doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.041

随机供水微灌管网系统同步优化与最优设计准则研究

马朋辉[1,2]　宋常吉[1]　景　明[1]　胡亚瑾[3,4]　梁冰洁[1,2]　宋静茹[1,3]　方鸣远[1,3]　张会敏[1]

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 2. 河南省农村水环境治理工程技术研究中心, 郑州 450003;
3. 河南省黄河流域生态环境保护与修复重点实验室, 郑州 450003; 4. 河南农业大学资源与环境学院, 郑州 450046)

摘要: 灌区以地表水为水源且充足时,优化微灌管网需确定单个微灌系统的合理控制面积及布置形式并进行优化设计,目前管网优化方法对此情况下随机供水微灌管网系统的优化并不适用。为实现不限定面积情况下随机供水微灌管网系统布置与管径同步优化,并提出其最优设计准则,建立了微灌干管管网优化设计数学模型,并给出了基于混合编码遗传算法的模型求解方法。分析了干管管网单位面积年费用与管网布置的相关性,及毛管管径、灌水器设计流量、灌水器间距、灌水器流态指数等对干管管网及微灌管网系统单位面积年费用的影响。实例计算结果表明,基于毛管双向布置控制面积最大模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用最低,基于毛管单向布置单位面积年费用最低模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用最高。与毛管单向布置单位面积年费用最低模型相比,基于毛管双向布置控制面积最大模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用减小 4.46% ~ 15.74%。实际工程中应采用较小的毛管管径、灌水器设计流量、灌水器流态指数和较大的灌水器间距,并基于毛管双向布置控制面积最大模型优化田间管网,以此优化结果为基础进行干管管网优化可有效降低费用。研究可为不限定面积情况下随机供水微灌管网系统优化设计提供依据。

关键词: 随机供水; 微灌管网系统; 同步优化; 遗传算法; 设计准则

中图分类号: S274.2　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)02-0444-10　　**OSID**:

Synchronous Optimization and Optimal Design Criteria of Random Water Supply Micro-irrigation Network System

MA Penghui[1,2]　SONG Changji[1]　JING Ming[1]　HU Yajin[3,4]　LIANG Bingjie[1,2]　SONG Jingru[1,3]
FANG Mingyuan[1,3]　ZHANG Huimin[1]

(1. *Yellow River Institute of Hydraulic Research*, *Yellow River Conservancy Commission*, *Zhengzhou* 450003, *China*
2. *Henan Engineering Research Center of Rural Water Environment Improvement*, *Zhengzhou* 450003, *China*
3. *Henan Key Laboratory of Ecological Environment Protection and Restoration of the Yellow River Basin*, *Zhengzhou* 450003, *China*
4. *College of Resources and Environment*, *Henan Agricultural University*, *Zhengzhou* 450046, *China*)

Abstract: When the irrigation area uses surface water as its water source and has sufficient supply, the optimization of the micro-irrigation pipe network requires determining the reasonable control area and layout form of individual micro-irrigation systems and conducting optimized design. The current pipe network optimization method is not applicable to the optimization of random water supply micro-irrigation pipe network systems under this situation. In order to achieve the synchronization optimization of layout and pipe diameter for random water supply micro-irrigation pipe network systems without limiting the area, and propose the optimal design criteria, a mathematical model for optimizing micro-irrigation main pipe network was established, and a model solution method based on a hybrid encoding genetic algorithm was provided. The correlation between the annual cost per unit area of the main pipe network and its layout was analyzed and the influence of lateral diameter, emitter design discharge, emitter spacing, and emitter emission exponent on the unit area annual cost of main pipe network and micro-irrigation pipe

收稿日期: 2024-08-03　修回日期: 2024-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51809105)、河南省软科学研究计划项目(242400410513)、水利部重大科技项目(SKR-2022020)、黄河水利科学研究院科技发展基金专项(HKF202316)和中央级公益性科研院所基本科研业务项目(HKY-JBYW-2023-26)

作者简介: 马朋辉(1990—),男,工程师,博士,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: mapenghui0371@163.com

通信作者: 张会敏(1965—),男,正高级工程师,博士,主要从事水资源高效利用研究,E-mail: zhmxx168@126.com

network system was analyzed. The results of example calculations showed that the unit area annual cost of the micro-irrigation pipe network system optimized based on the model with maximum control area for lateral double-sided layout was the lowest, while the unit area annual cost of the micro-irrigation pipe network system optimized based on the model with minimum unit area annual cost for lateral one-sided layout was the highest. Compared with the model with the minimum unit area annual cost for lateral one-sided layout, the percentage reduction in unit area annual cost of the micro-irrigation pipe network system optimized based on the model with maximum control area for lateral double-sided layout was 4.46% to 15.74%. In actual engineering projects, using smaller lateral diameters, emitter design discharges, emitter emission exponents, larger spacing between emitters, optimizing subunit based on the model with maximum control area for lateral double-sided layout, can effectively reduce costs. The results can provide a basis for the optimization design of random water supply micro-irrigation pipe network systems without limiting the area.

Key words: random water supply; micro-irrigation network system; synchronous optimization; genetic algorithm; design criterion

0　引言

水是农业的命脉。农业是用水大户,农业用水量占全国总用水量比重超过 60%[1]。在我国北方水资源紧缺地区,农业过度开发导致农业用水量大,加之用水效率低[2],农业水资源短缺和供需不平衡问题日益突出[3]。在这种趋势下,坚持“节水优先”方针、大力发展农业节水是保障粮食安全和水安全的必然选择[4],而大力发展微灌等高效节水灌溉技术则是行之有效的措施之一。微灌系统一般由水源工程、首部枢纽、输配水管网、灌水器以及控制装置、量测装置、保护装置等组成,输配水管网面广量大,其投资占微灌系统的比重较大,开展微灌输配水管网系统优化研究,有利于降低微灌系统投资,提高微灌效益。

微灌输配水管网由输水管、干管、分干管、支管和毛管等组成,其中输水管、干管和分干管组成干管管网,支管和毛管组成田间管网。田间管网优化的目的是在满足灌水均匀度的条件下降低投资或增大控制面积[5]。干管管网优化包括进行管网网形及管线选择的布置优化及寻求各级、各段管道管径最佳组合方案的管径优化,通常是先进行布置优化,然后以优化布置结果为基础进行管径优化[6]。在管网布置优化方面,周荣敏等[7]以图论和遗传算法为理论基础,应用改进的单亲遗传算法以管网投资最小为目标进行树状管网优化布置。马孝义等[8]提出基于整数编码的树状灌溉管网两级遗传算法优化模型,可分级实现管网的布置优化和管径组合优化,并能方便地将设计经验融合到管网的布置优化中。付玉娟等[9]基于图论相关理论与列队竞争算法实现变权值的管网优化布置,使得优化更加直接、简便。在管径组合优化方面,王新坤[10-11]将遗传算法全局优化与模拟退火算法的良好局部搜索能力有机结合,构造出一种模拟退火遗传算法并分别用于自压和机压树状管网优化设计。NAJARZADEGAN 等[12]基于改进的人工蜂群算法进行树状供水管网优化设计,可有效降低工程投资。在管网布置和管径组合同步优化方面,国内外学者根据灌溉管网特点,基于新型智能优化算法提出了布置和管径同步优化设计方法[6,13-17]。

微灌管网系统由田间管网和干管管网两部分组成,其优化的目的是在满足农田灌溉需求前提下寻求整个系统费用最低的布置及管径组合方案。与以往管网中各需水节点位置及流量已定,选择能够连通所有节点的管线并使管网总长度最短或总投资最小的优化布置[7-9,13-15]不同,微灌管网系统优化布置的主要目的在于确定最优的田间管网支毛管长度、支管位置、控制面积及干管管网中干管、分干管间距、段数、长度及控制面积。微灌管网系统的布置会对管径优化结果产生直接影响,且不同层级管网的优化结果也会由于其间的水力联系而相互影响,以往管径优化多限于某一级管网的费用最低[10-15],且只适用于面积及布置形式已定的管网优化设计。当大型灌区水源为河、库、渠等且来水充足时,需要确定单个微灌系统的合理控制面积及管网布置并进行管径组合优化,前文所述管网选线优化布置[7-9,13-15]对此情况并不适用。近年来,学者们研究了不限定面积情况下微灌管网系统布置与管径同步优化设计方法[6,16-17],但多为续灌或轮灌条件下灌溉管网的优化,缺少对能够实现“按需分配”的随机供水微灌管网系统优化尤其是其设计准则研究。

本文以前期微灌田间管网优化设计研究成果[5]为基础,研究随机供水微灌管网系统布置与管径的同步优化方法,并结合不同布置方式及优化目标下田间管网的优化结果,研究不同毛管管径、灌水器设计流量、灌水器间距、毛管方向地面坡度、灌水

器制造偏差系数及流态指数对干管管网及整个微灌管网系统单位面积年费用的影响,分析干管管网单位面积年费用与管网布置的相关性,进而提出随机供水微灌管网系统的最优设计准则,以期为随机供水条件下微灌管网系统优化提供技术支撑。

1 随机供水微灌管网系统优化设计数学模型

微灌管网系统由若干个田间管网及将其连接的干管管网组成,田间管网入口所需压力仅与微灌设计工作水头及田间管网允许水头差有关,因此可以采用分级优化的方法分别优化田间管网及干管管网。采用文献[5]中所述方法进行田间管网优化设计,可得出田间管网的支毛管长度、入口压力水头、入口流量等优化结果。以田间管网优化结果为基础确定干管管网参数,即毛管长度为顺水流方向非首段分干管管段长度(支管间距),支管长度为干管管段长度(分干管间距),然后从微灌系统中仅有一个田间管网到纵、横两个方向各有多个田间管网进行干管管网的优化设计,将田间管网与干管管网的优化设计结果结合即可得到整个微灌管网系统的优化设计结果。典型微灌管网系统如图 1 所示。

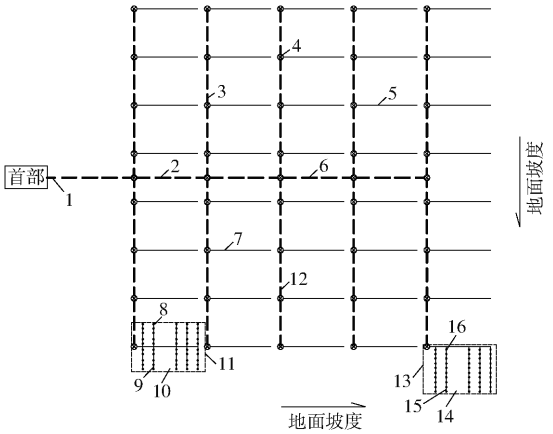

图 1 典型微灌管网系统示意图

Fig. 1 Schematic of typical micro-irrigation pipe network system

1. 输水管 2、6. 干管 3、12. 分干管 4. 阀 5、7. 支管 8、16. 灌水器 9、15. 毛管 10. 典型毛管双向布置田间管网 11、13. 田间管网边界 14. 典型毛管单向布置田间管网

干管管网优化的目的是确定干管管段长度、分干管管段长度、干管管段数、单条分干管管段数、各管段管径及水泵扬程,干管、分干管管段长度分别由田间管网尺寸即支管和毛管长度决定,因此干管管网优化的主要目的是确定干管管段数、单条分干管管段数、各管段管径及水泵扬程。干管及分干管管段数、各管段管径和水泵扬程相互影响,水泵扬程高,则动力费用较高,但可以增加干管及分干管管段数,减小各管段管径,有利于扩大干管管网控制面积、减少投资;反之若要降低动力费用,则应增大管径、减少干管及分干管管段数以减少水头损失。在满足各田间管网进口所需流量和压力的条件下,进行干管管网布置、选择干管、分干管各管段管径及水泵扬程以使单位面积年费用最低,即为干管管网优化要解决的问题。规定干管管网中每一管段仅选用一种标准管径,以干管管网单位面积年费用最低为目标函数,水泵扬程、各段干管管径及分干管管径为决策变量建立干管管网优化设计数学模型。

1.1 目标函数

目标函数为干管管网单位面积年固定投资费用 C_a、年能耗费用 C_e 和年维修费用 C_m 之和最小,即

$$\min C_T = C_a + C_e + C_m \tag{1}$$

式中 C_T——干管管网单位面积年总费用,元/(hm²·a)

单位面积年固定投资费用为考虑资金回收系数的泵站、输水管、干管、分干管及电磁阀投资之和,即

$$C_a = R\frac{C_p + C_d + C_g + C_s + C_v}{S} \tag{2}$$

其中

$$R = \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \tag{3}$$

$$C_p = C_{p1} + C_{p2} \tag{4}$$

$$C_{p1} = f_1 + g_1\frac{Q_{in}H_p}{0.102n_e} \tag{5}$$

$$C_{p2} = f_2 + g_2\frac{Q_{in}H_p}{0.102n_e} \tag{6}$$

$$C_d = C_k L_d \tag{7}$$

$$C_g = \sum_{i=1}^{N-1} C_{ik}L_g \tag{8}$$

$$C_s = \sum_{i=1}^{N-1}\sum_{j=1}^{M_0} C_{ijk}L_s \tag{9}$$

$$S = NL_gML_s/10\,000 \tag{10}$$

$$C_e = \frac{N_p O_t E_c}{S} \tag{11}$$

$$N_p = \frac{9.81Q_{in}H_p}{E_p} \tag{12}$$

$$O_t = \frac{R_g S}{3\,600Q_{in}} \tag{13}$$

$$R_g = \frac{R_n}{E_a} \tag{14}$$

式中 R——资金回收系数

C_p——单座泵站投资,元

C_d——输水管投资,元

C_g——干管投资,元

C_s——分干管投资,元

C_v——电磁阀投资,元

r——年利率

t——资金回收年限，a

C_{p1}、C_{p2}——泵站基建投资和机电设备投资，元

f_1、g_1——泵站基建投资经验系数，取 $f_1=72\,000$，$g_1=0$[18]

f_2、g_2——泵站机电设备投资经验系数，取 $f_2=25\,000$，$g_2=750$[18]

Q_{in}——微灌管网系统流量，m^3/s

H_p——水泵扬程，m

n_e——水泵效率，取 0.65[19]

C_k——输水管选用第 k 种标准管径所对应的单价，元/m

L_d——输水管长度，m

C_{ik}——第 i 段干管选用第 k 种标准管径所对应的单价，元/m

L_g——干管管段长度，即分干管间距，m

C_{ijk}——第 i 条分干管第 j 管段选用第 k 种标准管径所对应的单价，元/m

L_s——分干管管段长度，m

N——微灌管网中分干管数量

M——单条分干管上的支管数量

M_0——单条分干管管段数，M 为奇数时，$M_0=M-1$，M 为偶数时，$M_0=M$

S——单个微灌管网系统控制面积，hm^2

N_p——微灌系统正常工作所需水泵功率，kW

O_t——满足作物灌溉需求的系统年运行时间，h

E_c——电价，元/(kW·h)

E_p——泵站效率

R_g——毛灌溉定额，$m^3/(hm^2\cdot a)$

R_n——净灌溉定额，$m^3/(hm^2\cdot a)$

E_a——灌溉水有效利用系数

1.2　约束条件

干管管网优化设计数学模型约束条件包括保证管网正常运行所需的工作压力约束、管道承压能力约束、管径约束和流速约束。

1.2.1　工作压力约束

干管管网应提供能满足灌水要求的田间管网入口压力，即干管管网各节点压力水头均不小于支管进口所需压力水头。计算式为

$$H_{1k}=H_p-h_b+\frac{I_1L_d}{\sqrt{1+I_1^2}}+\sum_{i=1}^{k_1}\frac{I_1L_g}{\sqrt{1+I_1^2}}+\sum_{j=1}^{k_2}\frac{I_2L_s}{\sqrt{1+I_2^2}}-\sum_{i=1}^{k_1+k_2+1}h_{w,i}-H_{in}\geqslant 0 \tag{15}$$

其中

$$h_{w,i}=\alpha\frac{0.024\,6\nu^{0.25}Q_i^{1.75}}{D_i^{4.75}}L_i \tag{16}$$

$$Q_i=p\sum_{i=1}^{n_h}q_i+U\sqrt{p(1-p)}\sqrt{\sum_{i=1}^{n_h}q_i^2} \tag{17}$$

$$p=\frac{t_rN_s}{I_rT} \tag{18}$$

式中　H_{1k}——干管管网各节点最小压力水头约束变量，m

h_b——泵站首部水头损失，m

I_1、I_2——干管和分干管方向地面坡度

k_1、k_2——水流从干管管网入口到某一节点所流经的干管和分干管管段数

H_{in}——田间管网进口所需压力水头，m

$h_{w,i}$——干管管网某一管段的水头损失[20]，m

α——考虑局部水头损失的加大系数，取 1.05

ν——水粘滞系数，在室温(20℃)下为 $1.007\times10^{-6}m^2/s$

Q_i——随机供水条件下某一干管或分干管管段流量[21]，m^3/s

D_i——管道内径，m

L_i——管段长度，m

p——微灌系统中田间管网的平均运行概率

n_h——微灌管网系统中某一干管或分干管下游田间管网数量

q_i——田间管网进口流量，m^3/s

U——正态分布的百分位数，取决于微灌管网系统运行的可靠性

t_r——微灌系统控制范围内地块的灌水延续时间，h

N_s——单个微灌系统中田间管网数量

I_r——灌水周期，d

T——微灌系统日运行时间，h

1.2.2　管道承压能力约束

干管管网中各管段压力不超过管材允许承压能力，即

$$H_{2k}=H_p-h_b+\frac{I_1L_d}{\sqrt{1+I_1^2}}+\sum_{i=1}^{k_1}\frac{I_1L_g}{\sqrt{1+I_1^2}}+\sum_{j=1}^{k_2}\frac{I_2L_s}{\sqrt{1+I_2^2}}-\sum_{i=1}^{k_1+k_2+1}h_{w,i}-102H_c\leqslant 0 \tag{19}$$

式中　H_{2k}——干管管网各管段最大压力水头约束变量，m

H_c——管材承压能力，MPa

1.2.3　管径约束

顺水流方向，前一管段所选标准管径 D_i 应不小

于后一管段所选标准管径 D_{i+1}。

1.2.4 流速约束

干管管网中各管段水流流速 V_i 均不大于最大允许流速 V_{max}。

2 基于混合编码遗传算法的模型求解方法

2.1 编码

干管管网系统优化设计数学模型的决策变量为 $(D_1, D_2, \cdots, D_{N-1+NM_0}, D_d, H_p)$，共有 $N-1+NM_0+2$ 个决策变量。为方便进行求解计算，根据决策变量的特点，采用整数编码和实数编码相结合的混合编码方法，具体是将标准管径从小到大进行编号，采用一一对应的管径序号对 $D_1, D_2, \cdots, D_{N-1+NM_0}, D_d$ 进行整数编码，对于水泵扬程 H_p 则采用实数编码的方式。

2.2 约束条件处理

干管管网优化设计数学模型为带约束优化问题，需将其转化为无约束优化问题，采用模拟退火罚函数法实现上述转化，构造适应度函数为

$$\begin{aligned} F_{fit} = C_T &+ \lambda \sum_{i=1}^{n} |\min(0, H_{1k})| + \\ &\lambda \sum_{i=1}^{n} |\min(0, -H_{2k})| + \\ &\lambda \sum_{i=1}^{n} |\min(0, D_i - D_{i+1})| + \\ &\lambda \sum_{i=1}^{n} |\min(0, V_{max} - V_i)| \end{aligned} \tag{20}$$

其中

$$\begin{cases} \lambda = 1/t_k \\ t_{k+1} = \xi t_k \quad (\xi \in (0,1)) \end{cases} \tag{21}$$

式中 λ——模拟退火惩罚因子

t_{k+1}——第 $k+1$ 代模拟退火温度

t_k——第 k 代模拟退火温度，当 $k=0$ 时为初温

ξ——温度冷却系数

2.3 遗传操作

采用遗传算法对干管管网优化数学模型进行求解，算法计算过程中采用英国谢菲尔德大学开发的遗传算法 Matlab 工具箱中的函数进行选择、交叉、变异等遗传操作。

3 仿真计算与分析

3.1 基本数据

北方某灌区属于大陆性半湿润半干旱气候，灌区种植作物为夏玉米，灌溉水源为河水，由渠道输送至项目区沉淀池并过滤后通过泵站加压进行滴灌，基础数据及相关设计参数同文献[5]。滴灌管网系统中支管、毛管采用 PE 管，单价见文献[5]；干管、分干管及输水管采用 UPVC 管，管材承压能力为 0.63 MPa，单价见文献[16]；输水管长度为 30 m，电磁阀价格为 1 200 元/个。

3.2 控制参数选取

在随机优化搜索算法中缺少有效的确定最佳参数组合方法，通常是结合具体应用领域的特点，通过多次的数值模拟得到合理的参数取值[22]。遗传算法控制参数中对收敛性影响较大的为群体规模及最大遗传代数，群体规模一般取 20～100，最大遗传代数一般取 100～500[23]。考虑到本研究决策变量较多，群体规模较小时影响算法的收敛性，经过多次数值模拟确定群体规模为 200，最大遗传代数为 500。其他参数均为一般情况下的取值，具体为交叉概率 0.9，变异概率 $1/n_{NVAR}$（n_{NVAR} 为模型中决策变量数量）；模拟退火罚函数的具体参数为初温 0.000 01，温度冷却系数 0.99。

3.3 管网系统优化结果

3.3.1 田间管网优化结果

微灌管网系统优化结果包括田间管网及干管管网两部分，采用文献[5]中的方法得出田间管网布置及管径优化结果，毛管单向布置田间管网单位面积年费用最低模型（SWSL－F）、毛管单向布置田间管网控制面积最大模型（SWSL－A）、毛管双向布置田间管网单位面积年费用最低模型（SWPL－F）、毛管双向布置田间管网控制面积最大模型（SWPL－A）优化结果见表 1。

表 1 田间管网优化结果

Tab.1 Optimization results of subunit

优化模型	控制面积/hm^2	单位面积年费用/（元·hm^{-2}·a^{-1}）	田间管网进口流量/（m^3·s^{-1}）	田间管网进口压力水头/m	支管外径/mm	支管上毛管数量	支管长度/m	顺坡毛管灌水器数	顺坡毛管长度/m	逆坡毛管灌水器数	逆坡毛管长度/m	双侧毛管总长度/m
SWSL－F	0.31	3 719.43	0.003 4	11.29	50	29	28.50	219	109.25			109.25
SWPL－F	0.60	3 677.15	0.006 7	11.29	63	33	32.50	207	103.25	161	80.25	183.50
SWSL－A	1.02	3 925.19	0.011 4	11.34	90	119	118.50	172	85.75			85.75
SWPL－A	1.20	3 761.24	0.013 4	11.32	90	78	77.50	179	89.25	131	65.25	154.50

由表 1 可知，与以单位面积年费用最低为目标相比，以控制面积最大为目标优化田间管网时毛管单向和双向布置模式下支管长度分别增加 315.79% 和 138.46%，双侧毛管总长度分别减小 21.51% 和 15.80%，控制面积分别增加 229.03% 和 100.00%，单位面积年费用分别增加 5.53% 和 2.29%。与毛管单向布置模式相比，毛管双向布置模式下以单位面积年费用最低和控制面积最大为优化目标时，双侧毛管总长度分别增加 67.96% 和 80.17%，控制面积分别增加 93.55% 和 17.65%，单位面积年费用分别减小 1.14% 和 4.18%。对于田间管网，以 SWPL－F 模型进行优化所得单位面积年费用最低，较 SWSL－F、SWSL－A、SWPL－A 模型分别降低 1.14%、6.32% 和 2.24%。

3.3.2　干管管网优化结果

分别以田间管网 4 种优化模型的优化结果为基础进行干管管网优化，基于不同田间管网优化模型结果优化得到的干管管网优化结果见表 2。

表 2　干管管网优化结果

Tab.2　Optimization results of main pipe network

优化模型	控制面积/hm^2	单位面积年费用/(元·hm^{-2}·a^{-1})	微灌系统进口流量/(m^3·s^{-1})	水泵扬程/m	干管方向田间管网数量	干管方向微灌系统控制长度/m	分干管方向田间管网数量	分干管方向微灌系统控制长度/m
SWSL－F	89.67	1 142.85	0.166 0	34.59	48	1 368.0	6	655.50
SWPL－F	100.19	1 155.80	0.200 7	32.31	28	910.0	6	1 101.00
SWSL－A	82.31	916.73	0.186 6	37.29	9	1 066.5	9	771.75
SWPL－A	93.40	964.24	0.214 0	35.53	13	1 007.5	6	927.00

由表 2 可知，与田间管网单位面积年费用最低模型相比，基于 SWSL－A 模型结果优化得到的干管方向微灌系统控制长度减少 22.04%，分干管方向微灌系统控制长度增加 17.73%，控制面积减小 8.21%，单位面积年费用减小 19.79%；基于 SWPL－A 模型结果优化得到的干管方向微灌系统控制长度增加 10.71%，分干管方向微灌系统控制长度减小 15.80%，控制面积减小 6.78%，单位面积年费用减小 16.57%。与毛管单向布置模式相比，毛管双向布置模式下基于田间管网单位面积年费用最低和控制面积最大模型结果优化得到的干管方向微灌系统控制长度分别减小 33.48% 和 5.53%，分干管方向微灌系统控制长度分别增加 67.96% 和 20.12%，控制面积分别增加 11.73% 和 13.47%，单位面积年费用分别增加 1.13% 和 5.18%。对于干管管网，基于 SWSL－A 模型结果优化得到的干管管网单位面积年费用最低，较 SWSL－F、SWPL－F、SWPL－A 模型分别降低 19.79%、20.68% 和 4.93%。基于 SWSL－A 模型结果优化得到的干管管网见图 2。

3.3.3　微灌管网系统优化结果

微灌管网系统单位面积年费用为田间管网和干管管网两部分费用之和，基于 SWSL－F、SWPL－F、SWSL－A、SWPL－A 模型优化的微灌系统单位面积年费用分别为 4 862.28、4 832.95、4 841.92、4 725.48 元/(hm^2·a)。

对于微灌管网系统，基于 SWPL－A 模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用最低。这是由于基于 SWPL－A 模型得到的田间管网控制面积较大，有利于简化干管管网结构、降低干管管网投资，进而降低了整个微灌管网系统的单位面积年费用。

3.4　优化结果分析

文献[5]分析了毛管管径、灌水器设计流量、灌水器间距、毛管方向地面坡度、灌水器制造偏差系数和灌水器流态指数对田间管网优化结果的影响，得出田间管网采用毛管双向布置并以单位面积年费用最低为目标进行优化有利于降低费用。在提出随机供水微灌管网系统布置与管径同步优化方法的基础上，基于不同算例的优化结果分析干管管网单位面积年费用与管网布置的相关性，并分析不同因素对干管管网及微灌管网系统单位面积年费用的影响，以总结出随机供水条件下微灌管网系统的最优设计准则。

3.4.1　干管管网单位面积年费用与管网布置相关性

微灌管网系统布置参数主要包括干管管网控制面积 A_{mp}、干管方向微灌系统控制长度 $L_{mp,g}$、分干管方向微灌系统控制长度 $L_{mp,s}$、田间管网控制面积 A_s、支管长度 $L_{s,m}$ 和双侧毛管总长度 $L_{s,l}$，田间管网优化布置结果 A_s、$L_{s,m}$、$L_{s,l}$ 影响干管管网布置结果 A_{mp}、$L_{mp,g}$、$L_{mp,s}$，并进一步影响干管管网单位面积年费用 C_{mp}。干管管网单位面积年费用与管网布置的相关性见图 3(图中 * 表示在 0.05 水平差异显著)。

由图 3 可知，干管管网单位面积年费用与干管管网控制面积、分干管方向微灌系统控制长度、田间管网控制面积和支管长度呈显著负相关($P < 0.05$)，与干管方向微灌系统控制长度呈弱负相关，与双侧毛管总长度呈弱正相关。因此，增大支管长

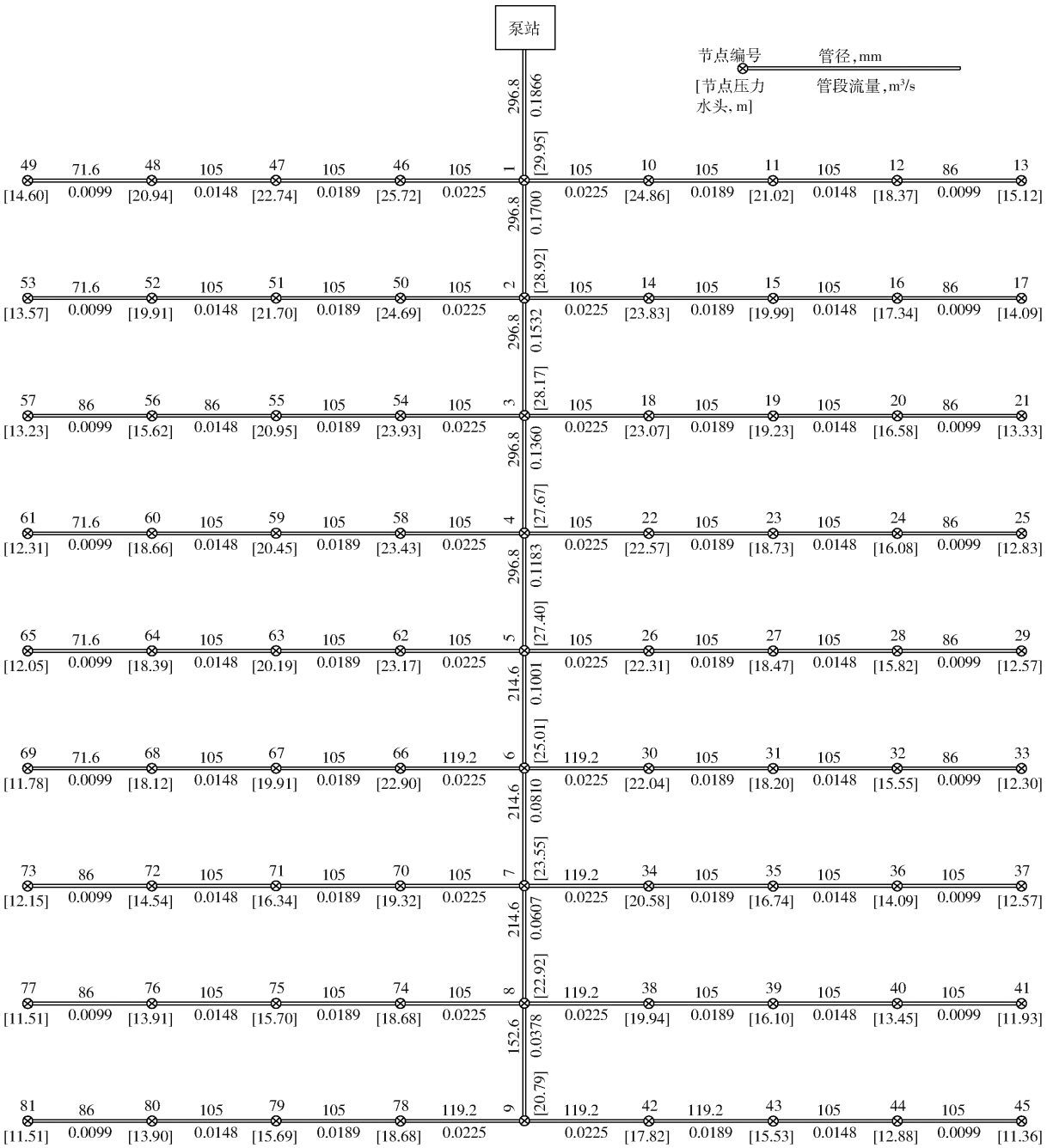

图 2 基于毛管单向布置田间管网控制面积最大模型(SWSL－A)结果优化得到的干管管网

Fig. 2 Micro-irrigation main pipe network optimized by model based on maximum control area of single laterals (SWSL－A)

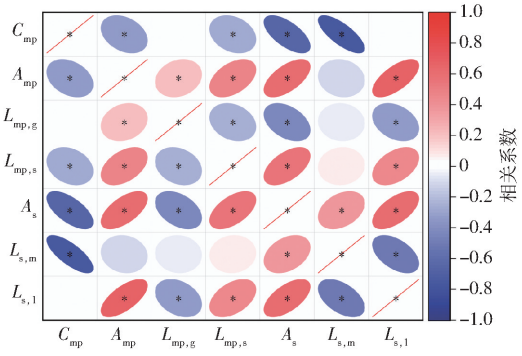

图 3 干管管网单位面积年费用与管网布置的相关性

Fig. 3 Correlation between annual cost per unit area of main pipe network and network system layout

度、田间管网控制面积、分干管方向微灌系统控制长度和干管管网控制面积,有利于减小干管管网单位面积年费用。这是由于增大田间管网控制面积有助于简化干管管网结构,增大干管管网控制面积有助于减小单位面积所分担的固定投资费用,进而降低了干管管网单位面积年费用。

3.4.2 不同因素对干管管网单位面积年费用的影响

以毛管管径 18 mm、灌水器设计流量 2.0 L/h、灌水器间距 0.5 m、毛管方向地面坡度 1/200、灌水器制造偏差系数 0.03、灌水器流态指数 0.5 为基本取值,分析不同因素对干管管网单位面积年费用的影响,结果见图 4。

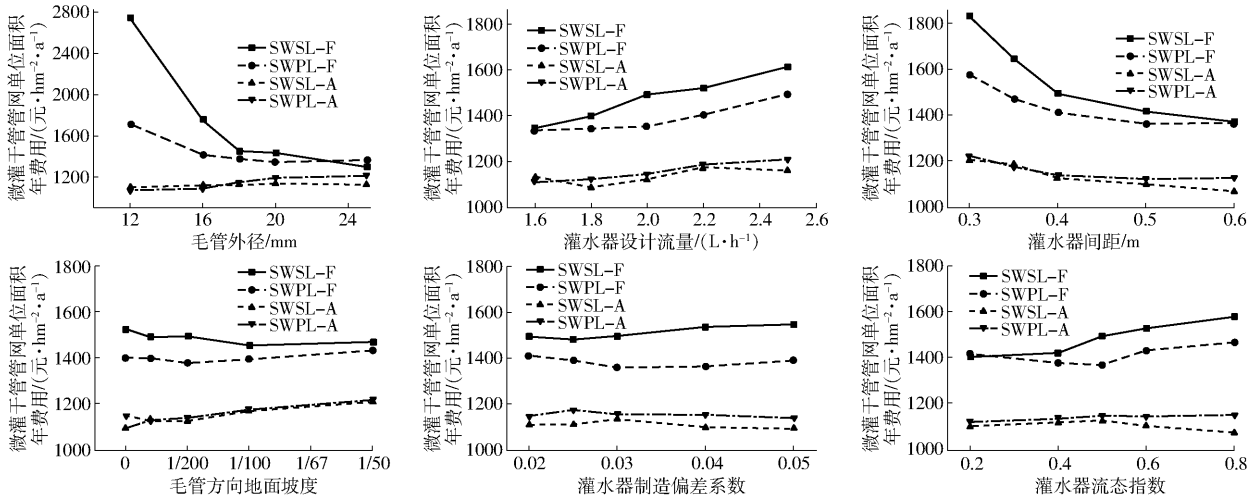

图 4　不同因素对干管管网单位面积年费用的影响

Fig. 4　Influence of different factors on annual cost per unit area of main pipe network

由图 4 可知，与田间管网单位面积年费用最低模型相比，基于田间管网控制面积最大模型结果优化得到的干管管网单位面积年费用更低。对于毛管单向布置田间管网，减小 12.95% ~59.65%；对于毛管双向布置田间管网，减小 10.84% ~37.56%。

毛管布置模式对干管管网单位面积年费用的影响与田间管网的优化目标有关。田间管网优化目标为单位面积年费用最低时，基于毛管双向布置模型结果优化得到的干管管网单位面积年费用整体上更低，相比毛管单向布置模型减小 2.39% ~37.32%；田间管网优化目标为控制面积最大时，基于毛管单向布置模型结果优化得到的干管管网单位面积年费用整体上更低，相比毛管双向布置模型减小 0.93% ~7.00%。

整体上，基于毛管单向布置控制面积最大模型结果优化得到的干管管网单位面积年费用最低，其次分别为基于毛管双向布置控制面积最大模型、毛管双向布置单位面积年费用最低模型和毛管单向布置单位面积年费用最低模型结果优化得到的干管管网。与毛管单向布置单位面积年费用最低模型相比，基于毛管单向布置控制面积最大模型结果优化得到的干管管网单位面积年费用减小 12.95% ~59.65%。

3.4.3　不同因素对微灌管网系统单位面积年费用的影响

以毛管管径 18 mm、灌水器设计流量 2.0 L/h、灌水器间距 0.5 m、毛管方向地面坡度 1/200、灌水器制造偏差系数 0.03、灌水器流态指数 0.5 为基本取值，结合文献[5]中田间管网优化优化结果和本研究干管管网优化结果，分析不同因素对微灌管网系统单位面积年费用的影响，结果见图 5。

由图 5 可知，微灌管网系统单位面积年费用整体上随毛管管径、灌水器设计流量、灌水器流态指数的增大而增加，随灌水器间距的增大而减小，受毛管方向地面坡度及灌水器制造偏差系数的影响相对较小。

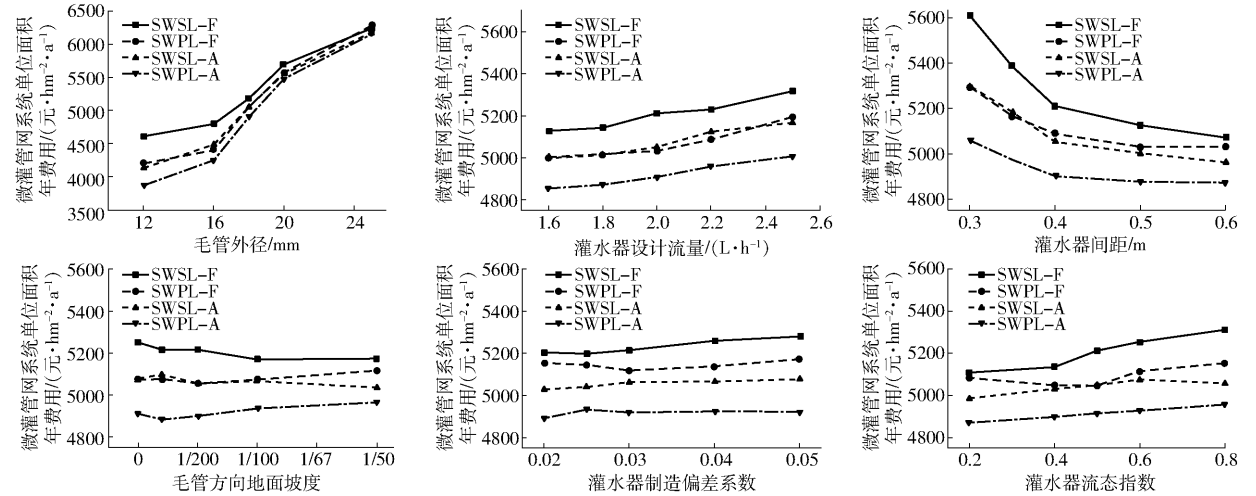

图 5　不同因素对微灌管网系统单位面积年费用的影响

Fig. 5　Influence of different factors on annual cost per unit area of micro-irrigation network system

与田间管网单位面积年费用最低模型相比,基于田间管网控制面积最大模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用整体上更低。对于毛管单向布置田间管网,减小 1.06% ~9.87%;对于毛管双向布置田间管网,减小 1.67% ~7.94%。

与毛管单向布置田间管网相比,基于毛管双向布置田间管网结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用整体上更低。对于单位面积年费用最低模型,减小 0.80% ~8.47%;对于控制面积最大模型,减小 0.19% ~6.52%。

整体上,基于毛管双向布置控制面积最大模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用最低,其次分别为基于毛管单向布置控制面积最大模型、毛管双向布置单位面积年费用最低模型和毛管单向布置单位面积年费用最低模型结果优化得到的微灌管网系统。与毛管单向布置单位面积年费用最低模型相比,基于毛管双向布置控制面积最大模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用减小 4.46% ~15.74%。

综上,不限定面积情况下随机供水微灌管网系统的最优设计准则为:先基于毛管双向布置控制面积最大模型优化田间管网,然后以此优化结果为基础进行干管管网优化,实际工程中应尽量采用较小的毛管管径、灌水器设计流量、灌水器流态指数和较大的灌水器间距以降低费用。

4 结论

(1)干管管网单位面积年费用与干管管网控制面积、分干管方向微灌系统控制长度、田间管网控制面积和支管长度呈显著负相关($P<0.05$)。

(2)基于毛管双向布置控制面积最大模型结果优化得到的微灌管网系统单位面积年费用最低,与毛管单向布置单位面积年费用最低模型相比,减小 4.46% ~15.74%。

(3)不限定面积情况下随机供水微灌管网系统的最优设计准则为:先基于毛管双向布置控制面积最大模型优化田间管网,然后以此优化结果为基础进行干管管网优化,实际工程中应尽量采用较小的毛管管径、灌水器设计流量、灌水器流态指数和较大的灌水器间距以降低费用。

参 考 文 献

[1] 中华人民共和国水利部. 中国水资源公报[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2024.

[2] 康绍忠. 中国农业节水十年: 成就、挑战及对策[J]. 中国水利, 2024(10): 1 -9.
KANG Shaozhong. Ten years of agricultural water-saving in China: achievements, challenges and measures[J]. China Water Resources, 2024(10): 1 -9. (in Chinese)

[3] 王玉宝, 吴楠, 张富尧, 等. 基于三维水足迹模型的农业用水可持续性评估[J]. 农业机械学报, 2023, 54(1): 287 -295.
WANG Yubao, WU Nan, ZHANG Fuyao, et al. Assessment of agricultural water sustainability based on 3D water footprint model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 287 -295. (in Chinese)

[4] 徐凯, 沈建强, 刘敏昊, 等. 基于 C -D 生产函数的灌区节水贡献率研究[J]. 中国农村水利水电, 2024(7): 234 -240.
XU Kai, SHEN Jianqiang, LIU Minhao, et al. Study on water saving contribution rate of irrigation area based on C - D production function[J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(7): 234 -240. (in Chinese)

[5] 马朋辉, 胡亚瑾, 刘韩生, 等. 微灌田间管网布置与管径同步优化及影响因素分析[J]. 水利学报, 2019, 50(11): 1350 -1364.
MA Penghui, HU Yajin, LIU Hansheng, et al. Simultaneous optimization of micro-irrigation subunit layout and pipe diameter and analysis of influencing factors[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(11): 1350 -1364. (in Chinese)

[6] 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): 1371 -1379.
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): 1371 -1379. (in Chinese)

[7] 周荣敏, 林性粹. 应用单亲遗传算法进行树状管网优化布置[J]. 水利学报, 2001, 32(6): 14 -18.
ZHOU Rongmin, LIN Xingcui. Application of single parent genetic algorithm for optimization of tree pipe network layout[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 32(6): 14 -18. (in Chinese)

[8] 马孝义, 范兴业, 赵文举, 等. 基于整数编码遗传算法的树状灌溉管网优化设计方法[J]. 水利学报, 2008, 39(3): 373 -379.
MA Xiaoyi, FAN Xingye, ZHAO Wenju, et al. Tree-type pipe network optimization design method based on integer coding genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(3): 373 -379. (in Chinese)

[9] 付玉娟, 蔡焕杰, 张旭东, 等. 基于列队竞争算法的变权值树状管网优化布置[J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1321 -1333.
FU Yujuan, CAI Huanjie, ZHANG Xudong, et al. Application of line-up competition algorithm to optimization of variable weight tree pipe network[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1321 -1333. (in Chinese)

[10] 王新坤. 基于模拟退火遗传算法的自压树状管网优化[J]. 水利学报, 2008, 39(8): 1012 -1016.

WANG Xinkun. Optimization of pumping tree pipe network by using annealing-genetic algorithms based on infeasible degree [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(8): 1012 – 1016. (in Chinese)

[11] 王新坤. 基于不可行度的机压树状管网退火遗传算法优化[J]. 农业机械学报, 2009, 40(9): 63 – 67.
WANG Xinkun. Optimization of pumping tree pipe network by using annealing-genetic algorithms based on infeasible degree [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(9): 63 – 67. (in Chinese)

[12] NAJARZADEGAN M R, MOEINI R. Optimal design of water distribution network using improved artificial bee colony algorithm[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2023, 47(5): 3123 – 3136.

[13] 杨建军, 丁玉成, 赵万华. 基于双重编码遗传算法和图论的自压树状管网优化[J]. 农业机械学报, 2010, 41(1): 81 – 85.
YANG Jianjun, DING Yucheng, ZHAO Wanhua. Optimization of gravity tree-type pipe network based on dual coding genetic algorithm and graph theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(1): 81 – 85. (in Chinese)

[14] MONEM M J, KASHKOOLI B S. New discrete particle swarm optimization applied to the design of pressurized irrigation networks[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2010, 143(1): 04016071.

[15] 李妍峰, 姜丹. 考虑轮灌方式下的树状管网布局优化问题[J]. 节水灌溉, 2023(5):75 – 83.
LI Yanfeng, JIANG Dan. Optimization of the tree-shaped pipeline network layout based on rotation irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2023(5):75 – 83. (in Chinese)

[16] 马朋辉, 刘韩生, 胡亚瑾. 机压微灌管网系统布置与管径同步优化设计[J]. 农业机械学报, 2019, 50(4): 236 – 244.
MA Penghui, LIU Hansheng, HU Yajin. Simultaneous optimization of layout and pipe diameter for pumping micro-irrigation pipe network system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 236 – 244. (in Chinese)

[17] ZHAO R H, HE W Q, LOU Z K, et al. Synchronization optimization of pipeline layout and pipe diameter selection in a self-pressurized drip irrigation network system based on the genetic algorithm[J]. Water, 2019, 11(3): 489.

[18] DERCAS N, VALIANTZAS J D. Two explicit optimum design methods for a simple irrigation delivery system: comparative application[J]. Irrigation and Drainage, 2012, 61(1): 10 – 19.

[19] MORENO M A, ORTEGA J F, CORCOLES J I, et al. Energy analysis of irrigation delivery systems: monitoring and evaluation of proposed measures for improving energy efficiency[J]. Irrigation Science, 2010, 28(5): 445 – 460.

[20] 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. GB/T 50485—2020: 微灌工程技术标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.

[21] PLANELLS A P, TARJUELO J M, ORTEGA A J, et al. Design of water distribution networks for on-demand irrigation[J]. Irrigation Science, 2001, 20(4): 189 – 201.

[22] 周荣敏, 雷延峰. 基于改进单亲遗传算法的树状管网布置优化[J]. 水利学报, 2012, 43(10): 1243 – 1247.
ZHOU Rongmin, LEI Yanfeng. Optimal layout of tree pipe networks based on improved single parent genetic algorithm[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(10): 1243 – 1247. (in Chinese)

[23] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及其应用[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2014.