DOI: 10.3901/JME.2019.24.253

新型翻板网式过滤器排污性能试验研究*

石 凯¹ 刘贞姬¹ 孟定华¹ 宗全利^{1,2} 李 曼¹

(1. 石河子大学水利建筑工程学院 石河子 832003;

2. 青岛农业大学资源与环境学院 青岛 266109)

摘要: 网式过滤器排污性能决定着过滤器排污过程的耗水量以及下一个工作周期的工作效率,对网式过滤器的排污性能分析,发现排污流量和进水含沙量是其重要的影响因素。为探究网式过滤器的排污效果,本次试验重点展开一种新型翻板网式过滤器的排污洁净度、排污时间、排污流量和进水含沙量等关系的探究,结果表明:在最佳预设压差下,排污流量是翻板网式过滤器的核心影响因素,随着排污流量增加,排污时间减少,排污洁净度增大,排污效果显著。同时,根据质量守恒定律,建立了排污时间与排污流量以及排污洁净度与排污流量的数学模型,根据试验结果进行计算,结果表明:拟合计算结果与试验结果的拟合相关系数 r 可达到0.98以上。为保证过滤器在低排污耗水量情况下达到高效排污效果,建议实际工作将排污流量设为 $180\text{ m}^3/\text{h}$,排污时间为 50 s ,可使排污洁净度达到98%。

关键词: 翻板网式过滤器; 排污时间; 排污洁净度; 排污流量; 排污效果

中图分类号: S275

Experimental Study on Blowdown Performance of New Type of Rotatable Plate Screen Filter

SHI Kai¹ LIU Zhenji¹ MENG Dinghua¹ ZONG Quanli^{1,2} LI Man¹

(1. College of Water Conservancy and Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003;

2. College of Resources and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109)

Abstract: The discharge performance of the screen filter determines the water consumption in the discharge process of the filter and the working efficiency in the next work cycle. Based on the analysis of the discharge performance of the screen filter, it is found that the sewage discharge flow and the sediment content of the inlet water are the important influencing factors. For exploring screen filter drainage effect, the focus of the experiment was on the relationship of sewage discharge cleanliness, sewage discharge time, sewage discharge flow and sediment content of a new type of rotatable plate screen filter. The results show that: the best default under differential pressure and sewage discharge flow is the core of the rotatable plate net filter factors, with the increase of sewage discharge flow, sewage discharge time reduces, sewage discharge cleanliness increases, blow down effect is remarkable. At the same time, according to the law of mass conservation, the mathematical models of sewage discharge time and sewage discharge flow, sewage discharge cleanliness and sewage discharge flow were established. According to the test results, the results show that the fitting correlation coefficient r between the calculated results and the test results can reach above 0.98. In order to ensure that the filter can achieve high efficiency in the case of low discharge water consumption, it is recommended to set the sewage discharge flow as $180\text{ m}^3/\text{h}$ and the sewage discharge time as 50 s in actual work to achieve 98% of the sewage discharge cleanliness.

Key words: rotatable plate screen filter; sewage discharge time; sewage discharge cleanliness; sewage discharge flow; effect of sewage

0 前言

微灌技术是我国西北干旱区绿洲充分合理利用

和节约水资源的现代灌溉技术,也是克服土壤次生盐渍化危害、提高生产效益的有效途径,完整高效的微灌系统是西北地区农业经济发展的支撑力量^[1-9]。其中微灌用网式过滤器是微灌系统的重要组成部分,以新疆北疆地区为代表,网式过滤器具有能够有效地去除水源当中的泥沙颗粒和悬浮杂质的作

* 国家自然科学基金资助项目(11662018)。20190403 收到初稿, 20190825 收到修改稿

用。当过滤器运行一段时间后,滤网内表面会被泥沙颗粒和悬浮杂质堵塞,水头损失增大,为达到高效过滤,需要对过滤器进行排污工作,因此对过滤器的排污效果研究就尤为重要^[10-14]。刘飞等^[15-18]对自清洗网式过滤器的水头损失和排污时间均进行了详细的研究,理论推导了排污时间的数学表达式,并通过试验验证拟合,给出了实际工作中自清洗网式过滤器的最佳排污时间值。王柏林等^[19]主要针对旋流网式组合型过滤器进行分析,并分析了其过滤特性。秦天云等^[20]对滴灌中常见的网式和叠片式过滤器水力性能进行对比研究,分析了两种过滤器的过滤性能,并指明了其适用的工况。但自清洗网式过滤器自清洗效果很难达到较高标准,在实际工作中往往会影响到下一个过滤周期的正常工作。同时,研究中也未明确指出流量与排污时间的准确关系,只是确定排污时间的工作范围,在实际工作中容易产生偏差。

因此,本文以一种新型翻板网式过滤器为研究对象,对不同流量下的排污时间进行理论分析和试验探究,以期准确确定其最佳排污时间,减少由于排污时间不足或过长造成的影响。同时本文对排污后滤网表面的洁净度进行研究,分析不同流量排污时滤网表面的洁净度,给出排污流量与洁净度的数学模型。通过排污时间和排污洁净度的研究,以指导网式过滤器确定最适排污流量,达到最佳的排污效果。

1 翻板网式过滤器的构造及工作原理

1.1 过滤器构造

图 1 为翻板网式过滤器结构示意图,它是由过滤器外壳,过滤器滤芯和可旋转翻板(在滤网内部可旋转 90°)等主要部件构成。图 2a 为翻板开启状态示意图,图 2b 为翻板完全关闭状态示意图。图 3 为过滤器内部滤网结构示意图。

图 1 翻板网式过滤器结构示意图

1. 排污口 2. 压力计 3. 翻板 4. 进水口
5. 过滤器外壳 6. 出水口

图 2 翻板开闭示意图

图 3 过滤器内部滤网结构示意图

1.2 过滤器工作原理

1.2.1 过滤器过滤过程工作原理

过滤器过滤时,保持翻板处于完全打开状态(如图 2a),排污口完全关闭,微灌用水由进水口进入过滤器滤网内,由滤网内部向外部进行杂质过滤,大于滤网孔径的杂质积聚在滤网内部,使滤网内压力增大,同时,过滤后的洁净水由出水口进入到灌溉系统中。当滤网内外压力差达到预先设定的压力差时,即开始排污工作。

1.2.2 过滤器排污过程工作原理

翻板网式过滤器的排污分为两次排污:进行第一次排污时,首先关闭出水阀,同时打开排污阀,过滤器内翻板处于打开状态,清水由进水口进入过滤器,将进水口和翻板之间的杂质携带至出水口,其中小部分杂质随水流经排污口排出,大部分杂质在翻板与出水口之间形成堆积;完成一次排污后,迅速将翻板完全关闭(图 2b),同时打开出水阀,出水管中清水通过出水口倒流进入过滤器,同时由进水口进入的清水经出水口和翻板之间的滤网由外向内进入过滤器,将堆积在翻板与出水口之间的杂质经排污口排出过滤器,完成二次排污;再次将翻板完全打开,观察进出水口处的压力表显示的压力差,若达到过滤器初始工作状态的压差值,即完成整个排污工作。其中,一次排污过程主要利用进水压力完成翻板和进水口部分的滤网内表面清洗,二次排污过程主要利用出水口管中回水形成的压力以及进水压力共同完成翻板与出水口之间滤网内表面清洗以及将杂质排出过滤器内部。

2 翻板网式过滤器的试验方法

2.1 试验装置

本试验使用过滤器为新型翻板网式过滤器,试

验装置如图 4 所示。

图 4 试验装置图

1. 蓄水池 2. 沉砂搅拌池 3. 变频柜 4. 翻板网式过滤器
5. 出水管 6. 排污管 7. 水泵 8. 进水管
9. 流量计 10. 压力计

2.2 试验配套辅助设施

本次试验使用配套辅助设施见表 1。

表 1 配套辅助设施

设备名称	产品型号	数量	规格	备注
三相异步电动机	Y90L-04	1	额定功率 1.5 kW	置于搅拌池
变频柜	DZB300B0015	1		用于调节进水流量
	L4A			
电磁流量计	TDS-100P	1	精度为 0.001 m ³ /s	
压力传感器	AS-131	4		分别位于进水口，出水口，排污口，滤网内部
精密电子压力计	JDC600	3	精度为 kPa	分别位于进水口，出水口，排污口
蝶阀		3		分别位于进水口，出水口，排污口

2.4 试验用泥沙颗粒级配

本次使用试验沙为玛纳斯河流域的河床沙，经过筛分对泥沙颗粒级配进行分析，本次试验人为筛除粒径大于 3 mm 部分的泥沙，得出本次试验所用泥沙的粒径级配状况。其中，泥沙粒径小于 0.5 mm 部分占总沙量的 85%，泥沙粒径小于 1.18 mm 部分占总沙量的 95%，泥沙粒径小于 2.36 mm 部分占总沙量的 98%。

3 翻板网式过滤器排污性能理论分析

3.1 排污时间公式推导

排污时间是评价过滤器排污性能的重要参数之一，确定其准确的排污时间，可减少排污时间不足或排污时间过长对过滤器运行的影响，对翻板网式过滤器排污过程两个阶段进行理论分析，0~t₁ 阶段为一次排污阶段，完成进水口与翻板之间滤网的清洁排污工作，此过程排污口不出沙。此时，满足式(1)

$$S_j = S_w \tag{1}$$

式中：S_j 为进水口水样含沙量，g/L；S_w 为排污口水样含沙量，g/L。

在 t₁~t₂ 阶段为二次排污阶段，翻板处于关闭

2.3 试验方法及步骤

按照图 4 安装并调试试验装置，采用正交试验法安排试验组次，本次试验设定五个不同的进水含沙量(0.122 g/L、0.234 g/L、0.278 g/L、0.309 g/L、0.336 g/L)和六个进水流量(140 m³/h、150 m³/h、160 m³/h、170 m³/h、180 m³/h、200 m³/h)对 80 目楔形过滤网(图 3)在最佳排污压差条件下展开试验。试验开始，在搅拌池中人为加入混合均匀的河沙，在进水口和出水口每 8 min 接取一次水样，直至完成整个工作周期，当过滤器过滤达到最大堵塞压差值时，进入到排污过程，在排污口接取排污水样，一次排污过程采取每 5 s 接取一次水样，共接取 5 次，二次排污过程，亦采取每 5 s 接取一次水样的方法，直至二次排污结束，可接取 10 次，总计 15 个水样。过滤以及排污试验结束后，对所有水样含沙量进行测定，结束全部试验工作。

状态，进行出水口与翻板之间滤网的排污工作，根据质量守恒原理，此时，满足式(2)

$$M_w = M_n \tag{2}$$

式中，M_w 为排污口排沙总量，g；M_n 为滤网内部堵沙量，g。

在 t₂ 时段后完成排污过程后再次满足式(1)即认为整个排污工作结束。

分析排污口含沙量与排污时间，利用 origin 软件将预试验的多组试验结果进行拟合，发现其分布曲线近似满足正态分布曲线，其函数满足式(3)

$$f_t = A \exp \left(\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \tag{3}$$

式中，σ 为标准差；μ 为期望值；A 为流量修正系数分析式(3)，确定初值条件，得到排污含沙量与排污时间的数学表达式，满足式(4)

$$S_w = S_j + A \exp \left(\frac{(t - \mu)^2}{2\sigma^2} \right) \tag{4}$$

式中，t 为排污总时间，s。

分析式(4)，当 S_j = S_w，认为完成排污，即进入下一过滤周期。

3.2 排污效果公式推导

排污结束后, 滤网洁净度是评价过滤器排污性能的另一重要参数, 洁净度直接决定了下一个工作周期的工作状态。定义排污口排沙总量与滤网内部堵塞沙量之比为滤网排污结束之后的洁净度, 用符号 λ 表示, 满足式(5)

$$\lambda = \frac{M_w}{M_n} \quad (5)$$

3.2.1 过滤器滤网内部堵塞沙量计算

依据质量守恒原理, 滤网内部堵沙量为进水口进沙总量与出水口排沙总量之差, 即

$$M_n = QT(S_j - S_c) \quad (6)$$

式中, Q 为进水流量, m^3/h ; T 为过滤总时间, h ; S_j 为进水口水样含沙量, kg/m^3 ; S_c 为出水口水样含沙量, kg/m^3 。

3.2.2 排污口排沙总量计算

对式(4)积分, 即满足式(7)

$$M_w = Q \int_0^t S_w dt \quad (7)$$

在计算中, 正态分布的积分无解析解, 刘清珩^[22]等给出正态分布积分的近似计算公式见式(8)

$$F_t = \frac{\exp(a(t-\mu))}{1 + \exp(a(t-\mu))} \quad a = \frac{4}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (8)$$

联立式(4)、(7)、(8), 即得到排污口排沙总量的数学表达式见式(9)

$$M_w = QS_j t + Q\sqrt{2\pi}\sigma A \frac{\exp(a(t-\mu))}{1 + \exp(a(t-\mu))} a = \frac{4}{\sqrt{2\pi}\sigma} \quad (9)$$

由式(5)、(6)、(9)可计算洁净度 λ 。

4 试验结果与分析

4.1 试验结果

对大田微灌中常用的 80 目楔形过滤网进行排污性能试验, 通过对排污口含沙水样含沙量的测定, 5 个不同含沙量下排污口水样含沙量随时间的变化曲线, 如图 5 所示。

4.2 试验结果分析

4.2.1 排污时间分析

通过正交试验分析, 过滤器排污流量是影响过滤器排污时间的关键因素。当进口含沙量一定时, 排污口含沙量随排污时间的变化规律是一致的。在初始 0-25 s 阶段, 过滤器进行一次排污时, 排污口含沙量保持不变, 基本等于排污用水的含沙量, 因在一次排污时, 主要是将过滤器进水口和翻板之间

的泥沙杂质运移到排污口附近; 25 s 以后阶段, 过滤器进行二次排污时, 排污口含沙量开始增加, 达到峰值后下降直至恢复至与排污用水含沙量一致时, 保持不变。

(a) $S=0.122 \text{ g/L}$

(b) $S=0.234 \text{ g/L}$

(c) $S=0.278 \text{ g/L}$

图 5 排污口含沙量随排污时间的变化曲线

由图 5 发现，随着排污流量的增大，排污口含沙量达到峰值的时间和排污总时间均在减小。当控制进水流量为 140~160 m³/s 时，排污达到排污峰值的时间为 40~45 s，排污总时间为 63~69 s；当控制进水流量为 170~200 m³/s 时，排污达到排污峰值的时间为 30~40 s，排污总时间为 48~53 s。以进口含沙量为 0.309 g/L 组试验结果进行拟合计算，将

试验数据利用 origin 软件进行公式拟合，并将试验结果与公式拟合结果比较，结果见表 2。

表 2 排污时间拟合计算表

流量/ (m³/h)	拟合结果 t_1/s	试验结果 t_2/s	拟合误差/ s	拟合精度 (%)
140	68.91	68	0.91	98.78
150	69.30	67	2.30	
160	65.88	65	0.88	
170	52.96	54	-1.04	
180	48.64	51	-2.36	
200	42.63	44	-1.37	

由表 2 表明，当含沙量为 0.309 g/L 时，计算结果 t_1 与试验结果 t_2 最大误差均小于 2.5 s，排污时间产生的误差值均小于排污时间的 4%。结合试验数据和工程实际，确定低流量工况下，排污时间应为 70 s，确定高流量工况下，排污时间应为 50 s，以避免由于排污时间过长产生的耗水量过大的问题以及由于排污时间不足造成的清洗效果达不到标准的问题。

4.2.2 排污效果分析

通过正交试验分析，过滤器进水流量是影响过滤器排污洁净度的关键因素。在进水含沙量一定的情况下，测定不同流量下滤网内部堵塞沙量与排污口排沙总量，其低流量(140~160 m³/h)和高流量(170~200 m³/h)工况下汇总数据分别见表 3、4。

从表 3、4 分析可知，当含沙量一定时，排污洁净度与进水流量呈线性关系，在低流量工况下洁净度较低，其洁净度均小于 90%，在高流量工况下洁净度较高，其洁净度均大于 90%，即随进水流量增加，排污洁净度 λ 增加；当进水流量一定时，排污洁净度与含沙量亦呈线性关系，以 $Q=170\text{ m}^3/\text{h}$ 分析，含沙量由 0.122 g/L 变化至 0.336 g/L，排污洁净度由 95.57%变化至 72.30%，即随进水含沙量增加，排污洁净度 λ 减小；当流量为 180 m³/h 及其以上时，洁净度基本稳定在 97%以上，即当流量较大时，进水流量为洁净度的主要影响因素，含沙量对洁净度影响程度小于进水流量对洁净度的影响因素。

表 3 低流量工况排污流量与排污洁净度计算表

含沙量/(g/L)	流量/(m³/h)								
	140			150			160		
	M_n/kg	M_w/kg	$\lambda(\%)$	M_n/kg	M_w/kg	$\lambda(\%)$	M_n/kg	M_w/kg	$\lambda(\%)$
0.122	2.96	2.04	68.98	2.72	1.99	73.24	2.35	1.96	83.37
0.234	3.71	2.64	71.22	3.17	2.94	80.28	2.94	2.48	84.14
0.278	4.71	3.31	70.23	4.74	3.36	71.00	3.93	3.47	88.37
0.309	4.86	3.28	67.50	4.44	3.66	82.39	4.17	3.77	87.13
0.336	7.30	3.70	50.70	6.86	3.86	56.19	6.45	3.79	55.99

表 4 高流量工况排污流量与排污洁净度计算汇总表

含沙量/(g/L)	流量(m ³ /h)								
	170			180			200		
	<i>M_n</i> /kg	<i>M_w</i> /kg	λ (%)	<i>M_n</i> /kg	<i>M_w</i> /kg	λ (%)	<i>M_n</i> /kg	<i>M_w</i> /kg	λ (%)
0.122	2.00	1.91	95.57	2.00	1.96	97.88	1.69	1.69	99.86
0.234	2.61	2.29	88.01	2.03	1.99	97.84	1.86	1.83	98.46
0.278	3.54	2.60	73.59	2.78	2.71	97.54	2.60	2.50	96.36
0.309	3.49	3.05	87.26	2.99	2.94	98.42	2.62	2.62	99.85
0.336	5.40	3.90	72.30	4.62	4.55	98.64	4.05	3.95	97.47

4.2.3 排污能耗分析

新型翻板网式过滤器主要是利用过滤器内外产生的压差完成排污工作,在使用过程中不需外加驱动清洗排污的电机,避免了在排污过程中产生的电能损耗问题。在小流量长时间与大流量短时间 2 种工况下进行排污,利用流量-时间法计算排污过程中水量的耗损。分析表 2,以含沙量为 0.309 g/L 试验组分析,计算获得各流量下排污耗水值分别为 2.64 m³、2.76 m³、2.89 m³、2.55 m³、2.55 m³、2.44 m³,排污耗水值相差小于 0.5 m³,排污流量设为 180 m³/h 较为合理,符合实际工程中对耗水量的控制要求。

5 结论

(1) 翻板网式过滤器在排污过程中,进口含沙量对排污效果的影响远小于流量的影响,在最佳预设压差条件下,随着排污流量增大,排污时间减小,排污洁净度增大。低流量(140~160 m³/h)条件下排污时间为 63~69 s,排污洁净度 λ 小于 85%,高流量(170~200 m³/h)条件下排污时间为 48~53 s,排污洁净度 λ 大于 95%。

(2) 结合质量守恒定律及排污试验,推导得出翻板网式过滤器最佳排污时间及排污洁净度的数学表达式。通过排污过程试验数据对公式进行了验证,其拟合计算结果与试验结果一致,为保证过滤器在满足较小的排污耗水量的同时达到较高的排污效果,建议控制进水流量为 180 m³/s,排污时间为 50 s,可达到 98%的洁净度。

参 考 文 献

- [1] 周生祥. 滴灌工程在新疆农田水利灌溉系统中的应用探讨[J]. 城市建设理论研究, 2017(11): 177.
ZHOU. Shengxiang. Discussion on the application of drip irrigation project in xinjiang farmland water conservancy Irrigation system[J]. Urban Construction Theory Research, 2017(11): 177.
- [2] 马辰. 滴灌技术的发展现状与趋势[J]. 吉林农业, 2018(6): 77.
MA Chen. Development status and trend of drip irrigation technology[J]. Jilin Nongye, 2018(06): 77.
- [3] 薛世柱. 新疆节水滴灌存在问题简析[J]. 吉林农业, 2017(4): 84.
XUE Shizhu. Analysis on problems of water-saving drip irrigation in xinjiang[J]. Jilin Nongye, 2017(4): 84.
- [4] 陈林. 新疆节水灌溉发展现状、面临问题及建议[J]. 新疆农垦科技, 2016, 39(6): 62-64.
CHEN Lin. Development status, problems and suggestions of water-saving irrigation in xinjiang[J]. Xinjiang Farm Research of Science and Technology, 2016, 39(6): 62-64.
- [5] 赖先齐, 王江丽, 程莲, 等. 亚洲中部干旱区主要绿洲滴灌技术适宜性分析[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(12): 104-109.
LAI Xianqi, WANG Jiangli, CHENG Lian, et al. Analysis on the suitability of drip irrigation technology in main oases of central Asia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(12): 104-109.
- [6] 陈杰. 新疆农业高效节水农民参与式管理模式研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
CHEN Jie. Study on the participatory management and model of xinjiang agricultural efficient water-saving farmers[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [7] 刘军. 新疆干旱区农业节水示范技术集成模式综合评价研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2013.
LIU Jun. Study on comprehensive effect evaluation of integrated model of agricultural water-saving demonstration technology in arid areas of xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2013.
- [8] 刘军. 新疆农业高效节水灌溉技术长效利用研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
LIU Jun. Study on long-term utilization of xinjiang agricultural efficient water-saving irrigation technology[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2016.
- [9] SIRIWARDENEA, DELETICN R T D. Clogging of storm water gravel infiltration systems and filters Insights from a laboratory study[J]. Water Research, 2007(41): 1433-1440.

- [10] 杨晓军, 刘焕芳, 刘洋. 几种微灌用过滤器的工作性能分析及其应用条件研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(26): 16405-16406, 16414.
YANG Xiaojun, LIU Huanfang, LIU Yang. Performance analysis and application conditions of several kinds of micro irrigation filters[J]. Anhui Agricultural Science, 2011, 39(26): 16405-16406, 16414.
- [11] 宗全利, 刘焕芳, 郑铁刚, 等. 微灌用网式新型自清洗过滤器设计与试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2010, 29(1): 78-82.
ZONG Quanli, LIU Huanfang, ZHENG Tiegang, et al. The design and experimental study on new net self-cleaning filter for micro-irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2010, 29(1): 78-82.
- [12] 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. Experimental study on the efficacy of sand filter, 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.
- [13] 葛宇川, 刘贞姬, 贾旺, 等. 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, et al. Review of several kinds of filters for micro-irrigation in xinjiang region[J]. China Building Materials Science & Technology, 2017, 26(3): 135-138.
- [14] 张晓光, 郑荫林, 姜春波. 国内外自动清洗过滤器的发展及应用[J]. 丹东纺专学报, 2002(3): 28-29.
ZHANG Xiaoguang, ZHEN Yinlin, JIANG Chunbo. Domestic and overseas development & application of auto cleaned filter[J]. Journal of Dandong Textile College, 2002(3): 28-29.
- [15] 刘飞, 刘焕芳, 宗全利, 等. 自清洗网式过滤器水头损失和排污时间研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5): 127-134.
LIU Fei, LIU Huanfang, ZONG Quanli, et al. Experiment on head loss and discharge time of self-cleaning screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(5): 127-134.
- [16] 李强强, 宗全利, 刘贞姬, 等. 卧式自清洗网式排污时间试验及计算[J]. 排灌机械学报, 2014, 32(12): 1098-1104.
LI Qiangqiang, ZONG Quanli, LIU Zhenji, et al. Experiment and calculation of discharge time for horizontal type self-cleaning screen filter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2014, 32(12): 1098-1104.
- [17] 宋剑鹏. 自清洗网式过滤器最佳排污时间试验研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(3): 145-148.
SONG Jianpeng. Study on the optimal drainage time of the self-cleaning screen filter[J]. Yellow River, 2017, 39(3): 145-148.
- [18] NIETO P J, GONZALO E G, ARBAT G, et al. Pressure drop modelling in sand filters in micro-irrigation using gradient boosted regression trees[J]. Biosystems Engineering, 2018, 171: 41-51.
- [19] 王柏林, 刘焕芳, 刘贞姬, 等. 旋流网式组合型过滤器过滤性能研究[J]. 中国农村水利水电, 2017(9): 1-4, 9.
WANG Bolin, LIU Huanfang, LIU Zhenji, et al. Experimental research on the filter performance of swirl-and-screen type combined filter[J]. China Rural Water and Hydropower, 2017(9): 1-4, 9.
- [20] 秦天云, 王文娥. 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 Wen'e. Hydraulic performance of screen and disc filters for drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(1): 57-62.
- [21] 秦天云. 滴灌系统网式与叠片式过滤器工作性能及影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
QIN Tianyun. Study on the working performance and influencing factors of net and laminated filters in drip irrigation system[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2017.
- [22] 刘清琨, 陈婷, 陈舜琮, 等. 正态分布积分近似计算公式及其在实验结果判定中应用[J]. 现代测量与实验室管理, 2009(3): 21-23.
LIU Qingjun, CHEN Ting, CHEN Shuncong, et al. Approximate calculation formula of the normal distribution integral and its application in the determination of experimental results[J]. Modern Measurement and Laboratory Management, 2009(3): 21-23.

作者简介: 石凯, 男, 1995年出生, 硕士研究生。主要研究方向为工程水力学及水力机械性能。

E-mail: 1029250483@qq.com

刘贞姬(通信作者), 女, 1979年出生, 硕士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为工程水力学及水力机械性能。

E-mail: shz_lzj@163.com