

# 网式过滤器拦截率计算及其影响因素分析

张 凯, 喻黎明, 刘凯硕, 曹东亮, 李 娜\*, 仵 峰

(昆明理工大学农业与食品学院, 昆明 650500)

**摘要:** 为了使网式过滤器在工程应用中既保持滤网良好渗透率又提高滤网拦截率, 该研究通过试验, 分析了 5 种不同入口压强 (0.02、0.04、0.06、0.08、0.10 MPa)、7 种滤网孔径 (125、150、180、210、250、300 和 350  $\mu\text{m}$ ) 及其与砂粒中值粒径的关系对过滤器拦截率的影响。结果表明: 当滤网孔径与砂粒中值粒径的比值小于一个阈值  $C$  ( $C \in [1.80, 1.88]$ ) 时, 拦截率随着滤网孔径增大而增大, 当该值大于此阈值时, 拦截率随着滤网孔径的增大而减小; 过滤器的入口压强越大, 过滤器拦截率越大, 入口压强对过滤器拦截率有显著影响, 被拦截砂粒在出口侧分布越集中; 入口压强从 0.02 MPa 提高到 0.10 MPa, 250  $\mu\text{m}$  滤网拦截率提升 38.49%, 而 125  $\mu\text{m}$  滤网拦截率提升 88.94%; 250  $\mu\text{m}$  滤网在 0.10 MPa 入口压强下 15 min 末出水砂粒粒径组成与 180  $\mu\text{m}$ 、0.02 MPa 下初始出水砂粒粒径组成相似, 在短时间的灌溉应用上, 可调整入口压强而不需要调整设备来满足灌溉要求, 研究为实际灌溉工程中提高过滤器拦截率和过滤效果提供了参考。

**关键词:** 压强; 过滤器; 灌溉; 拦截率; 滤网孔径; 中值粒径; 拦截位置

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.05.014

中图分类号: S275.5

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-05-0123-08

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. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.2021.05.014 <http://www.tcsae.org>

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 (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 123-130. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.05.014 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

随着大规模高标准农田的建设, 微灌节水灌溉系统将被大规模推广。过滤器是保证微灌系统正常运行, 防止其堵塞, 延长其使用寿命的核心设备之一<sup>[1-2]</sup>。网式过滤器具有结构简单、使用便利、制造成本低、使用效益高等优点, 因而被广泛应用于微灌系统中。

近年来, 学者们针对网式过滤器开展了大量研究并取得可观成果。在水力性能方面, 宗全利等<sup>[3]</sup>研究表明, 过滤器的局部水头损失变化受到过滤流量、过滤时间、水源含沙量的影响; 李曼等<sup>[4]</sup>分析了进水流量与水头损失的定量关系; 秦天云等<sup>[5]</sup>探究了流量、滤网孔径与水头损失的关系; 石凯等<sup>[6]</sup>探究不同进水流量下含沙量对水力性能的影响; Wu 等<sup>[7]</sup>构建出考虑水流流速和滤网孔径的水头损失模型; Anthony 等<sup>[8]</sup>认为过滤器水头损失对流速变化敏感。在堵塞机理方面, 喻黎明等<sup>[9]</sup>认为流速、入口压强和颗粒粒径对滤网局部堵塞有显著影响; 杨洪飞等<sup>[10]</sup>总结得出影响滤网堵塞的原因如水源杂质、滤网类型等; 宗全利等<sup>[11]</sup>表明, 水流流量越大, 含沙量越高, 滤网孔径越小则过滤器堵塞速度越快。此外, 在过滤性能<sup>[12-14]</sup>和过滤器的研发<sup>[15-18]</sup>方面也有较多成果。随着数值模拟技术的成熟, 已有学者将此技术应用于网式过滤器内部

流场、压力场、水力性能等的模拟分析<sup>[19-23]</sup>。综上, 水流流速、压强、滤网孔径和颗粒粒径被认为是影响过滤器各项性能的主要因素。在实际灌溉工程应用中, 压强、滤网孔径和灌溉水中泥沙颗粒粒径这 3 个因素已成为过滤器选型和灌溉参数设置时首先考虑的重要因素, 然而, 尚未发现有研究深入分析三者与过滤器泥沙拦截率之间的关系。

因此, 本文以微灌系统中广泛使用的 Y 型网式过滤器为研究对象, 试验分析过滤器入口压强、滤网孔径和砂粒中值粒径与过滤器拦截过程, 拦截率和滤网拦截位置的关系, 以期为灌溉工程应用中合理使用过滤器以提升过滤性能提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

试验用 Y 型式过滤器为一种常用过滤器, 购自上海悉迈自控阀门有限公司, 型号为 SY11-(16-64), 其结构和尺寸见图 1。过滤器运行原理如下: 承压含沙水从 A 端进入, 经滤芯入口 B 进入滤芯, 经过滤从出口面 C 和过滤器 D 端流入下级管道, 而无法通过滤网的沙粒则被拦截在滤芯中。

云南省内金沙江石鼓水文站统计金沙江多年平均含沙量为 0.60  $\text{kg}/\text{m}^3$ , 南盘江小龙潭水文站统计南盘江多年平均含沙量为 0.59  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。喻黎明等<sup>[9,11]</sup>研究中试验用水含砂量为 0.60  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

使用城市自来水和石英砂配制灌溉用水。石英砂具

收稿日期: 2020-10-30 修订日期: 2021-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51769009)

作者简介: 张凯, 研究方向为流体机械。Email: 794322581@qq.com

※通信作者: 李娜, 实验师, 研究方向为节水灌溉理论与设备。

Email: kjclina@163.com

有性质稳定、耐磨等优点,可以保证进入管道和过滤器的砂粒粒径不受搅拌器和离心泵等试验装置的影响,因而购买石英砂配制灌溉水泥沙用于本研究。

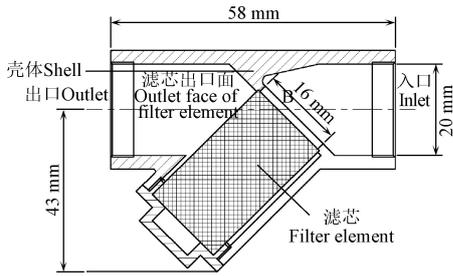


图1 Y型网式过滤器内部结构示意图

Fig.1 Diagram of internal structure of Y-type mesh filter

1.2 试验设计

过滤器孔径设计: 试验选择了微灌系统中使用最广泛、最具代表性的孔径 (125~250 μm), 在此之上稍做浮动以扩大研究范围, 最终设计了7种过滤器滤网孔径, 分别为125、150、180、210、250、300和355 μm, 对应的滤网目数分别为120、100、80、60、70、50和45。

压强设计: 试验用过滤器为微灌系统的中、末级过滤器, 滴灌时工作水头常低于10 m, 涌泉灌常为4~8 m, 故设计入口压强为0.02~0.10 MPa。

灌溉水中砂粒粒径设计: 灌溉水末级管道中沙粒粒径小于125 μm, 中级管道小于250 μm, 适当扩大研究范围, 确定中值粒径取值范围为60~300 μm, 分别为60、80、100、120、140、150、160、180、210、230、250、270、300 μm。

图2展示了V50 (即累积体积为50%时的对应粒径) 为180 μm的试验用砂级配, 其V10 (即累积体积为10%时的对应粒径) 对应63.84 μm, V75 (即累积体积为75%时的对应粒径) 对应261.11 μm, V90 (即累积体积为90%时的对应粒径) 对应344.56 μm。180 μm中值粒径试验中砂粒粒径主要集中在65~500 μm, 其中65~280 μm粒径的砂粒量占总砂量的70%。其余试验用砂的粒径组成随中值粒径变化等值变化。

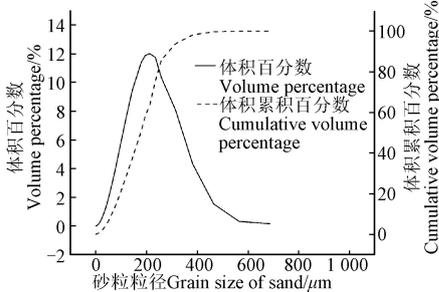


图2 180 μm中值粒径砂级配

Fig.2 Sand grading with median grain size of 180 μm

开展全因素试验和正交试验, 全因素试验通过轮流控制1个因素不变对另外2个因素进行试验, 分别探究各因素对过滤器拦截率的影响、分析拦截过程和拦截率成因、探究拦截位置形成的规律; 三因素三水平正交试

验旨在分析各因素对拦截率影响的程度, 正交试验设计如表1所示。各处理均进行3次重复。

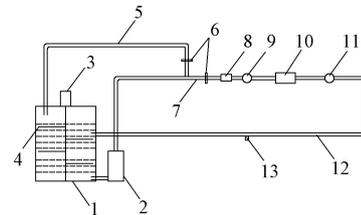
表1 正交试验因素水平表

Table 1 Orthogonal experimental factors and levels

水平 Levels	滤网孔径 Screen aperture/μm	入口压强 Inlet pressure/MPa	中值粒径 Median grain size/μm
1	210	0.03	120
2	180	0.06	160
3	150	0.09	200

1.3 试验过程

在昆明理工大学农业与食品学院农业水利实验室进行试验。供水装置为圆柱形不锈钢蓄水桶, 高0.6 m, 直径0.6 m, 总容积为0.17 m<sup>3</sup>, 水桶内装有搅拌器以保证进水含砂均匀稳定。离心泵扬程为35 m, 提供稳定的水流, 调节导水管和回流管上的球阀实现入口压强和水流流速的控制。压力表测量范围是0~0.10 MPa。使用内径为20 mm 导水钢管和软管将上述设备按图3顺序连接组装。



1.蓄水桶 2.离心泵 3.搅拌电机 4.搅拌器 5.分压管 6.球阀 7.导水管 8.电磁流量计 9.过滤器前压力表 10.Y型网式过滤器 11.过滤器后压力表 12.回流管 13.取水口  
1. Water storage barrel 2. Centrifugal pump 3. Mixing motor 4. Agitator 5. Partial pressure pipe 6. Ball valve 7. Aqueduct 8. Electromagnetic flowmeter 9. Pressure gauge before filter 10. Y mesh filter 11. Pressure gauge after filter 12. Return pipe 13. Water intake

图3 拦截率试验装置示意图

Fig.3 Diagram of interception rate test device

全因素试验与正交试验均在室温条件下进行, 使用相同的设备。试验装置是一个完整的循环过滤系统, 试验前, 预设水流入口压强、流速, 安装滤网。试验时, 水流在离心泵的作用下从蓄水桶进入导水管和分压管, 进入分压管的水流直接回到蓄水桶中, 进入导水管中的水经过滤器后流入回流管, 然后回到蓄水桶中进行下个循环。30 min 后, 关闭系统, 打开过滤器取出滤芯, 记录滤网上砂粒拦截位置, 并将滤网内拦截下来的砂粒完全冲洗至烧杯内。试验期间, 搅拌器需持续转动以保证砂粒在蓄水桶中均匀分布。

此外, 全因素试验还需在每组试验开始后, 每隔5 min 通过取水口取500 mL 出水水样, 共7瓶水样, 测定水样砂粒级配用于分析拦截过程。所有被拦截下来的砂粒在粒径分析和称干质量后重新放回到蓄水桶中, 以保证蓄水桶中试验用水含砂量基本不变。

1.4 指标测定和计算

1.4.1 流速和总过流量

采用HQLDE-25SM1F110-12电磁流量计 (江苏红旗仪表有限公司) 测定流速和总过流量, 流速测量范围在

0.04~15 m/s，流速分辨率为 0.5 mm/s。

1.4.2 含沙量、泥沙级配及粒径分布

通过烘干法测得泥沙干质量。使用 Malvern 激光粒度分析仪 2000 (Malvern Instruments Ltd., UK) 分析泥沙级配及粒径分布，粒度分析仪的测量范围为 0.02~2 000 μm。颗粒尺寸按升序排列，当累积体积为 10%、25%、50%、75%和 90%时，测得沉积物中的最大粒径分别表示为  $V_{10}$ 、 $V_{25}$ 、 $V_{50}$ 、 $V_{75}$  和  $V_{90}$ 。试验用砂为石英砂，具有良好亲水性，且石英砂粒子相互之间粘合力较小无法在水中聚集粘合，通过超声震荡就可以很好地形成悬浊液，所以使用激光粒度仪分析粒径时无需加入分散剂。

1.4.3 拦截率

本文将本应通过但未通过滤网的砂粒被拦截的现象称为拦截现象，则本应通过但未通过滤网的砂粒质量与总应通过滤网砂粒质量的比值即拦截率。

$$L = \alpha G / (\beta Q s) \times 100\% \quad (1)$$

式中  $L$  为拦截率，%； $\alpha$  为通过激光粒度仪分析得到小于

网孔尺寸的砂粒质量占全部被拦截砂粒质量的百分比，%； $G$  为干燥处理后被拦截砂粒的质量，kg； $\beta$  为蓄水桶含砂水中小于滤网网孔尺寸砂粒质量占桶中全部砂粒质量的百分比，%； $Q$  为试验过程中的总过流量， $m^3$ ； $s$  为试验用水含砂量， $kg/m^3$ 。

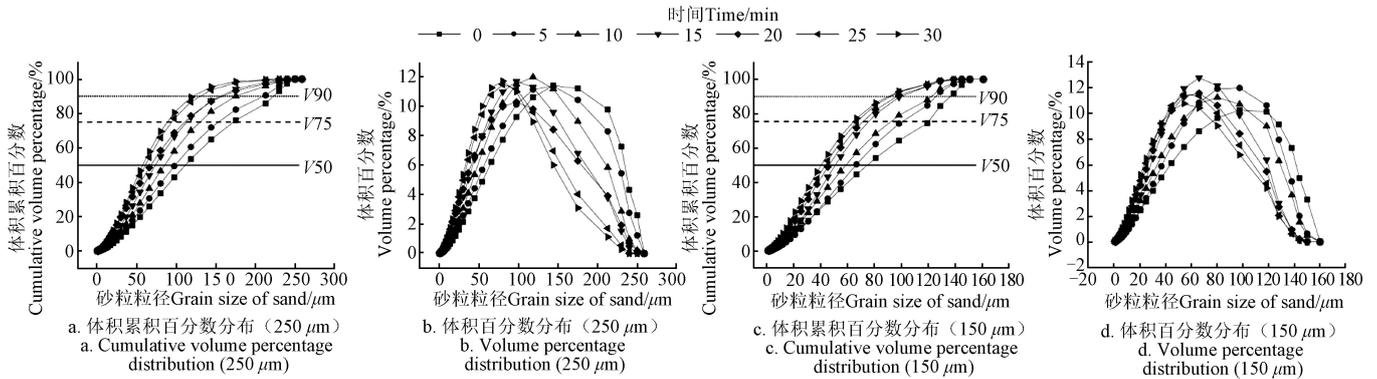
1.5 数据分析

利用 Excel 软件编辑公式计算拦截率；使用 Origin 软件作图，分析过滤器拦截过程和各因素对拦截率的影响；正交试验数据使用 Design-Expert 软件进行分析；使用 Matlab 软件编程进行拟合、误差分析。

2 结果与分析

2.1 过滤器拦截过程分析

对不同时段出水水样进行粒度分析，发现不同孔径和压强条件下出水砂粒径随时间变化有类似规律。故以 250 和 150 μm 滤网，0.02 MPa 入口压强试验组为样本，阐述 0~30 min 内不同时段出水砂粒粒径组成，分析过滤器拦截过程，如图 4 所示。



注： $V_{50}$ 、 $V_{75}$ 、 $V_{90}$  分别为体积累积百分数为 50%、75%、90% 时对应的砂粒粒径大小。  
 Note:  $V_{50}$ ,  $V_{75}$  and  $V_{90}$  are the corresponding sand particle sizes when the volume accumulation percentages are 50%, 75% and 90%, respectively.

图 4 0.02 MPa 入口压强下不同滤网出水砂粒粒径组成随时间变化

Fig.4 Dynamics of particle composition of effluent sand for filters with different screen apertures at inlet pressure of 0.02 MPa

试验运行的初始状态，小于过滤器网孔孔径的砂粒可以顺利通过滤网。如图 4a，试验开始时，出水砂粒  $V_{50}$  为 111.37 μm、 $V_{75}$  为 171.75 μm、 $V_{90}$  为 235.85 μm， $V_{100}$  为 250 μm，图 4b 中显示砂粒体积百分数峰值粒径为 144.01 μm，此时出水砂粒粒径各特征值 ( $V_{50}$ 、 $V_{75}$ 、 $V_{90}$ ) 较大，与水源砂粒粒径比较，只有大于滤网孔径的砂粒被滤网截留。

5 min 末出水砂粒  $V_{50}$  为 98.54 μm、 $V_{75}$  为 152.25 μm、 $V_{90}$  为 209.34 μm，砂粒体积百分数峰值粒径为 134.36 μm，相较初始状态，5 min 末出水砂粒各特征值有所减小。是因为在试验的 0~5 min 内，更多的砂粒随着水流进入过滤器，其中大于滤网孔径的砂粒被拦截下来，一部分堵在滤网网孔上，一部分在水流压力下附着在滤网出口面；另外，一些大小与网孔孔径相似的砂粒由于形态不规则，前小后大，前窄后宽，其头部通过网孔尾部无法通过而嵌在滤网上堵塞网孔。此时取出滤网观察可以看到网孔堵塞现象，滤网开始初步堵塞，出水砂粒

粒径组成开始变小，砂粒体积百分数峰值对应的粒径开始变小，部分小于滤网孔径但粒径较大的砂粒开始被拦截。

5~15 min 越来越多大于滤网孔径的砂粒被拦截，滤网已经形成初步堵塞，此时取出滤网观察发现这些砂粒一部分可能是直接以“架桥”的形式覆盖在原本通畅的网孔上面使其无法继续发挥过滤作用，另一部分在水流压力和颗粒间的粘合力共同作用下开始在网面上进行堆积，并固定在滤网表面。堵塞部分由于砂粒的堆积和“架桥”其实际过水通道尺寸已经小于滤网孔径，部分小于网孔孔径但大于实际过水通道尺寸的砂粒被拦截下来，此时拦截率开始变大，而未被堵塞的部分发挥正常的过滤作用并且开始重复上述堵塞过程。

15~30 min，更多砂粒被拦截在滤网表面，砂粒之间聚集层叠使实际过水通道尺寸进一步变小，滤网只能通过更小的砂粒，大部分较大粒径砂粒被拦截下来，从而形成稳定的滤饼，出水砂粒级配较初始状态大幅减小并趋于稳定。此时过滤器的拦截效果显著。如图 4a，30 min

末出水砂粒  $V50$  为  $57.58 \mu\text{m}$ 、 $V75$  为  $87.98 \mu\text{m}$ 、 $V90$  为  $119.98 \mu\text{m}$ ，图 4b 显示 15 min 末砂粒体积百分数峰值粒径为  $75.94 \mu\text{m}$ ，对比初始状态，30 min 末出水粒径的  $V50$ 、 $V75$ 、 $V90$  分别减少 48.30%、48.77%、49.13%，砂粒体积百分数峰值粒径减少 47.27%，粒径最大值从  $250 \mu\text{m}$  下降至  $230 \mu\text{m}$ 。图 4c 和图 4d 中显示出同样的变化规律。可知，在滤网的拦截作用下，过滤器的实际过滤精度大于其期望过滤精度，过滤效果更好。

## 2.2 拦截率计算数值分析

全试验中滤网孔径、入口压强和砂粒中值粒径与过滤器拦截率的关系如图 5 所示。

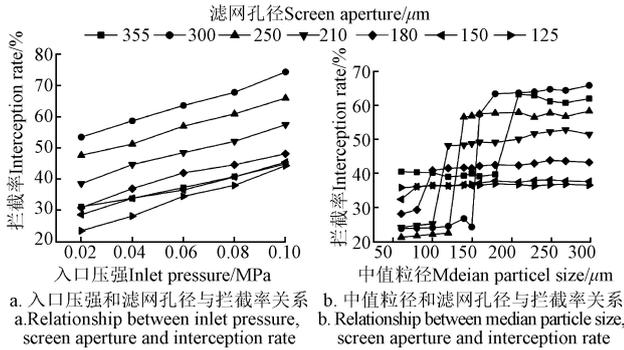


图 5 入口压强、滤网孔径和中值粒径与滤网拦截率的关系  
Fig.5 Relationships between inlet pressure, screen aperture and median particle size and screen interception rate

从图 5a 可以看出，滤网孔径和中值粒径确定时，在试验范围内过滤器拦截率随着入口压强的增大而增大。对入口压强进行方差分析得  $P=0.006$ ，对拦截率影响极为显著。125  $\mu\text{m}$  滤网在入口压强为 0.02 MPa 时滤网拦截率为 23.42%，0.10 MPa 压强下则为 44.25%，比 0.02 MPa 时提升 88.94%。250  $\mu\text{m}$  滤网在入口压强为 0.02 MPa 时拦截率为 47.59%，0.10 MPa 压强时则为 65.91%，比 0.02 MPa 压强时提升 38.49%。355、300、210、180 和 150  $\mu\text{m}$  滤网则分别提升 44.18%、39.11%、49.06%、56.12% 和 58.89%。

图 5a 也显示 125~300  $\mu\text{m}$  孔径的滤网在入口压强一定时，拦截率随着滤网孔径增大而增大，但滤网孔径达到 355  $\mu\text{m}$  时，拦截率反而有了大幅度下跌，滤网孔径的方差分析  $P=0.043$ ，影响显著。图 5b 显示在入口压强一定时，随着沙粒中值粒径增大，各孔径条件下的拦截率先是在某个水平波动，然后在某个特定区间陡增，然后再次进入相对平稳的波动状态，平稳区间中值粒径的方差分析  $P=0.59$ ，即中值粒径对拦截率影响不显著。

但对陡增区间分析发现此变化的关键在于滤网孔径-中值粒径比 ( $Y$ )。计算所有陡增区间两端  $Y$  值发现，对于 180  $\mu\text{m}$  孔径和 100  $\mu\text{m}$  中值粒径， $Y$  值为 1.80，300  $\mu\text{m}$  孔径和 160  $\mu\text{m}$  中值粒径的  $Y$  值为 1.88。1.80~1.88 区间条件下的滤网孔径-中值粒径比符合图 5b 的陡增条件，即  $Y$  小于该区间时，拦截率处于较低水平，高于该区间处于较高水平。因此，对滤网孔径-中值粒径比建模探究各因素与拦截率的关系。

## 2.3 各因素与拦截率的关系

由 2.2 节可知，滤网孔径  $x$  与中值粒径  $V50$  的比值为  $Y$ ，即  $Y=x/V50$ ，对拦截率剧变有影响， $0<Y<C$  ( $C$  为常数且  $C \in [1.80, 1.88]$ ) 时，拦截率随  $x$  增大而增大， $Y>C$  变化相反。为确定入口压强、 $Y$  和拦截率的关系，使用 Matlab 编程对试验数据进行拟合，在  $0<Y<C$ ，入口压强为 0.06 MPa 时：

$$L = -6.89 \times 10^{-6} x^3 + 4.43 \times 10^{-3} x^2 - 0.729x + 70.9 \quad (R^2=0.99) \quad (2)$$

式中  $L$  为拦截率，%； $x$  为滤网孔径， $\mu\text{m}$ 。

改变入口压强拟合后发现式 (2) 中常数项取值不同。使用 250  $\mu\text{m}$  滤网，对 0.02~0.10 MPa 入口压强  $p$  和常数项  $N_1$  进行拟合得其表达式为

$$N_1 = 2.36 \times 10^2 p + 56.7 \quad (R^2=0.94) \quad (3)$$

将式 (3) 代入式 (2) 得

$$L = -6.89 \times 10^{-6} x^3 + 4.43 \times 10^{-3} x^2 - 0.729x + 2.36 \times 10^2 p + 56.7 \quad (0 < Y < C) \quad (4)$$

当  $Y>C$ ，入口压强 0.06 MPa 时，不同孔径滤网和 350  $\mu\text{m}$  滤网在 0.02~0.10 MPa 入口压强下的拟合关系式为

$$L = 5.25 \times 10^{-6} x^3 - 2.57 \times 10^{-3} x^2 + 0.271x + 1.64 \times 10^2 p + 22.8 \quad (5)$$

综上，入口压强、滤网孔径与拦截率关系如下：

$$\begin{cases} L = -6.89 \times 10^{-6} x^3 + 4.43 \times 10^{-3} x^2 - 0.729x + \\ \quad 2.36 \times 10^2 + 56.7, & (0 < Y < C) \\ L = 5.25 \times 10^{-6} x^3 - 2.57 \times 10^{-3} x^2 + 0.271x + \\ \quad 1.64 \times 10^2 p + 22.8, & (Y > C) \\ C \in [1.80, 1.88] \end{cases} \quad (6)$$

使用 0.05 MPa 入口压强，120  $\mu\text{m}$  中值粒径试验组数据均值，对比拦截率计算值，结果见表 2。对模型进行验证发现，相对误差绝对值平均为 3.20%， $R^2$  为 0.94，模型准确度较高，具有可靠性。

表 2 基于式 (6) 的拦截率计算值和试验值比较

滤网孔径 Screen aperture/ $\mu\text{m}$	试验值 Test values/%	计算值 Calculated values/%	相对误差 Relative errors/%
355	20.94	20.16	-3.72
300	21.88	22.75	3.98
250	36.82	38.20	3.75
210	48.25	46.96	-2.67
180	41.61	40.63	-2.36
150	34.49	35.57	3.13
125	32.23	33.14	2.82

## 2.4 入口压强对拦截率的影响

入口压强对拦截率有极显著的影响，对比 250  $\mu\text{m}$  滤网不同入口压强出水砂粒径，分析入口压强对拦截率影响成因。

图 6a 中，0.02 MPa 入口压强条件下出水砂粒体积百分数曲线随时间变化比较均匀，0~20 min 内不同时间曲线差值稳定，最后 10 min 曲线差值急剧变小。图 6b 显示的出水砂粒体积百分数曲线和峰值对应的粒径的变

化规律与图 6a 相同。图 6a 中当累积百分数达到 100%时，20 min 开始曲线在 239.8  $\mu\text{m}$  粒径处重叠，此重叠点为临界点，即 20 min 后过滤效果稳定，出水粒径最大值为 239.8  $\mu\text{m}$ 。说明在此条件下滤网堵塞较慢，前 20 min 滤饼在滤网上逐渐堆积造成了出水砂粒粒径分布均匀变化的现象，20 min 后形成滤饼，出水粒径分布开始稳定。

图 6c，入口压强为 0.06 MPa 时曲线在前 15 min 内变化均匀，15 min 后变化趋势减缓变化幅度减小。图 6d 同样显示试验前 15 min 曲线和峰值粒径变化大且均匀，15 min 后曲线密集重叠，变化较小。砂粒体积累积百分数达到 100%时，15 min 开始曲线在 230.7  $\mu\text{m}$  处重叠，即

15 min 过后过滤效果稳定，此时出水粒径最大值为 230.7  $\mu\text{m}$ 。相较 0.02 MPa，滤饼形成和堵塞时间提前，出水砂粒级配稳定后出水粒径最大值减小。

图 6e，压强在 0.10 MPa 时，曲线在前 10 min 变化明显、均匀，10 min 后变化减小，图 6f 则显示在试验 10 min 后曲线变化小，出水砂粒粒径分布逐渐稳定，砂粒体积累积百分数达到 100%时，从 10 min 时开始曲线在 212.9  $\mu\text{m}$  处重叠，即 10 min 过后过滤效果稳定，此时出水粒径最大值为 212.9  $\mu\text{m}$ 。相较 0.02 和 0.06 MPa，滤饼形成时间和堵塞时间最早，稳定后出水粒径最大值最小，拦截效果形成最早，拦截率最大。

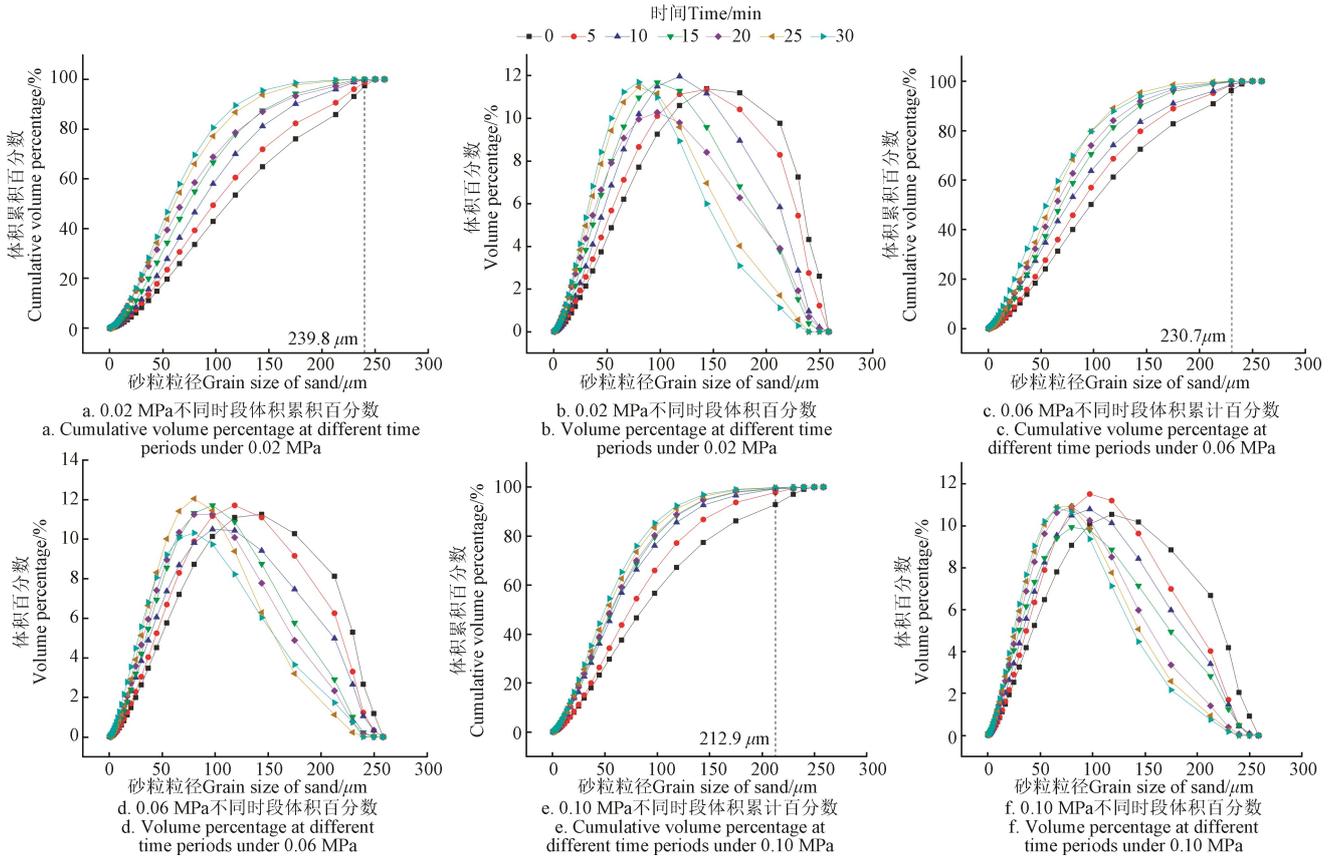


图 6 250  $\mu\text{m}$  孔径滤网不同入口压强和时间下出水砂粒粒径组成

Fig.6 Particle size composition of effluent sand with different entrance pressure and time for 250  $\mu\text{m}$  screen aperture

对比分析可知（图 6），形成入口压强对拦截率影响显著的原因一方面是压强增大流速增大，进水量和进砂量增大，堵塞加速，滤饼形成速度加快，拦截现象的出现变早。另一方面，砂粒随着高压高速水流进入过滤器，滤网出口面由最初的通畅状态逐渐堵塞，过滤器内部流场由于堵塞产生变化。根据喻黎明等<sup>[19]</sup>的研究，水流到达滤网面后由于网面堵塞一部分水流不会通过滤网出口面而是改变流向，流往过滤器下端部，最终在过滤器内部形成回流区和旋涡区。压强越大流速越大，回流区越大，一些细小砂粒随水流进入回流区和旋涡区后难以从中脱离，其数量不断增加最终在重力作用下进入过滤器下端部的滞留区中从而被过滤器拦截下来。

### 2.5 入口压强对拦截位置的影响

试验系统运行结束后，拆下滤网观察滤网表面堵塞情况，见图 7。

观察 250  $\mu\text{m}$  滤网在不同入口压强条件下滤网面的堵塞情况。图 7a 显示，在入口压强为 0.02 MPa 时对应流速为 0.98 m/s，此时滤网面上堵塞面积最大，砂粒堵塞位置分布最为分散。图 7b 中压强为 0.06 MPa，流速为 1.82 m/s 时，滤网面堵塞面积变小，砂粒堵塞位置分布较 0.02 MPa 条件下集中。图 7c 压强达到 0.10 MPa，流速 2.33 m/s 时，滤网面上砂粒堵塞位置最集中，堵塞面积最小。可见，入口压强和流速越大，被拦截在滤网面上的砂粒分布越集中。该现象与喻黎明等<sup>[9]</sup>的数值模拟结果相吻合。

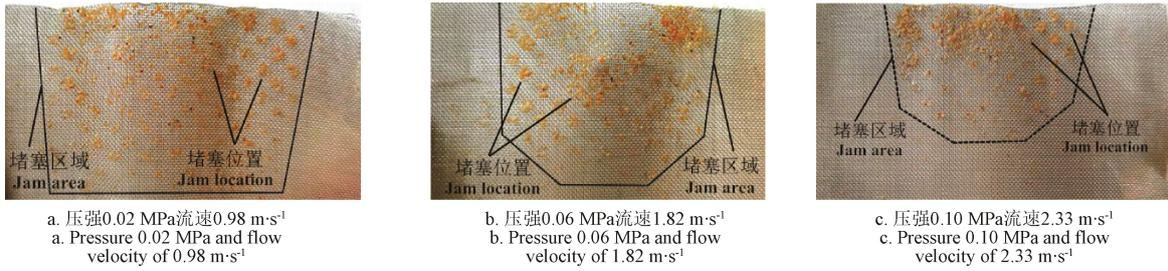


图 7 250 μm 滤网不同压强和流速下沙粒在滤网上堵塞位置分布

Fig.7 Distribution of sand blocking position on the 250 μm filter at different pressures and flow velocities

2.6 正交试验拦截率计算结果与分析

使用 Design-Expert 对正交试验拦截率计算结果进行极差分析和方差分析, 结果见表 3 和表 4。

表 3 滤网拦截率正交试验结果极差分析  
Table 3 Range analysis of filter screen interception rate orthogonal test results

序号 No.	滤网孔径 Screen aperture (AA)	入口压强 Inlet pressure (BB)	中值粒径 Median grain size (CC)	空列 Vacant column	拦截率 Interception rate/%
1	1	1	1	1	42.74
2	1	2	2	2	50.08
3	1	3	3	3	57.23
4	2	1	2	3	37.78
5	2	2	3	1	41.65
6	2	3	1	2	53.47
7	3	1	3	2	29.62
8	3	2	1	3	39.83
9	3	3	2	1	45.91
$k_1$	150.05	110.14	136.04	130.30	
$k_2$	132.90	131.56	133.77	133.17	
$k_3$	115.36	156.61	128.50	134.84	
极差 Range	34.69	46.47	7.54	4.54	
总和 Sum	398.31				

表 4 滤网拦截率正交试验方差分析结果

Table 4 Analysis of variance results of orthogonal test for filter screen interception rate

方差来源 Sources of variance	离差平方和 Sum of squares of deviation	自由度 Degrees of freedom	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
模型 Model	571.19	6	95.20	54.16	0.018 2
AA	200.57	2	100.29	57.06	0.017 2
BB	360.64	2	180.32	102.59	0.009 7
CC	9.98	2	4.99	2.84	0.260 6
误差 Error	3.52	2	1.76		
离差 Deviation	574.71	8			

注 (Note):  $F_{0.05}=19.0$   $F_{0.01}=99$

由表 3 可知, 影响滤网拦截率因素的主次顺序为入口压强、滤网孔径、砂粒中值粒径。但根据表 4 可知, 滤网孔径和入口压强对拦截率影响显著, 且入口压强对拦截率影响极为显著, 而中值粒径影响不显著。在选取较优生产条件时应该在保证灌溉过滤精度和过流量要求, 满足  $Y < C$  的前提下, 尽量选取较大的流速和较大的滤网孔径。

3 讨论

本研究使用 250 μm 孔径滤网, 在最小入口压强 0.02 MPa 条件下, 滤饼形成慢, 滤网堵塞最慢, 20 min 后出水砂粒级配开始稳定, 20~30 min 出水砂粒级配变

化小, 其他滤网孔径和入口压强条件下滤饼形成速度和滤网堵塞速度均快于该条件 (图 6a), 说明试验时间取 30 min 合理。试验结束后打开过滤器取出滤芯, 在滤网上观察不到明显的滤饼, 这是因为取出滤芯后滤饼失去水流压力的维持, 石英砂之间的相互粘合力又不能够支撑滤饼自身的质量导致其从滤网表面脱落并沉积到过滤器下端部。为了验证上述现象, 对过滤器下部沉积的砂粒进行粒度分析, 如图 8 所示, 发现上层的砂粒粒径较大, 下层的砂粒粒径较小, 分层位置约在端部 2/3 处。原因是在试验运行中较小的砂粒被水流裹挟进入回流区和旋涡区, 最终逐渐沉积在过滤器下端部的滞留区内, 这部分细小的砂粒率先沉积在下层。试验结束后, 取出滤芯的过程中滤网上拦截的较大砂粒随着滤饼的脱落最终也落到了过滤器下端部并且覆盖在之前沉积的较小砂粒上, 形成了下端部沉积砂粒上大下小的分层现象。

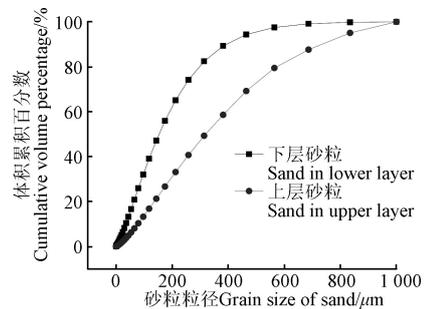


图 8 0.02 MPa 压强下 250 μm 滤网过滤器下端部上下层砂粒粒径组成

Fig.8 Particle size composition of sand in upper and lower layers at the lower end of 250 μm screen aperture under 0.02 MPa pressure

文棋<sup>[24]</sup>提出了计算过滤器过滤介质压降、滤饼压降和总压降的计算公式并详细分析了过滤器的过滤机理。宗全利等<sup>[11]</sup>通过测量滤饼厚度、滤饼干湿密度和孔隙率分析滤网堵塞和滤饼形成过程, 并提出滤网孔径和含沙量是影响滤网堵塞的重要因素。本文在研究拦截现象时同样发现了上述研究提出的过滤器的介质堵塞和滤饼堵塞现象, 滤网孔径和含沙量对滤网堵塞的影响也类似于上述研究。但由于试验结束后取出滤芯的过程中滤饼会发生脱落难以直接观测分析, 故本文采用测量试验过程中不同时段出水砂粒粒径级配从而间接分析过滤器运行过程中的堵塞过程和滤饼的形成过程, 并探究了入口压强对滤网堵塞和拦截现象的影响。相较于含沙量和滤网

孔径对滤网堵塞的影响,入口压强和流速对滤网堵塞和拦截现象的影响对实际灌溉生产意义更大。在灌溉生产中入口压强和流速直接影响灌溉水头、灌溉效率和节能效果。本文通过探究入口压强和流速对拦截率的影响得到入口压强大的情况下过滤器的实际过滤精度要高于其期望精度,从而在实际灌溉生产中,可调整入口压强来满足一定范围内的过滤需求,而不需要调整设备。

本文试验结果显示,过滤器入口压强越大,水流流速越大,过滤器的拦截率越大,拦截效果越好。在高入口压强条件下由于拦截率大,拦截效果佳,此时出水含沙粒径小,清洁度高,使得灌溉系统使用寿命延长,降低设备更换维护成本,此外高入口压强条件下灌溉效率更高,降低了灌溉系统的运行成本。但是在实际灌溉中入口压强不可能无限制增大,过高的入口压强势必会造成过滤器堵塞快,冲洗频率高,水头损失大,流量损失大,水流通过率减小,滤网破损等矛盾现象。因此在实际灌溉中可以选择较大的滤网孔径配合较大的入口压强,因为入口压强大的情况下过滤器的实际过滤精度要高于其期望精度,例如 250  $\mu\text{m}$  滤网在 0.10 MPa 入口压强的过滤条件下 15 min 末出水砂粒径组成与 180  $\mu\text{m}$  滤网 0.02 MPa 入口压强条件下初始出水砂粒径组成相似,而此时的流量损失为 8.29%,完全满足灌溉需求。同时滤网孔径大水流通过率高,堵塞慢,冲洗频率较低,故在参考灌溉要求和过滤精度要求后可以在  $Y < C$  的前提下适当选取较大孔径的滤网配合较大的入口压强,以提高滤网拦截率,增大滤网渗透率,提高灌溉效率,降低滤网冲洗频率。在大入口压强条件下滤网堵塞出现集中分布的现象,在砂粒集中分布区域滤饼形成速度快,滤网堵塞速度快。因此可以考虑降低出口面骨架密度、将出口段做成前大后小的圆锥或圆弧形状,以增加过流面积,从而达到减缓过滤器堵塞速度,提高过滤器使用性能。

## 4 结论

1) 在滤网孔径和砂粒中值粒径确定时,网式过滤器的入口压强越大,其拦截率越大,入口压强对过滤器拦截率的影响显著。在实际灌溉生产中,可通过调整入口压强来满足一定范围内的过滤精度需求,而不需要调整设备。

2) 滤网孔径-中值粒径比  $Y$  小于常数  $C$  ( $C \in [1.80, 1.88]$ ) 时,拦截率随着滤网孔径的增大而增大。此情况下滤网实际的过滤精度要高于期望精度。因此在参考灌溉要求和过滤精度后,在此前提下,根据实际情况选取滤网孔径应该小于比值常数与中值粒径的积,以保证灌溉要求和过滤精度要求的同时提高过滤器拦截率,提高灌溉效率,降低滤网冲洗频率。 $Y$  大于常数  $C$  时,拦截率随着滤网孔径的增大而减小。此时由于滤网孔径过大,滤网对沙粒的拦截效果下降,实际灌溉中应避免这种情况出现。

3) 在过滤过程中水流流速越大,砂粒被拦截的位置越集中,砂粒集中分布在出口侧,从而逐渐堵塞过滤器。因此可以考虑降低出口面骨架密度、将出口段做成前大

后小的圆锥形状或圆弧形状以增大出口面面积和过流面积,从而达到减慢过滤器堵塞速度,提高过滤器使用性能的效果。

## [参考文献]

- [1] 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, Lv 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. (in Chinese with English abstract)
- [2] 李久生, 栗岩峰, 王军, 等. 微灌在中国:历史、现状和未来[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 372-381. Li Jiusheng, Li Yanfeng, Wang Jun, et al. Microirrigation in China: History, current situation and prospects[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 47(3): 372-381. (in Chinese with English abstract)
- [3] 宗全利, 刘飞, 刘焕芳, 等. 滴灌用自清洗网式过滤器排污压差计算方法[J]. 农业机械学报, 2012, 43(11): 107-112. Zong Quanli, Liu Fei, Liu Huanfang, et al. Calculating and experiment on drainage pressure difference of self-cleaning screen filter for drip irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(11): 107-112. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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 twstand analysis of horizontal screen filter[J]. Yellow River, 2021, 43(2): 152-156, 161. (in Chinese with English abstract)
- [5] 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 Wen'e, 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)
- [6] 石凯, 刘贞姬, 李曼. 新型翻板网式过滤器水头损失试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2020, 38(4): 427-432. Shi Kai, Liu Zhenji, Li Man. Experimental study on head loss of a new type of rotatable plate screen filter[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2020, 38(4): 427-432. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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): 532-531.
- [8] Anthony S, Christopher T D, Anthony G S, et al. A numerical approach for determining the resistance of fine mesh filters[J]. Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering, 2018, 43(2): 221-229.
- [9] 喻黎明, 徐洲, 杨具瑞, 等. CFD-DEM 耦合模拟网式过滤器局部堵塞[J]. 农业工程学报, 2018, 34(18): 130-137. Yu Liming, Xu Zhou, Yang Jurui, et al. Numerical simulation of localclogging in screen filter based on coupled DEM-CFD[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(18): 130-137. (in Chinese with English abstract)
- [10] 杨洪飞, 宗全利, 刘贞姬, 等. 大田滴灌用网式过滤器滤网堵塞成因分析[J]. 节水灌溉, 2017(2): 94-98. Yang Hongfei, Zong Quanli, Liu Zhenji, et al. The analysis of clogging factor for filter Screen in field drip irrigation system[J]. Water Saving Irrigation, 2017(2): 94-98. (in Chinese with English abstract)
- [11] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(9): 215-222. (in Chinese with English abstract)

- [12] 周理强, 韩栋, 喻黎明, 等. 导流片对 Y 型网式过滤器性能的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(12): 40-46.  
Zhou Liqiang, Han Dong, Yu Liming, et al. Effects of guide vanes on performance of Y-screen filter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(12): 40-46. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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. (in Chinese with English abstract)
- [14] 阿力甫江·阿不里米提, 虎胆·吐马尔白, 木拉提·玉赛音, 等. 浑水条件下鱼雷网式过滤器的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(9): 79-83.  
Alipujang·Abulimiti, Hudan·Tumaerbai, Mulati·Yusaiyin, et al. Efficacy of torpedo screen filter in removing sediments from muddy water[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(9): 79-83. (in Chinese with English abstract)
- [15] 陶洪飞, 滕晓静, 马英杰, 等. 出水管角度对网式过滤器内部流场影响研究[J]. 节水灌溉, 2017(8): 21-25, 29.  
Tao Hongfei, Teng Xiaojing, Ma Yingjie, et al. Influence of outlet angle on the internal flow field of screen filter[J]. Water Saving Irrigation, 2017(8): 21-25, 29. (in Chinese with English abstract)
- [16] 李盛宝, 韩启彪, 杜思琦, 等. 微灌多级复合网式过滤器的设计和试验[J]. 节水灌溉, 2020(8): 82-84, 97.  
Li Shengbao, Han Qibiao, Du Siqi, et al. The design and test of multi-stage composite screen filter for micro-irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2020(8): 82-84, 97. (in Chinese with English abstract)
- [17] 赛依旦·艾力, 盛祥民, 崔春亮, 等. 高压直冲无压网式过滤器的主体结构设计[J]. 现代农业科技, 2020(3): 161-162, 165.  
Saiyidan Aili, Sheng Xiangmin, Cui Chunliang, et al. Design of main structure of high pressure direct flushing screen filter[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2020(3): 161-162, 165. (in Chinese with English abstract)
- [18] 徐昭. 移动轮流反冲洗网式过滤器的设计应用[J]. 塑料制造, 2016(5): 37-39.  
Xu Zhao. The design and application of mobile turns back flush filter[J]. Plastics Manufacture, 2016(5): 37-39. (in Chinese with English abstract)
- [19] 喻黎明, 徐洲, 杨具瑞, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的网式过滤器水沙运动数值模拟[J]. 农业机械学报, 2018, 49(3): 303-308.  
Yu Liming, Xu Zhou, Yang Jurui, et al. Numerical simulation of water and sediment movement in screen filter based on coupled CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(3): 303-308. (in Chinese with English abstract)
- [20] Tao H F, Teng X J, Zhao J H, et al. Numerical simulation of internal flow field in automatic screen filter under different flow[J]. Water Resources and Power, 2016, 34(12): 180-185.
- [21] Tao H F, Teng X J, Ma Y J, et al. Numerical simulation and structural optimization of direct-washing screen filter[J]. Water Resources and Power, 2017, 35(8): 98-102.
- [22] 阿力甫江·阿不里米提, 虎胆·吐马尔白, 木拉提·玉赛音, 等. 微灌鱼雷网式过滤器全流场数值模拟[J]. 农业工程学报, 2017, 33(3): 107-112.  
Alipujang·Abulimiti, Hudan·Tumaerbai, Mulati·Yusa iyin, et al. Numerical simulation on flow field of screen filter with torpedo in micro-irrigation[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(3): 107-112. (in Chinese with English abstract)
- [23] 陶洪飞, 朱玲玲, 马英杰, 等. 滤网孔径对网式过滤器内部流场的影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 68-74.  
Tao Hongfei, Zhu Lingling, Ma Yingjie, et al. The effect of screen aperture on internal flow field in automatic screen filter[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2017, 36(12): 68-74. (in Chinese with English abstract)
- [24] 文祺. 全自动自清洗过滤器过滤机理分析及控制系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
Wen Qi. Research on Filter Mechanism Analysis and Control System of Automatic Self-Cleaning Filter[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese with English abstract)

## Calculation of interception rate of mesh filter and analysis of its influencing factors

Zhang Kai, Yu Liming, Liu Kaishuo, Cao Dongliang, Li Na<sup>\*</sup>, Wu Feng

(College of Agriculture and Food, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** This study analyzed effects of inlet pressure, filter screen aperture and median particle size of sand on interception rates of filters in order to maintain the good permeability of filter screens and improve the interception rate of the filter screen in the engineering application of the screen filter. A full test and a three-factors-and-three-level orthogonal test were conducted. Five different inlet pressures were designed including 0.02, 0.04, 0.06, 0.08, 0.10 MPa. Seven kinds of filter screen apertures were 125, 150, 180, 210, 250, 300 and 350  $\mu\text{m}$ . The median particle size was from 60 to 300  $\mu\text{m}$ . The results showed that the cake produced in the filtration process was the main reason of the interception phenomenon. The larger the inlet pressure of the filter tended to lead to more significant interception phenomenon and the higher interception rate. The inlet pressure had a very significant impact on the interception rate of the filter. The interception rate increased with the increase of the filter screen aperture when the ratio of the filter screen aperture to the median size of sand was less than a critical range from 1.80 to 1.88. However, the interception rate decreased with the increase of the filter screen aperture when the ratio was higher than the critical range. A model of intercept rate estimation was fitted with the determination of coefficient of 0.94, indicating that the model has a high accuracy. The larger inlet pressure of the filter could result in the more concentrated distribution of intercepted sand particles at the outlet. It indicated that filter performance could be improved by reducing the skeleton density of the filter element at the outlet and designing the filter outlet segment into a circular arc shape with a large front and a small rear to increase the water passing area at the outlet. When the inlet pressure increased from 0.02 MPa to 0.10 MPa, the interception rate of 250  $\mu\text{m}$  filter increased by 38.49%, while that of 125  $\mu\text{m}$  filter increased by 88.94%. At the 15 min of the experiment, the composition of the sand particle size in the outlet water from the 250  $\mu\text{m}$  filter under the inlet pressure of 0.01 MPa was similar to that in the initial outlet from 180  $\mu\text{m}$  filter under the inlet pressure of 0.02 MPa. The filtration accuracy of the filter after a period of operation was more than expected. Therefore, the inlet pressure rather than adjusting the whole equipment could be an option to obtain good performance of filtration during short-term irrigation processes. This study provides valuable information for improving the interception rates and filtration effects of filters in irrigation projects.

**Keywords:** pressure; filters; irrigation; interception rate; screen aperture; sand particle; median particle size; interception position