

·灌溉技术与装备·


文章编号: 1672-3317(2023)06-0111-08

基于正交结果分析的内镶贴片式滴灌带性能优化设计

陶洪飞^{1,2}, 刘姚^{1,2}, 陶娟琴^{1,2}, 周良³, 李巧^{1,2},
马合木江·艾合买提^{1,2}, 姜有为^{1,2}

(1.新疆农业大学水利与土木工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2.新疆水利工程安全与
水灾害防治重点实验室, 乌鲁木齐 830052; 3.中建新疆建工, 成都 610000)

摘要:【目的】探究铺设坡度、含沙量、工作压力对内镶贴片式滴灌带的灌水均匀度和流量降幅的影响。【方法】开展了三因素三水平的均匀正交试验, 采用极差分析和层次分析研究了铺设坡度、含沙量、工作压力对内镶贴片式滴灌带的灌水均匀度和流量降幅影响的主次顺序, 运用 PPR 模型、NSGA-II 模型、线性回归模型进行对比分析。【结果】①各因素对灌水均匀度的影响排序为含沙量>铺设坡度>工作压力; 对流量降幅的影响程度排序为含沙量>工作压力>铺设坡度; 层次分析结果与极差分析结果一致, 均表明含沙量对灌水均匀度和流量降幅的影响大。②基于试验数据构建灌水均匀度和流量降幅的线性回归模型, 灌水均匀度线性回归模型的标准均方根误差为 19.15%, 流量降幅线性回归模型的标准均方根误差为 14.81%, 模型表现效果好。③构建灌水均匀度和流量降幅的投影寻踪回归模型, 灌水均匀度投影寻踪回归模型的标准均方根误差为 2.98%, 流量降幅投影寻踪回归模型的标准均方根误差为 2.42%, 模型表现效果极好。【结论】PPR 模型预测效果优于线性回归模型, 且 PPR 模型与 NSGA-II 预测结果较为一致, 最优工况为: 铺设坡度为 0%, 含沙量为 1 g/L, 工作压力为 96 kPa, 灌水均匀度为 0.958 5, 流量降幅为 0.083 5。

关键词: 内镶贴片式滴灌带; 灌水均匀度; 流量降幅; 线性回归模型; 投影寻踪回归; 多目标遗传算法
中图分类号: S275.6 文献标志码: A doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022561 OSID: 

陶洪飞, 刘姚, 陶娟琴, 等. 基于正交结果分析的内镶贴片式滴灌带性能优化设计[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 111-118.
TAO Hongfei, LIU Yao, TAO Juanqin, et al. Optimization of Drip Irrigation Belt with Interior Embedded Patches Using
Orthogonal Results Analysis[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 111-118.

0 引言

【研究意义】我国是农业大国, 农业用水量占总用水量的比例较大, 水资源短缺制约着经济发展和农业生产, 大力推进我国农业节水灌溉发展, 可以从根本上缓解我国农业缺水的问题^[1]。近年来, 滴灌技术在新疆得到广泛使用, 大部分地区的灌溉水源主要来源于山区的降水径流和冰川融雪等含沙量较高的地表水。含沙水作为滴灌灌溉水源的最大弊端就是导致灌水器的严重堵塞, 同时由于滴灌带的进水口和出水口都很小, 极易受含沙水的影响, 使得灌溉系统无法正常运行^[2-4]。目前为了减缓泥沙带来的灌水器堵塞问题, 部分会采用修建沉砂池或者配备过滤器, 但是这会使得成本大幅增加, 实际上选用滴灌灌水器将降低对系统沉降和过滤的要求。滴灌效率受灌溉水质、流道结构、工作压力等因素的影响, 灌水器的堵塞无法避免, 即使是在灌溉水质较好且过滤设施完备的情

况下, 灌溉系统也会出现堵塞现象^[5-6]。因此, 对内镶贴片式滴灌带抗堵塞性能主要影响因素以及堵塞规律的研究对于发展节水灌溉和现代农业具有重要意义。

【研究进展】张新燕等^[7]提出贴壁式滴灌带的水源泥沙质量浓度低于 100 mg/L 时滴灌带基本不堵塞, 大于该值时, 滴灌带开始堵塞; 张慧^[8]研究发现, 并非工作压力愈大单翼迷宫式滴灌带的灌水均匀度愈好, 而是在压力适中时灌水均匀度愈好; 滴灌质量评估和水力设计的核心指标是滴灌带灌水均匀度^[9], 其影响因素有主流道内的压力分布, 灌水器的制造偏差和堵塞状况, 但以压力分布为主^[10]; 滴灌系统毛管底部泥沙淤积主要受到泥沙颗粒粒径、密度、堵塞滴头数量等因素影响^[11]; Wang 等^[12]通过对含沙水灌溉下迷宫式灌水器的物理堵塞特性试验发现, 堵塞特性与灌水器类型、泥沙量、泥沙粒径有关; 罗春艳^[13]通过室内堵塞试验, 研究了压力、堵塞率、堵塞位置等对滴灌系统灌水均匀度影响规律, Bounoua^[14]研究发现, 颗粒粒径是导致物理堵塞的重要原因, 通常颗粒粒径越大、质量浓度越高, 堵塞情况越严重; 赵青青^[15]研究表明, 铺设长度对低压供水模式下灌水均匀度的影

收稿日期: 2022-10-11 修回日期: 2023-03-01 网络出版日期: 2023-05-06
基金项目: 新疆维吾尔自治区重大科技专项 (2022A02003-4)
作者简介: 陶洪飞 (1987-), 男, 副教授, 博士生导师, 主要从事节水
技术与新设备以及计算水力学研究。E-mail: 304276290@qq.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

响最显著；何建新等^[16]在研究沥青胶浆拉伸强度变化规律中运用极差分析和投影寻踪回归（PPR）对填料类型、填料浓度和试验温度的三水平正交拉伸试验结果进行分析预测得到较好的效果。在多目标优化算法中，多目标遗传算法（NSGA-II）得到了较多的应用^[17]；通常情况下，多目标优化问题中多个目标间具有冲突关系且没有绝对最优解而只有 Pareto 最优解，即其目标值向量比其他可行解更好，一类多目标优化求解方法为“预先宣布类”问题^[18]，这类方法在解决问题之前，需要给出全部决策者偏好的信息。目前，在研究不同坡度下压力对滴灌带影响的研究中，张天举等^[19]研究表明，在毛管上铺设适当顺流下坡坡度或者增加入口压力，都可以改善毛管滴灌均匀度。

【切入点】虽然目前多因素对灌水均匀度和流量降幅影响的研究较多，但是采用多种模型预测各因素对灌水均匀度和流量降幅的影响研究较少。并且多因素对抗堵塞性能影响的主次顺序研究还不够全面。

【拟解决的关键问题】为此，本研究设计了三因素三水平均匀正交试验，主要探究铺设坡度、含沙量、工作压力对滴灌带抗堵塞性能的影响，运用极差分析以及层次分析法确定三因素的影响排序，基于线性回归模型、PPR 模型、NSGA-II 模型对比分析确定最优工况。

1 材料与方 法

1.1 材料及设备

试验使用的内镶贴片式滴灌带来自于山东倡民节水灌溉设备有限公司，内镶贴片式滴灌带滴头结构是集正反面流道、中心打孔框和正反流道同一梳型进水口的滴头^[20]，其外径为 16 mm，滴头间距为 30 cm，水力性能参数中流态指数为 0.49，流量系数为 0.32，额定压力为 100 kPa，额定流量为 3 L/h。

试验泥沙选用乌鲁木齐西山的自然黄土，将其过 120 目筛网。试验在新疆农业大学农业水利工程实验室滴灌带（管道）抗堵塞性能试验台上完成，试验将乌拉泊水库经乌鲁木齐水厂处理后的水作为水源。该设备在 10~800 kPa 之间可以随意设置供水压力并精确至 2 kPa，压力波动幅度±2 kPa，铺设长度可达 35 m。

1.2 试验设计

选用三因素三水平均匀正交表 $UL_9(3^4)$ 设计试验，试验因素为铺设坡度、灌溉水含沙量、工作压力（分别标记为 A 、 E 、 B ），详见表 1。根据前人^[19,21-22]研究结果，试验铺设坡度选取 -1%~1%；选用的工作压力 40~100 kPa。为加快试验进度，扩大预测模型的预测区间，以农田灌溉水质标准^[23]为基础，选取灌溉水中悬浮物质量浓度（质量浓度≤0.1 g/L）的 10 倍以上，设定浑水含沙量为 1、2、3 g/L。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental design

| 试验编号 | 因素 | | | |
|------|--------|----------------------------|----------|------|
| | A 坡度/% | E 含沙量/(g·L ⁻¹) | B 压力/kPa | D 空白 |
| 1 | -1 | 1 | 40 | 2 |
| 2 | -1 | 2 | 70 | 1 |
| 3 | -1 | 3 | 100 | 3 |
| 4 | 0 | 1 | 100 | 3 |
| 5 | 0 | 2 | 70 | 2 |
| 6 | 0 | 3 | 40 | 1 |
| 7 | 1 | 1 | 70 | 1 |
| 8 | 1 | 2 | 40 | 3 |
| 9 | 1 | 3 | 100 | 2 |

选用 3 条长 35 m 滴灌带，架设于抗堵塞测试平台（重复 2 次，取其均值），调试铺设坡度，每条滴灌带等距选取滴头 25 个，将集水桶（1 000 mL）置于其下集水；浑水开始前，在清洗干净的浑水罐中加入清水，然后在计算机终端设定测试压力值，测出当前条件下的清水流量；清水试验结束后，保持原有布置不变，在浑水罐中加入配置好的相应质量浓度的含沙水，再设置计算机终端上的测试压力值 40、70、100 kPa，灌水时间 30 min，间隔时间 30 min，然后进行一次浑水灌水，待灌水结束后进行 10 min 的流量测量。

1.3 灌水均匀度和流量降幅评价指标

采用克里斯琴森均匀系数^[24]表示灌水均匀度。计算式为：

$$C_u = 1 - \frac{\sum |q_i - \bar{q}|}{N\bar{q}}, \quad (1)$$

式中： C_u 为灌水均匀度； \bar{q} 为每个滴头的平均流量（L/h）； q_i 为各滴头流量（L/h）； N 为试验的滴头数。

目前对于滴灌带抗堵塞性能的评价尚无统一标准，该试验以克里斯琴森均匀系数即灌水均匀度 C_u 和流量降幅 q_d 来评价滴灌带物理堵塞性能。

$$q_r = \frac{\bar{q}_h}{\bar{q}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$q_d = 1 - q_r, \quad (3)$$

式中： q_r 为平均相对流量（%）； q_d 为流量降幅； \bar{q}_h 为浑水条件下的平均流量（L/h）； \bar{q} 为清水条件下的平均流量（L/h）。

1.4 层次分析法

利用 AHP 模型^[25]对无交互作用的正交试验数据进行统计分析，给定的正交试验因素水平见表 2（其中 k 个因素为 $E^{(1)}$ 、 $E^{(2)}$ 、 \dots 、 $E^{(k)}$ ，每个因素的水平数分别是 m_1 、 m_2 、 \dots 、 m_k ），第 j 水平下的试验数据之和为 K_{ij} ，称为试验的影响效应，若试验指标越大越好，则令 $M_{ij} = K_{ij}$ ；否则令 $M_{ij} = 1/K_{ij}$ ，由此组成试验影响效应矩阵见式（4）。

表 2 因素水平表

Table 2 Factor levels table

| 因素 | 水平 | | | |
|-----|-------------|-------------|-----|-------------|
| | $E^{(1)}$ | $E^{(2)}$ | ... | $E^{(k)}$ |
| 1 | $E_1^{(1)}$ | $E_1^{(2)}$ | ... | $E_1^{(k)}$ |
| ... | ... | ... | ... | ... |
| m | $E_m^{(1)}$ | $E_m^{(2)}$ | ... | $E_m^{(k)}$ |

$$E = \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & \dots & 0 \\ M_{21} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{n_1 1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & M_{12} & \dots & 0 \\ 0 & M_{22} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & M_{n_2 2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & M_{1k} \\ 0 & 0 & \dots & M_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & M_{n_k k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

将试验影响效应矩阵按式 (5) 将每列进行归一化后再按式 (6) 进行计算后得到右乘矩阵 S 。2 个矩阵相乘可得到水平标准影响效应矩阵 ES 。

$$t_j = \sum_{i=1}^{m_j} M_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, k) \times E, \quad (5)$$

$$S = \begin{bmatrix} 1/t_1 & 0 & \dots & 0 & \dots \\ 0 & 1/t_2 & \dots & 0 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1/t_3 & \dots \end{bmatrix} \quad (6)$$

$R_i \quad (i=1, 2, \dots, m)$ 是第 i 个因素的极差，将 R_i 按式 (7) 进行计算可得影响权重矩阵。

$$C = \left[\frac{R_1}{\sum_{i=1}^m R_i} \quad \frac{R_2}{\sum_{i=1}^m R_i} \quad \dots \quad \frac{R_3}{\sum_{i=1}^m R_i} \right] \quad (7)$$

最终将上述的水平标准影响效应矩阵与影响权重矩阵进行计算得到各因素水平对指标的影响权重大小为 ω ，如式 (8) 所示：

$$\omega = ESC^T, \quad (8)$$

式中： ω 为 $(m_1+m_2+\dots+m_k) \times 1$ 向量。

1.5 模型介绍及模型误差的判别

用 SPSS 23.0 通过最小二乘法进行回归分析时，需要考虑因素水平间的显著性差异，其中规定 $P < 0.05$ 则表现为显著， $P < 0.01$ 则表现为极显著^[15]。为进一步评估模型表现效果，采用了模型评估指标：标准均方根误差 $nRMSE$ ^[26]。

现有回归分析都以正态假定为前提，然而多数检验结果其实并不完全为正态。PPR 模型具有不需要对其数据分布类型进行假设以及以正态假设为前提等优势^[27]。利用 PPR 模型进行无假定建模可以有效解决已有回归分析法存在的局限性，并提高回归方程求解准确性^[28]。设 x 为 P 维自变量， y 为因变量，

计算式为：

$$\hat{y} = E(y|x) = \bar{y} + \sum_{i=1}^M \beta_i \cdot f_i \left(\sum_{j=1}^P \alpha_{ij} \cdot x_{ij} \right) \quad (9)$$

多目标遗传算法 (NSGA-II) 将多目标优化问题作为研究目标，通过协调各目标函数间的相互关系，进行搜索使各目标函数的取值尽量大 (尽量小)、最优解集合为中心而发展起来的演化算法^[15]。

2 结果与分析

2.1 均匀正交试验结果

表 3 为 $UL_9(3^4)$ 均匀正交设计与试验结果，根据正交试验结果及式 (1) 一式 (3) 计算浑水条件下每个处理的灌水均匀度和流量降幅。由表 3 可知，灌水均匀度最大为 0.935 1，最小值为 0.227 0；流量降幅的最大值为 0.501 3，最小值为 0.085 1。

表 3 $UL_9(3^4)$ 均匀正交设计与试验结果

Table 3 $UL_9(3^4)$ uniform orthogonal design and test results

| 试验编号 | 因素 | | | | 灌水均匀度 C_u | 流量降幅 q_d |
|------|--------|--------------------------------|--------------|------|-------------|------------|
| | A 坡度/% | E 含沙量/ ($g \cdot L^{-1}$) | B 压力/ kPa | D 空白 | | |
| 1 | -1 | 1 | 40 | 2 | 0.880 9 | 0.089 9 |
| 2 | -1 | 2 | 70 | 1 | 0.380 2 | 0.380 2 |
| 3 | -1 | 3 | 100 | 3 | 0.227 0 | 0.452 8 |
| 4 | 0 | 1 | 100 | 3 | 0.935 1 | 0.085 1 |
| 5 | 0 | 2 | 70 | 2 | 0.772 1 | 0.238 9 |
| 6 | 0 | 3 | 40 | 1 | 0.736 9 | 0.321 4 |
| 7 | 1 | 1 | 70 | 1 | 0.915 5 | 0.087 8 |
| 8 | 1 | 2 | 40 | 3 | 0.744 8 | 0.218 8 |
| 9 | 1 | 3 | 100 | 2 | 0.247 6 | 0.501 3 |

2.2 影响因素排序

表 4 为有关灌水均匀度与流量降幅在不同试验因素下的极差分析。由表 4 可知，灌水均匀度极差从小到大排列顺序依次是： $R_D < R_B < R_A < R_E$ ；按极差从小到大排列滴灌带灌水均匀度各影响因素的顺序是 $B < A < E$ ，即工作压力 < 铺设坡度 < 含沙量；流量降幅 (q_d) 极差从小到大的顺序依次是 $R_D < R_A < R_B < R_E$ ，按极差大小排列各因素对流量降幅影响顺序依次是铺设坡度 < 工作压力 < 含沙量。与空白列相比，各试验因素极差都比空白列大，表明各因素间交互作用可忽略不计。

不同因素下灌水均匀度和流量降幅见图 1。由图 1 可知，对于灌水均匀度各因素最优水平取值为：铺设坡度 0%，含沙量 1 g/L，工作压力 40 kPa；对于流量降幅各因素最优水平取值为：铺设坡度 0%，含沙量 1 g/L，工作压力 40 kPa。由于极差分析法存在一定的局限性，对于由试验误差引起的还是由各因素变化所引起的误差难以分辨，因此，须进行层次分析来弥补极差分析的不足。

表 4 各因素的极差分析结果

Table 4 Results of extreme analysis of each factor

| 组号 | 因素 | | | | 灌水均匀度 C_u | 流量降幅 q_d |
|----------|-----------------|---|-----------------|-----------------|-------------|------------|
| | A 坡度/% | E 含沙量/($g \cdot L^{-1}$) | B 压力/kPa | D 空白 | | |
| 1 | -1 | 1 | 40 | 2 | 0.880 9 | 0.089 9 |
| 2 | -1 | 2 | 100 | 1 | 0.380 2 | 0.380 2 |
| 3 | -1 | 3 | 70 | 3 | 0.227 0 | 0.452 8 |
| 4 | 0 | 1 | 100 | 3 | 0.935 1 | 0.085 1 |
| 5 | 0 | 2 | 70 | 2 | 0.772 1 | 0.238 9 |
| 6 | 0 | 3 | 40 | 1 | 0.736 9 | 0.321 4 |
| 7 | 1 | 1 | 70 | 1 | 0.915 5 | 0.087 8 |
| 8 | 1 | 2 | 40 | 3 | 0.744 8 | 0.218 8 |
| 9 | 1 | 3 | 100 | 2 | 0.247 6 | 0.501 3 |
| K_{1j} | 1.488 1/0.922 9 | 2.731 5/0.267 4 | 2.362 6/0.630 1 | 2.032 6/0.789 4 | | |
| K_{2j} | 2.444 1/0.645 4 | 1.897 1/0.837 9 | 1.914 6/0.779 5 | 1.900 6/0.830 1 | | |
| K_{3j} | 1.908 2/0.807 9 | 1.211 8/1.275 5 | 1.562 9/0.966 6 | 1.906 9/0.756 7 | | |
| k_{1j} | 0.496 0/0.307 6 | 0.910 5/0.089 1 | 0.787 5/0.210 0 | 0.677 5/0.263 1 | | |
| k_{2j} | 0.814 7/0.215 1 | 0.632 4/0.279 3 | 0.638 2/0.259 8 | 0.633 5/0.276 7 | | |
| k_{3j} | 0.636 0/0.269 3 | 0.403 8/0.425 2 | 0.521 0/0.322 2 | 0.635 6/0.255 2 | | |
| R_j | 0.318 7/0.092 5 | 0.506 7/0.336 0 | 0.266 5/0.112 2 | 0.041 9/0.024 5 | | |
| R 排序 | | $R_E > R_A > R_B > R_D / R_E > R_B > R_A > R_D$ | | | | |

注 “/” 左侧为灌水均匀度的数据; “/” 右侧为流量降幅数据。

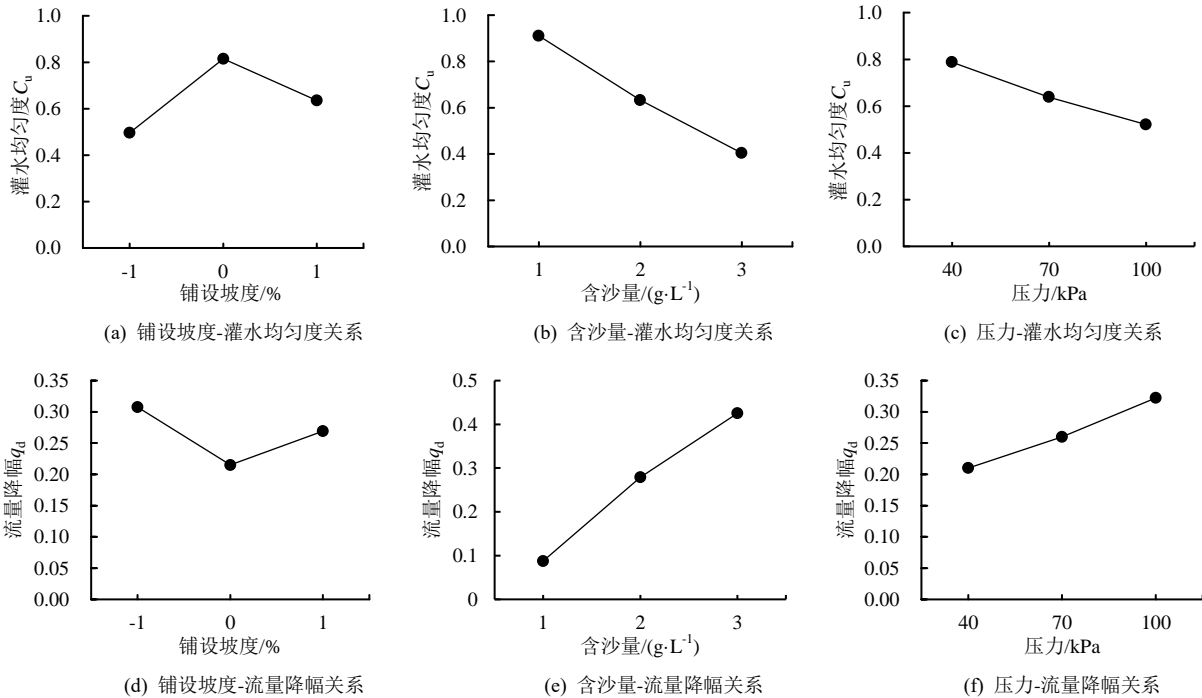


图 1 不同因素下灌水均匀度和流量降幅

Fig.1 Irrigation uniformity and flow rate reduction under different factors

由表 4 及式 (4) 一式 (8) 可得, 各因素水平对试验指标影响程度大小如式 (10) 所示。因素 A (铺设坡度) 三水平对指标的影响权重最大的是 $A_1=0.171 8$ (灌水均匀度)、 $A_2=0.068 4$ (流量降幅), 因素 E (含沙量) 三水平中影响权重最大的是 $E_3=0.222 9$ (灌水均匀度)、 $E_1=0.406 5$ (流量降幅), 因素 B (工作压力) 三水平中权重最大的是 $B_3=0.041 5$ (灌水均匀度)、 $B_1=0.084 4$ (流量降幅)。故试验因素的最优值为 $A_1E_3B_3$ (灌水均匀度)、 $A_2E_1B_1$ (流量降幅)。各因素主次排序根据因素 A、E、B 各级影响权重大小来确定, 可以得出灌水均匀度主次排序依次是: 含

沙量>铺设坡度>工作压力。流量降幅的主次顺序为: 含沙量>工作压力>铺设坡度, 层次分析结果与极差分析结果一致。

$$\omega_1 = \begin{bmatrix} 0.171 8 \\ 0.104 6 \\ 0.134 0 \\ 0.098 8 \\ 0.142 3 \\ 0.222 9 \\ 0.027 4 \\ 0.033 9 \\ 0.041 5 \end{bmatrix}, \quad \omega_2 = \begin{bmatrix} 0.047 9 \\ 0.068 4 \\ 0.054 7 \\ 0.406 5 \\ 0.129 6 \\ 0.085 2 \\ 0.084 4 \\ 0.068 2 \\ 0.055 0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

式中: ω_1 表示各因素对灌水均匀度的影响权重; ω_2

表示各因素对流量降幅的影响权重。

2.3 线性回归模型

线性回归分析表明，各因子共线性诊断 VIF 值在 5 以下，符合线性回归分析。通过计算得到各影响因素之间的相关系数及回归系数，构建基于最小二乘 SVM 法的预测模型。结果表明，此模型有良好的预测能力。以铺设坡度 A 、含沙量 E 、工作压力 B 为试验因素，灌水均匀度 C_u 、流量降幅 q_d 为考核指标，在 95%置信度下采用多元线性回归分析。

灌水均匀度 (C_u) 的线性回归模型如式 (11) 所示，对线性回归模型进行试验验证，由表 5、表 6 可知，不同处理间灌水均匀度有显著差异；各因素之间也有显著相关性；该模型调整后决定系数 $R^2=0.682$ 。建立的灌水均匀度 (C_u) 模型中，铺设坡度 (A) 和压力 (B) 的显著性值 (P 值) 均高于 0.05，而含沙量 (E) 的 $P=0.012<0.05$ ，说明可能存在未考虑因子或非线性关系^[29]。因此还需采用非线性方法对灌水均匀度 (C_u) 与各影响因素进行拟合。

灌水均匀度线性回归模型：

$$C_u=1.466+0.07A-0.253E-0.004B. \quad (11)$$

表 5 灌水均匀度回归方差分析表

Table 5 Anova with regression of irrigation homogeneity

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方和 | P 值 |
|------|-------|-----|-------|-------------|
| 回归 | 0.521 | 3 | 0.174 | 0.033* |
| 残差 | 0.129 | 5 | 0.026 | $R^2=0.682$ |
| 总计 | 0.650 | 8 | | |

注 *表示显著, $P<0.05$; **表示极其显著, $P<0.01$, 下同。

表 6 灌水均匀度回归参数估计和检验

Table 6 Estimation and test of irrigation homogeneity regression parameters

| 模型 | 参数值 | 标准误差 | t 值 | P 值 |
|-----------|--------|-------|--------|---------|
| 常量 | 1.466 | 0.209 | 7.030 | 0.001** |
| A (坡度) | 0.07 | 0.066 | 1.067 | 0.335 |
| E (含沙量) | -0.253 | 0.066 | -3.861 | 0.012* |
| B (压力) | -0.004 | 0.002 | -2.031 | 0.098 |

式 (12) 为流量降幅 (q_d) 线性回归模型，模型分析表明，当其他因素不变，铺设坡度由平坡向正坡或者负坡变化过程中，流量降幅均呈增大趋势，铺设坡度接近平坡时流量降幅变小。

流量降幅回归方差分析及各项回归参数的估计与检验结果见表 7、表 8。由表 7、表 8 可知，调整后决定系数 R^2 为 0.900，回归方程拟合效果较好，说明流量降幅 (q_d) 变化时，多数可由铺设坡度 (A)、含沙量 (E)、工作压力 (B) 所解释。含沙量 (E) 的 $P<0.01$ ，而工作压力 (B) 的 P 值为 0.042，铺设

坡度 (E) 的 P 值为 0.396，因此含沙量的回归系数在 0.01 水平下显著，工作压力的回归系数在 0.05 水平下显著，而铺设坡度对于流量降幅无显著影响。

残差分析发现，建立的模型残差符合正态分布。由上述结果可知，采用该线性回归模型探究含沙量、铺设坡度、工作压力对流量降幅的影响关系是恰当的。

模型输出如下：

$$q_d=-0.204-0.019A+0.169E+0.002B. \quad (12)$$

表 7 流量降幅回归方差分析表

Table 7 Analysis of variance of flow reduction regression

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方和 | P 值 |
|------|-------|-----|-------|-------------|
| 回归 | 0.192 | 3 | 0.064 | 0.002** |
| 残差 | 0.013 | 5 | 0.003 | $R^2=0.900$ |
| 总计 | 0.205 | 8 | | |

注 *表示显著, $P<0.05$; **表示极其显著, $P<0.01$, 下同。

表 8 流量降幅回归参数估计和检验

Table 8 Flow drop regression parameter estimation and testing

| 模型 | 参数值 | 标准误差 | t 值 | P 值 |
|-----------|--------|-------|--------|---------|
| 常量 | -0.204 | 0.66 | -3.114 | 0.026* |
| A (坡度) | -0.019 | 0.21 | -0.928 | 0.396 |
| E (含沙量) | 0.169 | 0.21 | 8.176 | <0.01** |
| B (压力) | 0.002 | 0.001 | 2.717 | 0.042* |

灌水均匀度预测模型的绝对误差在 $\pm 0.189 9$ 以内，最大相对误差为 57.27%， $nRMSE=19.15\%<20\%$ ；流量降幅的绝对误差在 $\pm 0.079 9$ 以内，最大相对误差为 93.89%， $nRMSE=14.81\%<20\%$ 。由此可以看出，以上 2 个模型虽表现效果良好，但存在某些预测结果误差较大的问题，故尝试使用非线性回归分析解决相关问题。

2.4 投影寻踪回归模型

用 PPR 对灌水均匀度进行计算分析，实测值与预测值的误差如表 9 所示。由表 9 得知，灌水均匀度 (C_u) 绝对误差为 $\pm 0.022 4$ ，灌水均匀度 (C_u) 非线性模型的 $nRMSE=2.98\%<10\%$ ，相对误差小于 9.07%；流量降幅 (q_d) 的绝对误差在 $\pm 0.012 7$ 以内，流量降幅非线性模型的 $nRMSE=2.42\%<10\%$ ，相对误差小于 5.31%；以上 2 个考核指标建模样本数据相对误差均在 10%以内，其合格率均为 100%且 2 个模型的标准均方根误差均小于 10%，模型表现效果极好。

对所得到的最优工况组合进行优化仿真模拟计算，当铺设坡度为 0%，含沙量为 1 g/L，工作压力为 40 kPa 时，流量降幅的最小值为 0.041 1，此工况下灌水均匀度为 0.831 0；当铺设坡度为 0%，含沙量为 1 g/L，工作压力为 96 kPa 时，灌水均匀度有最大值 0.958 5，此工况下流量降幅为 0.083 5。

表 9 PPR 模型计算结果

Table 9 Results of the PPR model calculations

| 组号 | 灌水均匀度 C_u | | | | 组号 | 流量降幅 q_d | | | |
|----|-------------|---------|----------|-------|----|------------|---------|----------|-------|
| | 实测值 | 预测值 | 绝对误差 | 相对误差% | | 实测值 | 预测值 | 绝对误差 | 相对误差% |
| 1 | 0.880 9 | 0.875 9 | -0.005 0 | -0.57 | 1 | 0.089 9 | 0.086 8 | -0.003 1 | -3.47 |
| 2 | 0.380 2 | 0.365 0 | -0.015 2 | -3.99 | 2 | 0.380 2 | 0.371 7 | -0.008 5 | -2.24 |
| 3 | 0.227 0 | 0.244 3 | 0.017 3 | 7.63 | 3 | 0.452 8 | 0.460 7 | 0.007 9 | 1.74 |
| 4 | 0.935 1 | 0.957 0 | 0.021 9 | 2.34 | 4 | 0.085 1 | 0.088 4 | 0.003 3 | 3.89 |
| 5 | 0.772 1 | 0.750 2 | -0.021 9 | -2.83 | 5 | 0.238 9 | 0.251 6 | 0.012 7 | 5.31 |
| 6 | 0.736 9 | 0.715 4 | -0.021 5 | -2.92 | 6 | 0.321 4 | 0.316 1 | -0.005 3 | -1.66 |
| 7 | 0.915 5 | 0.895 5 | -0.020 0 | -2.18 | 7 | 0.087 8 | 0.083 7 | -0.004 1 | -4.72 |
| 8 | 0.744 8 | 0.766 7 | 0.021 9 | 2.94 | 8 | 0.218 8 | 0.218 6 | -0.000 2 | -0.10 |
| 9 | 0.247 6 | 0.270 0 | 0.022 4 | 9.07 | 9 | 0.501 3 | 0.498 8 | -0.002 5 | -0.50 |

2.5 NSGA-II 模型

基于滴灌带的灌水均匀度和流量降幅与滴灌带的铺设坡度、含沙量、工作压力之间存在非线性关系,使用 NSGA-II 进行数学建模,在各因素的约束条件下寻求最优解集。若在某一工况条件下,灌水均匀度与流量降幅的散点落在 pareto 前沿附近时,表明此工况为最优工况。由图 2 可知,PPR 仿真模拟计算的最大灌水均匀度下流量降幅取值组成的点落在 pareto 前沿附近,而另一组 PPR 仿真计算结果远离 pareto 前沿,表明 PPR 模型与 NSGA-II 模型预测结果较为一致,故最优工况为铺设坡度 0%、含沙量 1 g/L 及工作压力 96 kPa,此时灌水均匀度为 0.958 5,流量降幅为 0.083 5。

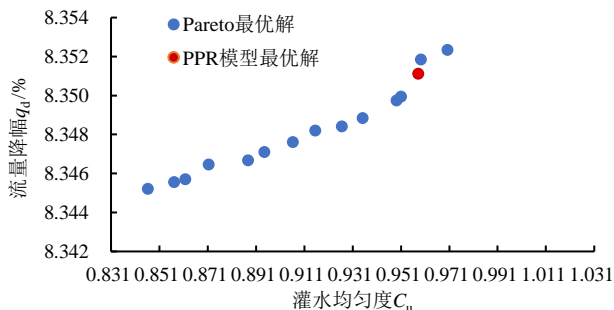


图 2 pareto 前沿

Fig.2 The pareto frontier

3 讨论

3.1 不同因素对评价指标影响

本研究表明,含沙量对灌水均匀度和流量降幅影响最大;工作压力对灌水均匀度影响最小;铺设坡度对流量降幅影响最小。这与前人^[30-31]研究一致。李治勤等^[32]研究发现,含沙量对滴头堵塞影响不显著,只对滴头堵塞之后灌水器堵死进度有影响。这与本试验存在差异,分析其中原因:其试验选取的泥沙粒径主要是大于 0.125 mm 的,即使浑水含沙量较小,颗粒依靠重力沉降,也较易堵塞灌水器,而本试验所选泥沙粒径较小(小于 0.125 mm),增大含沙量会增加彼此碰撞、黏结的机率,对某些粒径而言,易形成絮团,造成滴头堵塞。浑水滴灌条件下,随着含沙量升

高,流量降幅显著升高;较高的工作压力会导致滴灌带堵塞状况越来越严重。

3.2 模型对比分析

本研究表明,建模数据符合非线性分布规律。PPR 建模的方式属于无假定建模,充分利用数据本身有用信息和遵循数据真实规律,利用一系列岭函数之和来逼近回归函数,从而使其具有更高的拟合度。运用 SPSS 23.0 方法构建的线性回归模型原理是利用最小二乘法,要求建模数据服从正态分布、方差齐次性等^[33],常需要将数据转换处理成线性方可使用。故建议后续研究中可采用 PPR 模型这种无假定建模的方法,可有效处理高维或低维、正态或非正态、线性或非线性、独立或非独立分布的数据。

本研究通过 PPR 仿真计算获得以灌水均匀度最大和流量降幅最小的 2 组最优解,其 C_u 均符合《微灌工程技术标准》(GB/T50485—2020)中灌水均匀度大于 0.8 的规定,但为了获得唯一最优解,本文采用多目标遗传算法对 PPR 仿真计算的 2 组最优解进行验证和确定。NSGA-II 方法建模得到的是 1 组 pareto 最优解集^[34],将 PPR 仿真计算结果与 NSGA-II 建模的计算综合对比分析,最终确定唯一的最优工况。因此建议后续研究中采用 PPR 建模寻求最优工况的同时与 NSGA-II 建模的方法相结合,可增强 PPR 模型预测结果的可靠性。

由于本研究只考虑了铺设坡度范围-1%~1%,含沙量范围 1~3 g/L,工作压力范围 40~100 kPa,并未考虑三因素在此范围之外的取值对灌水均匀度和流量降幅的影响,灌水时间、泥沙粒径对滴灌带堵塞的影响本文也未考虑。后续可在探究各因素及水平对内镶贴片式滴灌带抗堵塞性能的影响时进行更加全面的研究。

4 结论

1) 各因素对该滴灌带灌水均匀度影响的排列顺序为:工作压力<铺设坡度<含沙量;对流量降幅影响的排列顺序为:铺设坡度<工作压力<含沙量。

2) 含沙量是影响灌水均匀度和流量降幅的主要因素,影响效果极其显著;工作压力对滴灌带的灌水均匀度和流量降幅的影响效果均为显著;铺设坡度对灌水均匀度影响效果显著,但对流量降幅影响不显著。

3) 使用 PPR 模型进行优化仿真计算得到该滴灌带最优工况为:铺设坡度为 0%,含沙量为 1 g/L,工作压力为 96 kPa;此条件下灌水均匀度为 0.958 5,流量降幅为 0.083 5。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 姜庆飞, 张营. 我国农业节水灌溉现状及发展对策浅析[J]. 海河水利, 2022(5): 1-4.
JIANG Qingfei, ZHANG Ying. Analysis of current situation of agricultural water-saving irrigation and development countermeasures in China[J]. Haihe Water Resources, 2022(5): 1-4.
- [2] 姜珊. 滴灌带抗堵塞性能与临界含沙水流滴灌带抗堵塞性能与临界含沙水流研究临界含沙水[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2010.
- [3] 于静静, 范世峰. 3种滴灌带流道滴头抗堵塞性能对比试验[J]. 农业工程, 2016, 6(4): 59-60.
YU Jingjing, FAN Shifeng. Comparative test of anti clogging performance of runner drop head for 3 kinds of drip tape[J]. Agricultural Engineering, 2016, 6(4): 59-60.
- [4] 吴泽广, 张子卓, 张珂萌, 等. 泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 99-108.
WU Zeguoguang, ZHANG Zizhuo, ZHANG Kemeng, et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 99-108.
- [5] 孙贯芳, 于健, 杜斌, 等. 过滤后黄河水对滴灌系统的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2015, 33(10): 901-907.
SUN Guanfang, YU Jian, DU Bin, et al. Influence of the Yellow River water filtered on drip irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(10): 901-907.
- [6] SHI K L, LU T G, ZHENG W G, et al. A review of the category, mechanism, and controlling methods of chemical clogging in drip irrigation system[J]. Agriculture, 2022, 12(2): 202.
- [7] 张新燕, 陈凤, 李华莹. 单翼迷宫贴壁式滴灌带水力性能初步试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(4): 225-228.
ZHANG Xinyan, CHEN Feng, LI Huaying. The Research of the hydraulic properties in drip irrigation tape resisting blockage[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2004, 22(4): 225-228.
- [8] 张慧. 单翼迷宫式滴灌带堵塞性能影响研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
ZHANG Hui. Study on the effect of clogging performance of drip-tape with labyrinth channel[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [9] 鞠学良, 吴普特, 朱德兰, 等. 基于流量偏差率的滴灌毛管管径简易设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(5): 14-20.
JU Xueliang, WU Pute, ZHU Delan, et al. Simplified method for designing diameter of drip irrigation laterals based on emitter flow variation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(5): 14-20.
- [10] 张林, 范兴科, 吴普特, 等. 均匀坡度下考虑三偏差的滴灌系统流量偏差率的计算[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 7-14.
ZHANG Lin, FAN Xingke, WU Pute, et al. Calculation of flow deviation rate of drip irrigation system taking three deviation rates into account on uniform slopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(4): 7-14.
- [11] LING J, SKUDARNOV P V, LIN C X, et al. Numerical investigations of liquid-solid slurry flows in a fully developed turbulent flow region[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2003, 24(3): 389-398.
- [12] WANG H, LING G, HU M Y, et al. Physical clogging characteristics of labyrinth emitters under low-quality (sand-laden water) irrigation[J]. Agronomy, 2022, 12(7): 1 615.
- [13] 罗春艳. 滴灌灌水均匀度影响因素及计算方法[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
LUO Chunyan. Influence and method of irrigation uniformity[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2014.
- [14] BOUNOUA S, TOMAS S, LABILLE J, et al. Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches[J]. Irrigation Science, 2016, 34(4): 327-342.
- [15] 赵青青. 低压供水条件下常规滴灌带水力性能研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2019.
ZHAO Qingqing. Study on hydraulic performance of drip irrigation tape under low pressure water supply[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [16] 何建新, 杨耀辉, 杨海华. 基于 PPR 无假定建模的沥青胶浆拉伸强度变化规律分析[J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(2): 189-192.
HE Jianxin, YANG Yaohui, YANG Haihua. Analysis of variation law of tensile strength for asphalt mortar based on PPR no assumption modeling[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2016, 27(2): 189-192.
- [17] YE H Chen-Ta. An improved NSGA2 to solve a bi-objective optimization problem of multi-state electronic transaction network[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2019, 191: 106 578.
- [18] 贺莉, 刘庆怀. 多目标优化理论与连续化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
HE Li, LIU Qinghui. Multi-objective optimization theory and continuous method[M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [19] 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.
- [20] 战国隆. 新型高效内镶贴片式滴头研制[J]. 安徽农业科学, 2015, 43(31): 344-345.
ZHAN Guolong. New and efficient research within embedded emitter[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2015, 43(31): 344-345.
- [21] 马晓鹏, 龚时宏, 王建东, 等. 低压条件下滴灌带灌水均匀系数试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(4): 6-10.
MA Xiaopeng, GONG Shihong, WANG Jiandong, et al. Uniformity coefficient of drip irrigation tapes under low operating pressure[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(4): 6-10.
- [22] 王建众, 牛文全, 吴普特, 等. 滴灌毛管灌水均匀度试验研究[J]. 人民黄河, 2008, 30(3): 56-57, 68.
WANG Jianzhong, NIU Wenquan, WU Pute, et al. Experimental study on uniformity of capillary irrigation under drip irrigation[J]. Yellow River, 2008, 30(3): 56-57, 68.
- [23] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 塑料节水灌溉器材 第3部分: 内镶式滴灌管及滴灌带: GB/T 19812.3—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 常凤生, 张顶山. 关于滴灌均匀度问题的探讨[J]. 东北水利水电, 2003, 21(12): 38-39, 56.
CHANG Fengsheng, ZHANG Dingshan. Discussion on uniformity of drip irrigation[J]. Water Resource & Hydropower of Northeast China, 2003, 21(12): 38-39, 56.
- [25] 郭穗勋, 黄裕波. 正交试验层次分析法[J]. 大学数学, 2004, 20(1):

- 114-117.
GUO Suixun, HUANG Rongbo. The AHP method of orthogonal trial[J]. College Mathematics, 2004, 20(1): 114-117.
- [26] MOHAMMAD Bannayan, GERRIT Hoogenboom. Using pattern recognition for estimating cultivar coefficients of a crop simulation model[J]. Field Crops Research, 2009, 111(3): 290-302.
- [27] 胡完. 复杂资料综合投影寻踪回归分析法与综合传统回归分析法的比较研究[D]. 北京: 中国人民解放军军事医学科学院, 2017.
HU Wan. Comparative study of comprehensive projection tracing regression analysis method and comprehensive traditional regression analysis method for complex data[D]. Beijing: Academy of Military Medical Sciences, Chinese People's Liberation Army, 2017.
- [28] 宫经伟, 陈瑞, 曹国举, 等. 基于 PPR 无假定建模的混凝土导热系数计算模型[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 948-954.
GONG Jingwei, CHEN Rui, CAO Guoju, et al. Model of thermal conductivity for concrete based on projection pursuit regression non-hypothetical modeling technology[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 948-954.
- [29] 孙超. 滴灌带流量均匀度实验与山地梯田滴灌系统的实例分析[D]. 太谷: 山西农业大学, 2016.
SUN Chao. Flow uniformity of drip experiment and mountain analysis of the dropper system[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016.
- [30] 吴泽广, 张子卓, 张珂萌, 等. 泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(7): 99-108.
WU Zeguang, ZHANG Zizhuo, ZHANG Kemeng, et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7): 99-108.
- [31] 刘璐, 牛文全. 滴灌灌水器流道堵塞及防治研究进展[J]. 农机化研究, 2012, 34(4): 13-18.
LIU Lu, NIU Wenquan. Progress in research on the clogging and prevention of flow path in drip irrigation emitter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(4): 13-18.
- [32] 李治勤, 陈刚, 杨晓池, 等. 迷宫灌水器中泥沙淤积特性研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(1): 229-234.
LI Zhiqin, CHEN Gang, YANG Xiaochi, et al. Study on sedimentation characteristics in labyrinth emitter[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2009, 37(1): 229-234.
- [33] 李世玲. 基于投影寻踪和遗传算法的一种非线性系统建模方法[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(4): 22-28.
LI Shiling. A nonlinear system modeling method based on projection pursuit and genetic algorithm[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(4): 22-28.
- [34] 邴其春, 龚勃文, 林赐云, 等. 基于粒子群优化投影寻踪回归模型的短时交通流预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2016, 47(12): 4 277-4 282.
BING Qichun, GONG Bowen, LIN Ciyun, et al. Short-term traffic flow prediction method based on particle swarm optimization projection pursuit regression model[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2016, 47(12): 4 277-4 282.

Optimization of Drip Irrigation Belt with Interior Embedded Patches Using Orthogonal Results Analysis

TAO Hongfei^{1,2}, LIU Yao^{1,2}, TAO Juanqin^{1,2}, ZHOU Liang³, LI Qiao^{1,2},
MAHMUJIANG·Ahmat^{1,2}, JIANG Youwei^{1,2}

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

2. Xinjiang Key Laboratory of Water Conservancy Engineering Safety and Water Disaster Control, Urumqi 830052, China;

3. China Construction Xinjiang Construction Engineering, Chengdu 610000, China)

Abstract: 【Objective】 Embedding patches in drip irrigation belts is a technique to improve flow rate and irrigation uniformity. The purpose of this paper is to investigate the impact of various factors on performance of the embedded patches in improving irrigation uniformity. 【Method】 Using uniform orthogonal design of experiments with three levels of factors and experimental study, we analyzed the influence of sediment content, working pressure and slope on performance of the irrigation belt. The relationship between change in these factors and irrigation uniformity was analyzed using the PPR model, NSGA-II model and linear regression models. 【Result】 ①The influence of the three factors on irrigation uniformity and flow rate reduction was ranked in the following order based on their significance: sediment content>land slope>working pressure. Analytic hierarchy process and range analysis both showed that sediment content had the greatest influence on irrigation uniformity and flow rate reduction. ②Regression showed that irrigation uniformity and flow rate reduction were linearly correlated to flow rate, with the standard error for the former and the latter being 19.15% and 14.81%, respectively. ③The projection tracking regression for change in irrigation uniformity and flow rate reduction showed that the standard error for the irrigation uniformity and flow rate reduction was 2.98% and 2.42%, respectively. 【Conclusion】 The PPR model was better than multiple regression model for predicting irrigation uniformity and flow rate reduction. Its results are consistent with that of NSGA-II. For the three factors we considered, the optimal working conditions for the drip irrigation belt with embedded patches were slope: 0%, sediment content: 1 g/L, working pressure: 96 kPa, under which the irrigation uniformity was 0.958 5 and the flow rate reduction was 0.083 5.

Key words: inner patch drip irrigation belt; irrigation uniformity; flow reduction; linear regression models; PPR; NSGA-II

责任编辑: 白芳芳