

# 叠片过滤器水力和过滤性能综合评价方法研究

杨培岭, 鲁 萍, 任树梅, 王 泉, 刘伟杰

(中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘 要:**为建立叠片过滤器过滤性能综合评价方法,以5种常见叠片过滤器为研究对象,对不同进水含沙量(0.02%、0.03%和0.04%)与过滤流量(25、30、35 m<sup>3</sup>/h)条件下叠片过滤器的水力性能和过滤性能开展试验研究。根据不同工况下叠片过滤器的堵塞均匀度、周期拦沙量以及拦截泥沙中值粒径,采用逐步回归分析、主成分分析方法,建立不同单项性能指标与6项叠片结构参数(叠片厚度、叠片片数、叠片沟槽长度、叠片沟槽数、叠片沟槽外截面三角形顶角、叠片沟槽外截面三角形高)间的多元线性回归方程,并采用直接加权法建立叠片过滤器性能的综合评价函数。结果表明,叠片结构尺寸参数均对过滤器性能有一定的影响,所建立的评价函数对叠片过滤器I~V的评价值依次为7.22、7.08、7.88、8.63以及3.11,该评价函数可以全面、合理地对叠片过滤器综合性能进行评价和对比。该评价方法不仅能用于对叠片过滤器性能进行评测,还能对改进叠片结构尺寸、进一步优化过滤器性能提供参考。

**关键词:**过滤器;堵塞;评价;叠片;均匀度;

doi:doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.016

中图分类号:S275.6 文献标识码:A 文章编号:1002-6819(2019)-19-0134-08

杨培岭, 鲁 萍, 任树梅, 王 泉, 刘伟杰. 叠片过滤器水力和过滤性能综合评价方法[J]农业工程学报, 2019, 35(19): 134—141. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.016 <http://www.tcsae.org>

Yang Peiling, Lu Ping, Ren Shumei, Wang Xiao, Liu Weijie. Comprehensive evaluation method for hydraulic performance and filtering quality of laminated filter[J] Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(19): 134—141. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.19.016 <http://www.tcsae.org>

## 0 引 言

灌水器过滤器是保证滴灌系统不受堵塞,能够正常运行的核心设备<sup>[1-2]</sup>。由于其占地面积小、自动化程度高,同时又兼具筛网和砂石过滤器的特点,能够实现立体过滤,叠片过滤器在过滤系统中得到广泛应用<sup>[3]</sup>,但其流道结构较为复杂,运行过程中常伴有较大的水头损失。因此选择合适的叠片过滤器产品是提高过滤性能的最有效方法。

叠片的结构是影响过滤性能的最主要参数,但因其属于微尺度范畴,目前开展的研究仅限于数值模拟领域。李楠等<sup>[4]</sup>对叠片过滤器的流道进行了三维造型,采用标准 $k-\epsilon$ 模型进行数值模拟计算,结果发现,叠片流道最小断面底角以及叠片厚度影响过流能力,而叠片流道的倾斜角度对过滤器的水头损失几乎没有影响。张重<sup>[5]</sup>对叠片流道断面进行了简化的koch分形设计,结果表明1/2处梯形分形流道最易于泥沙的沉积。马子萱<sup>[6]</sup>运用一级

Minkowski分形曲线设计叠片流道沿程轴线,认为更长的流道长度具有更好的过滤性能。叠片过滤器的过滤性能难以直接通过叠片结构尺寸来判断,但目前尚无明确的评价方法。

影响过滤过程的因素很复杂<sup>[7]</sup>,大多学者通过对叠片过滤器进行性能测试试验,采用运行周期、泥沙去除率、水头损失等<sup>[8-11]</sup>指标来评价其性能优劣,但评价指标单一,不能综合地反映过滤性能。研究发现<sup>[11-13]</sup>,叠片过滤器水头损失均表现出随系统运行先线性缓慢增长后线性加速递增的动态变化特征,而不同运行时段水头损失的变化规律在一定程度上能够反映杂质颗粒在叠片流道内堵塞的均匀性;另一方面,不同的叠片过滤器其叠片结构存在差异。因此,本文提出基于叠片结构尺寸参数的叠片过滤器性能评价方法,旨在为选择合适的叠片过滤器产品提供指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置及过滤器

试验装置如图1所示。其中供水装置为2 m×2 m×1.5 m的蓄水池,蓄水池内安装搅拌泵,以保证试验中进水含沙量的稳定。叠片过滤器进出口压差通过压差传感器自动记录,并利用高精度压力表实时校核。电磁流量计用来实时读取系统瞬时流量。

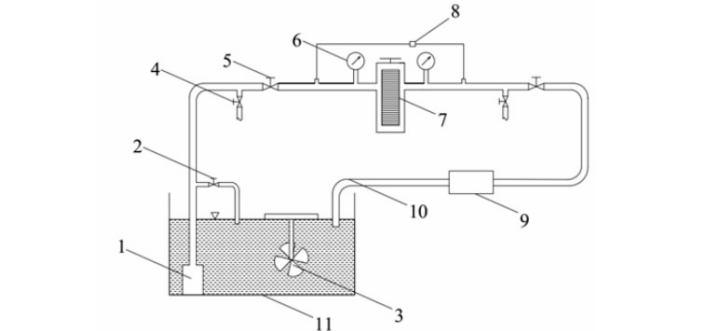
收稿日期:2019-01-18 修订日期:2019-07-10

基金项目:国家自然科学基金项目(51879263);内蒙古自治区科技重大专项(内蒙古黄灌区安全增效滴灌技术集成与示范推广)

作者简介:杨培岭,博士生导师,教授,主要从事节水灌溉理论与新技术研究。Email:yang-pl@163.com

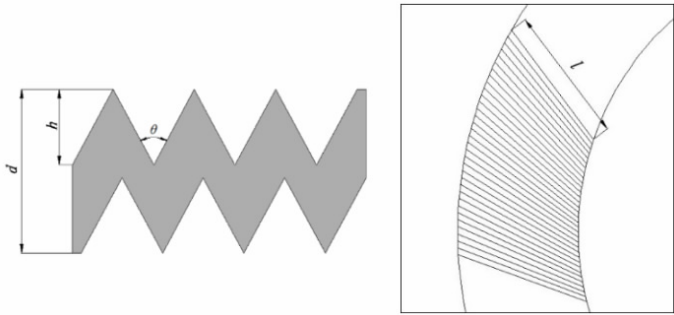
选择 5 种常见叠片过滤器,对其进行性能测试,测试时采用相同的额定流量(30 m<sup>3</sup>/h)、额定工作压力(0.15 MPa),过滤精度(120 μm)、管道进出口直径(63 mm),且所有过

滤器采用同一外壳,因此除滤芯不同外,其他均保持一致。叠片主要结构尺寸参数如表 1 所示,沟槽外截面及表面示意图如图 2 所示。



1.潜水泵 2.流量调节阀 3.搅拌泵 4.取样口 5.闸阀 6.压力表 7.叠片过滤器 8.压差传感器 9.电磁流量计 10.出水管 11.蓄水池  
1. Submersible pump 2. Flow regulating valve 3. Mixing pump 4. Sampling mouth 5. Gate valve 6. Pressure gauge 7. Laminated filter 8. Differential pressure sensor 9. Electromagnetic flowmeter 10. Outlet pipe 11. Reservoir

图 1 叠片过滤器水力性能试验装置示意图  
Fig.1 Schematic of device for hydraulic performance test of laminated filter



a. 沟槽外截面  
a. Outer section of flow channel  
b. 叠片表面  
b. laminated surface

注:  $d$  为叠片厚度, mm;  $h$  为叠片沟槽外截面三角形高, mm;  $\theta$  为叠片沟槽外截面三角形顶角, ( $^{\circ}$ );  $l$  为叠片沟槽长度, mm。  
Note:  $d$  is single laminate thickness;  $h$  is height of triangle outer section of flow channel;  $\theta$  is apex angle of triangle outside flow channel;  $l$  is length of flow channel.

图 2 叠片结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of laminated structure

表 1 5 种叠片主要结构尺寸参数  
Table 1 Main structural size parameters of 5 laminated filters

叠片主要结构参数 Main structural parameter of laminates	过滤器 I Filter I	过滤器 II Filter II	过滤器 III Filter III	过滤器 IV Filter IV	过滤器 V Filter V
厚度( $d$ ) Thickness/mm	2.14	2.16	2.05	2.19	1.60
片数( $p$ ) Number of laminations	276	270	268	262	312
沟槽长度( $l$ ) Length of flow channel/mm	15.14	15.43	15.14	14.97	15.42
沟槽数( $f_p$ ) Number of flow channels	801	701	720	580	750
沟槽外截面三角形顶角( $\theta$ ) Apex angle of triangle outside flow channel/( $^{\circ}$ )	57	55	74	64	33
沟槽外截面三角形高( $h$ ) Height of triangle outer section of flow channel /mm	0.61	0.68	0.64	0.71	0.36

1.2 试验设计及过程

为了深入研究叠片过滤器对泥沙的过滤能力,本文进行含沙水试验,配置含沙水中 0~10、>10~20、>20~40、>40~80、>80~160、>160~320、>320~1 000 μm 泥沙颗粒占比分别为 10.68%、8.94%、22.97%、30.78%、15.03%、6.64%、4.96%。实际灌溉中,灌溉水源经过一级过滤系统,过滤后泥沙粒径均小于 0.18 mm<sup>[14]</sup>。本文采用粒径小于 0.16 mm 的细沙,泥沙超过 80%(质量分数),符合工程实际。按比例向蓄水池中配置好所需含沙水。试验中,水流由蓄水池进入叠片过滤器,在过滤器内经过滤芯过滤后重新流回蓄水池,以达到循环过滤的效果。

1) 相同进水流量不同进水含沙量

为保证灌溉水量,实际大田灌溉中过滤器常采用最大流量<sup>[14]</sup>,故本试验保持进水流量为 30 m<sup>3</sup>/h。根据微灌易堵塞水质标准<sup>[15]</sup>,设置 3 个进水含沙量(质量分数)水平 0.02%、0.03% 及 0.04%,其对应的固体颗粒浓度分别为 200、300 和 400 mg/L。

2) 相同进水含沙量不同进水流量

过滤器进水流量的大小将直接影响其局部水头损失。试验中,保持相同进水含沙量(0.03%),考虑滴灌系统田间布置以及通过流量的实际情况,分别采用 0.8、1.0 及 1.2 倍的额定流量(25、30 及 35 m<sup>3</sup>/h) 3 种进水流量水平,根据系统流量变化测叠片过滤器局部水头损失。

参考灌水均匀度要求,判断叠片过滤器严重堵塞的

标准为系统流量下降至初始流量的 80%<sup>[15]</sup>,该周期即为叠片过滤器在此工况下的运行周期。

根据前述试验设计对不同叠片过滤器进行性能测试试验,从水头损失动态变化特征、堵塞均匀度、周期拦沙量以及拦截泥沙中值粒径对 5 种叠片过滤器进行分析。

1.3 评价指标及方法

1.3.1 堵塞均匀度

水头损失增长速率和运行周期是评判过滤器过流能力的重要指标,然而不同过滤器在不同运行阶段表现出相异的变化特征,仅靠水头损失和运行周期大小对过滤器性能进行评价,标准相对宽泛。

本文引用叠片过滤器堵塞均匀度指标( $\eta_u$ )<sup>[16]</sup>,用以反映堵塞物在叠片沟槽内分布的均匀程度。将过滤器开始运行至水头损失达 6~8 m 期间定义为过滤器稳定运行时段( $t_1$ ),从水头损失达 6~8 m 至完全堵塞停止运行期间定义为过滤器堵塞运行时段( $t_2$ )。

$$\eta_u=k_2/k_1 \tag{1}$$

式中  $k_1$  和  $k_2$  分别为  $t_1$  和  $t_2$  时段水头损失随时间增长速率, m/h。  $k_2$  越接近  $k_1$ , 即  $\eta_u$  越接近于 1, 堵塞物在叠片过滤器滤芯内的堵塞越均匀。

1.3.2 周期拦沙量

过滤器的拦沙量是指在整个过滤周期内,滤芯所截留的沙粒总量, g。本文通过测定叠片过滤器的周期拦沙量来评判其拦沙能力。

1.3.3 拦截泥沙中值粒径

泥沙处理能力是过滤器的一项重要性能指标,主要体现在拦截泥沙粒径上<sup>[17]</sup>。研究发现,粒径处于50~100 μm范围内的泥沙很容易沉淀在滴灌带的腔体内和流道内,从而引起灌水器的堵塞<sup>[18]</sup>。因此,叠片过滤器所拦截的泥沙粒径相对小,表明其泥沙处理能力相对好。本文采用叠片过滤器1次过滤周期内所拦截泥沙的中值粒径( $D_{50}$ )来评判其泥沙处理能力。

1.3.4 综合评价

根据可比性和可行性的原则,本文选择堵塞均匀度(以 $\eta_u$ 表示)、周期拦沙量(以 $M$ 表示)以及拦截泥沙中值粒径(以 $D_{50}$ 表示)3项指标来评价叠片过滤器性能。

1)通过线性函数拟合叠片过滤器 $\eta_u$ 、 $M$ 以及 $D_{50}$ 值与叠片各结构参数(表1)间的相关关系,分别建立3项指标的多元线性回归方程。2)综合单项性能评价指标与叠片结构参数间的相关关系,根据所建立的回归方程,采用加权组合法中的直接加权法建立叠片过滤器过滤性能的综合评价体系,加权因子根据单项指标函数的变动范围计算确定。

1.4 数据分析方法

数据统计及处理采用Excel2016、SPSS22.0软件;相关性采用Pearson相关分析;回归方法采用逐步回归分析,建立叠片结构尺寸参数与过滤器单项性能指标间的相关关系,并利用主成分分析方法消除多重线性相关对

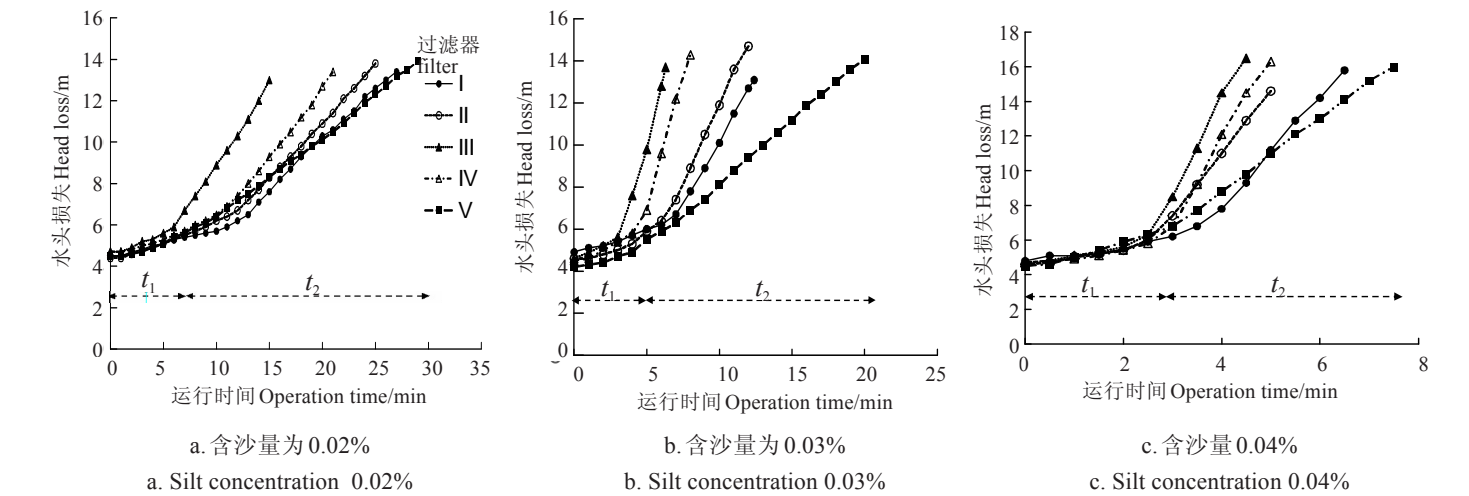
回归方程系数的影响;采用加权组合法中的直接加权法建立叠片过滤器性能评价的统一目标函数。

2 结果与分析

2.1 不同叠片过滤器堵塞均匀度及水头损失动态变化的对比

额定流量条件下,不同进水含沙量时5种过滤器水头损失动态变化如图3所示。可以看出,不同叠片过滤器水头损失均表现出随系统运行先缓慢上升后线性激增的变化特征,但不同叠片过滤器线性激增阶段递增速率( $k_2$ )存在显著差异,过滤器III、过滤器IV水头损失增长速率较快。从表2中可以看出,过滤器V的 $\eta_u$ 值较低,过滤器III、过滤器IV的 $\eta_u$ 值较大。总体来说,各过滤器水头损失在达6~8 m后便开始呈现快速增长趋势,可以认为此时过滤器已经发生明显堵塞,这与国内过滤器反冲洗指标<sup>[19]</sup>相一致。

研究认为,过滤器在水头损失达6~8 m后出现随时间激增的现象主要是滤芯内堵塞不均匀造成的<sup>[17]</sup>,且随着进水含沙量的增加,堵塞物分布的不均匀性加剧。另外,过滤过程中杂质颗粒间、颗粒与叠片间的吸附作用也会减小滤芯的过流面积,从而影响过滤效果。但随着过滤器运行停止,吸附作用也将随之消失。而杂质在叠片流道内堵塞的均匀程度以及过滤过程中杂质颗粒间、颗粒与叠片间的吸附作用与叠片沟槽的设计及相关尺寸参数直接相关,因此,对于叠片过滤器的过滤性能更应基于叠片尺寸参数来综合评定。



注: $t_1$ 为过滤器稳定运行时段, $t_2$ 为过滤器堵塞运行时段。流量条件为 $30\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。  
Note:  $t_1$  is the stable running period of the filter,  $t_2$  is the blocking running period of the filter. Flow rate is  $30\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ .

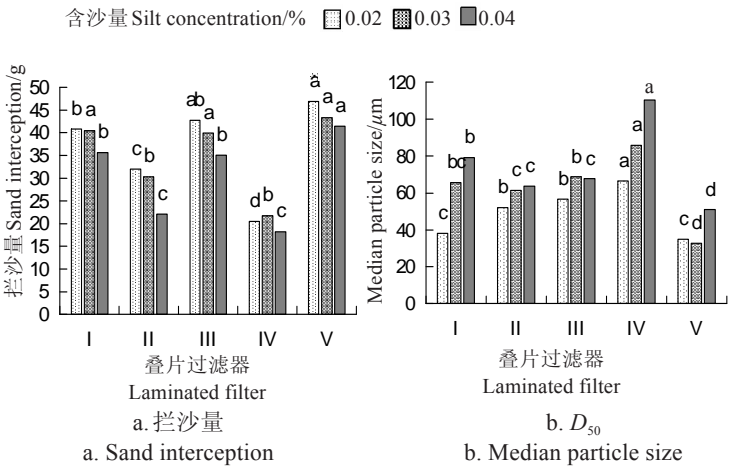
图3 不同含沙水条件下5种叠片过滤器水头损失动态变化  
Fig.3 Dynamic of head loss of 5 laminated filters under different sand-water conditions

表2 不同进水含沙量条件下不同时段叠片过滤器堵塞均匀度随时间变化线性回归拟合结果  
Table 2 Linear regression fitting results of filter clogging uniformity varying with time at different period under different silt concentration

过滤器 Filter	0.04% 含沙量 Silt concentration					0.03% 含沙量 Silt concentration					0.02% 含沙量 Silt concentration				
	$k_1$	$R_1^2$	$k_2$	$R_2^2$	$\eta_u$	$k_1$	$R_1^2$	$k_2$	$R_2^2$	$\eta_u$	$k_1$	$R_1^2$	$k_2$	$R_2^2$	$\eta_u$
I	0.44	0.93*	3.10	0.99**	7.00	0.22	0.98**	1.21	0.99**	5.45	0.14	0.98**	0.48	0.99**	3.34
II	0.53	0.94*	3.62	0.99**	6.81	0.30	0.90*	1.49	0.99**	4.89	0.19	0.99**	0.54	0.99**	2.86
III	0.46	0.98**	5.28	0.99**	11.48	0.33	0.99**	2.68	0.99**	8.11	0.21	0.96**	0.77	0.99**	3.73
IV	0.43	0.93*	4.86	0.99**	11.34	0.34	0.97**	2.48	0.99**	7.29	0.19	0.97**	0.65	0.99**	3.50
V	0.80	0.98**	2.10	0.99**	2.62	0.34	0.95**	0.61	0.99**	1.77	0.19	0.96**	0.40	0.99**	2.07

注: $R_1^2$ 和 $R_2^2$ 分别为 $t_1$ 和 $t_2$ 时段线性拟合决定系数;\*, $P<0.05$ ;\*\*, $P<0.01$ 。下同。  
Note:  $R_1^2$  and  $R_2^2$  are linear fitting determination coefficient in  $t_1$  and  $t_2$  periods, respectively, \*,  $P<0.05$ ; \*\*,  $P<0.01$ . Same as below.





注：不同小写字母表示在 0.05 水平，相同含沙量下不同过滤器间存在显著性差异。  
Note: Different small letter indicate significant difference among filters at 0.05 level under same sandy water condition .

图 4 含沙水条件下 5 种过滤器周期拦沙量和拦截泥沙中值粒径  
Fig.4 Amount and median size of intercepted sediment by 5 filters under sandy water condition

2.2 不同叠片过滤器拦沙量、拦截泥沙中值粒径对比

图 4 为含沙水条件下 5 种叠片过滤器的周期拦沙量和拦截泥沙  $D_{50}$ 。从图中可以看出，不同含沙量条件下，过滤器 IV 的拦沙量显著低于 ( $P<0.05$ ) 其他 4 种过滤

器，拦沙能力较差；过滤器 V 的拦沙量显著高于 ( $P<0.05$ ) 其他过滤器，平均拦沙量高出其他过滤器约 23.54%~32.98%，说明过滤器 V 能够在过滤周期内拦截质量较多的泥沙；过滤器 III、过滤器 I 以及过滤器 II 的平均拦沙量依次减小。从拦截泥沙  $D_{50}$  来看，总体上过滤器 V 所拦截泥沙  $D_{50}$  值显著低于 ( $P<0.05$ ) 其他过滤器，平均值约低 33.08%~54.90%，说明其拦截的泥沙中细颗粒含量较多；过滤器 IV 拦截泥沙  $D_{50}$  值显著高于 ( $P<0.05$ ) 其他过滤器，说明过滤器 IV 所拦截泥沙中粗颗粒占比较大；总体上来看，过滤器 II、过滤器 III 拦截泥沙粒径差异不显著。

2.3 叠片过滤器性能综合评价

2.3.1 单项性能评价指标与叠片结构参数间的相关关系

根据上文的分析结果可以看出，不同叠片过滤器的水头损失动态变化特征、堵塞均匀度、周期拦沙量以及拦截泥沙  $D_{50}$  均有所差异。因此，按照评价指标中的方法对 5 种叠片过滤器进行综合评价。首先通过线性函数拟合 5 种工况下，5 种叠片过滤器  $\eta_u$ 、 $M$  以及  $D_{50}$  值与叠片各结构参数间的相关关系，并将  $\eta_u$  与  $k_2$ 、运行周期 (以  $T$  表示) 进行比较，相关性结果如表 3 所示。

表 3 叠片过滤器性能评价指标与叠片结构参数间关系  
Table 3 Relationship between performance evaluation indices of laminated filter and structural size parameters

结构参数 Structural pa- rameter	单项性能评价指标 Single performance evaluation index														
	堵塞均匀度 Clogging uniformity index			$t_2$ 时段水头损失增长率 Head loss growth rate during $t_2$			运行周期 Operation cycle			周期拦沙量 Sand interception			拦截泥沙中值粒径 Median particle size		
	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$	$a$	$b$	$R^2$
$d$	5.66	-5.96	0.24*	1.62	-1.34	0.06	-11.35	36.69	0.08	-	76.26	0.36**	56.95	-52.33	0.47**
$p$	-0.08	28.41	0.33*	-0.03	9.72	0.12	0.18	-37.31	0.13	0.29	-47.71	0.42**	-0.69	254.66	0.46**
$l$	-7.44	118.7 1	0.27**	-2.52	40.26	0.09	13.21	-	0.07	20.00	-271.96	0.20*	-61.85	1004.3 8	0.37**
$f_p$	-0.01	13.64	0.11	-0.01	5.75	0.08	0.03	-8.72	0.07	0.09	-30.34	0.68**	-0.13	154.57	0.27**
$\theta$	0.12	-1.12	0.39**	0.04	-0.56	0.17*	-0.27	28.94	0.17*	-0.25	46.50	0.18*	0.67	25.04	0.25*
$h$	10.90	-1.03	0.29**	3.59	-0.22	0.09	-24.28	28.24	0.12	-	58.42	0.47**	99.83	3.27	0.47**
										43.25					

注：拟合函数为  $y=ax+b$ ，其中  $y$  为评价指标， $x$  为结构各参数， $a$  和  $b$  是方程的拟合参数。  
Note: Fitting function is  $y=ax+b$ , where  $y$  is each structural parameter and  $y$  is evaluation index,  $a$  and  $b$  are undetermined parameters.

从表 3 中可以看出， $\eta_u$ 、 $M$ 、 $D_{50}$  值与叠片各结构参数间存在线性相关关系。其中， $\eta_u$  主要受到  $d$ 、 $p$ 、 $l$ 、 $\theta$ 、 $h$  的影响， $\eta_u$  值随  $d$ 、 $\theta$ 、 $h$  的减小而减小，即堵塞更均匀，随  $p$ 、 $l$  的减小而增大，即堵塞均匀度更差； $M$  和  $D_{50}$  值受到 6 种结构参数的共同影响，其中， $M$  值随  $p$ 、 $l$ 、 $f_p$  的增大而增大，随  $d$ 、 $\theta$ 、 $h$  的增大而减小； $D_{50}$  值随  $d$ 、 $\theta$ 、 $h$  的增大而增大，随  $p$ 、 $l$ 、 $f_p$  的增大而减小。相比之下， $k_2$  和  $T$  值与叠片各结构参数间的相关关系较弱，因此选用  $\eta_u$ 、 $M$  以及  $D_{50}$  这 3 项指标与各自影响因素间建立多元线性回归关系。在对  $M$ 、 $D_{50}$  值的回归分析中，剔除对其影响不显著 ( $P>0.05$ ) 的变量，选用逐步回归法进一步确定影响两者的有效因子。经过筛选后，分别有  $d$ 、 $f_p$  和  $l$ 、 $\theta$ 、 $h$  分别对  $M$  和  $D$  值影响显著 ( $P<0.05$ )，且回归方程影响极显著 ( $P<0.01$ )，结果见式 (2) 和式 (3)。在对  $\eta_u$  值的回归分析

中，回归方程满足显著性要求 ( $P<0.05$ )，但各项系数间存在严重的多重线性相关关系， $d$  和  $h$  项系数方差膨胀因子 (variance inflation factor, VIF) 值为 22.9 和 29.8，均大于 10，结果见式 (4)，这将会对回归方程的系数及其相关性产生影响。为消除多重线性相关对回归方程系数的影响，本文采用主成分分析方法提取由原始变量线性组合的潜在变量，再将所提取的主成分因子与  $\eta_u$  值进行回归分析。

对与  $\eta_u$  值相关的变量  $d$ 、 $p$ 、 $l$ 、 $\theta$ 、 $h$  进行主成分分析，提取了 1 个主成分  $Y_1(\eta_u)$  (见式 (5))，该主成分方差贡献率达到 83.9%，可以代表对  $\eta_u$  值的评价信息。 $Y_1(\eta_u)$  与  $\eta_u$  值的回归方程结果见式 (6)，方程满足显著性要求 ( $P<0.05$ )。将标准化变量还原为原始变量，得到  $\eta_u$  值的回归分析方程，结果见式 (7)。

表4 叠片过滤器性能评价指标与叠片结构参数间线性回归结果  
Table 4 Linear regression results between performance evaluation index of laminated filter and structure parameters

结构参数 Structural parameter	R <sup>2</sup>				
	堵塞均匀度 Clogging uniformity index( $\eta_u$ )	$t_2$ 时段水头损失增长速率 Head loss growth rate during $t_2(k_2)$	运行周期 Operation cycle ( $T$ )	周期拦沙量 Sand interception ( $M$ )	拦截泥沙中值粒径 Median particle size ( $D_{50}$ )
叠片厚度 Single laminate thickness ( $d$ )	0.24*	0.06	0.08	0.36**	0.47**
叠片片数 Number of laminations ( $p$ )	0.33*	0.12	0.13	0.42**	0.46**
叠片沟槽长度 Length of flow channel ( $l$ )	0.27**	0.09	0.07	0.20*	0.37**
叠片沟槽数 Number of flow channels ( $f_p$ )	0.11	0.08	0.07	0.68**	0.27**
叠片沟槽外截面三角形顶角 Apex angle of triangle outside flow channel( $\theta$ )	0.39**	0.17*	0.17*	0.18*	0.25*
叠片沟槽外截面三角形高 Height of outer section of flow channel ( $h$ )	0.29**	0.09	0.12	0.47**	0.47**

$$Y(M) = -12.54d + 0.08f_p + 4.67$$
$$(F=39.4, R^2=0.78, P<0.01) \tag{2}$$

$$Y(D) = -51.78l - 0.79\theta + 129.67h + 818.16$$
$$(F=11.4, R^2=0.62, P<0.01) \tag{3}$$

$$Y(\eta_u) = -4.86d(VIF=22.87) - 2.87l + 0.07\theta + 10.22h + 48.76$$
$$(F=3.5, R^2=0.41, P<0.05, d \text{ 项对应 } VIF=22.87,$$
$$h \text{ 项对应 } VIF=29.83) \tag{4}$$

$$Y_1(\eta_u) = 0.46d^* - 0.48p^* - 0.36l^* + 0.45\theta^* + 0.47h^* \tag{5}$$

$$Y_2^*(\eta_u) = 0.29 Y_1(\eta_u) \tag{6}$$
$$(F=12.7, P<0.01)$$

$$Y_2(\eta_u) = 1.56d - 0.02p - 1.49l + 0.02\theta + 2.80h + 27.52 \tag{7}$$

式中  $Y(M)$ 、 $Y(D)$ 、 $Y(\eta_u)$  分别为对拦沙量  $M$ 、拦截泥沙中值粒径  $D_{50}$ 、堵塞均匀度  $\eta_u$  的线性回归结果,  $Y_1(\eta_u)$  为  $Y(\eta_u)$  所提取的 1 个主成分,  $Y_2(\eta_u)$  为  $\eta_u$  消除各变量多重线性相关后的线性回归结果。  $Y_2^*(\eta_u)$  为  $Y_2(\eta_u)$  的标准化量,  $d^*$ 、 $p^*$ 、 $l^*$ 、 $\theta^*$ 、 $h^*$  分别为参数  $d$ 、 $p$ 、 $l$ 、 $\theta$ 、 $h$  的标准化量。

2.3.2 基于叠片结构参数的过滤器性能综合评价方法

根据叠片过滤器性能的评判标准,  $\eta_u$  和  $D_{50}$  值以小为佳,  $M$  值则越大越好。利用上文所建立的回归方程, 采用直接加权法建立评价叠片过滤器性能的统一目标函数, 将指标命名为  $Q$ , 见式(8)。

$$Q = -\omega_1 Y(M) + \omega_2 Y_2(\eta_u) + \omega_3 Y(D) \tag{8}$$

式中  $Q$  为叠片过滤器性能综合评价指标函数, 下同;  $\omega_j(j=1, 2, 3)$  表示  $Y(M)$ 、 $Y(D)$ 、 $Y_2(\eta_u)$  3 个函数所对应的加权因子。

根据实测和计算确定每个函数的变动范围, 若已知某项指标的变动范围为  $\alpha \sim \beta$ , 则该指标所对应函数的加权因子  $\omega_j$  的计算方法为如式(9), 其值决定了各单项指标函数的数量级及重要程度。

$$\omega_j = \frac{1}{\frac{(\alpha - \beta)^2}{2}} \tag{9}$$

式中  $\alpha$  为 5 种过滤器某单项性能指标的最小值,  $\beta$  为 5 种过滤器某单项性能指标的最大值。

参考文献[20]计算得  $\omega_1=0.004$ ,  $\omega_2=1.2$ ,  $\omega_3=0.0007$ , 则综合评价数学模型见式(10)。

$$Q = 2.00d - 0.03p - 1.89l - 0.0003f_p + 0.03\theta + 3.58h + 34.89 \tag{10}$$

将 5 种叠片过滤器的  $d$ 、 $p$ 、 $l$ 、 $f_p$ 、 $\theta$  以及  $h$  代入式(10)中, 得到各叠片过滤器的无量纲综合评价值  $Q$ , 过滤器 I

到 V 的  $Q$  值依次为 7.22、7.08、7.88、8.63、3.11, 该值越小, 叠片过滤器性能越好。可以看出, 过滤器 V 的综合评价值较低, 过滤器 III 和过滤器 IV 的综合评价值较高, 说明过滤器 V 的综合性能较优, 而过滤器 III、过滤器 IV 的综合性能较差。根据表 2 和图 4 可以看出, 单项指标中, 过滤器 V 和过滤器 II 叠片流道沟槽内的泥沙堵塞较为均匀, 水力性能较好; 过滤器 V 和过滤器 I 的周期拦沙量较多, 过滤器 V 和过滤器 II 所拦截泥沙的粒径较小, 表现出较优的泥沙处理能力。可见, 式(10)可以全面合理地对叠片过滤器性能进行综合评价和对比。

2.4 基于评价公式分析叠片过滤器性能与其结构尺寸间的关系

叠片过滤器的净过流面积指的是叠片沟槽截面的总表面积, 代表过流叠片实际使用的面积<sup>[21]</sup>。叠片的结构尺寸参数决定着净过流面积的大小, 而净过流面积的大小又直接影响叠片过滤器水力性能和对泥沙的处理能力<sup>[22-24]</sup>。当净过流面积增大时, 单位时间系统过流量增多, 叠片过滤器的局部水头损失相应降低, 但较大的过流面积又会降低滤芯对泥沙的截留能力, 小粒径的泥沙不易被截留或容易被挤压带出叠片, 过滤器将失去过滤能力。因此, 叠片过滤器的性能会根据叠片的结构尺寸参数大小而发生改变<sup>[25-26]</sup>。

由式(10)可知, 当  $d$ 、 $\theta$ 、 $h$  值越小, 或  $p$ 、 $l$ 、 $f_p$  值增大时, 指标  $Q$  值都将减小, 此时说明叠片过滤器性能优良。而对叠片过滤器进行结构设计时, 各参数间的约束性普遍存在, 不能通过同时减小  $d$ 、 $\theta$ 、 $h$  值和增大  $p$ 、 $l$ 、 $f_p$  值来优化其性能。文中叠片过滤器沟槽截面均类似于等腰三角形, 因此对于单张叠片来说, 其沟槽外截面面积可按式(11)计算。

$$A = 2h^2 \tan \frac{\theta}{2} f_p \tag{11}$$

式中  $A$  为叠片净过流面积,  $\text{mm}^2$ ;  $h$  为叠片沟槽外截面三角形高,  $\text{mm}$ ;  $\theta$  为叠片沟槽外截面三角形顶角, ( $^\circ$ );  $f_p$  为每片叠片单面沟槽数。

假设叠片外径为  $R$ , 则叠片沟槽外截面三角形底边长与每片叠片单面沟槽数可按下式计算:

$$f_p = h \tan \frac{\theta}{2} \pi R \tag{12}$$

式中  $R$  为叠片外径,  $\text{mm}$ 。



假设叠片沟槽能通过的最大泥沙粒径为 $r$ ,可得如下关系式:

$$r = \frac{h}{\frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} + 1} \quad (13)$$

式中 $r$ 为叠片沟槽外截面三角形内切圆半径,mm。

将式(12)和式(13)代入式(11),可得:

$$A = r \left( \frac{1}{\sin \frac{\theta}{2}} \right) + 2\pi R \quad (14)$$

由前文分析可知,叠片过滤器的净过流面积大小影响其水力性能和泥沙处理能力。因此,本文试图通过调整叠片结构尺寸参数来改变叠片过滤器净过流面积与拦截泥沙粒径的相对大小,讨论优化叠片过滤器性能的可能性。

#### 1) 保持净过流面积不变,提高泥沙拦截能力

为使叠片过滤器在相同净过流面积下拦截更多的泥沙,应适当减小 $r$ 值。由式(14)可知,当 $r$ 值减小时, $\theta$ 值也相应减小。由式(13)可知,当 $r$ 与 $\theta$ 值均减小时, $h$ 值也需减小。再由式(12)可知, $\theta$ 与 $h$ 值减小, $f_p$ 值必将随之增大。因此,为保证在相同净过流面积下增大其泥沙的拦截能力,对于叠片过滤器设计而言,在叠片结构尺寸上应满足减小 $\theta$ 和 $h$ 值。同时, $f_p$ 值也应增大,一般认为更长的沟槽会为更多的泥沙提供沉降空间,这与本文指标 $Q$ 的结论相一致。

#### 2) 保持拦截泥沙粒径不变,提高水力性能

增大净过流面积能有效的降低叠片过滤器运行过程中的局部水头损失,提高水力性能。因此,保持 $r$ 值不变,由式(14)可知,当试图增加叠片过滤器的净过流面积时, $\theta$ 值应减小。再由式(13)得,当 $\theta$ 值减小时, $h$ 值将随之增大,这与上文结论相悖。

一般来说,降低叠片过滤器的局部水头损失与增强其泥沙拦截能力本身就是相对矛盾的。仅仅通过改变 $\theta$ 与 $h$ 值的大小,无法综合地满足叠片过滤器对过流能力和泥沙处理能力的要求,其性能的优劣也较难得到评价。而且,当改变 $h$ 值后, $d$ 也会随之改变。通过相关分析可知, $d$ 与叠片片数 $p$ 之间存在负相关关系( $P < 0.01$ )。假设叠片过滤器在额定流量一定的情况下,其滤芯的总高度是固定不变的,若改变 $d$ 值, $p$ 值相应增大或减小,过滤器的性能也会因此受到影响。

因此, $d$ 、 $\theta$ 、 $h$ 、 $p$ 、 $l$ 及 $f_p$ 值的增大或减小都会促使综合评价指标 $Q$ 值在数值上发生改变。 $Q$ 值越小,说明某种过滤器相比于其他过滤器的综合性能更好。此时,综合评价指标能更客观地对比不同叠片过滤器之间在水力性能、泥沙处理能力等方面的综合性能<sup>[27-30]</sup>,但仅通过简单地减小 $d$ 、 $\theta$ 、 $h$ 值,或增加 $p$ 、 $l$ 、 $f_p$ 值来降低 $Q$ 值并不会同时提高叠片过滤器水力性能及泥沙处理能力。对于优化叠片过滤器的某项性能参数,更应结合过滤器叠片的几何结构尺寸综合考虑。

### 3 结论

本文对5种国内外常见叠片过滤器进行水力性能和过滤性能测试试验,对其单项性能进行比较与分析。试验结果表明:5种叠片过滤器在拦沙量、拦截泥沙中值粒径、运行周期及堵塞均匀度等方面有较大差异。

在性能测试的基础上,筛选与叠片尺寸参数相关的单项性能指标(拦沙量、拦截泥沙中值粒径、堵塞均匀度),结合线性回归结果,建立基于叠片结构尺寸参数的叠片过滤器性能综合评价的数学模型,并对其进行了理论的分析。5种叠片过滤器的综合评价结果为:过滤器V(3.11) < 过滤器II(7.08) < 过滤器I(7.22) < 过滤器III(7.88) < 过滤器IV(8.63),该指标大小反映出5种叠片过滤器在叠片的结构尺寸上存在差异,从而在堵塞均匀度、周期拦沙量以及拦截泥沙中值粒径等方面表现出差异的现象。

叠片过滤器的结构尺寸参数间存在一定的约束关系,仅通过改变某一参数值的大小很难同时提高过滤器水力性能及泥沙处理能力。因此,对于优化叠片过滤器的某项性能参数,更应结合过滤器叠片的几何结构尺寸综合考虑。

### [参考文献]

- [1] 李云开,周博,杨培岭.滴灌系统灌水器堵塞机理与控制方法研究进展[J].水利学报,2018,49(1):103—114.  
Li Yunkai, Zhou Bo, Yang Peiling. Research advances in drip irrigation emitter clogging mechanism and controlling methods[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 103—114. (in Chinese with English abstract)
- [2] 吴显斌,吴文勇,刘洪禄,等.再生水滴灌系统滴头抗堵塞性能试验研究[J].农业工程学报,2008,24(5):61—64.  
Wu Xianbin, Wu Wenyong, Liu Honglu, et al. Experimental study on anti-clogging performance of emitters for reclaimed wastewater irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 61—64. (in Chinese with English abstract)
- [3] 阿不都沙拉木,彭立新,崔春亮.微灌系统中叠式和网式过滤器对含藻类地表水过滤效果的分析[C]//中国水利学会青年科技论坛,2005.
- [4] 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. (in Chinese with English abstract)
- [5] 张重.叠片过滤器流动特性的研究及分形流道设计与验证[D].北京:中国农业大学,2016.  
Zhang Chong. Study on Flow Characteristics of Laminated Filter and Design and Verification of Fractal Flow Channel[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [6] 马子萱.叠片式过滤器内部流道流动特性的研究及分形叠片产品研发[D].北京:中国农业大学,2018.  
Ma Zixuan. Research of the Flow Path in the Laminated Filter and Product Development with Fractal Curve[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘辉,夏群,王文标.直接过滤池过滤性能综合评价指标[J].中国市政工程,2001(1):56—59.  
Liu Hui, Xia Qun, Wang Wenbiao. Indices for comprehensive ap-

- praisal of direct filter tank performance[J]. China Municipal Engineering, 2001(1):56—59. (in Chinese with English abstract)
- [8] 肖新棉,董文楚,杨金忠,等.微灌用叠片式砂过滤器性能试验研究[J].农业工程学报,2005,21(5):81—84.  
Xiao Xinmian, Dong Wenchu, Yang Jinzhong, et al. Experimental study on characteristics of laminated sand filter form icro-irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(5):81—84. (in Chinese with English abstract)
- [9] 张文正,翟国亮,吕谋超,等.微灌条件下三种过滤器过滤效果试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(4):88—93.  
Zhang Wenzheng, Zhai Guoliang, Lü Mouchao, et al. Experiment Study on the Efficacy of sandfilter, screen filter and disc filter for removing silts from the yellow river water for micro-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(4): 88—93. (in Chinese with English abstract)
- [10] 崔春亮,阿不都沙拉木,申祥民,等.自主研发的叠片过滤器与国外同类产品的性能比较研究[J].节水灌溉,2010(12):16—18.  
Cui Chunliang, Abudu Shalamu, Shen Xiangmin, et al. Comparison of performance of one independently-developed disc filter with similar products abroad[J]. Water Saving Irrigation, 2010(12): 16—18. (in Chinese with English abstract)
- [11] 叶成恒,范兴科,姜珊.离心叠片与离心筛网过滤系统性能比较试验[J].中国农村水利水电,2010(2):73—75.  
Ye Chengheng, Fan Xingke, Jiang Shan. A comparative experiment on performances of centrifuge disc and centrifuge screen filtration systems[J]. China Rural Water and Hydropower, 2010(2): 73—75. (in Chinese with English abstract)
- [12] 张娟娟.微灌用典型过滤器水力学特性及泥沙过滤效果研究[D].郑州:华北水利水电大学,2015.  
Zhang Juanjuan. Study on Hydraulic Characteristics and Sediment Filter Effects of Typical Filters[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [13] 秦天云,王文娥,胡笑涛.滴灌系统网式和叠片式过滤器水力性能试验研究[J].灌溉排水学报,2017,36(1):57—62.  
Qin Tianyun, Wang Wene, Hu Xiaotao. Hydraulic performance of screen and disc filters for drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1):57—62. (in Chinese with English abstract)
- [14] 骆秀萍.自清洗网式过滤器运行特性及内部流场数值模拟研究[D].石河子:石河子大学,2013.  
Luo Xiuping. Study on Operating Characteristics and Internal Flow Field Numerical Simulation of Self-cleaning Screen Filter[D]. Shihezi: Shihezi University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [15] 微灌工程技术规范:SL 103-95[S].
- [16] 杨培岭,鲁萍,任树梅,等.基于分形理论的叠片过滤器性能试验研究[J].农业机械学报,2019,50(2):218—226.  
Yang Peiling, Lu Ping, Ren Shumei, et al. Experiment on performance of disc filter based on fractal theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 218—226. (in Chinese with English abstract)
- [17] 邱元锋,孟戈,罗金耀.微灌旋流网式一体化水砂分离器试验[J].农业工程学报,2016,32(5):77—81.  
Qiu Yuanfeng, Meng Ge, Luo Jinyao. Experiment of screen hydrocyclone separator for micro-irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016,32(5):77—81. (in Chinese with English abstract)
- [18] 李宏燕.微灌叠片过滤器泥沙过滤与反冲洗研究[D].郑州:华北水利水电大学,2014.  
Li Hongyan. Study on the Filtration and Backwashing for the Disc Filter in Micro-irrigation[D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [19] 陈京英.基于水头损失解析的BAF过滤模式及反冲洗控制研究[D].济南:济南大学,2010.  
Chen Jingying. BAF Filtration Mode and Backwashing Control based on Headloss Analysis[D]. Jinan: University of Jinan, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张威,刘智,李龙.基于多元回归分析的纬平织物热湿舒适性能[J].纺织学报,2011,32(7):54—59.  
Zhang Wei, Liu Zhi, Li Long. Thermal-moisture comfort of weft knitted plain fabric based on multiple regression analysis[J]. Journal of Textile Research, 2011, 32(7):54—59. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨万龙,宋世良.叠片式自动反冲洗过滤器的研制[J].中国农村水利水电,2005(1):115—117.  
Yang Wanlong, Song Shiliang. Development of laminated automatic backwashing filter[J]. China Rural Water and Hydropower, 2005 (1):115—117. (in Chinese with English abstract)
- [22] Zhou Bo, Li Yunkai, Song Peng, et al. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2016, 35(3):181—192.
- [23] Hou Junxia, Zhang Youchen. Study on filtration performance of rotary disc filter with different filter discs[J]. Advanced Materials Research, 2012, 610-/611/612613:1265—1269.
- [24] Duran-Ros M, Puig-Bargués J, Arbat G, et al. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents[J]. Agricultural Water Management, 2009, 96(1):0—79.
- [25] Yurdem H, Demir V, Degirmencioglu A. Development of a mathematical model to predict head losses from disc filters in drip irrigation systems using dimensional analysis[J]. Biosystems Engineering, 2010, 100(1):14—23.
- [26] Vedat Demir, Hüseyin Yurdem, Yazgi A, et al. Determination of the head losses in metal body disc filters used in drip irrigation systems[J]. Turkish Journal of Agriculture & Forestry, 2009, 33(3): 219—229.
- [27] 臧英,何新刚,周志艳,等.电动多旋翼植保无人机升力特性综合测评方法[J].农业工程学报,2018,34(14):69—77.  
Zang Ying, He Xingang, Zhou Zhiyan, et al. Comprehensive evaluation method for lifting characteristics of electric multi-rotor UAV for plant protection[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 69—77. (in Chinese with English abstract)
- [28] 吴澎,贾朝爽,范苏仪,等.樱桃品种果实品质因子主成分分析及模糊综合评价[J].农业工程学报,2018,34(17):291—300.  
Wu Peng, Jia Chaoshuang, Fan Suyi, et al. Principal component analysis and fuzzy comprehensive evaluation of fruit quality in cultivars of cherry[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018,34(17): 291—300. (in Chinese with English abstract)
- [29] 景有海,金同轨,范瑾初.均质滤料直接过滤性能的评价指标[J].给水排水,2000,26(3):13—16
- [30] 赵京,李立明.基于主成分分析法和核主成分分析法的机器人全域性能综合评价[J].北京工业大学学报,2014,40(12):1763—1769.  
Zhao Jing, Li Liming. Comprehensive evaluation of robotic global performance based on principal component analysis and kernel principal component analysis[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(12): 1763—1769.

## Comprehensive evaluation method for hydraulic performance and filtering quality of laminated filter

Yang Peiling, Lu Ping, Ren Shumei, Wang Xiao, Liu Weijie

(College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Laminated filter has the characteristics of screen filter and sand filter, and can achieve three-dimensional filtration. The structure size of laminated filter is the most important parameter affecting the filter performance. In this study, we established a comprehensive evaluation method of laminated filter performance. Experiment was carried out at Tongzhou Test Station of China Agricultural University. A total of 5 kinds of laminated filters commonly used were selected. The hydraulic and filtration performance of laminated filters were tested under different sediment concentration (0.02%, 0.03% and 0.04%) and flow rate (25, 30, 35 m<sup>3</sup>/h). Dynamic change of head loss with time, clogging uniformity index, amount of intercepting sediment and median particle size of intercepted sediment were analyzed. Based on the performance test, the 3 single performance indices (amount of intercepting sediment, median particle size of intercepted sediment and clogging uniformity index) related to the size parameters of laminates were selected through correlation analysis. By means of stepwise regression analysis and principal component analysis, the multivariate linear regression equations between 3 single performance indices and 6 laminated structural parameters (single laminate thickness, the number of laminations, length of the flow channel, the number of flow channels, the apex angle of triangle outside flow channel, the height of triangle outer section of flow channel) were established respectively. And the regression equation of 3 single performance indices was used to establish the comprehensive evaluation function of laminated filter performance by direct weighting method. The results showed that there were great differences among the 5 laminated filters in head loss, amount of intercepting sediment, median particle size of intercepted sediment and clogging uniformity index. The evaluation value of comprehensive evaluative function established in this paper for 5 kinds of laminated filters was ordered by filter V(3.11), smaller than filter II(7.08), filter I(7.22), filter III(7.88) and filter IV(8.63). The smaller evaluation value indicated better comprehensive performance of laminated filters. According to the analysis of the test data, the evaluation results were in line with the actual situation, and could comprehensively and reasonably evaluate and compare the performances of laminated filters. In addition, the numerical value of the index also reflected the difference of the structure and size of the 5 kinds of laminated filters, which showed difference in clogging uniformity index, amount of intercepting sediment and median particle size of intercepted sediment. According to the design requirements of laminated filters, there was a certain constraint relationship between the structural size parameters of laminated filters. It was difficult to improve the hydraulic performance and sediment disposal capacity of the filter at the same time only by changing the value of a certain parameter. Therefore, the geometric structure and size of laminated filter should be considered comprehensively in order to optimize some performance parameters of laminated filter. This evaluation method cannot only be used to assess performance of laminated filter, but also provide information for improving the size of laminated filter structure and further optimizing the performance of filter.

**Keywords:** filters; clogging; evaluation; lamination; uniformity