

# 回流滴灌系统毛管泥沙输移规律模拟及实验研究

卢金锁<sup>1,2</sup>, 路泽星<sup>1</sup>, 于健<sup>3</sup>, 史吉刚<sup>3</sup>

(1. 西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西北水资源与环境生态教育部重点实验室, 陕西 西安 710055;  
3. 内蒙古自治区水利科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:** 为探究回流滴灌系统滴灌毛管的输沙潜力和抗堵塞性能, 本试验通过 CFD 模拟和室内滴灌实验探究滴灌系统中泥沙颗粒输移规律和水流运动特性。CFD 模拟结果表明: 当毛管内水流流速小于  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 随流速的增加, 自毛管进入滴头的泥沙数量明显减少, 且毛管内水流紊流强度大小与紊流区域范围逐渐减小; 当毛管内水流流速大于  $0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时, 流速的增加对进入滴头内的颗粒数量和水流状态无明显影响。室内滴灌实验结果表明: 回流滴灌系统毛管水流流速增加时, 滴头出水中的泥沙颗粒数量较支状系统减少约 30%, 而当回流毛管流速为  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 三种滴灌带的灌水周期比支状滴灌系统分别提高 50%、38%、41%, 继续提高流速对提高灌水周期影响不大。回流滴灌系统较传统滴灌系统可以显著提高毛管的输沙排沙能力, 减少进入滴头内的泥沙数量, 提高系统抗堵塞性能, 延长滴灌系统的运行周期。

**关键词:** 泥沙输移; 滴头堵塞; CFD 模拟; 回流管; 毛管流速

**中图分类号:** S275.6 **文献标志码:** A

## Simulation and experimental study on lateral sediment transport in drip irrigation with return pipe

LU Jin-suo<sup>1,2</sup>, LU Ze-xing<sup>1</sup>, YU Jian<sup>3</sup>, SHI Ji-gang<sup>3</sup>

(1. College of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China;  
2. Key Laboratory of NothWest Water Resource and Environment Ecology Ministry of Education, Xi'an, Shaanxi 710055, China;  
3. Inner Mongolia Autonomous institute of water resources research, Hohhot, 010020, China)

**Abstract:** In order to explore the sediment transport potentials of lateral in drip irrigation system with return pipe, this paper utilized the numerical method by CFD and intermittent drip irrigation method to study the movement regulation of sand particles and movement state of liquid-solid two-phase flow in lateral. The result showed that with the increase of flow velocity in lateral, the number of particles enter into emitter reduced significantly; when the flow rate is  $0.05 \sim 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the turbulence intensity and turbulence region in the lateral were reduced with the increase of flow velocity. When the flow rate is  $0.2 \sim 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the increase of flow rate has no obvious effect on the change of water flow state. When the return pipe is arranged at the end of lateral to increase flow velocity, the number of particles outflow from emitter is reduced by about 30%. When the flow rate of return pipe is  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , the irrigation period of three kinds of emitter was improved by 50%, 38% and 41% respectively. These results indicate that to improve the flow rate of lateral can significantly improve the transport capacity of sand, increase the running time of drip irrigation system, reduce the requirements for water treatment facilities.

**Keywords:** sand movement; emitter clogging; CFD; return pipe; flow rate of lateral pipe

滴灌是一种新型灌溉方式, 具有节水、高效等诸多优点, 适合在干旱缺水地区推广。但由于滴灌系统对水质要求较高<sup>[1]</sup>, 而在我国西北内陆黄河灌区黄河水含沙量普遍较高, 处理达到滴灌水质标准成本较高, 否则极易造成滴头堵塞, 从而严重制约滴灌系统的大面积推广<sup>[2-3]</sup>。

针对黄河水泥沙量大和处理成本较高的问题, 有学者研究采用水力旋流器、沉淀池和过滤器等方法对黄河水进行处理<sup>[4-5]</sup>; 还有研究人员通过对滴头流道水力特性的 CFD 模拟和实验研究, 探究滴头内部的水沙运动特性, 并据此对滴头流道结构进行优化, 提高了滴头的输沙抗堵塞性能<sup>[6-11]</sup>; 还有学

者提出在系统运行时通过水力冲洗对滴灌系统进行清洗排沙,从而降低滴灌系统堵塞的几率和对水质处理的要求<sup>[12-14]</sup>。

目前,研究人员主要从水质净化、滴头流道结构优化、滴灌运行方式等三个方面为切入点研究使用黄河水作为水源的滴灌系统的堵塞问题。但对滴灌毛管的输沙排沙能力研究较少,并且针对国内滴灌带“一年一换”不同于国外滴灌毛管3至5年的使用周期的特点,现有的水质净化方法的效费比较低,因此有必要针对滴灌毛管内的泥沙输移规律进行研究。

本文提出一种在传统支状滴灌系统末端增设回流管的回流滴灌系统,通过控制回流管流速调节系统内毛管水流流速。本研究通过CFD模拟和滴灌实验,研究滴灌毛管水流流速提高后毛管内泥沙颗粒的运动规律,发掘滴灌毛管的输沙、排沙潜力,从而利用经简易过滤后的原水作为滴灌水源,以实现提高滴灌系统运行周期和降低滴灌系统的水处理成本的目的。

## 1 材料与方 法

### 1.1 CFD 控制方程及滴灌模型简化

模拟计算过程中的控制方程由连续性方程和 Navier-Stokes 等方程构成,其在直角坐标系中的表达式为<sup>[15-16]</sup>:

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 方程:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u U) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \nabla^2 u + \rho f_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v U) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \nabla^2 v + \rho f_y \quad (3)$$

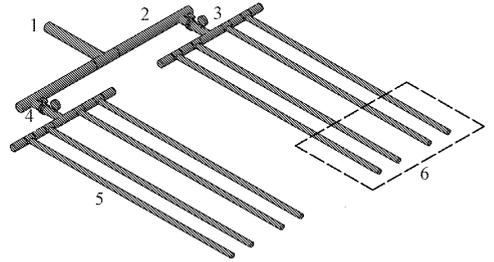
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w U) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \nabla^2 w + \rho f_z \quad (4)$$

传统的支状滴灌系统布置形式如图1所示,CFD模拟计算过程中选取滴灌系统末端毛管为研究对象。通过设定末端毛管的不同水流流速模拟回流滴灌系统不同回流流速时毛管内的水沙运动状态,探究在滴灌毛管末端设置回流管提高毛管流速后,泥沙颗粒的运动特征以及毛管内水流流速对水流状态的影响。

### 1.2 计算区域网格划分与模型求解

计算区域的三维几何模型构建在 AutoCAD 2010 中完成,计算区域毛管长度为 66 cm,毛管直径为 16 mm,滴头位于计算区域毛管 33 cm 处。滴头流道宽度为 0.75 mm,流道深度 0.75 mm,齿间距 1.74 mm,齿高度 1.0 mm,流道长度 19.4 mm。将几何模型导

入 GAMBIT 2.3.16 划分计算区域的网格,滴头区域采用 0.1 mm 的四面体非结构化网格划分,滴头流道入口处 20 cm 的毛管区域采用 0.3 mm 的六面体结构化网格划分,其余毛管区域采用 1 mm 的六面体结构化网格划分。计算区域的网格总数约  $4.5 \times 10^5$  个,计算区域网格划分如图2所示。



1. 干管;2. 支管;3. 压力表;4. 阀门;5. 滴灌带;6. 模拟计算区域

1. main pipe; 2. branch pipe; 3. pressure gauge; 4. valve; 5. drip irrigation tape; 6. simulated calculation area

图1 CFD 模拟滴灌系统简化图

Fig. 1 CFD Simulated drip irrigation system simplified diagram

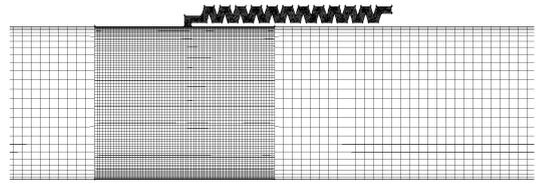


图2 计算区域网格划分

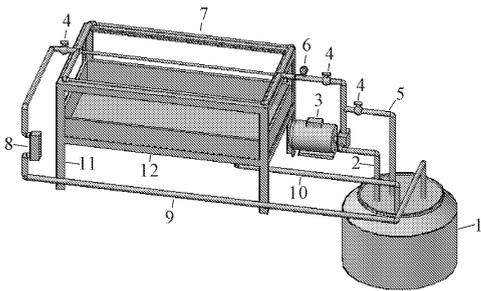
Fig. 2 The grid division of computational region

CFD模拟采用欧拉两相流模型,固相颗粒直径 0.01 mm,固相颗粒密度  $2500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。毛管入口设置为速度入口形式,共设 0.05、0.10、0.20、0.40  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  四个流速梯度。毛管出口设为压力出口形式,压力值为  $1.01 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。滴头流道出口设为压力出口,压力值为 0。滴头流道入口和滴灌毛管的边壁连接处设定为交界面形式,并在 FLUENT 6.3.26 中将交界面创建为网格交界面。近壁面采用标准壁面函数法对壁面进行处理,并根据滴灌实验选用的滴灌带材料特性将壁面粗糙高度设为 0.01 mm,粗糙系数设为 0.5。压力项采用一阶迎风格式,速度压力耦合采用 SIMPLEC 算法,计算收敛精度设置为  $10^{-4}$ 。

### 1.3 滴灌实验材料及方法

实验室滴灌实验选用额定流量分别为 1.4、1.75、2.2  $\text{L} \cdot \text{h}^{-1}$  的三种内镶贴片迷宫式滴灌带。实验选用滴灌带长度均为 66 cm,含 2 个滴头,实验装置如图3所示。实验使用内蒙古自治区巴彦淖尔黄河水源段泥沙经 300 目筛网经过滤、烘干后配制成不同浓度的滴灌水源。本实验使用 LS230 激光粒度

分析仪测试滴灌水源和滴头出水颗粒粒径的分布,其泥沙颗粒分布情况如下: $d < 5\mu\text{m}$  占 18.31%, $5\mu\text{m} \leq d < 10\mu\text{m}$  占 32.45%, $10\mu\text{m} \leq d < 15\mu\text{m}$  占 49.22%,其中位值粒径为  $9.86\mu\text{m}$ ,平均粒径为  $8.52\mu\text{m}$ 。根据滴头堵塞的成因可分为生物堵塞、物理堵塞,其中物理堵塞多由自毛管进入滴头内部泥沙颗粒的沉积、凝聚或直接堵塞流道引起,本文主要研究进入滴头的泥沙颗粒引起的物理堵塞。“不同毛管回流流速条件下泥沙颗粒输移实验”;同时为研究毛管回流流速对滴灌系统灌水周期的影响,进行了“不同毛管回流流速条件下间歇灌水实验”。



1. 水沙混合桶; 2. 吸水管; 3. 水泵; 4. 阀门; 5. 旁通管; 6. 压力表; 7. 滴灌带; 8. 流量计; 9. 回流管; 10. 水槽排水管道; 11. 支架; 12. 水槽  
1. mixed bucket; 2. suction pipe; 3. pump; 4. valve; 5. bypass pipe; 6. pressure gauge; 7. drip irrigation tape; 8. flowmeter; 9. Return pipe; 10. discharge pipe; 11. bracket; 12. Storage tank

图 3 滴灌系统简化装置测试平台

Fig. 3 Test platform for simplified device of drip irrigation system

在“不同毛管回流流速条件下泥沙颗粒输移实验”中,配制泥沙浓度分别为  $1, 2, 4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  的 3 种滴灌水源在回流流速分别为  $0.05, 0.1, 0.2, 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的条件下进行共 12 种工况的滴灌实验。首先调节毛管末端阀门和系统首端阀门的开启程度控制末端毛管水流流速分别为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 同时保证系统首端压力表读数为  $1.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。随后通过位于滴头下方的集水器收集滴头出水水样 20 min, 测试滴头出水中的粒度分布, 更新滴灌带, 实验结束。依次进行另外三种毛管流速条件下以及支状滴灌系统工况的实验。

在“不同毛管回流流速条件下颗粒输移实验”中,使用泥沙浓度为  $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  的配制水样,控制滴灌毛管末端的水流流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,同时保证系统首端压力表读数为  $1.0 \times 10^6 \text{ Pa}$ ,实验装置每天 8:00—16:00 运行一个灌水周期。在每个灌水周期内,通过位于滴头下方的集水器收集滴头出水水样 20 min,记算滴头流量。当滴头流量值小于额定流量的 75% 时,更换滴灌带,结束实验。按照同样的

方法依次进行滴灌毛管末端流速为  $0.10, 0.20, 0.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  条件下的滴灌系统灌水实验,记录滴灌系统运行的时间。

## 2 结果与分析

### 2.1 毛管水流流速与颗粒迁移运动关系

图 4 所示为不同毛管水流流速条件下计算区域泥沙颗粒迁移运动的轨迹。由图 4 可知,当水流流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,滴头位置处毛管内颗粒迹线杂乱、无序,颗粒可沿各个方向经流道入口进入滴头;当水流流速提高为  $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,滴头流道入口处颗粒迹线同样呈漩涡状,但较流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时颗粒运动迹线更规则、有序,且进入滴头内部的颗粒数量明显减少。当水流流速提高为  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,颗粒运动轨迹与毛管水流方向一致,当流速继续增加至  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,颗粒迹线无明显变化。

对图 4 中进入滴头内部的颗粒数目统计发现:当毛管水流流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,进入滴头内颗粒数量约占毛管内颗粒数量的 12%,当水流流速增加为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,进入滴头内泥沙颗粒数量约占毛管内颗粒数量的 8%;当毛管水流流速继续增加为  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  和  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,该值分别为 6%、5%。通过上述对毛管内不同水流流速条件下进入滴头泥沙颗粒数量统计发现,随毛管水流流速的增加进入滴头内部的颗粒数量逐渐减少。有研究表明<sup>[17]</sup>泥沙颗粒在滴头内的凝聚可造成滴头的堵塞,上述研究中通过提高毛管流速实现了毛管的输沙排沙,减少了泥沙颗粒进入滴头内数量,降低了泥沙颗粒在滴头内凝聚造成的堵塞现象的发生。

### 2.2 毛管水流流速与水流状态关系

图 5 为计算区域内水流紊动强度的分布图。从图中可以看出,当毛管水流流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,毛管内水流紊流强度为 20%,紊流区域扩展到毛管整个横截面区域;当毛管水流流速增加为  $0.10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,此紊流区的紊流强度减小为 16%,紊流的范围同样扩展至毛管全部横截面区域,但略有减小;当毛管水流流速进一步增加为  $0.20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,毛管内已无明显的紊流区,紊流区主要集中在滴头入口处,且该紊流区的最大紊流强度减小为 5%;当水流流速继续增加为  $0.40 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,毛管内紊流区的范围和紊流强度的大小均无明显的变化。通过上述的模拟结果可以发现,当毛管水流流速小于  $0.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,毛管内的紊流强度和紊流区域的范围均随着流速的增加而减小,而当流速继续增加达到  $0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时,流速的改变对紊流范围和紊流强度的影响不大。

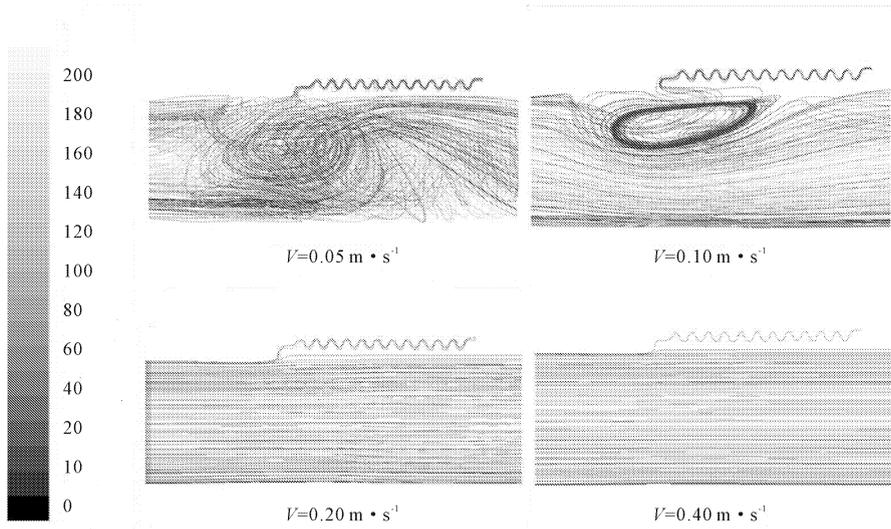


图 4 不同毛管主流流速条件下计算区域颗粒运动迹线图

Fig.4 The path lines of particle movement under different current velocity

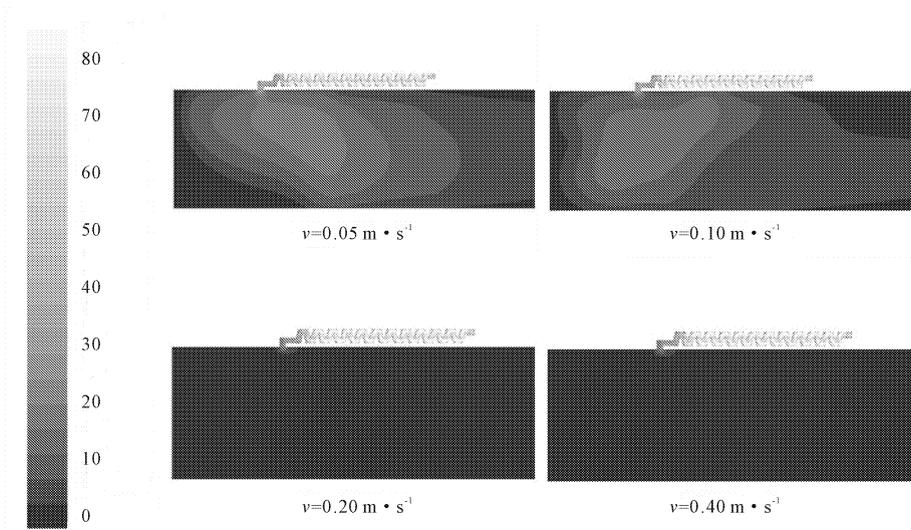


图 5 不同毛管主流流速条件下计算区域紊流强度

Fig.5 Turbulence intensity under different current velocity

将上述毛管内水流流态的变化与进入滴头内颗粒数量比较发现二者之间存在着明显的一致性,即当紊流强度和紊流区域较大时,进入滴头内部的颗粒数量较多,反之则进入滴头内的颗粒数量减少。袁竹林<sup>[18]</sup>等人的研究表明,在稀相悬浮体系中,颗粒沿非主流方向的运动主要由流体内大小漩涡团带动,即颗粒将跟随紊流漩涡团而脱离毛管的主流方向进入滴头内部。上述论述可以说明,当毛管水流的紊流强度和紊流区域范围随毛管水流流速增加而减小后,颗粒沿非水流方向的扩散强度也随之降低,从而使得进入滴头内部的颗粒数量减少。

### 2.3 毛管流速与滴头出水颗粒粒径分布

通过对室内实验中支状滴灌系统和回流流速分别为 0.05、0.1、0.2、0.4 m·s<sup>-1</sup>的回流滴灌系统在滴

灌水源含沙量分别为 1、2、4 kg·m<sup>-3</sup>条件下滴头出水水样进行粒度分析发现,滴头出水中 99.98%的颗粒直径均小于 15 μm,因此颗粒分析粒径选择为 0~15 μm。以支状滴灌系统滴头出水中各粒径范围内颗粒数量为基准值 100%,统计在四种不同的毛管回流流速条件下滴头出水中泥沙颗粒数量相对于支状滴灌系统滴头出水的颗粒百分比,得到滴头出水中颗粒相对数量分布图。

滴灌水源含沙量为 1 kg·m<sup>-3</sup>的测试结果表明,当回流流速为 0.05 m·s<sup>-1</sup>时,滴头出水泥沙颗粒比支状滴灌毛管减少 30%,随回流流速增加,滴头出水泥沙颗粒继续减少,当回流流速为 0.4 m·s<sup>-1</sup>时颗粒数量减少约 40%。滴灌水源含沙量为 2 kg·m<sup>-3</sup>的测试结果表明,当回流流速为 0.05 m·s<sup>-1</sup>时,滴头

出水泥沙颗粒较支状滴灌系统减少约 15%，当回流流速继续增加时滴头出水颗粒数量减少约 30%。滴灌水源含沙量为  $4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时，回流滴灌系统滴头出水泥沙颗粒均比支状系统滴头减少约 30%。上述结果均表明，回流滴灌系统滴灌水源含沙量为 1

$\sim 4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  时，提高系统回流流速可以显著的减少进入滴头内部的泥沙颗粒。由图 6 还可以发现，当系统回流流速增加为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时，流速继续增加对进入滴头的泥沙颗粒数量影响较小，这与模拟计算颗粒运动迹线和水流紊流状态相吻合。

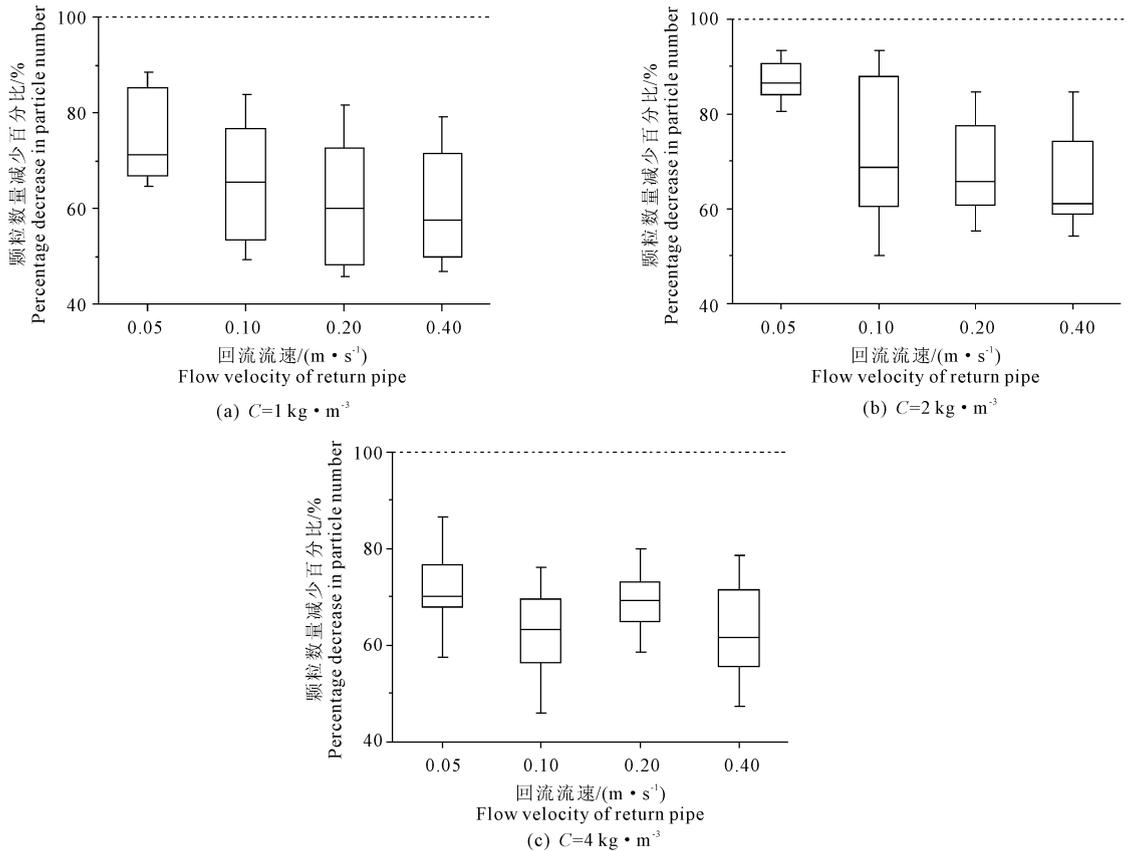


图 6 滴头出水中颗粒相对数量分布箱形图

Fig. 6 The box-plot of particles relative number distribution in the flow of emitter

上述规律说明：当回流滴灌系统回流流速为  $0.05 \sim 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时， $0 \sim 15 \mu\text{m}$  粒径范围的泥沙颗粒进入滴头内部的数量较传统的支状滴灌系统明显减少，从而降低传统支状滴灌系统中由于泥沙过多进入滴头内部积累、凝聚进而堵塞滴头现象的发生。上述实验结果论证了回流滴管系统通过设置回流管提高滴灌系统毛管水流流速，增强毛管的输沙排沙能力，使泥沙颗粒随毛管运动排出滴灌系统，减少自滴头排出泥沙颗粒。

#### 2.4 毛管回流流速与滴头灌水周期关系

图 7 为周期灌水实验中额定流量为  $1.4, 1.75, 2.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  的三种滴头在不同的回流流速条件下滴头发生严重堵塞(滴头流量降低为额定流量 75% 以下)时系统灌水周期。由图可知，额定流量为  $1.75 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  的支状滴灌带在第 16 个灌水周期结束之后滴头发生堵塞，而回流流速为  $0.05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时，灌水周期

延长为 22 次。当回流流速继续增加为  $0.1, 0.2, 0.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时灌水周期分别为 26、26、25。额定流量为  $1.4 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  的滴头也呈现出随回流流速的增加灌水次数逐渐增加的趋势，支状条件下灌水次数为 12 次，而四种不同回流流速条件下灌水次数分别为 18、21、22、23；而流量为  $2.2 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1}$  的滴头在相同的条件下灌水次数分别为 17、24、27、26、27。通过对灌水周期的分析还可以发现在相同的回流流速条件下，大流量的滴头发生堵塞时的灌水周期更长。

通过上述分析发现，当毛管末端流速为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时，三种滴头灌水周期相比支状系统分别提高 50%、38%、41%，流速的增加对灌水周期的提高作用明显，而当流速大于  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  时，毛管末端流速的增加对灌水周期的延长无明显影响，反而会使得滴灌系统的运行能耗提高，因此设定回流滴灌系统回流管流速为  $0.1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，可以平衡回流滴灌系统的

运行能耗和灌水周期。

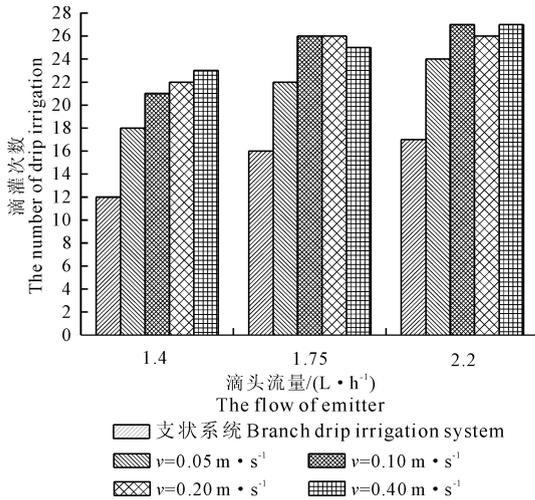


图7 不同回流流速时滴头堵塞时灌水周期

Fig.7 The irrigation period of emitter clogging at different flow rate

发生上述现象一方面是由于随毛管流速的增加颗粒沿毛管主流方向迁移,受重力作用沉积在毛管底部的颗粒数量减少,从而降低了毛管底部泥沙受水流冲击重新进入滴头的几率;另一方面是由于随水流流速的增加,颗粒受到毛管水流的影响明显大于滴头入口水流对颗粒的影响,从而使颗粒随水流运动而不易经滴头流道入口进入滴头内部。上述结果进一步的验证了通过在支状滴灌系统毛管末端设置回流管的回流滴灌系统,可以显著提高滴灌系统的灌水周期。

### 3 结论

为探究回流滴灌系统中毛管输沙排沙特性和系统抗堵塞性能,本文通过对滴灌毛管和滴头的 CFD 模拟计算和室内滴灌实验综合分析结果得到如下结论:

1) CFD 模拟计算表明,当毛管水流流速为  $0.05 \sim 0.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时随水流流速的增加,进入滴头的泥沙颗粒数量逐渐减少,当流速为  $0.2 \sim 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,流速的改变对进入滴头内颗粒的数量影响较小。当毛管流速为  $0.05 \sim 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,毛管内水流紊流强度和紊流区域范围均随水流流速增加而减小,紊流强度越大沿毛管非主流方向迁移进入滴头内部的颗粒数量越多。

2) 室内滴灌实验表明,回流滴灌系统回流流速为  $0.1 \sim 0.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,可以将滴头出水中的泥沙颗粒数量减少约 30%,验证了毛管流速的增加可提高毛管的输沙排沙能力,减少泥沙颗粒进入滴头的数量,降低了由于进入滴头内部的泥沙数量较多而导致的物理堵塞。

3) 综合考虑滴灌系统的运行能耗和灌水周期,将末端回流滴灌系统的回流流速设置为  $0.1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  时,三种滴头的灌水次数分别延长 50%、38%、41%,明显提高系统的灌水周期,可以取得较好的效果。

### 参考文献:

- [1] Nakayama F S, Bucks D A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review[J]. *Irrigation Science*, 1991,12(4):187-192.
- [2] 李云开,宋鹏,周博.再生水滴灌系统灌水器堵塞的微生物学机理及控制方法研究[J]. *农业工程学报*, 2013,29(15):98-107.
- [3] Pei Yi-ting, Li Yun-kai, Liu Yao-ze, et al. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation[J]. *Irrigation Science*, 2014,32(2):141-157.
- [4] 孙步功,龚俊,辛舟.滴灌用黄河水泥沙分离试验研究[J]. *农业工程学报*, 2008,24(8):51-53.
- [5] 牛文全,刘璐.浑水泥沙粒径与含沙量对迷宫流道堵塞的影响[J]. *排灌机械工程学报*, 2011,29(6):547-552.
- [6] W Qing-song, L Gang, W Li. Experimental study on the multi-segment regime of the water flow in drip emitters[J]. *Journal of Irrigation Engineer*, 2010,136(4):254-260.
- [7] W Qing-song, L Gang, L Jie. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments[J]. *Journal Computers and Electronics in Agriculture*, 2008,63(2):294-303.
- [8] 吴泽广,牛文全.泥沙级配对迷宫流道滴头堵塞及毛管内泥沙沉积的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2014,5:35.
- [9] Zhang Jun, ZhaoWan-hua et al. Anti-clogging performance evaluation and parameterized design of emitters with labyrinth channel[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2010,74(1):59-65.
- [10] Li Yun-kai, Yang Pei-ling, et al. Hydraulic characterizations of tortuous flow in path drip irrigation emitter[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2006,(4):449-457.
- [11] 刘春景,唐敦兵,等.滴灌三角形迷宫滴头水力性能稳健性分析[J]. *农业机械学报*, 2013,44(1):67-72.
- [12] Liu H, Huang G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent[J]. *Agricultural water management*, 2009,96(5):745-756.
- [13] Puig-Bargués, Jaume; Lamm, Freddie R. Effect of flushing velocity and flushing duration on sediment transport in microirrigation driplines[J]. *Transactions of the ASABE*, 56,(5):1821-1828.
- [14] Puig-Bargués J, Arbat G, Elbana M, et al. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents[J]. *Agricultural Water Management*, 2010,97(6):883-891.
- [15] John D Anderson. *Computational Fluid Dynamics: The basics with application*[M]. McGraw-Hill Inc, New York, 1995.
- [16] Meneveau C, Katz J. Scale-invariance and turbulence models for large-eddy simulation[J]. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2000,32(1):1-32.
- [17] 王亚林,朱德兰,等.滴灌毛管泥沙分布与灌水器堵塞试验研究[J]. *农业机械学报*, 2014,45(6):177-182.
- [18] 袁竹林,朱立平. *气固两相流动与数值模拟*[M]. 南京:东南大学出版社, 2013.