

基于PPR和NSGA-II的泵前微压过滤器 水力与过滤性能研究

陶洪飞^{1,2}, 李琦^{1,2}, 周洋³, 马合木江·艾合买提^{1,2*}, 李巧^{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.新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049)

摘要: 【目的】探究泵前微压过滤器的性能。【方法】开展5组流量(2~8 m³/h)、5组含沙量(0.5~2.0 g/L)、3组滤网过滤面积(1 105、1 582、2 060 cm²)和4组分水器型式(不加、1型、2型、3型)的物理模型试验,采用投影寻踪回归分析法(PPR)、多目标遗传算法(NSGA-II),建立水头损失、截沙质量和总过滤效率的预测模型,探究各指标的影响因素排序,确定泵前微压过滤器的最佳运行工况。【结果】影响泵前微压过滤器水头损失的因素排序为进水流量>含沙量>滤网过滤面积;影响截沙质量的因素排序为含沙量>滤网过滤面积>进水流量;影响总过滤效率的因素排序为滤网过滤面积>含沙量>进水流量;以相对误差≤10%作为判定标准,建立的截沙质量和总过滤效率PPR预测模型合格率为100%,模型精度较高,但水头损失PPR预测模型合格率仅为70%,模型不可靠。本试验范围内泵前微压过滤器的最佳运行工况为:含沙量2 g/L、进水流量7 m³/h、滤网过滤面积2 060 cm²。【结论】PPR预测模型对截沙质量和总过滤效率的预测精度较高,对水头损失的预测误差较大,在后期可用量纲分析与多元回归相结合预测水头损失、截沙质量和总过滤效率。

关键词: 过滤器; 水头损失; 模型; 水力性能; 过滤性能

中图分类号: S275.6

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023480

陶洪飞, 李琦, 周洋, 等. 基于PPR和NSGA-II的泵前微压过滤器水力与过滤性能研究[J]. 灌溉排水学报, 2024, 43(5): 30-37, 78.

TAO Hongfei, LI Qi, ZHOU Yang, et al. Efficiency and hydraulic performance of the micro-pressure filter in front of the pump studied using PPR and NSGA-II[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2024, 43(5): 30-37, 78.

0 引言

【研究意义】微灌作为新型的农业节水灌溉方式,其堵塞问题严重影响着灌溉用水效率。过滤器可以保障微灌系统稳定运行并且可以防止系统堵塞^[1],而过滤器的运行特性在很大程度上影响微灌系统的工作效率和寿命,因此探明过滤器水力性能和过滤性能对微灌系统的发展有重大意义^[2]。

【研究进展】微灌常用泵后过滤器主要有砂石、网式、叠片过滤器等^[3-7],国内外专家学者对微灌用泵后过滤器水力性能以及过滤性能进行了大量研究。Puig-Bargués等^[8]、Duran-Ros等^[9]、WU等^[10]和Zong等^[11]利用量纲分析法建立了过滤器水头损失的计算模型,且所建模型均有良好的预测效果。Yurdem等^[7]指出适当增加进出口尺寸,能有效降低

网式过滤器水头损失。吴玉秀等^[12]、谢炎等^[13]和李曼等^[14-15]研究发现,水头损失、进水流量等因素影响网式过滤器的排污性能和过滤性能。董文楚^[16]、Mesquita等^[17]和Elbana等^[18]研究了不同因素对砂石过滤器水头损失的影响,给出了初始水头损失计算式,建立了计算水头损失的数学模型;张文正等^[19]研究发现,过滤速度与水头损失正相关,过滤速度对过滤后水样浊度的影响较弱;Deus等^[20]探讨了砂的粒径、过滤流量和反冲洗流量对出水水质和过滤性能的影响;李楠等^[21]通过试验探究了微灌用叠片过滤器水力性能和过滤性能,结果表明当加沙量到一定程度并迅速达到或超过安全压差时,水头损失急剧增加;袁寄望等^[22]通过回归分析的方法确定了叠片过滤器在不同条件下水头损失的计算方法,分析了不同粒径砂粒水头损失变化的原因;徐鑫等^[23]和王钦等^[24]将传统叠片过滤器和离散型流道结构过滤器进行对比,得出离散型流道较直线型流道有更好的水力和过滤性能。上述砂石、网式及叠片过滤器都属于泵后过滤器,它们在微灌系统首部枢纽中发挥着重要作用,但泵后过滤器是在强压条件下完成过滤和冲洗工作,存在水头损失

收稿日期: 2023-10-16 修回日期: 2024-02-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(52369013)

作者简介: 陶洪飞(1987-),男,副教授,博士生导师,主要从事节水新技术与新设备以及计算水力学研究。E-mail: 304276290@qq.com

通信作者: 马合木江·艾合买提(1986-),男,副教授,硕士生导师,主要从事农业节水及环境影响的研究。E-mail: 1027903576@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

大、能耗高、造成大量碳排放等问题。随着灌溉技术的发展，专家更注重以低能耗、低污染、低排放、高效能、高效益为目标的灌溉技术^[25-26]。因此，研发了一种安装于加压水泵之前，利用沉沙池尾部 0~1 m 的水头进行自然条件下过滤和冲洗操作的过滤器即泵前微压过滤器。该过滤器采用并联方式提高污泥处理能力，可以根据灌溉面积确定过滤器大小，与泵后过滤器相比，具有损失小、功耗低、运行稳定、效率高等优点^[27]。目前已有专家学者对泵前微压过滤器的水力和过滤性能进行了研究。Tao 等^[28]考虑了进水流量、含沙量、分水器类型以及滤网面积 4 个因素开展了泵前微压过滤器的室内物理模型试验，并用量纲分析和多元线性回归相结合的方法建立了水头损失的预测模型，经验证模型可靠；Li 等^[29]利用同样方法建立了截沙质量和总过滤效率的预测模型；陶洪飞等^[30]利用极差分析得到泵前微压过滤器的最佳运行工况，探究了影响过滤器水力和过滤性能的因素排序。

【切入点】以往研究最佳运行工况时未考虑各指标间相互影响关系，缺乏对泵前微压过滤器水力与过滤性能的综合分析。【拟解决的关键问题】鉴于此，基于室内泵前微压过滤器的物理模型试验，建立关键指标的预测模型，并探究其影响因素排序，综合分析过滤器的最佳运行工况。

1 材料与方法

1.1 试验装置与原理

图 1 为泵前微压过滤器循环系统的各组成结构，图 2 为分水器的种类，表 1 为试验系统中的主要部件

表1 试验系统主要部件特性

Tab.1 Characteristics of the main components of the test system

结构名称	大小描述
蓄水池	500 mm×300 mm×600 mm (长×宽×高)
过滤池	505/705/915 mm×300 mm×430 mm (长×宽×高) 对应的过滤面积分别为 1 105、1 582、2 060 cm ²
分水器	分水器由头部、中段和尾部组成。头部长 60 mm，中段长 300 mm，尾部长 60 mm。3 种分水器的区别在于头部和尾部的形状。 1 型分水器的头部通过旋转一条拟合曲线形成；2 型分水器的头部通过旋转椭圆曲线形成，其中长轴 120 mm、短轴 40 mm； 3 型分水器头部的形状为上下底半径分别为 5、20 mm 的圆台旋转成体。
过滤器入口	直径 50 mm
过滤器出口	直径 50 mm

1.2 试验设备和材料

泵前微压过滤器由过滤池和不锈钢滤网组合而成，试验供水装置为一个近似的圆筒。本研究根据滴灌系统中沉沙池尾部沉积物颗粒的大小配置试验用的沙样。使用漏斗加沙，并使用搅水泵混合污泥颗粒。试验设备主要有电子天平、搅水泵、泥浆泵、电热恒温箱、红外测温仪及手持式超声波流量计等。试验沙样的粒径分布如图3所示，其中粒径≤1 mm泥沙占比为100%，≤0.5 mm泥沙占比为99.96%，≤0.25 mm泥沙占比为97.83%，≤0.1 mm泥沙占比为3.90%，≤0.075 mm泥

特性。泵前微压过滤器的工作原理为地表水中的泥沙颗粒首先通过沉沙池沉降，然后通过其末端的出口管流入过滤器内进行过滤。在过滤器运行过程中分为过滤和排污 2 个阶段。过滤过程：灌溉水流入过滤器并从内部过滤到外部，过滤后的清水流入过滤池，泥沙等污物杂质被过滤网拦截。排污过程：当滤网堵塞到一定程度时打开排污阀进行排污，在沉沙池自然水头的作用下排出沙子。

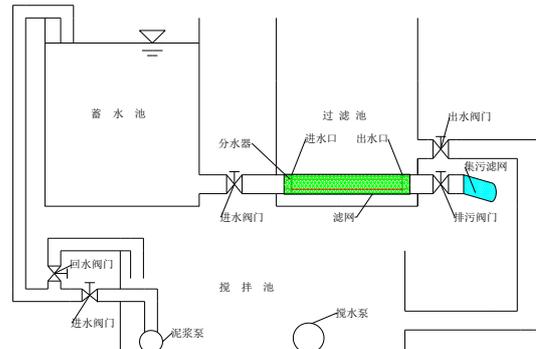


图1 泵前微压过滤器循环系统示意

Fig.1 Schematic diagram of the micro-pressure filter circulation system before the pump

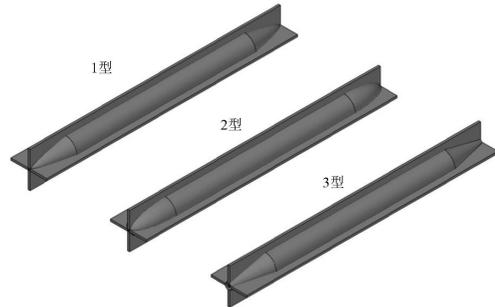


图2 分水器型式示意图

Fig.2 Schematic diagram of water divider type

沙占比为2.83%。

1.3 试验步骤及评价指标

首先关闭排污阀，调节进水阀至试验所需的流量阈值，然后在搅拌池内加入对应比例的水和沙子，并打开搅水泵使其均匀混合，泥浆泵将含沙水吸入过滤系统中并开始过滤，试验期间记录蓄水池和过滤池中的水位高度，同时提取出水管尾部的含沙水样，最后通过烘干法测量出水含沙量。试验结束后，称量积聚在过滤网中的泥沙颗粒和沉积在过滤池底部的泥沙质量。每组浑水试验结束后，对试验装置进行清洗。

本研究选择水头损失 h_w 、截沙质量 R_m 、总过滤效率 η 作为评价指标,各指标的计算式参考文献[27]。

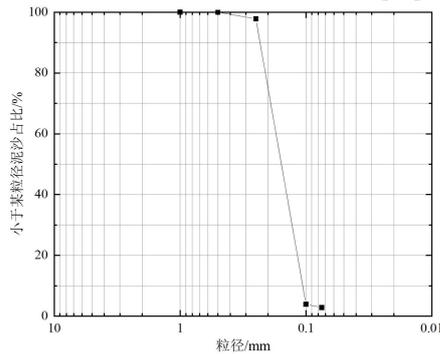


图3 沙样粒径分布

Fig.3 Size distribution of sand samples

1.4 研究方法

1.4.1 投影寻踪回归分析法

投影寻踪回归(Projection Pursuit Regression, PPR)是一种在没有正态假定的前提下通过对高维数据进行投影,实现降维以找寻有效反映数据结构特征的无假定建模技术^[31]。不同分水器型式对水头损失影响不显著,对截沙质量和总过滤效率虽影响显著,但组间差异不明显^[27],故在后面建立预测模型时未将分水器型式考虑在内。设 x 为 p 维自变量, y 为因变量,则 PPR 模型可表示为:

$$\hat{y}=E(y|x_1,x_2,\dots,x_p)=\bar{y}+\sum_{i=1}^M\beta_i f_i(\sum_{n=1}^p\alpha_{in}x_n), \quad (1)$$

其中, f_i 为第 i 个岭函数, $Ef_i=0$, $Ef_i^2=1$, $\sum_{n=1}^p\alpha_{in}^2=1$ 。

PPR 模型使用多个岭函数之和来逼近回归函数,并通过降维和逐步优化来评估岭函数 f_i 以确定投影方向 α_m 和模型的贡献权重系数 β_i ,最终决定回归函数,从而使满足下列极小化规则:

$$L_2=\sum_{i=1}^Q W_i E\left[Y_i-EY_i-\sum_{i=1}^{M_u}\beta_i f_i\left(\sum_{n=1}^p\alpha_{in}X_n\right)\right]^2=\min. \quad (2)$$

PPR 模型求解步骤^[32]:

①选择初始投影方向 α ;

②对 $\{X_i\}_n$ 进行线性投影得到 $\alpha^T X_i$,对 $(\alpha^T X_i, Y_i)$ 用平滑方式确定岭函数 $f_\alpha(\alpha^T X)$, $i=1, L, n$;

③使式 $\sum_{i=1}^n (y_i - f_\alpha(\alpha^T X_i))^2$ 最小的 α 为 α_1 ,重复步骤

②,直到2次误差不再改变,即可确定出 α_1 和 $f_1(\alpha_1^T X)$;

④将第1次计算得到的拟合残差 $r_1(X)=Y-f_1(\alpha_1^T X)$ 代替 Y ,重复步骤①—步骤③,即可得到 α_2 和 $f_2(\alpha_2^T X)$;

⑤重复步骤④,计算 $r_2(X)=r_1(X)-f_2(\alpha_2^T X)$ 代替 $r_1(X)$,直到获得第 M 个 α_M 和 $f_M(\alpha_M^T X)$,使 $\sum_{i=1}^n r_i^2$ 不再减少或满足某一精度为止;

⑥通过返回拟合,确定出最后的 m 个 α 、 f ;

⑦计算 $f(x)=\sum_{m=1}^M f_m(\alpha_m X)$ 。

1.4.2 多目标遗传算法

多目标遗传算法(NSGA-II)是最具影响力和应

用最广泛的遗传算法之一,它将不同影响因素之间以及各水力指标之间的相互关系综合考虑,求得使各目标函数均达到最优时所对应的解。多目标优化模型通常包括参数变量、约束条件和目标函数3个方面,结合评价指标和影响因素,建立多目标优化模型,寻求 Pareto 最优解集。

1.5 试验设计

选取进水流量、含沙量、滤网过滤面积、分水器型式为研究因素,以水头损失、截沙质量、总过滤效率为评价指标设计正交试验。选取的因素及水平如下:进水流量 Q (2、4、6、7、8 m³/h),含沙量 S (0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 g/L),分水器型式 C (不加、1型、2型、3型),滤网过滤面积 A (1 105、1 582、2 060 cm²)取3个水平,把空白列当作1个误差因素,正交试验详见表2。

利用投影寻踪回归分析(PPR)建立水头损失、截沙质量和总过滤效率的预测模型,探究各影响因素的排序,利用 NSGA-II 探究过滤器的最佳运行工况。

表2 正交试验设计

Tab.2 Orthogonal experimental design

试验编号	滤网过滤面积/cm ²	分水器型式	进水流量/(m ³ h ⁻¹)	含沙量/(g L ⁻¹)	空白列
1	1 582	不加	7	0.5	2
2	1 582	3型	8	1.5	1
3	1 582	2型	7	1.0	3
4	1 105	3型	7	2.0	5
5	1 105	1型	8	2.0	2
6	1 582	不加	8	1.0	5
7	1 582	2型	4	2.0	1
8	2 060	不加	4	1.5	5
9	1 105	不加	6	1.0	1
10	1 582	不加	4	2.5	2
11	1 105	不加	2	0.5	1
12	2 060	不加	6	2.0	3
13	1 105	不加	7	1.5	4
14	1 105	3型	4	0.5	3
15	1 582	1型	6	0.5	5
16	1 105	2型	2	2.5	5
17	2 060	1型	7	2.5	1
18	2 060	3型	2	1.0	2
19	1 582	3型	6	2.5	4
20	1 105	不加	8	2.5	3
21	2 060	2型	8	0.5	4
22	1 582	不加	2	2.0	4
23	1 105	1型	4	1.0	4
24	1 105	2型	6	1.5	2
25	1 582	1型	2	1.5	3

2 结果与分析

2.1 基于投影寻踪回归分析(PPR)预测模型的建立

严格按照正交试验的设计开展室内试验,表3所示为正交试验结果。

针对正交试验结果,选择20组试验数据进行建

模，5 组数据进行模型验证。利用 PPR 分别对水头损失 (h_w)、截沙质量 (R_m)、总过滤效率 (η) 3 个考核指标进行计算分析，选择反应投影灵敏度的光滑系数为 0.5，影响因素个数取 3，因变量个数 Q 取 1，投影

次数 M 取 5，样本数据 N 取 20，由于 $MU < M$ ，故 MU 取 3。因此所建模型参数为： $N=20, P=3, Q=1, M=5, MU=3$ 。

表3 正交试验结果

Tab.3 Orthogonal test results

试验编号	滤网过滤面积/cm ²	分水器型式	进水流量/(m ³ h ⁻¹)	含沙量/(g L ⁻¹)	空白列	截沙质量/g	总过滤效率	水头损失/m
1	1582	不加	7	0.5	2	105.6	0.920	0.118
2	1582	3型	8	1.5	1	323.3	0.895	0.155
3	1582	2型	7	1.0	3	212.6	0.908	0.135
4	1105	3型	7	2.0	5	420.8	0.860	0.198
5	1105	1型	8	2.0	2	400.1	0.844	0.268
6	1582	不加	8	1.0	5	201.1	0.893	0.152
7	1582	2型	4	2.0	1	426.3	0.882	0.126
8	2060	不加	4	1.5	5	309.6	0.891	0.106
9	1105	不加	6	1.0	1	199.2	0.863	0.141
10	1582	不加	4	2.5	2	497.4	0.859	0.133
11	1105	不加	2	0.5	1	103.0	0.895	0.046
12	2060	不加	6	2.0	3	409.6	0.885	0.139
13	1105	不加	7	1.5	4	293.4	0.847	0.183
14	1105	3型	4	0.5	3	106.8	0.916	0.079
15	1582	1型	6	0.5	5	106.9	0.941	0.116
16	1105	2型	2	2.5	5	500.1	0.844	0.093
17	2060	1型	7	2.5	1	521.4	0.885	0.200
18	2060	3型	2	1.0	2	215.2	0.930	0.068
19	1582	3型	6	2.5	4	523.0	0.891	0.182
20	1105	不加	8	2.5	3	475.9	0.830	0.251
21	2060	2型	8	0.5	4	107.2	0.956	0.136
22	1582	不加	2	2.0	4	404.7	0.866	0.078
23	1105	1型	4	1.0	4	205.3	0.895	0.116
24	1105	2型	6	1.5	2	301.5	0.855	0.185
25	1582	1型	2	1.5	3	317.5	0.902	0.089

在 PPR 建模过程中得到水头损失、截沙质量及总过滤效率 3 个考核指标的岭函数权重系数 β 和投影方向依次如式 (3) 一式 (8) 所示。分别将各考核指标岭函数相应的权重系数 β 和投影方向的向量式代入式 (1) 中即可得到最终的计算模型^[33]。

$$\beta_1 = (0.905\ 3, 0.292\ 0, 0.117\ 2), \quad (3)$$

$$\begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_2 \\ \vec{\alpha}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.413\ 4 & 0.910\ 5 & -0.000\ 9 \\ -0.209\ 9 & -0.977\ 7 & 0.003\ 1 \\ -0.277\ 0 & -0.960\ 9 & -0.000\ 3 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

$$\beta_1 = (0.983\ 1, 0.049\ 0, 0.057\ 2), \quad (5)$$

$$\begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_2 \\ \vec{\alpha}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.007\ 8 & 0.999\ 9 & 0.000\ 04 \\ -0.588\ 4 & 0.808\ 6 & 0.002\ 6 \\ 0.871\ 2 & 0.490\ 9 & -0.001\ 7 \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$\beta_1 = (0.797\ 1, 0.162\ 5, 0.374\ 7), \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} \vec{\alpha}_1 \\ \vec{\alpha}_2 \\ \vec{\alpha}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.083\ 3 & -0.996\ 5 & 0.000\ 8 \\ 0.032\ 1 & 0.999\ 5 & -0.001\ 0 \\ -0.566\ 1 & 0.824\ 4 & 0.002\ 6 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

对比各指标的 PPR 预测值与实测值可知，20 组样本数据中水头损失实测值与预测值的相对误差有 6 组大于 10%，而截沙质量和总过滤效率的相对误差均 <10%，由此可见，若以相对误差 ≤ 10% 为合格率判定标准，20 组样本数据的合格率为 70%，详见表 4。

将事先预留的 5 组检验样本代入已建立的 PPR 模型中计算预测值 (表 5)。截沙质量和总过滤效率预测模型的最大相对误差为 5.99%，最小相对误差为 0.60%；而水头损失预测模型最大相对误差为 56.99%，最小相对误差为 2.83%，若以相对误差 ≤ 10% 为判定标准，截沙质量和总过滤效率预测模型的合格率为 100%，水头损失预测模型的合格率仅为 60%，此结果表明 PPR 对于截沙质量和总过滤效率的预测精度较高，而对于水头损失的预测误差偏大，这说明此模型不能对水头损失进行良好的预测。

表4 PPR模型回归分析结果

Tab.4 Results of regression analysis of PPR model

试验编号	水头损失/m			截沙质量/g			总过滤效率		
	实测值	预测值	相对误差/%	实测值	预测值	相对误差/%	实测值	预测值	相对误差/%
1	0.118	0.123	4.24	105.6	101.3	4.07	0.920	0.920	0.00
2	0.155	0.166	7.10	323.3	313.7	2.97	0.895	0.887	0.89
3	0.135	0.128	5.19	212.6	210.5	0.99	0.908	0.911	0.33
4	0.198	0.221	11.62	420.9	409.5	2.71	0.860	0.852	0.93
5	0.268	0.241	10.07	400.1	403.4	0.82	0.844	0.838	0.71
6	0.152	0.147	3.29	201.1	204.2	1.54	0.893	0.896	0.34
7	0.126	0.114	9.52	426.3	410.4	3.73	0.882	0.874	0.91
8	0.068	0.068	0.00	215.2	213.4	0.84	0.930	0.931	0.11
9	0.141	0.149	5.67	199.2	198.0	0.60	0.863	0.871	0.93
10	0.133	0.141	6.02	497.4	509.2	2.37	0.859	0.860	0.12
11	0.046	0.052	13.04	103.0	106.4	3.30	0.895	0.907	1.34
12	0.139	0.136	2.16	409.6	413.8	1.03	0.885	0.893	0.90
13	0.183	0.190	3.83	293.4	302.6	3.14	0.847	0.855	0.94
14	0.079	0.087	10.13	106.8	105.1	1.59	0.916	0.906	1.09
15	0.116	0.107	7.76	205.3	206.9	0.78	0.895	0.888	0.78
16	0.089	0.077	13.48	317.5	311.5	1.89	0.902	0.889	1.44
17	0.078	0.090	15.38	404.7	410.5	1.43	0.866	0.873	0.81
18	0.136	0.142	4.41	107.2	111.6	4.10	0.956	0.956	0.00
19	0.185	0.177	4.32	301.5	307.1	1.86	0.855	0.865	1.17
20	0.116	0.105	9.48	106.9	108.6	1.59	0.941	0.934	0.74

表5 PPR模型预测精度的验证

Tab.5 Verification of prediction accuracy of PPR model

试验编号	水头损失/m			截沙质量/g			总过滤效率		
	实测值	预测值	相对误差/%	实测值	预测值	相对误差/%	实测值	预测值	相对误差/%
1	0.093	0.146	56.99	500.1	506.0	1.18	0.844	0.860	1.90
2	0.106	0.103	2.83	309.6	314.2	1.49	0.891	0.911	2.24
3	0.200	0.166	17.00	521.4	514.3	1.36	0.885	0.877	0.90
4	0.251	0.241	3.98	475.9	504.4	5.99	0.830	0.835	0.60
5	0.182	0.188	3.30	523.0	511.7	2.16	0.891	0.861	3.31

表6为进水流量 Q 、含沙量 S 、滤网过滤面积 A 对水头损失 h_w 、截沙质量 R_m 和总过滤效率 η 的影响权重。相对权重越大,表明该因子对研究结果的影响程度越大。由表6可知,影响水头损失的因素排序为:进水流量>含沙量>滤网过滤面积;截沙质量的影响因素排序为:含沙量>滤网过滤面积>进水流量;总过滤效率的影响因素排序为:滤网过滤面积>含沙量>进水流量。由于水头损失为水流在运动过程中单位质量液体的机械能损失,随着进水流量的增大机械能损失即会增大,随水流进入过滤器内的泥沙颗粒也会增多,水流运动的粘滞力增大,从而产生更大的能量损失,因此进水流量为影响水头损失的主要因素。当在浑水条件下,随着水流携沙量逐渐增多,短时间内加快了滤网的堵塞,引起有效过滤面积急剧减少,使得大量泥沙淤积在滤网内,同时引起局部水头损失急剧上升。因此过滤器的水头损失除了与过滤流量有关,与含沙情况也有很大关系,这些因素主要决定了有效过水面积减小的快慢程度,也就决定了水头损失增加的快慢程度,因此滤网过滤面积对水头损失也有一定影响。对于过滤器的截沙质量来说,含沙量和滤网过滤面积也

直接影响了滤网截留泥沙质量,因此含沙量和滤网过滤面积为主要影响因素。当滤网面积增大时,在相同流量和含沙量条件下滤网的堵塞面积相对更小,从而过滤器具有更高的过滤效率,而含沙量的增大会引起滤网快速堵塞,导致其过滤效率降低。

表6 影响因素的相对权重

Tab.6 Relative weights of influencing factors

试验因素	相对权重		
	h_w	R_m	η
$Q/(m^3 h^{-1})$	1	0.061	0.632
$S/(g L^{-1})$	0.649	1	0.655
A/cm^2	0.514	0.089	1

将前人^[28-29]基于量纲分析结合多元回归分析所建立的泵前微压过滤器水头损失、截沙质量和过滤效率预测模型的精度验证结果与事先预留的5组样本数据对PPR模型的精度检验结果进行对比(表7)。由表7可知,用量纲分析结合多元回归分析建立的水头损失预测模型最大相对误差仅为5.67%,预测精度较PPR预测模型高,2种方法建立的截沙质量和总过滤效率预测模型相对误差<10%,为保证结果的准确性,本研究选择量纲分析结合多元回归建立的预测模型作为NSGA-II的函数模型。

表7 多元回归与PPR模型预测相对误差

Tab.7 Prediction relative error of multiple regression and PPR model

模型	水头损失		截沙质量		总过滤效率	
	最大值	最小值	最大值	最小值	最大值	最小值
多元回归分析	5.67	2.09	5.31	0.16	3.13	0.29
PPR	56.99	2.83	5.99	1.18	3.31	0.60

2.2 基于 NSGA-II 对泵前微压过滤器最优工况的分析

本研究基于上述的 NSGA-II 函数模型，建立多目标优化模型：

1) 参数变量：含沙量 (S)、进水流量 (Q)、滤网过滤面积 (A)；

2) 约束条件： $s.t.\{0.5\text{ g/L} \leq S \leq 2.0\text{ g/L}; 2\text{ m}^3/\text{h} \leq Q \leq 8\text{ m}^3/\text{h}; 1\ 861.4 \leq A \leq 2\ 060\text{ cm}^2\}$ 。

3) 水头损失 (h_w) 越小说明在流动过程中的能量损耗越小；截沙质量 (R_m) 越大说明经过滤网过滤后的水所含沙粒等杂质越少；过滤效率 (η) 越大，表明微压过滤冲洗池的过滤效果越好，下列为目标函数： $goal.\{\min h_w(S, Q, A), \max R_m(S, Q, A), \max \eta(S, Q, A)\}$ 。

(9)

图 4 为用 NSGA-II 对优化模型进行求解得到 Pareto 最优前沿。最优前沿上的所有解都视为最优解，而每个解对应的工况均为最优工况。表 8 为 Pareto 前沿对应的解集，20 组最优解中流量介于 2.06~7.83 m^3/h ，含沙量介于 0.62~2.50 m^3/h ，滤网过滤面积介于 1 861.4~2 057.4 cm^2 ，所对应的水头损失介于 0.014 0~0.029 6 m，截沙质量介于 0.332 2~0.499 9 kg，总过滤效率介于 81.00%~84.79%。由于实际工程会考虑各指标之间的相互影响关系，即水头损失要更小，同时保证更高的截沙质量和总过滤效率，因此在选择

最佳工作条件时综合考虑这 3 个指标。从以上结果可以看出，水头损失的分布相对集中，水头损失最大值与最小值之差在 0.015 6 之内，因此优先关注截沙质量和总过滤效率，在此基础上选择相对较小的水头损失。从表 8 可以看出，当进水流量为 7.07 m^3/h 、含沙量为 2.26 g/L、滤网过滤面积为 1 997.3 cm^2 时，其截沙质量、过滤效率均达到最大值，分别为 0.499 9 kg、84.79%。此时的水头损失为 0.029 0 m，水头损失并未达到最小值 0.014 0 m，由于适当增大滤网过滤面积会有更大的截沙质量和总过滤效率^[27]，较小的进水流量和含沙量会降低过滤器的水头损失^[30]，故经过综合分析最终确定本试验范围内泵前微压过滤器的最优运行工况为进水流量 7 m^3/h 、含沙量 2 g/L、滤网过滤面积 2 060 cm^2 。

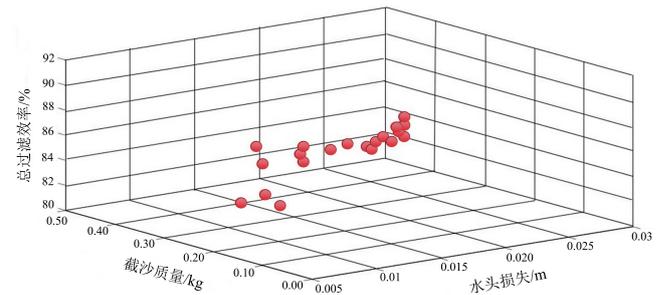


图4 Pareto最优解集分布图

Fig.4 Distribution of Pareto optimal solution sets

表8 Pareto最优解集

Tab.8 Pareto optimal solution set

解	进水流量/ $(\text{m}^3\ \text{h}^{-1})$	含沙量/ $(\text{g}\ \text{L}^{-1})$	滤网过滤面积/ cm^2	水头损失/m	截沙质量/kg	总过滤效率	评价函数值
1	2.06	1.54	1995.8	0.014 0	0.399 2	0.810 0	-0.014 0
2	2.24	2.50	2 057.4	0.016 1	0.332 2	0.811 6	-0.016 1
3	2.07	1.12	2 031.8	0.017 6	0.411 5	0.811 3	-0.017 6
4	2.30	1.20	1995.9	0.019 4	0.494 9	0.833 3	-0.019 4
5	3.64	0.62	2 018.1	0.021 0	0.513 0	0.821 3	-0.021 0
6	2.70	1.45	2 017.8	0.022 5	0.488 9	0.826 4	-0.022 5
7	2.35	2.16	2 035.7	0.022 1	0.483 1	0.811 0	-0.022 1
8	3.25	1.40	2 053.5	0.023 7	0.480 3	0.820 8	-0.023 7
9	2.26	2.49	1 220.6	0.025 6	0.477 0	0.819 5	-0.025 6
10	5.62	0.79	1 952.3	0.027 7	0.473 6	0.818 5	-0.027 7
11	5.43	1.00	2 044.0	0.027 4	0.480 1	0.812 5	-0.027 4
12	3.67	2.50	2 037.8	0.028 5	0.441 3	0.815 4	-0.028 5
13	7.54	0.70	1 986.1	0.029 3	0.427 5	0.824 9	-0.029 3
14	4.54	1.77	1 861.4	0.029 4	0.413 9	0.822 4	-0.029 4
15	5.79	1.68	1 928.3	0.029 1	0.498 9	0.827 1	-0.029 1
16	7.04	1.46	2 028.4	0.029 6	0.461 1	0.826 5	-0.029 6
17	7.83	1.60	2 046.7	0.029 1	0.485 7	0.833 4	-0.029 1
18	7.14	2.00	1 999.9	0.029 5	0.447 0	0.823 7	-0.029 5
19	7.07	2.26	1 997.3	0.029 0	0.499 9	0.847 9	-0.029 0
20	7.11	2.43	2 048.7	0.029 3	0.429 8	0.826 9	-0.029 3

3 讨论

3.1 泵前微压过滤器的水力与过滤性能分析

过滤效率和滤网截沙质量是评价过滤器过滤性

能的重要指标。Li 等^[29]建立了泵前微压过滤器截沙质量和总过滤效率的预测模型，其 R^2 均大于 0.889，截沙质量预测模型的相对误差最大为 5.31%，最小为

0.16%；过滤效率预测模型的相对误差最大为 3.13%，最小为 0.29%；本研究用选取的 20 组试验数据建立的 PPR 预测模型中，截沙质量预测值的最大相对误差为 4.10%，最小相对误差为 0.60%；过滤效率预测值的最大相对误差为 1.44%，最小相对误差为 0%。这说明 PPR 对于截沙质量和总过滤效率的预测更准确，能够很好地对高维数据进行处理，虽然预测结果存在一定程度的误差，但在绝大多数情况下具有较精准的预测；王亮等^[32]、姜春萌等^[34]、宫经伟等^[35]认为 PPR 无假定建模技术具有较高精度和较好的稳定性，这与本研究结果一致。水头损失是评价过滤器水力性能的重要指标。Tao 等^[28]利用量纲分析结合多元回归分析计算得出了泵前微压过滤器在含沙水条件下水头损失的预测模型，研究表明影响水头损失的因素有滤网孔径、水流粘滞系数、滤网过滤面积以及含沙量等，该预测模型的 R^2 为 0.94，最大相对误差为 9.70%，最小相对误差为 3.44%，表明该模型有较高的预测精度。而本研究用 PPR 建立的水头损失预测模型相对误差较大，分析认为除了数学模型、分析过程中的参数设置、边界条件的处理以及数值计算方法等误差外，本研究在对水头损失进行建模以及对模型进行精度验证时，所选取的数据可能存在局部集中、分布不均匀的情况，进而导致水头损失预测模型不准确，后续将对此问题展开进一步研究，以期解决误差过大的问题。

3.2 泵前微压过滤器运行特性综合分析

陶洪飞等^[30]通过方差分析得出了泵前微压过滤器水头损失、截沙质量和总过滤效率的影响因素排序，与本研究利用 PPR 建模分析所得排序结果一致，这也进一步验证了 PPR 仿真计算对于影响因素相对权重分析的准确性。对于泵前微压过滤器的最优工况，本研究利用 NSGA-II 分析所得泵前微压过滤器的最佳工作条件为进水流量 7 m³/h、含沙量 2 g/L、滤网过滤面积 2 060 cm²，这与陶洪飞等^[30]通过极差分析确定的最佳运行工况不一致，通过对比发现二者的进水流量和含沙量有一定差别，分析原因有以下 2 个方面：①除了每次试验过程均存在误差外，多目标遗传算法采用了概率机制进行迭代，而每一次的迭代均具有随机性，而且建立的目标函数也存在一定的误差，故而对 Pareto 解集产生影响；②NSGA-II 在选取最优解的时候考虑了 3 个指标之间的相互影响关系，经过层层淘汰，最终选择出了使水头损失最小、截沙质量最大、总过滤效率最高时对应的最优工况解集，而极差分析所得到的的是某单一指标下对应的最佳工况，因此二者分析结果不同。张凯等^[1]研究发现，过滤器入

口压强会对滤网泥沙截沙率造成影响，而本研究中进水流量、含沙量等因素的变化均会对过滤器入口处压强、滤网内外压差造成影响，但是本文并未考虑到该因素，后续将会对过滤器内的压强展开深入研究。

4 结论

1) 水头损失的影响因素表现为进水流量>含沙量>滤网过滤面积；截沙质量的影响因素表现为含沙量>滤网过滤面积>进水流量；总过滤效率的影响因素表现为滤网过滤面积>含沙量>进水流量。

2) 含沙水条件下泵前微压过滤器的最优运行工况为含沙量 2 g/L、进水流量 7 m³/h、滤网过滤面积为 2 060 cm²。

3) 利用 PPR 建立了水头损失、截沙质量和总过滤效率的预测模型，其中水头损失的 PPR 预测模型不可靠，其余 2 个指标的 PPR 预测模型可靠度高；后期可采用量纲分析结合多元回归建立的预测模型进行水头损失、截沙质量和总过滤效率的预测。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] 张凯, 喻黎明, 刘凯硕, 等. 网式过滤器拦截率计算及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 123-130.
ZHANG Kai, YU Liming, LIU Kaishuo, et al. Calculation of interception rate of mesh filter and analysis of its influencing factors[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(5): 123-130.
- [2] 喻黎明, 李俊锋, 李娜, 等. 不同网孔与筒体模型对 Y 型网式过滤器性能的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(14): 97-105.
YU Liming, LI Junfeng, LI Na, et al. Effects of different screen mesh and cylinder models on the performance of Y-type screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(14): 97-105.
- [3] ADIN A. Clogging in irrigation systems reusing pond effluents and its prevention[J]. Water Science and Technology, 1987, 19(12): 323-328.
- [4] CAPRA A, SCICOLONE B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2004, 68(2): 135-149.
- [5] LIU Z J, SHI K, XIE Y, et al. Hydraulic performance of self-priming mesh filter for micro-irrigation in Northwest China[J]. Agricultural Research, 2022, 11(1): 58-67.
- [6] 葛宇川, 刘贞姬, 贾旺. 浅述新疆地区几种微灌用过滤器研究[J]. 中国建材科技, 2017, 26(3): 135-138.
GE Yuchuan, LIU Zhenji, JIA Wang. Review of several kinds of filters for micro-irrigation in Xinjiang Region[J]. China Building Materials Science & Technology, 2017, 26(3): 135-138.
- [7] YURDEM H, DEMIR V, DEGIRMENCI OGLU A. Development of a mathematical model to predict head losses from disc filters in drip irrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2008, 100(1): 14-23.
- [8] PUIG-BARGUÉS J, BARRAGÁN J, RAMÍREZ DE CARTAGENA F. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in microirrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2005, 92(3): 383-390.
- [9] DURAN-ROS M, ARBAT G, BARRAGÁN J, et al. Assessment of

- head loss equations developed with dimensional analysis for micro irrigation filters using effluents[J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 521-526.
- [10] WU W Y, CHEN W, LIU H L, et al. A new model for head loss assessment of screen filters developed with dimensional analysis in drip irrigation systems[J]. *Irrigation and Drainage*, 2014, 63(4): 523-531.
- [11] ZONG Q L, ZHENG T G, LIU H F, et al. Development of head loss equations for self-cleaning screen filters in drip irrigation systems using dimensional analysis[J]. *Biosystems Engineering*, 2015, 133: 116-127.
- [12] 吴玉秀, 刘贞姬, 谢炎, 等. 自清洗网式过滤器排污系统数值模拟及结构优化[J]. *中国农村水利水电*, 2023(1): 128-133.
WU Yuxiu, LIU Zhenji, XIE Yan, et al. Numerical simulation and structural optimization of self-cleaning mesh filter sewage system[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2023(1): 128-133.
- [13] 谢炎, 刘贞姬, 李洁, 等. 卧式自清洗网式过滤器过滤及排污过程的数值模拟[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2022, 48(1): 117-124.
XIE Yan, LIU Zhenji, LI Jie, et al. Numerical simulation of the filtration and sewage processes of horizontal self-cleaning mesh filter[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2022, 48(1): 117-124.
- [14] 李曼, 刘贞姬, 宗全利, 等. 滴灌网式过滤器水头损失试验及分析[J]. *人民黄河*, 2021, 43(2): 152-156, 161.
LI Man, LIU Zhenji, ZONG Quanli, et al. Energy loss test analysis of horizontal screen filter[J]. *Yellow River*, 2021, 43(2): 152-156, 161.
- [15] 李曼, 刘贞姬, 石凯. 滴灌用网式过滤器排污效果试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(10): 55-62.
LI Man, LIU Zhenji, SHI Kai. Experimental study on sewage discharge effect of drip irrigation net filter[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(10): 55-62.
- [16] 董文楚. 滴灌用砂过滤器的过滤与反冲洗性能试验研究[J]. *水利学报*, 1997(12): 72-78.
DONG Wenchu. A study on the filtration and backflushing performance of the filters with crushed quartz sand for drip-irrigation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1997(12): 72-78.
- [17] MESQUITA M, TESTEZLAF R, RAMIREZ J C S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss[J]. *Agricultural Water Management*, 2012, 115: 178-185.
- [18] ELBANA M, RAM R ÉZ DE CARTAGENA F, PUIG-BARGUÉS J. New mathematical model for computing head loss across sand media filter for microirrigation systems[J]. *Irrigation Science*, 2013, 31(3): 343-349.
- [19] 张文正, 蔡九茂, 吕谋超, 等. 砂石过滤器过滤效果影响因素试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(7): 77-83.
ZHANG Wenzheng, CAI Jiumao, LYU Mouchao, et al. Experimental study on influencing factors of filtration effect of sand filter[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(7): 77-83.
- [20] DEUS F P, MESQUITA M, SALCEDO RAMIREZ J C, et al. Hydraulic characterisation of the backwash process in sand filters used in micro irrigation[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 192: 188-198.
- [21] 李楠, 翟国亮, 张文正, 等. 微灌用叠片过滤器的过滤性能试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(11): 52-56.
LI Nan, ZHAI Guoliang, ZHANG Wenzheng, et al. Filtration performance of disc filters for microirrigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(11): 52-56.
- [22] 袁寄望, 朱德兰, 高洒洒, 等. 叠片过滤器水头损失变化规律及杂质拦截特征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(13): 114-122.
YUAN Jiwang, ZHU Delan, GAO Sasa, et al. Head loss variation and impurity interception characteristics in a disc filter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(13): 114-122.
- [23] 徐鑫, 张金珠, 王振华, 等. 滴灌系统叠片过滤器离散型流道结构水力性能试验及内部流场模拟[J]. *水资源与水工程学报*, 2021, 32(4): 235-240.
XU Xin, ZHANG Jinzhu, WANG Zhenhua, et al. Hydraulic performance experiment and internal flow field simulation of the novel disc filter with a discrete flow channel in drip irrigation system[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2021, 32(4): 235-240.
- [24] 王钦, 徐鑫, 王振华, 等. 离散型流道结构叠片过滤器性能试验研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(3): 218-224.
WANG Qin, XU Xin, WANG Zhenhua, et al. Experimental study on performance of disc filter with discrete flow channel structure[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(3): 218-224.
- [25] TARJUELO J M, RODRIGUEZ-DIAZ J A, ABAD Í R, et al. Efficient water and energy use in irrigation modernization: Lessons from Spanish case studies[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 162: 67-77.
- [26] 李云开, 冯吉, 宋鹏, 等. 低碳环保型滴灌技术体系构建与研究现状分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(6): 83-92.
LI Yunkai, FENG Ji, SONG Peng, et al. Developing situation and system construction of low-carbon environment friendly drip irrigation technology[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(6): 83-92.
- [27] 周洋. 泵前微压过滤器运行特性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2021.
ZHOU Yang. Study of the operating characteristics of pre-pump micro-pressure filters[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2021.
- [28] TAO H F, WU Z J, ZHOU Y, et al. Establishment of a dimensional analysis-based prediction model for the head loss of pre-pump micro-pressure filters for micro-irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2023, 41(6): 803-815.
- [29] LI Q, WU Z J, TAO H F, et al. Establishment of prediction models of trapped sediment mass and total filtration efficiency of pre-pump micro-pressure filter[J]. *Irrigation Science*, 2022, 40(2): 203-216.
- [30] 陶洪飞, 沈萍萍, 周洋, 等. 微灌用泵前微压过滤器的最佳运行工况研究[J]. *灌溉排水学报*, 2022, 41(6): 72-79.
TAO Hongfei, SHEN Pingping, ZHOU Yang, et al. Optimizing operating condition of the filters in micro-irrigation pump[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(6): 72-79.
- [31] 杨志豪, 何建新, 杨武, 等. 基于PPR无假定建模的水工沥青混凝土偏应力计算模型[J/OL]. *武汉大学学报(工学版)*: 1-9[2024-01-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1675.T.20230630.1722.002.html>.
- [32] 王亮, 慈军, 宫经伟, 等. 基于PPR建模的全固废材料固化盐渍土抗压强度计算模型[J]. *环境工程*, 2020, 38(10): 177-182, 52.
WANG Liang, CI Jun, GONG Jingwei, et al. Compressive strength model of saline soil solidified by all-solid waste materials based on PPR modeling[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(10): 177-182, 52.
- [33] 张慧, 陶洪飞, 如苏力·努尔, 等. 单翼迷宫式滴灌带的关键参数与灌水均匀度的响应关系[J]. *节水灌溉*, 2021(4): 98-103.
ZHANG Hui, TAO Hongfei, RUSUL Nur, et al. Response relationship between key parameters of single-wing labyrinth drip irrigation belt and irrigation uniformity[J]. *Water Saving Irrigation*, 2021(4): 98-103.
- [34] 姜春萌, 宫经伟, 唐新军, 等. 基于PPR的低热水泥胶凝体系综合性能优化方法[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(3): 333-340.
JIANG Chunmeng, GONG Jingwei, TANG Xinjun, et al. Optimization method of comprehensive properties of low heat cement cementitious system based on projection pursuit regression[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(3): 333-340.
- [35] 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.

Improving the stability of slopes of earth drainage ditches by microbially induced calcium carbonate precipitation

LUO Danhu^a, JIAO Xiyun^{a*}, WU Shuyu^a, LIU Kaihua^b, GUO Weihua^a, LI Huandi^a

(Hohai University a. College of Agricultural Science and Engineering, Nanjing 211100, China;

b. College of Hydrology and Water Resources, Nanjing 210098, China)

Abstract: 【Objective】 Microbially induced calcium carbonate precipitation (MICP) is an eco-friendly and innovative technique for improving soil stability. This paper investigates the potential of MICP for improving the stability of slopes of earth drainage ditches. 【Method】 *Bacillus pasteurii* with OD₆₀₀=0.97 and consolidation solution with concentration of 1 mol/L (CO(NH₂)₂ : CaCl₂ = 1 : 1) were used in the study. The solid - bacteria ratio was 5 : 3, and a urease inhibitor at concentration of 15% was added to the consolidation solution. The experiment was conducted in boxes filled with soil. We sprayed the soil surface with the consolidation solution and the bacterial liquid alternatively for the infiltration to reach the depth of 5 cm (C1), 10 cm (C2) and 15 cm (C3), respectively. The control was to spray water over the soil surface. The mechanical properties of the soils were measured using direct shear tests when soils were air-dried, saturated, and naturally dried, respectively. 【Result】 The shear strength of the soils treated by MICP were all increased; the decrease of internal friction angle of CK, C1, C2, and C3 after saturation treatment were 46.67%, 39.73%, 28.98%, and 27.85%, and the decrease of cohesion were 76.37%, 62.83%, 39.09%, and 51.62%, the soil slope of CK was in the understability, and the slopes of C1, C2, and C3 met the safety requirements C1, C2 and C3 slopes meet the safety requirements, cohesion is the main factor affecting the stability of slopes. 【Conclusion】 Our findings suggest the optimal consolidation depth was 10 cm and demonstrate the efficacy of MICP for reinforcing the slopes of earth drainage ditches.

Key words: MICP consolidation; soil slope; consolidation depth; slope stability

责任编辑: 赵宇龙

(上接第 37 页)

Efficiency and hydraulic performance of the micro-pressure filter in front of the pump studied using PPR and NSGA-II

TAO Hongfei^{1,2}, LI Qi^{1,2}, ZHOU Yang³, Mahemujiang · Aihemaiti^{1,2*}, LI Qiao^{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. Xinjiang Institute of Water Resources and Hydropower Research, Urumqi 830049, China)

Abstract: 【Objective】 Pump often has a filter installed in the front of it to filter sediments and debris. This paper studied its efficiency and performance. 【Method】 The study was based on physical model, with flow rate being 2-8 m³/h, sediment content being 0.5-2.0 g/L. The area of the filter varied from 1 105 to 2 060 cm², and water separator type was Type 1, Type 2, Type 3. Without a separator was the control. A prediction model was used to evaluate sediment interception and total filtration efficiency. Based on these measurements, we determined the optimal operating conditions for the pump. 【Result】 The factors that influenced water head loss across the filter were ranked in the order of inlet flow > sediment content > filter area; the factors that affected the quality of sediment interception were ranked in the order of sediment content > filter area > inlet flow; the factors impacting the total filtration efficiency were ranked in the order of filter area > sediment content > inlet flow. The accuracy of the PPR model for predicting sediment interception quality and total filtration efficiency was 100%, with a relative error less than 10%, while its accuracy for predicting water head loss across the filter was 70%, which needs further improvement. The optimal operating conditions for the filter were sand content 2 g/L, inlet water flow rate 7 m³/h, and filter area 2 060 cm². 【Conclusion】 The PPR prediction model was accurate for sediment interception and total filtration efficiency, but it resulted in errors for calculating water head loss across the filter. Dimensional analysis and multiple regression can be used as an alternative to predict the water head loss.

Key words: filter; head loss; model; hydraulic performance; filtration performance

责任编辑: 白芳芳