

基于投资成本和可靠性的机压滴灌管网系统 多目标优化方法

何武全¹ 赵珂轶¹ 王玉宝¹ 李渤² 贺正宇¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 西安 710065)

摘要: 滴灌管网系统在降低工程投资和运行成本的前提下提高可靠性,是优化设计亟需解决的关键问题。针对机压滴灌特点,以管网年投资费用最低、节点富余水头均值最小和节点富余水头方差最小为目标,建立了机压滴灌管网系统多目标优化设计数学模型,提出了改进和声搜索算法求解多目标优化模型方法和步骤。在构建优化模型中,将管网系统按照级、条、段为单元划分,使建立的优化模型具有通用性。以新疆某机压滴灌工程为例,采用该方法对其管网进行优化,与原设计方案相比,优化方案滴灌系统年投资成本降低4.97%,管网节点富余水头均值降低16.84%,管网节点富余水头方差降低12.47%。优化结果表明,该方法不仅能有效降低管网系统投资成本,而且节点富余水头均值和节点富余水头方差显著减小,降低了管网系统压力偏差和故障发生频率,从而提高了管网系统可靠性。

关键词: 机压滴灌; 投资成本; 可靠性; 改进和声搜索算法; 多目标优化

中图分类号: S274.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)02-0323-10

OSID:



Multi-objective Optimization Method of Machine-pressed Drip Irrigation Pipe Network System Based on Investment Cost and Reliability

HE Wuquan¹ ZHAO Keyi¹ WANG Yubao¹ LI Bo² HE Zhengyu¹

(1. Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Areas, Ministry of Education,
Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. Power China Northwest Engineering Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: Drip irrigation is one of the irrigation methods with the most significant water-saving effects in modern agricultural irrigation. How to improve the reliability of drip irrigation pipe network systems while reducing project investment and operation costs is a key issue that needs to be addressed urgently in optimal design. Aiming at the characteristics of machine-pressure drip irrigation, a multi-objective optimal design mathematical model for machine-pressure drip irrigation pipe network systems was established with the objectives of minimizing the annual investment cost of the pipe network, the mean value of node surplus head, and the variance of node surplus head. An improved harmony search algorithm was proposed to solve the multi-objective optimization model, along with its methods and steps. In constructing the optimization model, the pipe network system was divided into units of levels, strips, and sections, making the established optimization model universal. Taking a machine-pressure drip irrigation project in Xinjiang as an example, this method was used to optimize its pipe network. Compared with the original design scheme, the optimized scheme reduced the annual investment cost of the drip irrigation system by 4.97%, the mean value of node surplus head by 16.84%, and the variance of node surplus head by 12.47%. The optimization results showed that this method can not only effectively reduce the investment cost of the pipe network system, but also significantly reduce the mean value and variance of node surplus head, thereby reducing the pressure deviation and failure frequency of the pipe network system and improving its reliability.

Key words: machine-pressure drip irrigation; investment cost; reliability; improved harmony search algorithm; multi-objective optimization

收稿日期: 2025-07-09 修回日期: 2025-08-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD1900402)

作者简介: 何武全(1967—),男,副教授,主要从事节水灌溉理论与新技术研究,E-mail: hewq@nwafu.edu.cn

0 引言

滴灌是现代农业灌溉中节水最为显著的灌溉方式之一,与传统的地面灌溉相比,能使水资源得到充分利用,极大地提高灌溉效率和效益^[1-3]。近年来,随着我国现代农业不断发展,滴灌系统建设规模越来越大,管网布置也越来越庞大复杂,管网对于规划设计的要求也越来越高。传统的机压滴灌管网系统优化设计大多以管网系统的投资成本最低为目标进行单目标优化,这种优化方法只考虑了管网系统的经济性,而且现有的优化模型往往是在管网布置方案确定的前提下建立的,导致建立的优化模型缺乏通用性^[4-5]。同时,目前滴灌管网系统优化方法很少考虑管径变化对各节点水压带来的不利影响,致使管网各节点富余水头分布存在不均匀情况,即管网系统水压偏差较大,不仅影响了灌溉均匀度,降低了农作物产量和质量,还降低了管网系统安全性,增加了管网系统发生故障的风险和频率。

滴灌管网系统优化设计方法研究方面,国内外以往主要是以管网投资成本最小或运行费用最低为目标,基于固定管网寻求最优管径或管网布置和管径同步寻优等方式的单目标优化。HASSANLI等^[6]提出了一种分支管网优化设计数学模型,利用遗传算法对分支管网布局和管径进行优化,获得了管网投资成本最小的优化方案;窦超银等^[7]提出改变支管布置形式,利用支管长短管代替等距支管布置方式实现了降低管网投资的目标;PERELMAN等^[8]以最小化其资本和运营成本为目标函数,提出了利用交叉熵法进行配水管网系统的优化设计方法;魏志莉等^[9]以管网造价为目标函数寻求最优管径组合优化方案,采用改进遗传算法对优化模型求解,实现了管网投资最小和管段水头利用率高的目标;李援农等^[10]建立了不同毛管布置形式的自压微灌管网优化设计数学模型,利用遗传算法求解,得出了单位面积投资最小的优化设计方案,并且通过工程实例优化结果认为毛管双向布置效果更优;侯依然等^[11]建立了以供水成本最低为目标函数的灌溉管网优化模型,对管网布置和管径利用遗传算法进行同步优化,得到了灌溉供水成本最低的优化设计方案。马朋辉等^[12]提出随机供水微灌管网系统的最优设计准则,对微灌管网系统布置与管径利用混合编码遗传算法进行同步优化,实现了降低微灌管网系统单位面积年费用的目标。

为了降低管网工程投资成本,提高管网水压均匀度,近年来国内外学者在管网的多目标优化方面

也做了许多研究。朱发昇等^[13]针对给水管网的经济性和可靠性同时进行优化,在管网年费用最低的基础上,提出了以节点富余水头加权平均值衡量管网水压,以管网恢复力衡量管网剩余能量,从而提高管网的可靠性指标,进行了多目标优化;孟勤超等^[14]以管网投资成本为经济性目标,以节点富余水头方差和节点富余水头总和为可靠性目标,采用改进 SPEA-II 算法,对给水管网进行了多目标优化。但目前管网多目标优化设计在城市给水和燃气管道输送方面应用较多^[15-19],在灌溉管网优化中鲜见应用。因此,基于降低管网系统投资成本和提高可靠性为出发点,以机压滴灌管网系统投资成本最低、管网节点富余水头均值最小和管网节点富余水头方差最小为优化目标,本文建立适用于各类灌溉管网布置方案的机压滴灌管网系统多目标优化通用模型,提出改进和声搜索算法的求解方法和步骤,并通过新疆某机压滴灌工程进行实例研究,验证所提多目标优化方法的有效性和优越性。

1 材料与方法

1.1 问题描述

机压滴灌管网系统是水流从水源通过水泵加压和输配水管网流向田间各分水节点,由田间分水节点通过田间管网经滴灌带上的灌水器对农田作物进行灌溉。图1为机压滴灌管网系统布置图,由输配水管网系统(图1a)和田间滴灌管网系统(图1b)组成。

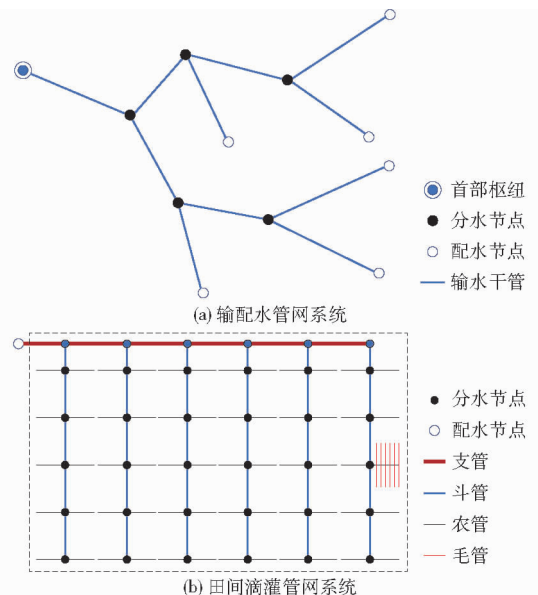


图1 机压滴灌管网系统示意图

Fig. 1 Schematics of machine-pressed drip irrigation pipe network system

机压滴灌规模较大输配水管道距离较长时,易导致各分水节点水压产生偏差,影响灌溉均匀度,使

灌溉效率和效益降低。同时,由于首部采用水泵加压需消耗能源,也会增加管网系统运行费用,机压滴灌管网系统以往的优化设计大多只考虑投资成本,以管网投资和运行成本最低进行单目标优化,往往在降低投资成本的同时增大了管网水压偏差,降低了管网安全性和灌溉均匀度。因此,传统的单目标优化已不能满足日益发展的机压滴灌管网工程应用需求,如何协调管网系统总成本和管网水压偏差,提高管网可靠性,是目前机压滴灌管网系统优化设计中亟待解决的关键问题。

1.2 多目标优化数学模型

机压滴灌管网系统投资成本通常包括管网基建费用和系统年运行费用^[20]。当管网布置方案一定时,管径选取是影响管网投资的重要因素。当管道流量一定时,选取的管径大,管网投资成本高,但管网水头损失和能量损耗小,年运行费用低;选取的管径小,管网投资成本低,但管网水头损失和能量损耗大,年运行费用高^[21]。因此,本文以降低管网系统投资成本和提高可靠性为目的,寻求一种使管网投资费用最低的管网布置和管径组合设计方案,同时考虑机压滴灌管网系统的水压均匀性,若管网中水压分布不均,则会降低管网系统安全性和灌溉均匀度,并且增加管网发生故障的风险和频率。因此,引入节点富余水头均值与节点富余水头方差2个目标函数,以实现提高管网系统可靠性的目的。

1.2.1 管网年投资成本目标函数

管网年投资成本目标函数为管网折算年基建费、维修管理费和能耗费之和最小,计算管网基建费时,将管网系统按照级、条、段为单元进行划分,通过三维索引 (i, j, k) 描述管网任意管段位置 $(i$ 级- j 条- k 段)投资情况,使建立的优化模型具有通用性。其表达式为

$$\min F_1 = \left[\frac{s + (1+s)^t}{(1+s)^t - 1} + P \right] \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^x \sum_{k=1}^y (a + bd_{ijk}^\beta) l_{ijk} + \frac{ETQH}{367.2\eta} \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad y = a + bd_{ijk}^\beta \quad (2)$$

式中 F_1 ——管网年投资费用,元/年

s ——年利率, %

t ——经济计算期,年

P ——管网维修和管理费率, %

i, j, k ——管网的级、条、段

n ——管网分级总数

x ——各级管网总条数

y ——各级管网中各条管道总段数

a, b, β ——系数

d_{ijk} ——第 i 级管网中第 j 条管道上第 k 段管段选用的标准管径, mm

l_{ijk} ——第 i 级管网中第 j 条管道上第 k 段管段选用的标准管径长度, m

E ——电费,元/(kW·h)

Q ——水泵输出流量, m³/h

H ——水泵扬程, m

η ——水泵工作效率, %

T ——系统年工作小时数, h

1.2.2 管网可靠性目标函数

管网可靠性目标函数由节点富余水头均值和节点富余水头方差最小表示。

(1) 节点富余水头均值目标函数为管网系统各分水节点富余水头平均值最小,其表达式为

$$\min F_2 = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S (H_i - H_{i\min}) \quad (3)$$

式中 F_2 ——节点富余水头均值, m

H_i ——节点 i 的水头, m

$H_{i\min}$ ——节点 i 的最小允许水头, m

S ——管网中节点总数目

(2) 节点富余水头方差目标函数为管网系统各分水节点富余水头方差最小,其表达式为

$$\min F_3 = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \left[(H_i - H_{i\min}) - \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S (H_i - H_{i\min}) \right]^2 \quad (4)$$

式中 F_3 ——节点富余水头方差, m²

因此,机压滴灌管网系统多目标优化模型可表示为

$$\begin{cases} \min F_1 = \left[\frac{s + (1+s)^t}{(1+s)^t - 1} + P \right] \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^x \sum_{k=1}^y (a + bd_{ijk}^\beta) l_{ijk} + \frac{ETQH}{367.2\eta} \\ \min F_2 = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S (H_i - H_{i\min}) \\ \min F_3 = \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S \left[(H_i - H_{i\min}) - \frac{1}{S} \sum_{i=1}^S (H_i - H_{i\min}) \right]^2 \end{cases} \quad (5)$$

对于机压滴灌管网系统,管网年投资费用 F_1 越小,表明滴灌系统管网投资成本越低。节点富余水头是指节点实际自由水头与节点所要求的最小自由水头之差,其与管网水压呈线性关系。在满足滴灌系统管网约束的条件下,节点富余水头越小,管网水压越低,能量损耗也越小。节点富余水头均值 F_2 越大,即管网平均水压越大,说明滴灌系统能耗浪费越大,管网发生爆管和其他故障风险也越大。节点富余水头方差 F_3 反映管网中各节点富余水头分布情

况,节点富余水头方差越大,说明管网中各节点压力分布不均,节点水压极值越大,存在爆管的风险越大。因此,节点富余水头均值 F_2 与节点富余水头方差 F_3 越小,表明灌溉水压分布越均匀,管网系统可靠性越高。

1.2.3 约束条件

(1)管径约束:各级管道及同级管道的不同管段沿水流方向的管径应逐级或逐段减小或不变,即

$$D_{i+1} \leq D_i \quad (i=1,2,\dots) \quad (6)$$

式中 D_i —— D_{i+1} 的上级管道或管段标准管径,mm

(2)压力约束:管道节点 i 的工作压力应不小于该点的最小允许工作压力且不大于该点的最大承受压力,即

$$P_{imin} \leq P_i \leq P_{imax} \quad (7)$$

式中 P_i ——管道节点 i 工作压力,m

P_{imin} ——管道节点 i 最小允许工作压力,m

P_{imax} ——管道节点 i 最大承受压力,m

(3)流速约束:各级管道或管段的流速应不小于最小流速且不大于最大流速,即

$$v_{min} \leq v \leq v_{max} \quad (8)$$

式中 v ——各级管道或管段实际流速,m/s

v_{min} 、 v_{max} ——最小流速和最大流速,m/s

(4)毛管铺设长度约束:毛管实际铺设长度应小于或等于最大允许铺设长度,即

$$L_{ak} \leq [L_a] \quad (k=1,2,\dots) \quad (9)$$

$$L_{bk} \leq [L_b] \quad (k=1,2,\dots) \quad (10)$$

式中 L_{ak} 、 $[L_a]$ ——第 k 条支管上顺坡向毛管实际铺设长度和最大允许铺设长度,m

L_{bk} 、 $[L_b]$ ——第 k 条支管上逆坡向毛管实际铺设长度和最大允许铺设长度,m

(5)灌水定额约束:单位面积 1 次灌水量 m 应小于或等于最大灌水定额,即

$$m = \frac{t_c Q_{jk}}{A} \leq m_{max} \quad (11)$$

式中 m_{max} ——最大灌水定额,即单位灌溉面积上的 1 次灌水深度,m

t_c ——1 次灌水持续时间,h

Q_{jk} ——参与轮灌毛管流量之和,m³/h

A ——1 次轮灌覆盖区域面积,m²

(6)系统管网允许水头差约束:灌水小区内灌水器的水头偏差率应小于或等于允许偏差率,即

$$h_v = \frac{h_{max} - h_{min}}{h_d} \times 100\% \leq [h_v] \quad (12)$$

式中 h_v ——灌水器工作水头偏差率,%

h_{max} 、 h_{min} ——灌水器最大和最小工作水头,m

h_d ——灌水器设计工作水头,m

$[h_v]$ ——灌水器允许水头偏差率,%

(7)轮灌组数约束:为满足作物需水要求,滴灌系统实际灌水时间应小于或等于设计灌水周期,即

$$N \leq N_{max} = \frac{T_{max} t_d}{t_c} \quad (13)$$

式中 N ——设计轮灌组数

N_{max} ——最大轮灌组数

T_{max} ——最大灌水周期,d

t_d ——日运行最大时间,h/d

其中,输配水管网系统优化时考虑前 3 项约束条件,田间滴灌管网系统优化时考虑全部 7 项约束条件。

1.3 改进和声搜索算法

和声搜索算法(Harmony search algorithm, HS)是一种模拟音乐家即兴创作过程的元启发式全局优化技术,其将音乐创作类比为种群进化过程^[22]。该算法具备较强的全局搜索能力,但局部搜索较弱,易遗漏部分最优解^[23]。蝙蝠算法(Bat algorithm, BA)是一种元启发式优化算法,灵感源自蝙蝠的回声定位行为^[24]。该算法模拟蝙蝠利用超声波感知环境、定位猎物的机制:将解空间映射为蝙蝠搜索空间,每个蝙蝠代表一个潜在解。算法通过调整蝙蝠的位置与速度进行搜索,并利用声波频率、响度及脉冲发射率等特征更新解的质量,逐步趋近最优解。BA 的更新机制主要在现有解之间进行,较少向外扩展,因此搜索结果受当前解集分布影响显著,更适宜与全局优化算法配合使用^[25]。鉴于 BA 具有收敛速度快、无需特殊参数、不易陷入局部最优等优点,且尚未见其应用于多目标优化(特别是机压滴灌管网优化),选用 BA 对 HS 进行改进,提出一种改进和声-蝙蝠优化算法(Harmony-bat optimization algorithm, HS-BA),旨在兼顾搜索的精确性、快速性并规避局部极值。其运算步骤如下:

步骤 1:初始化 HS 参数,包括和声种群大小(HMS)、和声记忆概率(HMCR)、音调微调概率(PAR)、音调微调带宽(BW)以及和声算法迭代次数(N_{HS})。

步骤 2:初始化 BA 参数,包括蝙蝠个数脉冲响度(A_0)、响度衰减系数(K)以及蝙蝠算法搜索最大迭代次数(N_{BA})。

步骤 3:随机生成初始解,计算并筛选最优记录。

步骤 4:开展循环操作,实现和声库的迭代更新。

步骤4.1:为每条和声记录生成随机数。若小于HMC_R转步骤4.2;否则转步骤4.3。

步骤4.2:在HMS范围内随机选择一条记录进行继承,并根据PAR决定是否微调。转步骤4.4。

步骤4.3:将当前记录与和声库数据输入BA。构建蝙蝠个体,评估当前全局最优解(g_{best}),更新蝙蝠位置与速度。迭代至 N_{BA} 后,用BA最优解替换当前记录。转步骤4.4。

步骤4.4:将新记录与原和声库合并,选取前 N_{HS} 条最优记录组成新库。

步骤4.5:判定是否完成最大循环迭代次数 N_{BA} ,若尚未达到则返回步骤4继续执行,若已达到则选取当前和声库中最优个体 g_{best} 作为搜索结果。

2 实例验证

2.1 项目区概况

采用新疆某机压滴灌实例工程验证本文提出的多目标优化设计方法。该工程位于石河子市玛纳斯河灌区的莫索湾垦区,灌溉面积124.67 hm²,分为4个灌溉区域,灌溉面积分别为30.67、28.00、33.47、32.53 hm²,具体见图2a。灌溉从玛纳斯河灌区一支渠引水,种植作物为棉花,灌溉方式采用膜下滴灌技术,覆膜宽窄行栽培,行距为(66+10)cm,株距10cm,一膜3管6行。土壤类型以灰漠土为主,

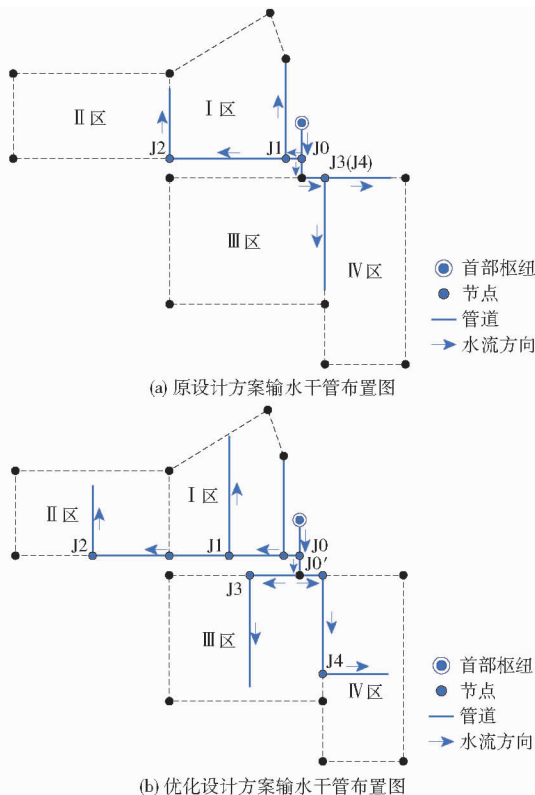


图2 输水干管优化前后对比

Fig. 2 Comparison diagram of water transmission main pipeline before and after optimization

土壤容重为1.5 g/cm³。原设计方案滴灌枢纽安装2台额定流量为240 m³/h、设计扬程为37 m水泵,干管、支管和斗管选用UPVC管,管径为160~315 mm;农管选用PE管,管径为90 mm,农管布置间距为97 m;毛管选用压力迷宫流道一次性滴灌带,外径为20 mm,滴头间距为0.3 m,设计流量为2.2 L/h,设计工作压力为10 m水头,毛管布置间距为0.76 m。机压滴灌管网系统设计参数见表1,项目区标准管道规格及单价见表2。

表1 机压滴灌管网系统设计参数

Tab. 1 Design parameters of machine-pressed drip irrigation pipe network system

参数	数值	参数	数值
设计耗水强度/(mm·h ⁻¹)	6	设计日运行时间/h	22
土壤湿润比/%	70	1次灌水延续时间/h	3.45
计划土壤湿润层深度/cm	50	灌水周期/d	5
流量偏差率/%	20	年利率/%	3
土壤含水率上限/%	90	经济计算期/a	10
土壤含水率下限/%	65	管网维修和管理费率/%	2
田间持水率/%	24	电费/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	0.312
灌溉水利用系数/%	90	系统年工作小时数/h	780
灌水定额/mm	33.33	水泵工作效率/%	76

表2 管道规格及单价

Tab. 2 Pipe specifications and unit prices

管道	管材	外径/mm	内径/mm	单价/(元·m ⁻¹)
干管	UPVC(0.6 MPa)	355	336.2	96.52
		315	296.6	74.62
		280	263.6	58.41
支管	UPVC(0.6 MPa)	200	188.2	29.36
		180	169.4	23.88
		160	150.6	19.45
斗管	UPVC(0.6 MPa)	140	131.8	15.41
		125	117.6	12.61
		110	103.6	9.96
农管	PE(0.4 MPa)	90	84.4	8.21
		75	70.4	6.20
		63	59.0	5.18
毛管	滴灌带	20	19.6	0.50

采用最小二乘法对表2中标准管径及单价数据进行回归拟合,得到标准管径及单价拟合曲线,由拟合曲线可得管道单价公式为 $y = 3.3466 + 0.0002x^{2.2158}$,即 $a = 3.3466, b = 0.0002, \beta = 2.2158$ 。

2.2 算法参数设置

利用Matlab 2023a软件,在优化计算时引入适用于不同管网布置形式的多个分水和配水节点,以管道(管段)数量和管径作为决策变量,采用改进HS-BA算法求解多目标优化数学模型,综合考虑水力约束条件,在分水和配水节点不确定的情况下

实现管网“梳子”和“丰字”形布置,逐段进行管径选择,并进行方案比选得出最优方案,从而实现管网布置和管径选择的同步优化。设置 HS 算法的种群规模为 100,最大迭代次数为 100,历次更新和声库尺寸为 50,和声记忆概率为 0.9,音调微调概率为 0.3,音调微调带宽为 0.1。设置 BA 算法的种群规模为 50,最大迭代次数为 100,初始响度为 0.6,响度衰减系数为 0.9,初始脉冲率为 0.2,脉冲增强系数为 0.5,最小频率为 0,最大频率为 20。

2.3 滴灌系统工作制度

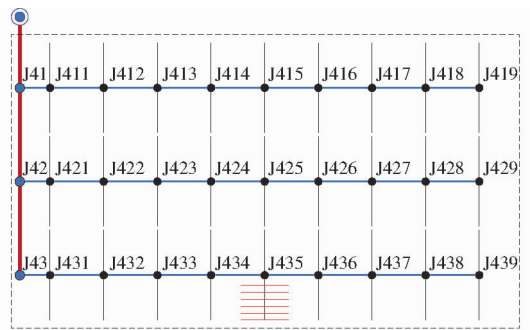
模型中轮灌组数约束是为了满足作物的需水要求,保证滴灌系统的实际灌水时间应小于或等于设计灌水周期。优化计算中,根据工程实例实际灌水要求,优化设计方案的轮灌工作制度为每灌 1 次水开 2 个区域,每个区域分别开 1 条支管,每条支管上开 2 条斗管,每条斗管上开 2 条农管进行轮灌,优化计算时自动搜索不同组合轮灌组,并逐段计算管段通过的最大流量,根据流量进行管径选择,最终得出管网年投资成本最低、节点富余水头均值和方差最小的优化设计方案。

2.4 优化结果与分析

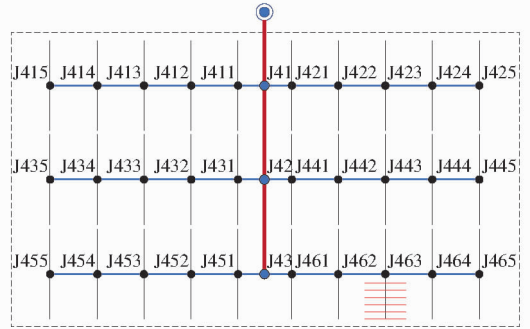
2.4.1 田间管网优化结果

田间管网优化以 IV 区为例,IV 区灌溉区域长 × 宽为 873 m × 373 m,原设计方案由 1 条支管、3 条斗管和 54 根农管组成,斗管间距为 124.34 m,斗管前 436.5 m 管段为外径 200 mm 的 UPVC 管,后 388 m 管段为外径 160 mm 的 UPVC 管;每根农管上有 164 条毛管,农管各管段均为管径 90 mm 的 PE 管,IV 区原设计方案田间管网布置见图 3a。采用本文提出的优化设计方法对该区域进行优化,优化方案管网系统由 1 条支管、6 条斗管和 60 根农管组成,斗管前 218.25 m 管段采用外径 160 mm 的 UPVC 管,后 174.6 m 管段采用外径 110 mm 的 UPVC 管;每根农管上仍有 164 条毛管,农管各管段依旧采用管径 90 mm 的 PE 管。在管网投资成本模型求解时采取逐管段计算管径,相比以往算法先确定变径节点后进行变径的方法更合理准确。IV 区优化设计方案田间管网布置见图 3b。

从图 3 可以看出,在满足约束条件的情况下,优化方案的农管数量与原设计方案农管数量相比增加,优化方案斗管分为 160 mm 和 110 mm 2 种管径。原设计方案与优化方案的各节点水力参数计算见表 3、4。优化结果表明,IV 区原设计方案投资为 30.49 万元,富余水头均值为 8.83 m,富余水头方差为 2.89 m²;优化方案投资为 28.24 万元,富余水头



(a) IV 区原设计方案田间管网布置图



(b) IV 区优化设计方案田间管网布置图

图 3 IV 区田间管网优化前后对比

Fig. 3 Comparison diagrams of field pipeline network in zone IV before and after optimization

均值为 7.68 m,富余水头方差为 2.58 m²。相比原设计方案,优化方案投资减少 2.25 万元,降低 7.38%;节点富余水头均值降低 1.15 m,降低 13.02%;节点富余水头方差降低 0.31 m²,降低 10.73%。

2.4.2 输水干管优化结果

通过 IV 区实例对改进和声搜索算法求解多目标优化模型方法、步骤合理性和可行性进行验证后,对其他 3 个区域以及输水干管进行多目标优化设计,将 4 个灌溉区域优化结果作为计算参数,对该工程输水干管进行优化。图 2 为输水干管优化前后对比,表 5 为输水干管年投资费用,表 6、7 为原设计方案和优化设计方案输水干管各节点水力参数。

优化结果表明,输水干管原设计方案投资为 9.33 万元,富余水头均值为 5.96 m,富余水头方差为 9.06 m²;优化方案投资为 12.45 万元,富余水头均值为 5.58 m,富余水头方差为 10.17 m²。相比原设计方案,优化方案投资增加 3.12 万元,升高 33.44%;节点富余水头均值降低 0.38 m,降低 6.38%;节点富余水头方差升高 1.11 m²,升高 12.25%。

2.4.3 总体优化结果

对于本文所研究的机压滴灌管网设计,原设计方案总体年投资为 126.98 万元,富余水头均值为 4.69 m,富余水头方差为 3.77 m²;优化设计方案总

表3 IV区原设计方案田间管网各节点水力参数

Tab.3 Hydraulic parameters of each node in field pipeline network for original design scheme in zone IV

节点	管段长度/m	管径/mm	水头损失/m	地形高差/m	实际水头/m	所需水头/m	富余水头/m
J41	62.17	200	1.85	-0.35	27.80	19.72	8.08
J411	48.50	200	1.52	0.30	28.78	16.12	12.66
J412	97.00	200	3.47	-0.10	26.43	15.80	10.63
J413	97.00	200	4.55	-0.10	25.35	15.48	9.87
J414	97.00	200	5.64	-0.10	24.26	15.17	9.09
J415	97.00	200	6.72	-0.20	23.08	14.85	8.23
J416	97.00	160	5.34	-0.10	24.56	13.93	10.63
J417	97.00	160	7.03	-0.10	22.87	13.01	9.86
J418	97.00	160	8.71	-0.10	21.19	12.09	9.10
J419	97.00	160	10.39	-0.10	19.51	11.17	8.34
J42	124.34	200	3.24	-0.35	26.41	19.72	6.69
J421	48.50	200	3.78	0.20	26.42	16.12	10.30
J422	97.00	200	4.86	0.10	25.24	15.80	9.44
J423	97.00	200	5.94	0.10	24.16	15.48	8.68
J424	97.00	200	7.02	-0.10	22.88	15.17	7.71
J425	97.00	200	5.05	-0.10	24.85	14.85	10.00
J426	97.00	160	6.73	-0.20	23.07	13.93	9.14
J427	97.00	160	8.41	-0.20	21.39	13.01	8.38
J428	97.00	160	10.09	-0.10	19.81	12.09	7.72
J429	97.00	160	8.34	0.10	21.76	11.17	10.59
J43	124.34	200	4.62	-0.20	25.18	19.72	5.46
J431	48.50	200	3.80	0.20	26.40	16.12	10.28
J432	97.00	200	6.25	0.10	23.85	15.80	8.05
J433	97.00	200	7.33	0.10	22.77	15.48	7.29
J434	97.00	200	8.41	-0.10	21.49	15.17	6.32
J435	97.00	200	9.49	-0.10	20.41	14.85	5.56
J436	97.00	160	8.12	-0.20	21.68	13.93	7.75
J437	97.00	160	9.80	-0.20	20.00	13.01	6.99
J438	97.00	160	11.48	-0.20	18.32	12.09	6.23
J439	97.00	160	13.16	-0.10	16.74	11.17	5.57
富余水头均值/m							8.83
富余水头方差/m ²							2.89

注:管段长度指上一节点到该节点距离,下同。

体年投资为120.67万元,富余水头均值为3.9m,富余水头方差为3.3m²。相比原设计方案,优化方案共减少投资6.31万元,降低投资4.97%;节点富余水头均值降低0.79m,降低16.84%;节点富余水头方差降低0.47m²,降低12.47%。其中,田间管网投资减少9.43万元,输水干管投资增加3.12万元。田间管网投资降低的原因在于,管网布置由“梳子”形优化为“丰字”形,斗管管径变小。而输水干管投资升高的主要原因在于,由于田间管网布置形式改变,输水干管节点增多,干管长度增加。优化后投资降低的主要原因:①优化设计方案相比原设计方案的管网布置有变化。②优化设计方案在斗管级做了变径优化。节点富余水头均值与节点富余水头方差

表4 IV区优化设计方案田间管网各节点水力参数

Tab.4 Hydraulic parameters of each node in field pipeline network for optimized design scheme in zone IV

节点	管段长度/m	管径/mm	水头损失/m	地形高差/m	实际水头/m	所需水头/m	富余水头/m
J41	62.17	200	5.57	0	23.43	14.12	9.31
J411	43.65	160	5.92	0.1	23.18	13.77	9.41
J412	87.30	160	6.60	0.2	22.60	13.57	9.03
J413	87.30	160	7.29	0.1	21.81	13.37	8.44
J414	87.30	110	8.00	-0.1	20.90	12.17	8.73
J415	87.30	110	8.72	-0.1	20.18	10.98	9.20
J421	43.65	160	5.92	-0.1	22.98	13.77	9.21
J422	87.30	160	6.60	-0.1	22.30	13.57	8.73
J423	87.30	160	7.29	-0.1	21.61	13.37	8.24
J424	87.30	110	8.00	-0.1	20.90	12.17	8.73
J425	87.30	110	8.72	0.1	20.38	10.98	9.40
J42	124.34	200	6.73	0	22.27	14.12	8.15
J431	43.65	160	7.07	0.1	22.03	13.77	8.26
J432	87.30	160	7.75	0.1	21.35	13.57	7.78
J433	87.30	160	8.44	0.1	20.66	13.37	7.29
J434	87.30	110	9.15	-0.1	19.75	12.17	7.58
J435	87.30	110	9.87	-0.1	19.03	10.98	8.05
J441	43.65	160	7.07	-0.1	21.83	13.77	8.06
J442	87.30	160	7.75	-0.2	21.05	13.57	7.48
J443	87.30	160	8.44	-0.2	20.36	13.37	6.99
J444	87.30	110	9.15	0	19.85	12.17	7.68
J445	87.30	110	9.87	0	19.13	10.98	8.15
J43	124.34	200	7.88	0.1	21.22	14.12	7.10
J451	43.65	160	8.22	0	20.78	13.77	7.01
J452	87.30	160	8.90	0.1	20.20	13.57	6.63
J453	87.30	160	9.59	0.1	19.51	13.37	6.14
J454	87.30	110	10.30	-0.1	18.60	12.17	6.43
J455	87.30	110	11.02	-0.1	17.88	10.98	6.90
J461	43.65	160	8.22	-0.1	20.68	13.77	6.91
J462	87.30	160	8.90	-0.2	19.90	13.57	6.33
J463	87.30	160	9.59	-0.2	19.21	13.37	5.84
J464	87.30	110	10.30	-0.2	18.50	12.17	6.33
J465	87.30	110	11.02	-0.2	17.78	10.98	6.80
富余水头均值/m							7.68
富余水头方差/m ²							2.58

表5 输水干管年投资费用

Tab.5 Annual investment costs for water transmission

方案	main pipeline		万元/年
	管网投资	运行费用	F ₁
原方案	7.86	1.47	9.33
优化方案	11.03	1.42	12.45

降低的原因:①农管数量增加,使得每根农管上分配的流量减小,因此水压整体降低。②轮灌组变多,从而使每个轮灌组相较于优化前通过的流量减少。③轮灌组开设更加合理,合理开关轮灌组使得管网毛管进口节点富余水头下降。

表6 原设计方案输水干管各节点水力参数

Tab.6 Hydraulic parameters for each node of water transmission main pipeline in original design scheme

节点	管段长 度/m	管径/ mm	水头损 失/m	地形高 差/m	实际 水头/m	所需水 头/m	富余 水头/m
J0	128.6	315	0.54	0.20	29.66	26.86	2.80
J1	9.6	200	0.65	0.02	29.37	20.48	8.89
J2	529.0	200	6.21	0.50	24.29	21.19	3.10
J3(J4)	53.6	200	1.06	0.02	28.96	19.92	9.04
富余水头均值/m							5.96
富余水头方差/m ²							9.06

表7 优化设计方案输水干管各节点水力参数

Tab.7 Hydraulic parameters for each node of water transmission main pipeline in optimized design scheme

节点	管段 长度/m	管径/ mm	水头 损失/m	地形高 差/m	实际水 头/m	所需水 头/m	富余 水头/m
J0	128.6	315	0.49	0.20	28.71	27.60	1.11
J1	274.1	200	2.71	0.30	26.59	17.38	9.21
J2	640.0	200	10.11	0.45	19.34	17.98	1.36
J0'	24.4	200	0.72	0.10	28.38	21.30	7.08
J3	266.3	200	3.32	0.15	25.83	17.61	8.22
J4	465.7	200	5.03	-0.50	23.47	16.99	6.48
富余水头均值/m							5.58
富余水头方差/m ²							10.17

3 讨论

3.1 优化模型优势及适用性

以管网年投资费用最低、节点富余水头均值最小和节点富余水头方差最小为目标,提出了一种适用于机压滴灌管网系统多目标优化的通用数学模型,该模型无需分别利用多级枢纽和多种布置形式建立不同的数学模型,从而大大简化了计算过程,使优化设计更加方便高效,具有更广泛的适用性。采用该优化设计方法,与文献[26]提出的机压滴灌管网系统单目标优化结果相比,投资降低0.95%,节点富余水头均值降低6.80%,节点富余水头方差降低5.15%。不仅能在一定程度上降低管网年投资费用,又能较好地满足管网水压均匀性要求,保证了管网系统的经济性和可靠性。传统优化方法管网变径节点固定,管段管径变化受限,增加了不必要的材料成本,本文管网优化设定为同级管道上2个相邻节点间管道为一段独立管段,每级管道上的每个管段作为独立部分参与算法中的变径计算,采用的独立变径计算能够较好地保证管径设计的合理性,精确调整每个管段管径,确保系统中各节点压力均匀分布,避免局部压力过高或过低,使得优化结果更能满足机压滴灌工程管网优化需求。

3.2 算法优势

HS-BA结合了HS与BA,HS擅长全局搜索,能避免陷入局部最优,而BA在局部优化方面表现出色,可以利用HS的全局搜索能力进行广泛的解空间探索,同时利用BA在局部优化中的优势,进一步精细调整,提高解质量和精度。通过两者的协同作用,能有效减少复杂优化问题的计算复杂度,提高整体效率。

为分析HS-BA算法优越性,分别采用HS-BA、PSO、GA对IV区管网优化模型求解,3种优化算法优化结果与原方案结果见表8,收敛过程见图4。

表8 3种算法优化设计方案与原设计方案对比

Tab.8 Comparison of optimized design schemes with three algorithms and original design scheme

项目	原方案	HS-BA	PSO	GA
		算法	算法	算法
年投资费用/万元	30.49	28.24	28.93	29.16
节点富余水头均值/m	8.83	7.68	8.06	8.14
节点富余水头方差/m ²	2.89	2.58	2.69	2.73
年投资费用降低率/%		7.38	5.12	4.36
节点富余水头均值降低率/%		13.02	8.72	7.81
节点富余水头方差降低率/%		10.73	6.92	5.54

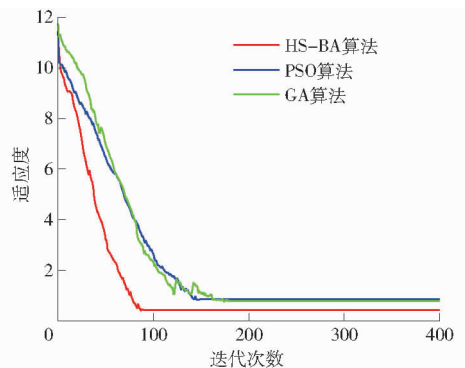


图4 3种算法收敛曲线

Fig.4 Convergence curves of three algorithms

从图4可以看出,HS-BA算法适应度比PSO和GA低,说明HS-BA算法在大多数情况下都表现更优,表明其结果的稳定性更好,波动较小;出现的一些异常值表示在多次运行中表现特别好的或特别差的结果,但这些异常值相比其他2种算法仍在一个较低范围内,显示了HS-BA算法较好的优越性;PSO算法适应度范围表现中等,异常值较少,表明其结果相对稳定,但性能不如HS-BA算法;GA算法适应度范围较广,说明其结果波动较大,异常值较多,这些异常值说明GA算法在一些运行中效果特别差或特别好,但整体上较不稳定。结果表明HS-BA算法在处理需快速找到最优解的复杂优化问题时具有显著优势。

4 结束语

提出了基于投资成本和可靠性的机压滴灌管网系统多目标优化方法,该方法将管网系统划分为级、条、段,综合考虑管网系统投资成本和管网节点水压分布情况,以管网年投资费用最低、节点富余水头均值最小和节点富余水头方差最小为目标,建立了多目标优化通用数学模型,提出了改进和声搜索算法

求解该模型的方法和步骤。通过新疆某实例工程验证了该方法的有效性和优越性,优化方案不仅降低了管网年投资,还提高了系统压力分布均匀性,确保了灌溉均匀度,有效提升了农业生产效率;优化方案大幅降低了节点富余水头均值和节点富余水头方差,减少了管道爆管和其他故障发生风险,提高了管网系统的整体可靠性和安全性。

参 考 文 献

- [1] 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. (in Chinese)
- [2] 李鹏,曹华,詹伟,等.滴灌节水技术应用机理及热点研究进展[J].节水灌溉,2024(2):62-68,75.
LI Peng, CAO Hua, ZHAN Wei, et al. Application mechanism of drip irrigation water saving technology and hot spot research progress[J]. Water Saving Irrigation, 2024(2): 62-68,75. (in Chinese)
- [3] 张益,吕明阳,韩一军.采用节水技术对农户灌溉用水效率的影响——基于冀鲁豫麦农的调查数据[J].灌溉排水学报,2025,44(5):106-116.
ZHANG Yi, LYU Mingyang, HAN Yijun. Impact of adoption of water-saving technologies on irrigation water use efficiency at the farm household level[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2025, 44(5): 106-116. (in Chinese)
- [4] 周荣敏,雷延峰,林性粹.压力输水树状管网遗传优化布置和神经网络优化设计[J].农业工程学报,2002,18(1):41-44.
ZHOU Rongmin, LEI Yanfeng, LIN Xingcui. Genetic optimization layout and artificial neural networks optimal design of pressurized tree water-pipe network[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(1): 41-44. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] HASSANLI M A, DANDY C G. Optimal layout and hydraulic design of branched networks using genetic algorithms[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2005, 21(1): 55-62.
- [7] 窦超银,孟维忠.滴灌支管轮灌模式中管网布置形式的改进研究[J].节水灌溉,2015(6):95-97.
DOU Chaoyin, MENG Weizhong. Study on improvement of pipe network layout of drip irrigation in the model of rotation irrigation with branch pipe[J]. Water Saving Irrigation, 2015(6): 95-97. (in Chinese)
- [8] PERELMAN L, OSTFELD A. Water distribution systems optimal design using cross entropy[C]//Genetic and Evolutionary Computation Conference, GECCO, 2005.
- [9] 魏志莉,陈新明.基于遗传算法的山地自压管网干管优化设计[J].节水灌溉,2018(4):54-58.
WEI Zhili, CHEN Xinming. Optimal design of main pipe in a mountain gravity pipe network based on genetic algorithm[J]. Water Saving Irrigation, 2018(4): 54-58. (in Chinese)
- [10] 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)
- [11] 侯依然,上官林建,侯泽林,等.基于遗传算法的灌溉管网同步优化研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2020,41(1):52-57.
HOU Yiran, SHANGGUAN Linjian, HOU Zelin, et al. Study on synchronous optimization of irrigation pipe network based on genetic algorithm[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(1): 52-57. (in Chinese)
- [12] 马朋辉,宋常吉,景明,等.随机供水微灌管网系统同步优化与最优设计准则研究[J].农业机械学报,2025,56(2):444-453.
MA Penghui, SONG Changji, JING Ming, et al. Synchronous optimization and optimal design criteria of random water supply micro-irrigation network system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(2): 444-453. (in Chinese)
- [13] 朱发昇,季春雷.给水管网优化设计的多目标遗传算法[J].节水灌溉,2008(6):43-46.
ZHU Fasheng, JI Chunlei. Multi-objective genetic algorithms applied to optimization design of water distribution networks[J]. Water Saving Irrigation, 2008(6): 43-46. (in Chinese)
- [14] 孟勤超,杨翠丽,乔俊飞.基于改进SPEA2算法的给水管网多目标优化设计[J].智能系统学报,2018,13(1):118-124.
MENG Qinchao, YANG Cuili, QIAO Junfei. Multi-objective optimization design of water distribution systems based on improved SPEA2 algorithm[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2018, 13(1): 118-124. (in Chinese)
- [15] YAZDI J, LEE E H, KIM J H, et al. Stochastic multiobjective optimization model for urban drainage network rehabilitation [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2015, 141(8): 4014091.

- [16] KIM H J, LEE H D, KANG J. Multi-objective optimization of stormwater pipe networks and on-line stormwater treatment devices in an ultra-urban setting[J]. *Membrane Water Treatment*, 2019, 10(1): 75–82.
- [17] NEGIN Z, ARASH A, MEHDI M H. Improvement of the performance of NSGA-II and MOPSO algorithms in multi-objective optimization of urban water distribution networks based on modification of decision space[J]. *Applied Water Science*, 2022, 12(6): 1–12.
- [18] ALVES S D F, SOUZA D M N J, COSTA H L A. Multi-objective design optimization of natural gas transmission networks[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2016, 93: 212–220.
- [19] KUMAR A A, RAJESH K, P. K S, et al. A multi-objective model for optimizing hydrogen injected-high pressure natural gas pipeline networks[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(76): 29699–29723.
- [20] 宋博, 钱治丞, 赵冰, 等. 机压滴灌管网优化设计与应用[J]. *黑龙江大学自然科学学报*, 2022, 39(2): 222–230.
SONG Bo, QIAN Zhicheng, ZHAO Bing, et al. Optimization design and application of drip irrigation pipe network[J]. *Journal of Natural Science of Heilongjiang University*, 2022, 39(2): 222–230. (in Chinese)
- [21] CARRIÓN F, SANCHEZ-VIZCAINO J, CORCOLES I J, et al. Optimization of groundwater abstraction system and distribution pipe in pressurized irrigation systems for minimum cost[J]. *Irrigation Science*, 2016, 34(2): 145–159.
- [22] KIM J H, GEEN Z W, JUNG D, et al. *Advances in harmony search[M]//Soft computing and applications*. Cham, Switzerland: Springer, 2020.
- [23] GEEM Z, KIM J, LOGANATHAN G. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. *Simulation*, 2001, 76(2): 60–68.
- [24] YANG X S. *A new metaheuristic batinspired algorithm[M]//Nature inspired cooperative strategies for optimization*. Berlin: Springer, 2010: 65–74.
- [25] 李千禧, 何武全, 李渤, 等. 基于混合和谐搜索算法的自压滴灌田间管网多目标优化设计[J]. *节水灌溉*, 2024(6): 40–45.
LI Qianxi, HE Wuquan, LI Bo, et al. Multi-objective optimization design of self-pressure drip irrigation field pipe network based on mixed harmony search algorithm[J]. *Water Saving Irrigation*, 2024(6): 40–45. (in Chinese)
- [26] 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)

(上接第 322 页)

- [30] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 等. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798–7806.
YUAN Lihua, JIANG Weiguo, SHEN Wenming, et al. The spatio-temporal variations of vegetation cover in the Yellow River Basin from 2000 to 2010[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7798–7806. (in Chinese)
- [31] 张寅飞, 杨雅萍, 乐夏芳, 等. 蒙古高原 500 m 分辨率植被物候及变化趋势数据集(2001—2019 年)[J]. *中国科学数据(中英文网络版)*, 2023, 8(1): 23–36.
ZHANG Yinfei, YANG Yaping, YUE Xiafang, et al. A dataset of vegetation phenology and change trends with a resolution of 500 m of on the Mongolian Plateau(2001—2019)[J]. *China Scientific Data(Chinese/English Online)*, 2023, 8(1): 23–36. (in Chinese)
- [32] ZUO D, HAN Y, XU Z, et al. Time-lag effects of climatic change and drought on vegetation dynamics in an alpine river basin of the Tibet Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 600: 126532.
- [33] VERHOEVEN E, WARDLE G M, ROTH G W, et al. Characterising the spatiotemporal dynamics of drought and wet events in Australia[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 846: 157480.
- [34] SAWUT R, LI Y, KASIMU A, et al. Examining the spatially varying effects of climatic and environmental pollution factors on the NDVI based on their spatially heterogeneous relationships in Bohai Rim, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 617: 128815.
- [35] DAS J, DAS S, UMAMAHESH N V. Population exposure to drought severities under shared socioeconomic pathways scenarios in India[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 867: 161566.
- [36] WANG A, TAO H, DING G, et al. Global cropland exposure to extreme compound drought heatwave events under future climate change[J]. *Weather and Climate Extremes*, 2023, 40: 100559.
- [37] GAO Y, YU Z, ZHOU M, et al. Optimal reliability ensemble averaging approach for robust climate projections over China[J]. *International Journal of Climatology*, 2024, 44(9): 2852–2875.
- [38] 王剑, 刘正亮, 王夺, 等. 加气滴灌旋流式微纳米气泡发生器运行工况优化[J]. *农业机械学报*, 2025, 56(2): 357–369, 401.
WANG Jian, LIU Zhengliang, WANG Duo, et al. Working condition optimization of swirling micro and nano bubble generator for aerated drip irrigation[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2025, 56(2): 357–369, 401. (in Chinese)