

f分类号：
学 号：20222010027

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



立式网式过滤器流场特性及滤饼生长研究

学位申请人	龙洋娟
指导教师	刘贞姬 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学科、专业名称	水利工程
研究方向	水力学及河流动力学
所在学院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2025年5月

分类号：
学 号：20222010027

密 级：
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



立式网式过滤器流场特性及滤饼生长研究

学 位 申 请 人	龙洋娟
指 导 教 师	刘贞姬 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	水利工程
研 究 方 向	水力学及河流动力学
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子
2025 年 5 月

**Study on hydraulic characteristics and cake growth of vertical mesh
filter**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Long Yangjuan


(Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Liu Zhen-ji

May, 2025

学位论文独创性声明


本人所呈交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名： 

时间： 2025 年 5 月 19 日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名： 

时间： 2025 年 5 月 19 日

导师签名： 

时间： 2025 年 5 月 19 日

摘要

目的：过滤器是微灌系统中的关键设备，能够对灌溉水中的污物进行拦截和过滤，使其达到农田灌溉水质要求。本文以网式过滤器为研究对象，针对网式过滤器中泥沙颗粒分布，三维滤饼在过滤过程中生长过程以及滤饼结构变化进行研究有利于深入了解网式过滤器过滤堵塞过程，为实际灌溉选择合适运行参数提供理论依据，对于节水农业推广具有积极意义。

方法：采用数值模拟、室内原型试验与理论分析相结合的方法，研究不同进水流量、含沙量、滤网目数条件下立式网式过滤器水流特性与滤饼生长过程的规律。并对试验中各项指标进行分析，建立滤饼堵塞程度等级模型，完成对立式网式过滤器由宏观流场特性到微观滤饼生长过程的系统研究。

结果：（1）颗粒在罐体内分布规律显示，在三种位置处，下腔体截留颗粒数量最多，占比 60%左右。颗粒粒径对颗粒所在位置有显著影响，对于下腔体处，大粒径颗粒占比越大。流量越大，滤网拦截颗粒数量增加，下腔体截留颗粒数量明显减小。网式过滤器在过滤过程中颗粒集中在靠近出口的第IV区域。流量越大，颗粒滤网面上分布越分散，颗粒粒径越小，分散程度越大。浓度变化主要是改变拦截颗粒数量，并不对颗粒分布造成影响。（2）对滤饼生长过程分阶段研究发现，进口泥沙浓度越大，单位时间内拦截的泥沙颗粒数量增多，过滤器堵塞进程加快，T1 和 T2 阶段的持续时间越短。流量对于 T1 阶段影响更大，这导致有效过滤时间比随流量增大而增大。堵塞时滤饼厚度与滤饼面积受工况下单位网面颗粒接触数量、流场力、颗粒相互作用力与颗粒重力协同决定。（3）对滤饼结构研究发现，滤饼生长过程中易堵塞颗粒占比逐步减小，可滤除颗粒占比逐级增加。滤网孔径越大，形成的滤饼颗粒中可滤除颗粒占比小。对于 S3、S4 阶段，流量越大，滤饼中可滤除颗粒占比越大，孔隙比越小。随着滤饼生长阶段增加，中值粒径，孔粒比和孔隙比均减小。流量越大孔隙比越小；浓度与滤饼孔隙比相关性不强。建立了两种孔径下滤饼孔隙比的回归模型，模型决定系数 R^2 分别为 91.33%和 80.73%，拟合效果较好。由不同工况下滤饼参数基于孔隙率，滤饼厚度，过滤面积和孔粒比为指标对滤饼堵塞程度分级，量化滤饼堵塞状态，根据试验结果分级表示应在 S3 阶段前进行滤饼清洗工作。

结论：研究结果可为网式过滤器的运行和参数设置提供理论依据，对降低过滤器堵塞程度，延长过滤系统寿命具有重要意义。

关键词：网式过滤器；生长滤饼；滤饼结构；过滤时长；颗粒粒径

Abstract

Objective: Filters are critical components in micro-irrigation systems. They intercept and filter impurities in irrigation water, ensuring water meets the quality standards for agricultural irrigation. This study focuses on screen filters as the research subject. A comprehensive investigation of sediment particle distribution patterns, the dynamic evolution of three-dimensional filter cake formation, and associated structural transformations is critical for elucidating the fundamental mechanisms governing screen filter clogging processes. The research provides a theoretical basis for selecting appropriate operational parameters in practical irrigation applications. It holds significant importance for promoting water-saving agriculture.

Methods: A combined approach of numerical simulation, laboratory prototype testing, and theoretical analysis was employed to investigate the flow characteristics and filter cake growth process in vertical screen filters under varying conditions of inflow rate, sediment concentration, and mesh size. Subsequently, the experimental data were analyzed to establish a grading model for filter cake clogging levels. This study systematically examines vertical screen filters, spanning from macroscopic flow field characteristics to microscopic filter cake growth processes.

Results: (1) Regarding particle distribution within the tank, among particles at three locations, the lower chamber intercepts the largest number of particles, accounting for approximately 60%. This indicates that the upper and lower chamber structure of the vertical screen filter effectively intercepts sediment. Particle size significantly influences particle state, with larger particles dominating in the lower chamber. As flow rate increases, the number of particles intercepted by the screen increases, while the total number of particles retained in the lower chamber decreases significantly, and the total number of particles in the upper chamber increases notably. In the early stages of filtration, particles are mainly concentrated in the region near the outlet (Region IV), with fewer particles distributed in the other three regions. However, particles of different sizes become more dispersed across the screen surface as flow rate increases, with smaller particles exhibiting greater dispersion. Increasing concentration has little effect on the proportion of different particle sizes, indicating that changes in particle concentration primarily affect the number of intercepted particles rather than their distribution. (2) Studies on filtration time at different stages reveal that higher inlet sediment concentrations result in more particles being intercepted per unit time, accelerating filter clogging and shortening the duration of T1 and T2 stages. Flow rate has a greater impact

on the T1 stage, leading to an increase in the effective filtration time ratio as flow rate increases. Since the T1 stage is dominated by screen filtration and the T2 stage by cake filtration, changes in mesh size have a more significant effect on the duration of the T1 stage. As mesh size increases, the effective filtration time ratio decreases. Concentration changes equally affect the duration of both stages and have no significant impact on the effective filtration time ratio. (3) Filter cake growth involves the filling of mesh pores by easily clogged particles, followed by the sequential filling of pores in the large particle skeleton by filterable particles. The proportion of easily clogged particles gradually decreases, while the proportion of filterable particles increases. When the screen aperture is larger, the inlet particles contain more easily clogged particles, resulting in a smaller proportion of filterable particles in the formed cake. For clogged cakes, higher flow rates lead to a greater proportion of filterable particles in the cake. As the cake growth stage progresses, the median particle size, pore-to-particle ratio, and porosity ratio all decrease. Influenced by the sediment-carrying capacity of the flow, during the S1 and S2 stages, higher flow rates result in larger porosity ratios, while during the S3 and S4 stages, higher flow rates lead to smaller porosity ratios. Concentration shows weak correlation with cake porosity. A grading model for cake clogging levels is established based on porosity, cake thickness, filtration area, and pore-to-particle ratio to quantify the clogging state of the cake.

Conclusion: The research results provide a theoretical basis for the operation and parameter settings of screen filters. They hold significant importance for reducing the degree of filter clogging and extending the lifespan of filtration systems.

Key words: Screen filter; Growth of filter cake; Structure of filter cake; Filtration duration; Particle size

目录

摘 要.....	I
Abstract.....	II
目录.....	IV
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 国内外研究现状.....	3
1.3 研究内容.....	7
1.4 技术路线图.....	8
第 2 章 阶段堵塞试验与过滤过程模拟方法.....	9
2.1 试验设备及装置.....	9
2.2 试验步骤与方法.....	11
2.3 模拟方法.....	12
2.4 模型建立及网格划分.....	13
2.5 数值模拟参数设置.....	13
2.6 数值模拟方案.....	14
第 3 章 网式过滤器过滤中颗粒分布模拟研究.....	16
3.1 数值模拟验证.....	16
3.2 流场特性.....	17
3.3 罐体内颗粒分布规律.....	21
3.4 滤网面颗粒分布规律研究.....	22
3.5 本章小结.....	29
第 4 章 网式过滤器过滤时间与滤饼生长的试验研究.....	31
4.1 生长指标和生长阶段划分.....	31
4.2 各阶段过滤时间分析.....	33
4.3 不同工况下滤饼生长规律.....	35
4.4 本章小结.....	41
第 5 章 网式过滤器生长滤饼结构研究.....	42
5.1 不同工况下各阶段生长滤饼粒径分布特征.....	42
5.2 不同工况下各阶段生长滤饼孔隙特征.....	45
5.3 孔隙比回归方程建立.....	49

5.4 滤饼堵塞程度分级	51
5.5 本章小结	54
第 6 章 结论与展望	55
6.1 结论	55
6.2 展望	56
参考文献	57
致谢	64
作者简介	65
导师评阅表	错误！未定义书签。

第 1 章 绪论

1.1 研究背景

中国水资源总量是 2.8 万亿立方米，水资源总量丰富，位居世界第六位。但我国人均水资源量短缺，仅为世界人均水量的 1/4，在世界排第 121 位（按 1995 年 153 个国家统计），现已经被列为 13 个贫水国家之一^[1-3]，人均占有量只有 2200 m³。其中，我国的第一用水大户和第一浪费大户是农业灌溉用水。2010 年以来，全国农业用水量维持在 3500 亿立方米/年以上，超过用水总量的 60%。我国农业灌溉用水现状存在显著效率差距：当前农业用水仍以传统漫灌方式为主导，水资源利用效率亟待提升。统计数据显示，2022 年全国农田灌溉水有效利用系数仅为 0.572，这一数值不仅明显低于发达国家 0.80 的平均水平，与以色列等节水技术领先国家（系数约 0.90）相比差距更为显著。这种效率差距凸显了我国农业灌溉节水技术升级的紧迫性^[4-7]。根据水利部统计，2022 年，全国农田用水总量在 3781.3 亿立方米之间，如果提高 10% 的利用率，则可节水 360 多亿立方米，行业发展潜力巨大^[8]。为此，发展节水农业，推进高效节水灌溉技术势在必行。2012 年 1 号文件中提出大力发展节水农业，2023 年中央 1 号文件中又提出要求统筹推进高效节水灌溉，势必将国家高效节水灌溉推向一个新的台阶^[9-10]。

农业高效节水的主要内容即发展节水灌溉，根据节水灌溉技术的不同，可将节水灌溉分类为滴灌、喷灌、低压管灌、渠道防渗等类型。在各类成熟的节水灌溉技术中，“微灌”是目前公认的效果好、效率高的有效节水灌溉技术^[11-13]。根据调查数据显示，常规地面“漫灌”用水量是微灌用水量的 3 倍，喷灌用水量是微灌用水量的 2 倍。特别是对于水资源短缺的干旱、半干旱农业产区，微灌技术具有更加明显的优势^[14-16]。微灌节水技术已在海外诸多缺水、干旱乃至沙漠地区大规模推广，且成效显著。一般来说，微灌系统由三大部分构成：其一是灌溉首部枢纽，涵盖水泵、各类仪表、控制阀以及过滤器；其二是中间管网系统，主要承担输配水工作；其三则是各类形式的灌水器，直接向土壤供水，保障作物的水分需求。灌水器作为作物灌溉的最后一环，是确保灌溉任务精准完成的关键设备，其流道尺寸和出水口径通常设计得很小，对灌溉水源含沙量等要求较高。因此，过滤器作为首部过滤设备，它的选择对防止灌水器堵塞就至关重要。泥沙处理不好必定引起配水不均和微灌系统性能损耗，甚至造成整个微灌系统瘫痪，影响正常的农业生产活动，造成大量人力和财力损耗^[17-18]。

目前，我国农业灌溉系统中中应用较广泛的过滤器主要是离心式过滤器、砂石过滤

器、网式过滤器和叠片式过滤器^[19-21]：（1）离心式过滤器主要应用于地下水泥沙的去除。其工作原理是利用高速旋转水流产生的离心力实现砂粒等重质杂质的分离。该类型过滤器无滤网结构，无可拆卸部件，具有维护简便的特点。需要注意的是，底部积沙室需定期冲洗以避免泥沙二次进入系统。但其对有机污染物或轻质杂质的处理效果欠佳，且需在特定流量范围内才能达到理想处理效果。（2）砂石过滤器适用于水库、河流等开放水源的有机物初级过滤。通常采用均质砂粒作为过滤介质，通过介质吸附和滤头阻隔实现泥沙处理。这类过滤器不仅能有效去除无机污染物，特别适合处理含有机污染物和淤泥的水质。（3）叠片式过滤器具有复合型过滤特性，可同时处理有机和无机污染物。其核心部件是带有微细滤槽的叠片组，通过叠片压紧形成立体过滤网络，独特的滤槽结构使其具备较强的杂质吸附能力，且局部堵塞不会影响整体过滤效果。虽然具有过流能力强、运行稳定等优势，但在自清洗过程中可能出现叠片粘连现象。（4）网式过滤器采用金属或尼龙滤网作为过滤介质，通过物理拦截的方式去除大于网孔尺寸的泥沙为主的杂质。这类过滤器经济实用、维护简单，适用于沙粒等无机杂质的去除，但对藻类等有机物的处理效果有限。根据安装方式可分为立式和卧式；按清洗方式有人工和自动之分；从结构上可分为封闭和敞开两种形式。

在以上几种过滤器中因网式过滤器具有简单有效，造价便宜，水头损失小等优点，在国内外灌溉系统二级过滤中使用最为广泛。但网式过滤器在过滤时存在容易堵塞的问题，并且随着长时间运行，滤网前、后的压差增到某一程度，网孔受压扩张将使一些杂质“挤”过滤网进入灌溉系统。我国自20世纪80年代引入微灌技术以来，网式过滤器作为微灌系统的关键组件，长期面临着污物堵塞和清洗效果不理想等技术难题^[22-23]，这些问题严重制约了我国微灌技术的推广进程。因此，提升过滤器的实际运行效能，对于推动现代农业发展和微灌技术普及具有重要意义。根据前人研究可以发现，过滤器堵塞的本质是三维滤饼的形成，过滤器压降增加的本质是滤饼持续累积的结果^[24-25]。现阶段网式过滤器的研究主要围绕两个维度展开：一是，研究者运用三维数值模拟技术，深入解析过滤器内部复杂流场特性，重点研究固液两相流动行为、压力梯度分布等关键水力特性；在试验层面，则通过系统性的测试方案，全面评估不同运行参数下过滤器的拦污效率、堵塞特性等核心性能指标。值得注意的是，目前针对滤饼形成机理这一本质问题开展的网式过滤器基础研究仍较为匮乏。为了减小网式过滤器堵塞带来的损害，保证网式过滤器达到经济高效的目的，对网式过滤器堵塞过程以及过滤器压降与滤饼结构的关系进行研究是十分必要的。

1.2 国内外研究现状

网式过滤器作为微灌系统二级过滤的核心组件，因其重要作用成为国内外学者重点研究的对象，并取得了丰硕的研究成果。从研究发展历程来看，早期研究主要聚焦于宏观水力特性分析，包括清水工况下的流场数值模拟及过滤性能试验研究；随着研究的深入，学者们逐渐转向微观层面，重点探究泥沙颗粒的截留机制、结构参数优化以及不同工况对过滤效率和抗堵塞性能的影响规律。

1.2.1 国内研究现状

当前对网式过滤器的研究主要集中在以下几个方面：

(1) 网式过滤器水力特性研究

20世纪90年代，我国学者对网式过滤器展开了系统研究。徐茂云^[26]通过实验研究建立了滤网清洁度与水头损失的经验关系式，发现国产过滤器存在滤网有效利用率低的问题，具体表现为滤网面积过大而实际工作区域有限，建议将过水断面面积优化为滤网面积的1/7并减小整体体积。张国祥^[27]重点探讨了滤网孔径与运行压强的优化配置，董文楚^[28]则系统提出了包括设计流速、水头损失和过流能力在内的关键运行参数，并对相关计算公式进行了试验验证。在过滤性能研究方面，刘焕芳等^[29]深入分析了局部水头损失的变化规律，系统考察了含沙量、流量和工作时长等因素对水头损失的影响，发现当堵塞达到临界程度时，有效过滤面积会快速减小并引发水头损失骤增。刘飞等^[30]针对农田滴灌系统，研究了自清洗式网式过滤器的水力特性，建立了不同水质条件下水头损失的预测模型，并揭示了自清洗周期与过滤时长的变化规律。

在过滤器水头损失研究方面，宗全利等^[31]通过试验研究发现过滤流量、运行时长和水源含沙量均会影响局部水头损失变化，建立了浑水工况下水头损失的计算模型，并指出在滤饼形成前后，水流阻力主要来源会由滤网介质转变为滤饼本身。文棋^[32]重点研究了过滤介质与滤饼间的压力损失特性，量化了工业自动化清理过滤器的滤饼渗透率和孔隙特征参数。李曼^[33]针对80目滤网开展了系统测试，通过清水试验数据建立了流量与水头损失的关系模型，并采用单因素分析法推导出浑水条件下的水头损失计算方法。秦天云等^[34]对比研究了网式与叠片式过滤器的性能差异，发现清水条件下水头损失与流量呈正相关，同时滤网孔径和浑水条件都会显著影响水头损失特性，比较两者优缺点提出两者的适用条件。在过滤器结构优化方面，刘贞姬等^[35]对比分析了立式和卧式自清洗过滤器的水力特性，建立了统一的流量-水头损失数学模型。阿力甫江等^[36]通过试验验证了鱼雷式过滤器在清水工况下流量与水头损失存在幂函数关系。雷建花^[37]的研究表明，水力驱动式自清洗过滤器具有过流能力强、清洗效率高等优势。石凯等^[38]设计出一种新

型翻板式过滤器并对其性能进行测试,结果表明,其水头损失特性与流量密切相关,并建立了相应的数学模型。

(2) 网式过滤器过滤和堵塞过程研究

在过滤性能研究方面,文棋^[39]将滤网堵塞分为介质堵塞和滤饼堵塞两种类型,研究发现滤饼堵塞虽会增加水头损失,但能提升过滤效率,并通过试验测定了自清洗过滤器的透过度与孔隙度参数。李曼等^[40]对滴灌用网式过滤器的排污特性进行研究,发现排污过程在10秒左右达到峰值,20-30秒后趋于稳定,据此优化了排污时间参数。阿力甫江^[41]针对鱼雷式过滤器的研究表明,鱼雷式过滤器的特殊结构设计可显著延长过滤周期,增加泥沙拦截能力,并且发现当过滤器冲洗压差设定为0.04MPa时,冲洗性能和清洗效果达到最佳状态。张国祥^[42]深入分析了滤网堵塞机理,指出滤网仅能限制颗粒的二维尺寸,建议采用较大粒径比来减轻堵塞,并提出了临界粒径比的概念。朱德兰等^[43]研究发现在微灌系统运行时,投放的有机肥浓度对过滤器滤网的清洗效果存在较大影响,建议控制肥液浓度在40g/L以内,可保证过滤器能有较好清洗效果。杨洪飞等^[44]系统分析了滴灌过滤器堵塞的主要成因,包括水源水质、滤网选型、反冲洗设计问题等因素,并提出了相应的解决方案。

当前滤饼研究主要聚焦于其结构特征与形成机制两个方面。冯泽宇等^[45]创新性地采用X射线计算机断层扫描技术,通过真空过滤实验揭示了颗粒粒度分布对过滤速率的调控作用,并定量表征了颗粒特性与滤饼多孔结构的构效关系;陈茹霞等^[46]则针对细粒煤脱水过程开展系统研究,通过测定不同工况下滤饼的孔隙率、分形维数等关键参数,结合过滤动力学数据,建立了滤饼微观结构与其脱水性能的定量关联模型。杨泽志等^[47]以过滤过程中单个微粒的受力为基础,分析了各种力对微粒沉积的作用方式,得出各作用力与滤饼厚度的关系。上述研究成果为深入解析微灌系统网式过滤器的过滤动力学特性及堵塞演化机制提供了重要的理论支撑和技术基础。

(3) 网式过滤器的数值模拟研究

随着计算流体动力学(CFD, Computational Fluid Dynamics)技术的持续进步与完善,其在工程实践中的应用日益广泛,近年来已逐步拓展至农业灌溉设备流体力学特性的研究领域^[48-50]。在网式过滤器CFD模拟研究方面,李浩^[51]通过不同湍流模型的对比分析,揭示了滤网区域存在的流速分布不均匀现象,特别指出出水管与过滤器筒体连接处形成的紊流区是导致水头损失增加和过滤效率降低的重要原因。宗全利等^[52]针对工程中常见的自清洗过滤器下端破裂问题,创新性地采用动网格技术模拟清洗过程,研究发现过滤器上、下端显著的流速差异是造成下端滤网应力过大的根本原因。王忠义等^[53]通过建立平面模型确定关键参数,采用多孔介质模型模拟网式过滤器内部流场,其数值结果与实验数据高度吻合,验证了该模型在过滤器水力性能模拟中的可靠性。王栋蕾等^[54]运用Fluent软件结合动网格技术,模拟了流场形状随时间变化情况,实现了自清洗过滤器内

部瞬态流场的可视化模拟,为研究机械内部真实流动特性提供了新方法。阿力甫江·阿不里米提^[55-56]系统研究了鱼雷式过滤器的优化设计,通过多孔介质模型模拟发现,出水口位置显著影响流场均匀性,不同规格过滤器存在特定的最佳工作区间。陶洪飞等^[57-58]通过数值模拟获得了不同工况下的流场分布特征:1)清水条件下流量变化虽未显著改变流场结构,但会线性增大水头损失,具体表现为流量增加导致滤网速度梯度和压差增大,进而影响过滤效率和使用寿命;2)采用多孔阶跃模型分析表明,滤网孔径减小会增强流场紊动强度,使水头损失显著增加。骆秀萍等^[59]则针对自清洗系统开展专项研究,通过流场模拟揭示了排污装置内部压力场、速度场及湍流参数的动态变化规律及其与流速条件的定量关系。滕晓静^[60]针对全自动鱼雷网式过滤器,开展了不同流量下清水流场的模拟研究。研究发现,流量变化并不会对过滤器内部的速度分布和压强分布产生影响。然而,随着流量不断增大,过滤器的水头损失、速度差以及压差均呈现出上升趋势。喻黎明^[61-62]采用CFD-DEM(Computational Fluid Dynamics - Discrete Element Method)耦合方法对网式过滤器的固液两相流动特性进行了深入研究,揭示了过滤器内部存在三个特征流动区域,回流区、漩涡区和滞流区。研究发现这些特殊流动结构导致过滤面流速分布不均,具体表现为出口侧流速显著高于进口侧。同时,研究还发现入口流速与颗粒分布特性存在明显的相关性,较高入口流速会导致颗粒通过位置集中,而适当降低流速可改善颗粒分布的均匀性。周理强等^[63]对比了Y型网式过滤器分别在有、无导流片时的内部水流和沙粒的运动,认为导流片对过滤器性能具有双重影响:1)增加系统水头损失;2)有效抑制滤网表面泥沙沉积。受限于过滤器罐体的密闭结构特性,采用常规物理实验方法难以实现对其内部流体动力学行为的直接观测与测量。CFD数值模拟技术能直观展现过滤器内部流体、沙粒的运动轨迹与分布状态。

1.2.2 国外研究现状

国外对于网式过滤器的研究同样集中在上述方面,且国外尤其是美国以色列等发达国家对于节水灌溉技术的研究较我国早,研究更为深入,且近年来研究重点主要集中在过滤器过滤性能和堵塞性能方面。

水力性能方面,Puig-Bargues^[64]使用量纲分析方法探究过滤器在过滤污水时的水头损失公式。Wu等^[65]基于建立的水头损失预测模型,揭示了关键结构参数的影响规律,进水口直径和滤网孔径与水头损失呈负相关;滤网安装角度和尺寸对水头损失影响不显著。过滤性能方面,Schmidt等^[66-67]深入分析了滤饼演化特性,发现随着过滤时间延长,滤饼结构参数(包括颗粒粒径分布、表面电荷等)的变化会导致其质量和流动阻力持续增加,从而显著影响过滤器性能表现。Capra等^[68]研究了灌溉水源水质对过滤系统过滤性能的影响,发现在水源水质较差的情况下可以利用废水灌溉,此时过滤系统的过滤性

能取决于废水质量，稀释污水后可以保障过滤器良好的过滤性能。Duran-Ros^[69]通过系统研究揭示了过滤器运行时间与过滤性能的动态关系，研究表明，随着运行时间延长，过滤器会出现显著的流量衰减拐点，通过入口压力与反冲洗效果的关联分析，确定了最优反冲洗压力参数。该研究成果为过滤器运行参数的优化选择提供了重要依据，特别是对确定合理的工作时长和操作压力具有重要指导价值。

滤网堵塞方面，Juanico 等^[70]针对水库水源条件下的滴灌系统，证实水藻等生物有机物是造成过滤器堵塞的主要因素，并通过 80 目滤网的实验建立了工作压力与堵塞程度的定量关系。Adin 等^[71]通系统研究了有机物浓度、过滤参数对堵塞的影响，创新性地采用滤饼阻力系数和过滤指数评价过滤性能。Duranros^[72]研究了污水灌溉条件下网式过滤器的过流量，对其被堵塞的风险进行了系统评估。Puigbargués^[73-74]提出了在微灌时去除过滤器滤芯上的被堵塞颗粒的可供参考的方法。Haman 等^[75]对水源水质类型进行研究发现物理、化学和生物污染会造成滤网堵塞，因此在灌溉工程中要选用不同类型的过滤器对不同类型的污染水进行过滤处理。Ribeiro^[76-77]对生物存在下对滴灌系统堵塞的影响进行研究，提出硝酸-次氯酸钠联合处理方法显著改善过滤器水质，研究显示该方法不仅能有效控制细菌数量，还可提高灌水均匀度，可有效解决生物污染导致的堵塞问题。该研究实现了对过滤器内部复杂流动特性（包括流场分布、颗粒拦截及碰撞行为）的精确模拟。通过系统对比实验数据与数值模拟结果，验证了该模型在过滤过程模拟中的可靠性，为深入理解过滤机理提供了重要的研究方法参考。

滤饼研究方面，Zeier 等^[79-80]通过研究颗粒粒径和含沙量对多级过滤器堵塞特性的影响，揭示了颗粒在过滤过程中的选择性截留机制，较小粒径颗粒主要造成滤网孔隙的直接堵塞，而较大粒径颗粒则在过滤器腔体内随水流运动。研究建立了滤网堵塞过程的数学模型，实现了不同工况下过滤器性能的定量预测。结果表明，滤网孔径的减小会显著加速颗粒积聚过程，当系统水头损失达到 44.1 kPa 临界值时出现明显性能劣化；同时发现小颗粒优先堵塞滤网孔隙，大颗粒则在滤网表面逐渐沉积。此外，研究还证实进水含沙量的增加会线性加速颗粒积聚速率。Iritani 等^[81-82]通过压滤实验揭示了过滤压力与滤饼结构的动态关系，研究表明：随着过滤压力的提升，滤饼质量比阻呈现递增趋势，同时其渗透性能相应降低。MCKINLEY 等^[83]则基于系统的砂土渗透实验，建立了恒定压力条件下滤饼厚度增长的动力学模型，为理解滤饼演化规律提供了理论依据。Avner 等^[84]在前人研究基础上，对网式过滤器的过滤与堵塞机理开展了深入的实验研究。实验结果表明：过滤器的堵塞速率和水头损失与悬浮颗粒浓度、过滤速度及滤网目数均呈正相关关系。研究指出，传统基于鲍彻定律的堵塞机理分析存在局限性，主要体现在未充分考虑滤饼特殊阻力对整体堵塞过程的影响。为此，研究者从理论层面完善了堵塞机理模型，分别建立了可压缩和不可压缩滤饼条件下的压力梯度计算表达式。Wu 和 Sharma^[85]基于离散元法计算过滤介质阻抗特性，提出评价过滤介质孔径尺寸的新方法，在模拟中设

置粒子之间的相互作用，在与理论计算结果对比后发现二者结果相吻合，表明离散元法可以准确评估过滤介质模型。

综上所述，目前对过滤器的研究主要采用试验和数值模拟手段对网式过滤器水力性能，过滤性能，堵塞性能，结构优化等进行研究，其中水力性能，过滤性能以及结构优化方面研究开展较早，研究也比较充分，而对于滤饼堵塞方面多集中过滤器堵塞成因以及抗堵塞性能研究。滤饼的形成是过滤器堵塞的本质，因此，对网式过滤器中泥沙颗粒分布，三维滤饼在过滤过程中生长过程以及滤饼结构变化进行研究有利于深入了解网式过滤器过滤堵塞过程，为实际灌溉选择最优运行流量提供理论依据，对于节水农业推广具有积极意义。

1.2.3 过滤器发展趋势

为了解决随着我国工农业迅速发展带来的各种灌溉水资源不足和微灌过滤系统存在的问题，需要继续深入对微灌用过滤器的理论研究。而网式过滤器作为国内外大田微灌应用最广泛的过滤器之一，针对网式过滤器滤饼堵塞机理和滤饼结构研究以及相关理论完善仍是今后研究的重点方向之一。本次研究以立式网式过滤器为研究对象，通过数值模拟、原型试验和理论共同确定其实际应用规律，为过滤器发展提供相关应用成果。

1.3 研究内容

本文以滴灌用立式网式过滤器为研究对象，拟采用数值模拟、原型试验与理论分析相结合的手段，从宏观方面对立式网式过滤器流场特性、罐体内泥沙颗粒分布规律进行研究，从微观方面对过滤器滤饼结构以及滤饼生长过程进行研究。

(1) 立式网式过滤器过滤过程的水沙耦合模拟：1) 通过不同工况下过滤器内部流速场以及压强场，得到立式网式过滤器中流场特性；2) 对不同粒径颗粒在过滤器罐体内部分布情况进行分析，得到不同工况下过滤过程中泥沙颗粒在过滤器内部宏观分布规律；3) 对不同工况下形成的局部堵塞滤饼中颗粒在滤网网面分布规律进行研究。

(2) 立式网式过滤器时间尺度和空间尺度的滤饼生长的试验研究：1) 对不同工况下过滤压降与过滤时间的规律进行研究，根据过滤压降划分过滤器堵塞阶段；2) 依据堵塞阶段划分，确定滤网过滤阶段的有效堵塞时间，对各工况对网式过滤器堵塞总时间和有效过滤时间作用机理进行研究；3) 从滤饼面积，滤饼厚度出发，对不同工况下三维滤饼随不同堵塞阶段的动态生长变化进行研究，揭示各因素对滤饼生长作用机理。

(3) 滤饼结构研究与滤饼堵塞程度分级：1) 从滤饼的孔隙率，粒径出发，对不同工况下不同堵塞阶段中的滤饼内部结构进行研究；2) 基于滤饼厚度、孔隙率、滤饼面