

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.025

基于分形理论的叠片过滤器性能试验研究

杨培岭¹ 鲁萍¹ 任树梅¹ 马子萱² 王 泉¹

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国水利电力对外有限公司, 北京 100120)

摘要: 传统叠片过滤器运行过程中水头损失存在陡增现象, 极易在短时间内完全堵塞而影响过滤效果。本文将分形理论应用到叠片过滤器叠片流道的设计中, 提出一种叠片过滤器, 并与国内外传统叠片过滤器的水头损失、拦沙量、拦截泥沙粒径以及泥沙在流道分布的均匀程度等方面进行试验对比分析。在试验对比的基础上, 引入堵塞均匀度指标 η_u , 通过定量表征运行时段水头损失变化规律判定叠片过滤器堵塞均匀性。结果表明, 清水条件下本文叠片过滤器局部水头损失比传统叠片过滤器低 12% ~ 20%, 含沙水条件下本文叠片过滤器水头损失随时间增长速率均匀且低于传统叠片过滤器的增长速率; 不同进水含沙量条件下, 本文叠片过滤器的平均拦沙量比传统叠片过滤器高 11% ~ 54%, 拦截泥沙平均中值粒径为 39.51 μm , 小于传统叠片过滤器的 59.04 ~ 87.60 μm 。

关键词: 叠片过滤器; 水头损失; 分形流道; 堵塞均匀度; 评价指标

中图分类号: S275.6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)02-0218-09

Experiment on Performance of Disc Filter Based on Fractal Theory

YANG Peiling¹ LU Ping¹ REN Shumei¹ MA Zixuan² WANG Xiao¹

(1. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. China International Water and Electric Corp, Beijing 100120, China)

Abstract: During the operation of traditional disc filter, the head loss is steeply increased, and it is easy to reach complete clogging in a short time, which affects the filtering effect. The existing research focuses on the improvement of its macrostructure, and there are few studies on the optimization of disc flow path structure. A fractal theory was introduced into the design of disc filter along flow path. A new type of disc filter was proposed, and compared with the traditional disc filter at home and abroad on the performance of head loss, sand interception, d_{50} and the uniformity of sediment distribution in the runner. Based on the experimental comparison, the clogging uniformity index η_u , was introduced, and it was desirable to determine the clogging uniformity by quantitatively characterizing the change in head loss during the operating period. The results showed that the local head loss of the new disc filter under the condition of clear water was 12% ~ 20% lower than that of the traditional disc filters, under the condition of sandy water, the head loss of the new disc filter was uniform with time and lower than the growth rate of the traditional disc filter; under the condition of different concentrations of sandy water, the average sand interception of the new disc filter was 11% ~ 54% higher than that of the traditional disc filter, the average d_{50} of the intercepted sediment was 39.51 μm , which was smaller than the traditional disc filter of 59.04 ~ 87.60 μm . The research can provide theoretical and experimental basis for the feasibility and superiority of fractal theory applied to disc structures.

Key words: disc filter; head loss; fractal flow path; clogging uniformity; evaluation index

0 引言

灌水器堵塞是威胁滴灌技术发展的最大障碍^[1], 过滤器作为滴灌系统中对水源进行净化处理

的最后一道屏障, 是保证系统正常运行的核心设备^[2-3]。叠片过滤器兼具筛网和砂石过滤器的特点, 能够实现立体过滤^[4], 因而得到广泛应用, 其水力性能也逐渐成为研究的重点。水流在叠片流道内

收稿日期: 2018-08-22 修回日期: 2018-10-10
基金项目: 国家自然科学基金项目(51879263)和内蒙古自治区科技重大专项
作者简介: 杨培岭(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究, E-mail: yang-pl@163.com

运动较为复杂,传统叠片过滤器在运行过程中,当水头损失达某一范围后便开始随时间激增,过滤器短时间内便形成完全堵塞^[5],不仅提高了运行成本,还将直接影响整个滴灌系统的运行效率。

近年来,大量学者对叠片过滤器外部宏观结构进行组合改进,从而提升其水力性能,如反清洗功能和泥沙处理能力^[6-10]。肖新棉等^[8]结合砂过滤器和叠片过滤器的优点,研究设计叠片式砂过滤器,增大了过滤能力并减小了水头损失;王君等^[9]研发带有透明壳体的水动活塞式叠片过滤器,可以达到稳定水头损失和减小幅值的效果;张杰武^[10]将离心和叠片过滤器组合优化,设计了一套水流泥沙分离系统,使过滤效果得到显著提高。然而已有的研究主要集中于对叠片过滤器外部宏观尺寸的改进,虽能在一定程度上提升产品性能,但叠片或流道结构作为影响过滤性能的主要参数并未得到优化,因此叠片内部的水力性能问题尚未得到真正解决。

叠片过滤器是通过复杂的水流通道及大量的交叉点实现深度过滤的,其滤芯内部的水流状态为紊流,而紊流在许多方面都显示出分形的特性^[11]。分形最早由 MANDELBROT^[12] 提出,用来描述形状极不规则的结合对象,其图形具有自相似性。分形理论是以更小尺度为基础建立起来的,因此在微流道方面得到广泛的应用^[13-15]。李云开^[15]在灌水器滴头的迷宫流道设计中引入分形理论,利用分形曲线构造了更为复杂的流道边界,从而使分形流道较迷宫式流道更能降低滴头的流态指数,具有较强的抗堵塞能力。然而,对于分形流道的相关研究还处于起步阶段,叠片过滤器中流道的分形研究更是少见。通过对叠片过滤器中水流特性的研究^[16],可知更为复杂的流道结构,在某种程度上可以提高过滤器的过滤水平。基于此,本文将分形理论引入到叠片过滤器叠片流道的沿程设计中,自主设计一种叠片式过滤器,旨在利用分形几何来构造具有分形特性的叠片流道轨迹,进一步提升过滤器的过滤能力。通过将具有分形流道特点的叠片过滤器与国内外传统直流道叠片过滤器的水头损失、拦沙量、拦截泥沙粒径以及泥沙在流道分布的均匀程度等方面进行试验对比研究,结合过滤器水头损失和流量的变化关系分析叠片过滤器分形流道的过滤机理,论证分形理论应用在叠片优化设计上的可行性和优越性,为进一步提升叠片过滤器的水力性能和泥沙处理能力提供新思路。

1 材料与方法

1.1 叠片分形流道的设计方法

叠片过滤器叠片流道设计方法主要分为两个部

分:①根据流道特征以及过滤器的运行原理,引入 Minkowski 曲线,以叠片内部流道沿程轴线为主体,运用一级分形曲线且曲线中分形高度为 0.3 mm (图 1)。②在叠片内部流道的中间区域增加缓冲槽,缓冲槽底部与进入叠片方向的流道深度一致,保持底边平直,缓冲槽宽度为 0.4 mm (图 2)。传统叠片与本文叠片的主要区别在于流道的分形以及缓冲槽的设计,具体结构示意图见图 3。

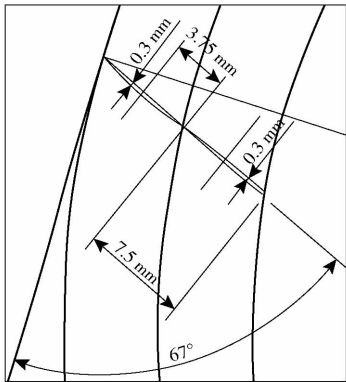


图 1 添加缓冲槽的一次分形流道设计
Fig. 1 First-order fractal flow path design with buffer tank

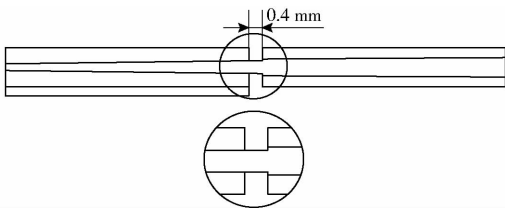


图 2 缓冲槽侧面示意图
Fig. 2 Longitudinal section sketch of buffer tank

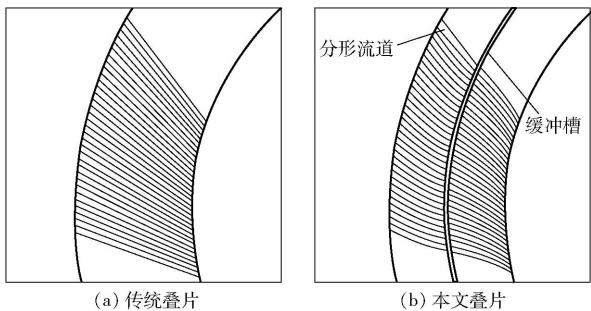


图 3 传统叠片与本文叠片流道结构示意图
Fig. 3 Schematics of traditional and new disc flow path structure

1.2 试验材料

试验平台由蓄水池 (2 m × 2 m × 1.5 m)、潜水泵、搅拌泵、叠片过滤器 (本文叠片过滤器 DN、2 种国外传统叠片过滤器 DF1、DF2 及 2 种国内传统叠片过滤器 DC1、DC2)、高精密压力表以及电磁流量计等组成,如图 4 所示。为满足滴灌对水量及过滤的需求,控制 5 种叠片过滤器的额定流量均为 30 m³/h,额定工作压力为 0.1 MPa,管道的进出口尺

寸为 63 mm,过滤目数均为 120 目。不同过滤器均采用同一外壳,因此除滤芯不同外,其他均保持一致。

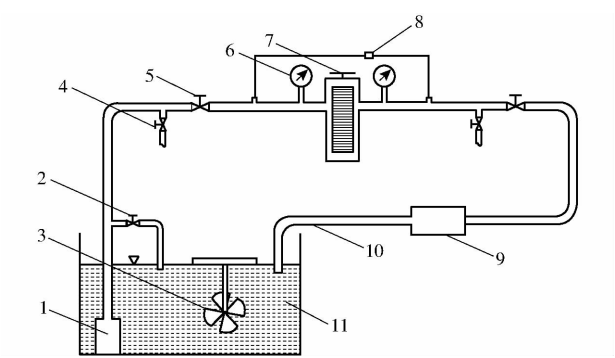


图 4 试验装置示意图

Fig. 4 Schematic of experimental device

1. 潜水泵 2. 流量调节阀 3. 搅拌机 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

1.3 试验设计及过程

试验包含清水和含沙水试验两部分,含沙水试验前,按所需比例在蓄水池中配置好所需含沙水,使用搅拌机保证水源含沙浓度的稳定。试验过程中,水流由蓄水池进入过滤器,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。

在清水条件下,通过电磁流量计和精密压力表测量叠片过滤器出口流量及进出口压降,探求 5 种叠片过滤器水头损失随流量的变化关系。

实际大田灌溉中,为保证灌溉水量,过滤器一般以最大流量进行工作,结合该实际状况本试验保持进水流量为 30 m³/h。根据微灌上易堵塞水质标准^[17],分别设置 0.02%、0.03%、0.04% 3 个进水含沙量水平,其对应的固体颗粒含量分别为 200、300、400 mg/L。同时,考虑实际灌溉中叠片过滤器常用于二级过滤,而一般经过一级过滤后的泥沙粒径均小于 0.18 mm^[18],本文选用的泥沙级配分析如表 1 所示,可以看出粒径小于 0.16 mm 的泥沙质量分数超过 80%。试验切合工程实际,具有广泛应用

表 1 泥沙粒径区间和分布

Tab. 1 Particle range and particle size distribution of test sand

粒径/ μm	质量分数/%	累积质量分数/%
0 ~ 10	10.68	10.68
10 ~ 20	8.94	19.62
20 ~ 40	22.97	42.59
40 ~ 80	30.78	73.37
80 ~ 160	15.03	88.40
160 ~ 320	6.64	95.04
320 ~ 1 000	4.96	100

价值。
含沙水试验中,参考灌水均匀度的要求^[19],以系统流量偏差 20% 作为衡量和判断过滤器严重堵塞的指标,达到该指标则停机结束本次试验。

试验主要测量过滤器进出口压力差、过滤器出口流量、过滤前后水流含沙量、过滤周期、过滤器周期内拦沙量以及所拦截泥沙的粒径组成。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;系统瞬时流量通过电磁流量计每 1 min 读取记录;为保证数据分布的均匀性,在系统流量下降至初始流量的 98%、96%、92%、88%、84% 及 80% 6 个时刻分别在过滤器进出口处采集体积为 250 mL 左右的水样,经过量积、沉淀、干燥、称量计算水样含沙量及该时刻过滤器的泥沙去除率;过滤周期为试验结束时(系统流量下降至初始流量的 80%)过滤器运行的总时间;试验结束后,清洗叠片上截留的泥沙,干燥、称量得到周期内拦沙量;采用激光粒度仪对截留泥沙样品进行粒径组成分析测定。

2 试验结果与分析

2.1 清水条件下水头损失对比

过滤器的水头损失是评价过滤器的关键性能参数^[20],主要是水流通过过滤器时所产生的能量损耗,一般认为过滤器水头损失小,则能量消耗低,过滤性能好。

水头损失公式可表示为

$$h_j = \xi v^2 / (2g)$$
 (1)

式中 h_j ——过滤器水头损失, m

ξ ——局部水头损失系数

v ——断面平均流速, m/s

g ——重力加速度

流速公式可表示为^[21]

$$v = Q/A$$
 (2)

式中 Q ——过滤器进口流量, m³/s

A ——过流断面面积, m²

根据式(1)、(2),过滤器的局部水头损失可表示为

$$h_j = kQ^2$$
 (3)

式中 k ——回归方程系数

试验中,通过控制进、出水管的闸阀和水泵的流量调节阀来测量不同流量下叠片过滤器的清水水头损失,得到 5 种叠片过滤器清水条件下的局部水头损失随流量的变化关系曲线,如图 5 所示(5 种过滤器均采用同一种外壳,不同过滤器产生的局部水头损失不同仅与叠片结构的差异有关)。从图 5 中可

看出,5种过滤器的局部水头损失均随系统过流量的增加而增大;相同过滤条件下,DN的局部水头损失明显低于其他4种传统叠片过滤器。其中,在额定流量下,DN的局部水头损失比其他4种传统叠片过滤器低12%~20%。

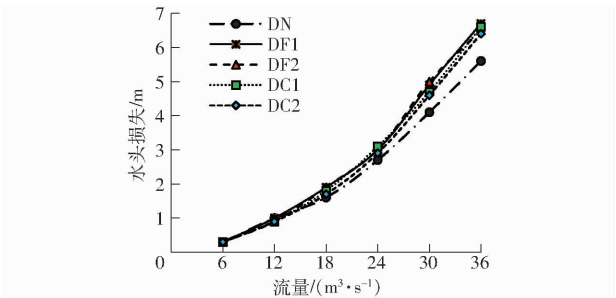


图5 清水条件下叠片过滤器局部水头损失随流量的变化曲线

Fig.5 Changing curves of local head loss of five disc filters with flow by using clear water

为更好地确定水头损失的变化情况,将各过滤器不同流量下的水头损失按式(3)进行拟合,结果如表2所示,决定系数 R^2 均大于0.98,相关程度较高。DN回归方程系数 k 明显小于其他4种过滤器,由此可知清水条件下,本文叠片过滤器能量消耗比

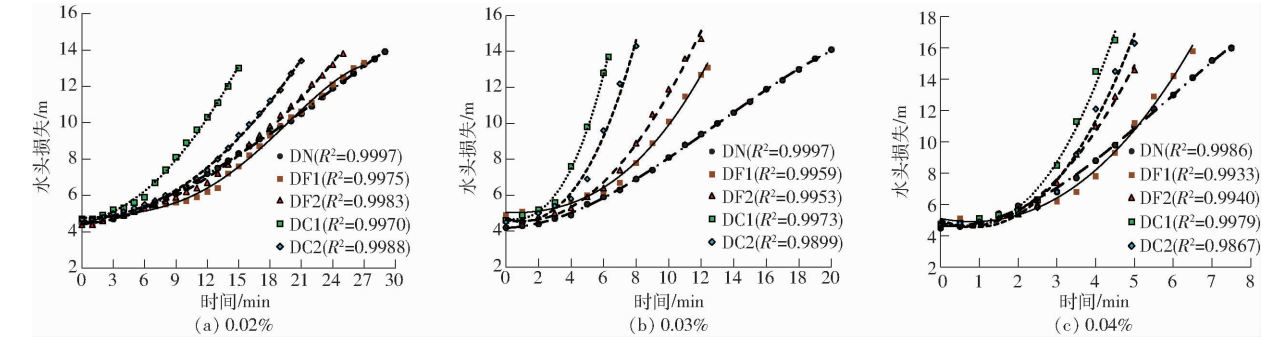


图6 不同进水含沙量条件下5种过滤器水头损失随时间的变化曲线

Fig.6 Changes of head loss of five disc filters with time under different concentrations of sandy water

2.2.2 除沙率与拦沙量

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,反映了过滤器的过滤能力。过滤器的除沙率是指通过过滤器前后含沙量之差与过滤前含沙量的比值,是过滤器一项重要性能指标^[22]。表3为不同进水含沙量时,5种过滤器周期拦沙量。可以看出同一工况下,不同过滤器的拦沙量呈现极显著性差异($P<0.01$),DN的拦沙量高于传统叠片过滤器。其中,DN的平均拦沙量(3种含沙量工况的平均值)比传统叠片过滤器高11%~54%,DN相比传统叠片过滤器表现出更高的泥沙过滤能力。

如图7(图中时刻1~6分别表示流量下降至初始流量的98%、96%、92%、88%、84%及80%时)所示,不同过滤器的除沙率随着时间变化均呈先增

表2 清水条件下5种叠片过滤器局部水头损失-流量回归方程

Tab.2 Regression equation of local head loss and flow for five disc filters by using clear water		
过滤器	水力特征方程	R^2
DN	$h_j = 0.00447Q^2$	0.989
DF1	$h_j = 0.00529Q^2$	0.995
DF2	$h_j = 0.00523Q^2$	0.992
DC1	$h_j = 0.00519Q^2$	0.997
DC2	$h_j = 0.00502Q^2$	0.997

传统叠片过滤器小。

2.2 抗堵塞性能与泥沙过滤性能对比

2.2.1 含沙水条件下水头损失对比

水头损失增长速率是表征过滤器性能的重要指标之一,过滤器对不同浓度含沙水的过滤稳定性直接反映在水头损失增长速率上。由图6可知,5种过滤器的水头损失增长速率差异显著。总体来说,传统叠片过滤器的水头损失变化均表现为前期增长缓慢,后期激增的现象;DN水头损失随时间呈均匀且缓慢的增长趋势,曲线没有明显拐点,这与其他4种传统叠片过滤器变化趋势不同。

表3 不同进水含沙量条件下5种过滤器周期拦沙量

Tab.3 Sand interception of five disc filters under different concentrations of sandy water

过滤器	进水含沙量/%		
	0.02	0.03	0.04
DN	46.94	45.40	38.40
DF1	40.80	40.47	36.64
DC1	38.74	39.93	30.04
DF2	31.97	30.29	22.11
DC2	20.55	21.74	18.19

注: F_x 值和 F_y 值分别表示进水含沙量和过滤器种类对周期拦沙量的单因素线性回归方程的显著性检验结果;**表示在显著性水平 $\alpha=0.01$ 条件下达到显著,下同。

大后减小、后期小范围波动的变化趋势,5种过滤器的除沙率均随含沙水浓度增高而降低。分析认为,

过滤系统运行过程中,过滤器叠片流道内堵塞物不断累积,滤孔尺寸逐渐变小,能够过滤孔的泥沙颗粒数量也相应减少,除沙率逐渐增大;而随着过滤时间的增加,流道孔隙逐渐减小并被堵塞,过滤器进口压力增大,较高的水流压力将叠片流道上附着的部分泥沙颗粒挤压带出叠片,从而导致除沙率在后期

有略微的降低,这与吴显斌^[23]的研究相一致。而随着含沙水浓度的增大,过滤器滤芯会在更短时间内堵塞,在高浓度含沙水流的压力作用下,叠片流道上被水流挤压带出的泥沙会相应增多,因此除沙率也会随之降低,结果与李宏燕^[24]的研究吻合。

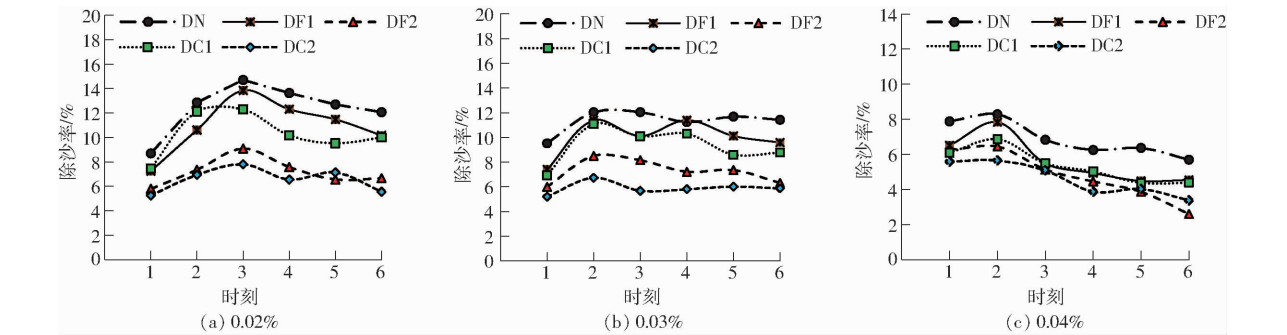


图7 不同进水含沙量条件下5种过滤器除沙率随时间的变化曲线

Fig.7 Changes of sand removal rate of five disc filters with time under different concentrations of sandy water

2.2.3 堵塞均匀度指标

从图8可看出,5种过滤器除沙率的最高值均出现在水头损失为6~8m段,此后除沙率随进口压力增大有小范围降低,水头损失随时间出现快速增长趋势,可以认为此时过滤器已经发生明显堵塞。将从过滤器开始运行至水头损失达6~8m的时段定义为过滤器稳定运行时段(t_1),将从过滤器水头损失达6~8m至完全堵塞停止运行(流量下降至初始流量的80%)的时段定义为过滤器堵塞运行时段(t_2)。

过滤器水头损失达6~8m后,除沙率小范围减小,但平均除沙率(S_{t_2} 、 S_{t_1})没有明显降低(表4, T 为过滤器运行周期),可以认为过滤器虽堵塞加剧,但

仍保持较高的过滤能力。此时过滤系统流量偏差仅为2%~4%, t_1 仅占总过滤周期的40%~50%。本文叠片过滤器在 t_2 阶段水头损失随时间增长较为均匀(图8),持续较长过滤时间;其他4种传统叠片过滤器在 t_2 阶段较本文叠片过滤器水头损失随时间上升较快,达到完全堵塞的时间短。说明本文叠片过滤器较传统过滤器更能够保持较长时间的高效除沙状态,这可能与堵塞物在叠片流道内分布的均匀度有关。

由图6可知,过滤器系统运行 t_1 和 t_2 阶段水头损失动态变化特征均表现出随系统运行线性递增的特征,且不同过滤器线性递增速率存在差异,传统过

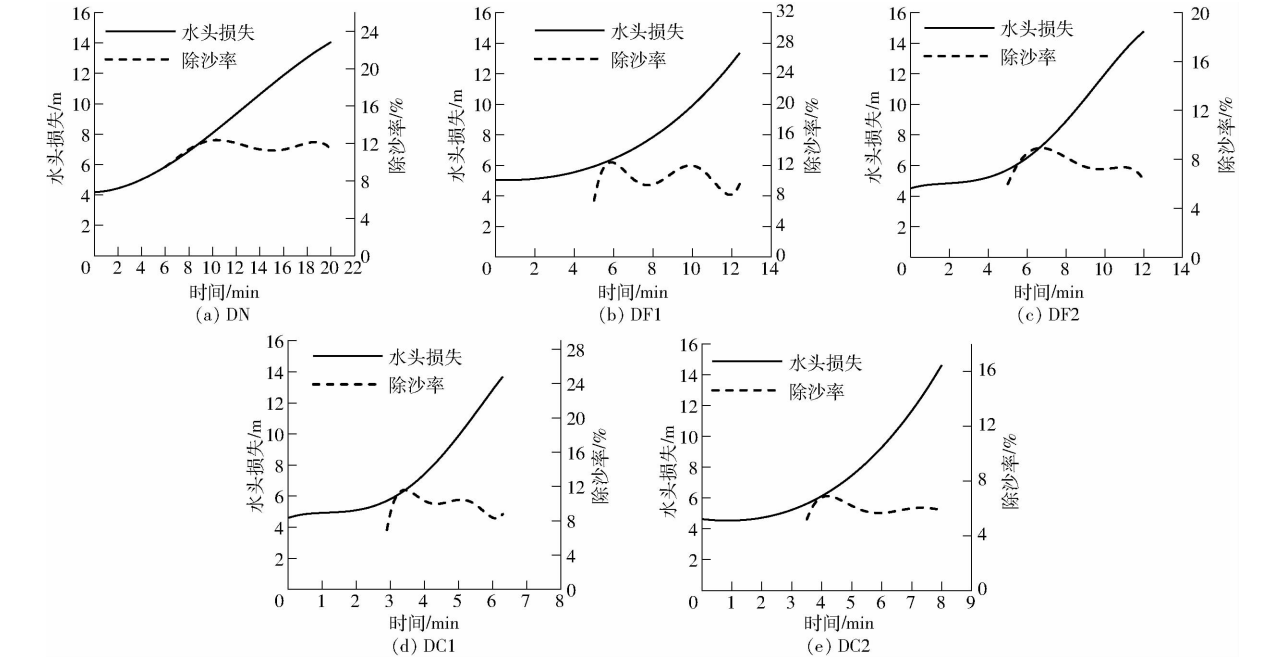


图8 进水含沙量为0.03%时5种过滤器水头损失与除沙率关系曲线

Fig.8 Relationship between head loss and sediment removal rate of five disc filters when concentration of sandy water was 0.03%

表 4 进水含沙量为 0.03% 时 5 种过滤器
平均除沙率(质量分数)

Tab.4 Average sand removal rate of five disc filters when
concentration of sandy water was 0.03%

指标	过滤器				
	DN	DF1	DC1	DF2	DC2
$S_{t1}/\%$	10.79	9.40	9.02	7.26	5.97
$S_{t2}/\%$	11.60	10.31	9.45	7.27	5.85
$\frac{t_1}{T}/\%$	40.00	48.39	47.62	50.00	50.00

滤器系统运行 t_2 阶段存在水头损失急剧增加,堵塞物时段分布不均匀过程。综合上述分析,本文引入过滤器堵塞均匀度指标(η_u),定量描述稳定运行阶段与堵塞运行阶段水头损失变化,定义为 t_2 时段水头损失随时间增长速率(k_2)与 t_1 时段水头损失随时间增长速率(k_1)的比值,即

$$\eta_u = \frac{k_2}{k_1}$$

(4)

表 5 不同进水含沙量条件下 5 种过滤器的堵塞均匀性指标

过滤器	进水含沙量 0.02%					进水含沙量 0.03%					进水含沙量 0.04%				
	k_1	R_1^2	k_2	R_2^2	η_u	k_1	R_1^2	k_2	R_2^2	η_u	k_1	R_1^2	k_2	R_2^2	η_u
DN	0.19	0.96	0.40	0.99	2.07	0.34	0.95	0.61	0.99	1.77	0.80	0.98	2.10	0.99	2.62
DF2	0.19	0.99	0.54	0.99	2.86	0.30	0.90	1.49	0.99	4.89	0.53	0.94	3.62	0.99	6.81
DF1	0.14	0.98	0.48	0.99	3.34	0.22	0.98	1.21	0.99	5.45	0.44	0.93	3.10	0.99	7.00
DC2	0.19	0.97	0.65	0.99	3.50	0.34	0.97	2.48	0.99	7.29	0.43	0.93	4.86	0.99	11.34
DC1	0.21	0.96	0.77	0.99	3.73	0.33	0.99	2.68	0.99	8.11	0.46	0.98	5.28	0.99	11.48

$F_x = 6.28^*$, $F_y = 11.59^{**}$

注: * 表示在显著性水平 $\alpha = 0.05$ 条件下达到显著。

2.2.4 拦截泥沙粒径分析

灌溉水中杂质的粒径直接关系到灌水器堵塞与否^[25],颗粒直径越大,就越容易造成灌水器的堵塞。叠片过滤器作为二级过滤装置,拦截的泥沙粒径是评价其性能的一个重要指标。图 9(图中 R 为粒径, μm)为不同进水含沙量条件下 5 种过滤器截留泥沙粒径的分布曲线,图中纵坐标代表小于某粒径的粒

k_2 越接近 k_1 ,即 η_u 越接近于 1,过滤器滤芯内的堵塞越均匀,过滤器运行时间越长,过滤性能越好。

表 5 表示额定流量条件下,在不同进水含沙量条件下 5 种过滤器的 η_u 值。从表 5 可看出,不同过滤器的 η_u 值呈现极显著性差异,在不同工况条件下, DN 的 η_u 值均小于其他 4 种传统叠片过滤器。而随着进水含沙量的增加,各过滤器间 η_u 值的差异加大,在 0.02% 进水含沙量条件下, DC1 与 DN 的 η_u 值差异不显著,然而在 0.04% 进水含沙量条件下, DC1 的 η_u 值较 DN 高 4 倍多。可以看出,含沙水浓度对 DC1 的 η_u 值影响较大,而对 DN 的影响相对小。这可能是因为分形流道结构使泥沙堵塞较为均匀,而传统叠片过滤器的直流道设计,使高浓度的含沙水流加剧了流道内堵塞物分布的不均匀,泥沙更易积聚流道造成过滤器的快速堵塞,因此传统叠片过滤器对高浓度含沙水的适应性较差。

径质量分数。从图 9 可看出,不同工况下, DN 截留泥沙粒径的分布曲线均靠右,说明 DN 截留的泥沙中小粒径泥沙含量较高; DF2、DC2 曲线靠左,相对截留的泥沙粒径较大。从截留泥沙的中值粒径 d_{50} 和粗端粒径 d_{90} 来看(表 6), DN 所拦截泥沙的 d_{50} 和 d_{90} 均小于其他 4 种传统叠片过滤器。不同进水含沙量条件下, DN 拦截泥沙平均 d_{50} 为 $39.51\ \mu\text{m}$,小

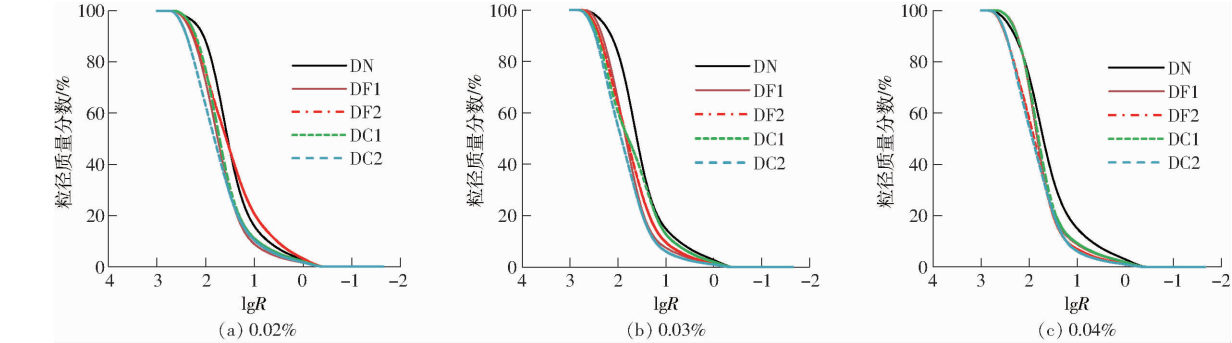


图 9 不同进水含沙量条件下 5 种过滤器截留泥沙粒径分布

Fig.9 Distributions of sediment particle size intercepted by five disc filters under different concentrations of sandy water

于传统叠片过滤器的 59.04 ~ 87.60 μm ,这说明本文叠片过滤器对于泥沙颗粒的拦截能力优于传统叠片过滤器。

表 6 不同进水含沙量条件下 5 种过滤器拦截泥沙 d_{50} 及 d_{90}

Tab. 6 Five disc filters intercepting sediment d_{50} and d_{90} under different concentrations of sandy water μm

过滤器	进水含沙量 0.02%		进水含沙量 0.03%		进水含沙量 0.04%	
	d_{50}	d_{90}	d_{50}	d_{90}	d_{50}	d_{90}
DN	34.820	105.508	32.847	135.863	50.874	173.855
DF2	38.008	170.034	65.688	245.357	79.108	303.262
DC1	52.057	158.757	61.341	275.675	63.716	177.058
DF1	56.624	184.576	68.867	214.261	67.710	195.325
DC2	66.575	245.685	85.834	299.292	110.403	305.052

2.3 叠片过滤器流道设计的堵塞机理

图 10 为传统叠片过滤器与本文叠片过滤器过滤后叠片表面比较图。从图可以明显看出,本文叠片过滤器所拦截的泥沙在流道中分布均匀,泥沙已经深入到叠片流道内部;而传统叠片泥沙分布不均匀,主要积聚于叠片的外边缘,并未进入叠片内部,这与上文的结果相一致。

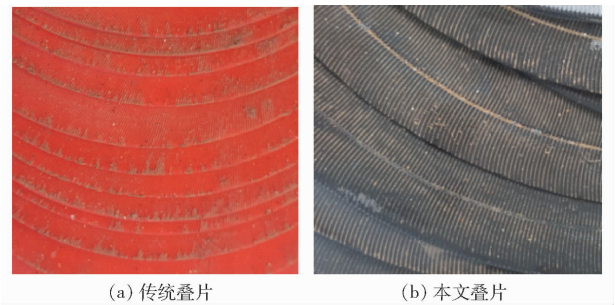


图 10 滤后叠片表面泥沙分布

Fig. 10 Sediment distribution on surface

传统叠片过滤器采用直流道设计,且流道截面由外向内逐渐缩小,这使得滤芯中水流压力沿流道向内逐渐降低,因此传统叠片过滤器的局部水头损失在整个流道上一直处于不均匀变化状态,易造成叠片堵塞。当含沙水通过直流道时,有部分泥沙被截留在压力突变处,该处压力不断降低,势必造成更多的泥沙积聚于此,短时间内便会造成过滤器的严重堵塞。因此,传统直流道叠片过滤器所拦截的泥沙易积聚于叠片的外边缘,很难进入到流道的内部。

相比于传统直流道设计,一方面,本文叠片流道的分形结构使叠片内部的局部水头损失变化较为均匀,水流在流道内的压力几乎没有突变,泥沙在流动过程中能够实现均匀地沉降。另一方面,一般认为水流在流动过程中湍流发展得更充分将更有利于泥沙的沉降和拦截^[26];同时流道的交叉结构使水流在流道内的流动存在明显的主流区和低速区,低速区

对细颗粒泥沙的沉降具有重要作用。传统叠片过滤器简单的直流道不利于流道中湍流漩涡的形成发展,而基于分形理论设计的叠片过滤器对叠片内部流道结构进行分形设计,分形又具有极高的自相似性。因此,分形流道不仅增加了水流的运动轨迹,其自相似性也增加了流道内部低速区的比例,这将更有利于水流内部漩涡的发展。因此,本文叠片过滤器能够较传统叠片过滤器截留更多的细颗粒泥沙,拦截泥沙能力也因此得到提升。

对于本文叠片过滤器来说,在过滤初期,由于泥沙沉降地较为均匀,系统过流量相对稳定。但随着泥沙逐渐累积并深入到流道内部,流道内堵塞物质量不断增加,加之分形流道复杂的结构形式,在过滤后势必会导致流道内局部水头损失较传统叠片过滤器有所增加。因此,在叠片内部流道的中间区域增加了缓冲槽设计,缓冲槽对降低过滤过程中的局部水头损失有着重要作用。通过上文分析可知,在传统直流道叠片中,流道水流压力分布不均,极易造成流道中某点泥沙的积聚堵塞,堵塞后水流只能通过流道间的交叉点与相邻的流道进行流体交换,水流可流动的范围小,因此积聚在叠片流道内部某点的泥沙会在短时间内达到很大程度的堵塞。如图 10 所示,传统叠片过滤器泥沙多积聚堵塞于叠片外边缘而很难向内部深入。相比较来说,本文叠片流道的分形结构使泥沙均匀地向叠片内部积累,此时位于流道内部的缓冲槽便发挥了作用。缓冲槽是基于分形流道的基础上对叠片的优化设计,一方面,位于叠片流道中间区域的缓冲槽能够为水流提供更大范围的流道交换,泥沙不易在流道内部积聚堵塞;另一方面,其截断流道也形成了较大的过流断面,可以有效降低过滤过程中所产生的局部水头损失。这也从另一方面解释了本文叠片过滤器滤芯内水头损失随系统运行而出现均匀增长的现象。

3 结论

- (1)清水条件下,本文叠片过滤器的水头损失较其他 4 种传统叠片过滤器低 12% ~ 20%;含沙水条件下,本文叠片过滤器水头损失随系统运行呈均匀且缓慢的增长趋势,曲线没有明显拐点。
- (2)不同进水含沙量条件下,本文叠片过滤器的平均拦沙量比传统叠片过滤器高 11% ~ 54%。流道的分形设计增加了水流流动轨迹,促进了流道水流中涡流的发展,能够较传统直流道叠片过滤器截留更多的泥沙。
- (3)随着进水含沙量的提升,本文叠片过滤器的堵塞均匀度 η_u 相对于传统叠片过滤器变化较为

稳定,而后的 η_u 变化较大。因此在高进水含沙量条件下,本文叠片过滤器仍能保持较稳定的过滤性能。

(4)不同进水含沙量条件下,本文叠片过滤器拦截泥沙平均 d_{50} 为 $39.51\text{ }\mu\text{m}$,小于传统叠片过滤器的 $59.04\sim 87.60\text{ }\mu\text{m}$,本文叠片过滤器显示出更强的泥沙拦截能力。

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)

[2] 宗全利,杨洪飞,刘贞姬,等. 网式过滤器滤网堵塞成因分析与压降计算[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(9):215 – 222.
ZONG Quanli, YANG Hongfei, LIU Zhenji, et al. Clogging reason analysis and pressure drop calculation of screen filter[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9):215 – 222. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170927&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2017.09.027. (in Chinese)

[3] 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 CSAE, 2008,24(5):61 – 64. (in Chinese)

[4] 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.

[5] 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)

[6] 王燕燕. 自清洗叠片过滤器设计与研究[D]. 北京:北京化工大学, 2010.
WANG Yanyan. Design and research of self-cleaning discs-type filter[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2010. (in Chinese)

[7] 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)

[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 CSAE, 2005, 21(5):81 – 84. (in Chinese)

[9] 王君,崔春亮,崔瑞. 自主研发的水动活塞式单体叠片过滤器水力学性能研究[J]. 黑龙江水利科技, 2016(9):4 – 6.
WANG Jun, CUI Chunliang, CUI Rui. A test on the hydraulic performance of self-developed piston driven monomer disc filter [J]. Heilongjiang Hydraulic Science and Technology, 2016(9):4 – 6. (in Chinese)

[10] 张杰武. 高含沙水泥沙分离系统设计与分析[J]. 节水灌溉, 2015(5):88 – 91.
ZHANG Jiewu. Design and analysis of high-sand cement sand separation system[J]. Water Saving Irrigation, 2015(5):88 – 91. (in Chinese)

[11] 汤一波. 紊流新理论初探:分形 DDC 和通用物理方程[D]. 南京:河海大学, 1993.
YANG Yibo. A preliminary study on the new theory of turbulence: fractal DDC and general physics equations[D]. Nanjing: Hohai University, 1993. (in Chinese)

[12] MANDELBROT B B. The fractal geometry of nature[M]. Basel: Birkhäuser Verlag, 1991.

[13] 冯吉. 引黄滴灌系统泥沙逐级调控机制及方法研究[D]. 北京:中国农业大学, 2017.
FENG Ji. Step regulation mechanism and method of sediment in drip irrigation system with the yellow river water[D]. Beijing: China Agricultural University,2017. (in Chinese)

[14] 陈伟. 基于 Y-形单元分形吸液芯结构流动与传热性能研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
CHEN Wei. Research on the flow and heat transfer performance of a fractal wick structure based on the Y-shaped unit[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2015. (in Chinese)

[15] 李云开. 滴头分形流道设计及其流动特性的试验研究与数值模拟[D]. 北京:中国农业大学, 2005.
LI Yunkai. Design of fractal flow path for emitters and experiment study and medeling on its fluid mechanism[D]. Beijing: China Agricultural University,2005. (in Chinese)

[16] TUCOTTE D L. Fractals in fluid mechanics[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1988, 20(1):5 – 16.

[17] 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)

[18] 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)

[19] SL 103—95 微灌工程技术规范[S]. 1995.

- [20] 聂新山. 高效网式过滤器的试验研究与特点分析[J]. 新疆水利, 2011(3):25-27.
NIE Xinshan. Experimental research and characteristic analysis of high efficiency net filter[J]. Xinjiang Water Resources, 2011(3):25-27. (in Chinese)
- [21] 吕宏兴, 裴国霞, 杨玲霞. 水力学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002.
- [22] 傅琳, 董文楚, 郑耀全. 微灌工程技术指南[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988:1-7.
- [23] 吴显斌. 再生水灌溉下滴灌系统抗堵塞性能试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
WU Xianbin. Experimental study of drip irrigation system anti-clogging performance under reclaimed water irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] ZHOU B, LI Y, SONG P, et al. Anti-clogging evaluation for drip irrigation emitters using reclaimed water[J]. Irrigation Science, 2017, 35(3):181-192.
- [26] 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)
- [27] 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 CSAE, 2016, 32(5):77-81. (in Chinese)
- [28] PEI Y, LI Y, LIU Y, et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation[J]. Irrigation Science, 2014, 32(2):141-157.
- [29] 李云开, 杨培岭, 任树梅, 等. 分形流道设计及几何参数对滴水水力性能的影响[J]. 机械工程学报, 2007, 43(7):109-114.
LI Yunkai, YANG Peiling, REN Shumei, et al. Effects of fractal flow path designing and its parameters on emitter hydraulic performance[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(7):109-114. (in Chinese)
- [30] 王睿, 王文娥, 胡笑涛, 等. 微灌用施肥泵施肥比例与肥水比对过滤器堵塞的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(23):117-122.
WANG Rui, WANG Wene, HU Xiaotao, et al. Impact of fertilizer proportion and fertilizer-water ratio on clogging of filter by fertilizer pump in micro-irrigation[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(23):117-122. (in Chinese)
- [31] 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)

(上接第 168 页)

- [16] 王国德, 张培林, 任国全, 等. 融合 LBP 和 GLCM 的纹理特征提取方法[J]. 计算机工程, 2012, 38(11):199-201.
WANG Guode, ZHANG Peilin, REN Guoquan, et al. Texture feature extraction method fused with LBP and GLCM[J]. Computer Engineering, 2012, 38(11):199-201. (in Chinese)
- [17] 薛翠红, 于洋, 张朝, 等. 融合 LBP 与 GLCM 的人群密度分类算法[J]. 电视技术, 2015, 39(24):7-10.
XUE Cuihong, YU Yang, ZHANG Chao, et al. Fusing LBP and GLCM for crowd density classification algorithm[J]. Video Engineering, 2015, 39(24):7-10. (in Chinese)
- [18] TATSUMI K, YAMASHIKI Y, TORRES M, et al. Crop classification of upland fields using random forest of time-series Landsat 7 ETM+ data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2015, 115:171-179.
- [19] 王利民, 刘佳, 杨玲波, 等. 随机森林方法在玉米-大豆精细识别中的应用[J]. 作物学报, 2018, 44(4):569-580.
WANG Limin, LIU Jia, YANG Lingbo, et al. Application of random forest method in maize-soybean accurate identification[J]. Acta Agronomica Sinica, 2018, 44(4):569-580. (in Chinese)
- [20] 王行汉, 刘超群, 丛沛桐, 等. 基于增强温度植被指数的农业旱情遥感监测[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(5):165-170.
WANG Xinghan, LIU Chaoqun, CONG Peitong, et al. Agriculture drought monitoring using remote sensing based on enhanced temperature vegetation dryness index[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5):165-170. (in Chinese)
- [21] 张超, 乔敏, 刘哲, 等. 基于无人机和卫星遥感影像的制种玉米田识别纹理特征尺度优选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17):98-104.
ZHANG Chao, QIAO Min, LIU Zhe, et al. Texture scale analysis and identification of seed maize fields based on UAV and satellite remote sensing images[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(17):98-104. (in Chinese)