

斜管布置形式对沉沙池沉积黄河泥沙的影响

查映东^{1,2}, 侯鹏², 刘泽元², 王克远², 李云开², 王春霞^{1*}

(1.石河子大学 水利建筑工程学院, 新疆 石河子 832000;

2.中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要:【目的】探究斜管在沉沙池内的最优布置形式,提升黄河泥沙去除效果。【方法】针对重力式斜管沉沙池,设置了单层(Fs)、双层(Fv1、Fv2)3种斜管布置形式,应用黄河上游段(Su)、中游段(Sm)、下游段(Sd)3种典型粒径泥沙的配水,在2种运行流量(Qq、Qs)下开展原型沉沙试验,对比分析3种斜管布置形式对不同黄河泥沙的沉降效果。【结果】大颗粒泥沙进入斜管前已发生沉降,斜管主要对细颗粒泥沙($d < 75 \mu\text{m}$)进行沉降,其有效控制出口泥沙量为 $0.342 \sim 1.354 \text{ kg/m}^3$,有效控制出口砂粒量为 $0 \sim 0.018 \text{ kg/m}^3$;不同斜管布置形式下,出口泥沙及相关砂粒、粉粒、黏粒量均以Fv2斜管布置形式最低,Fv1、Fs斜管布置形式依次次之;其中Fv2斜管布置形式有效控制出口泥沙量为 $0.342 \sim 0.991 \text{ kg/m}^3$,较Fv1、Fs斜管布置形式分别减少了10.01%~20.95%、26.82%~38.83%;不同黄河水出口泥沙及相关砂粒量、粉粒量、黏粒量均以Su黄河水最低,Sm、Sd黄河水依次次之。【结论】3种斜管布置形式不同黄河泥沙处理能力存在明显差异($P < 0.05$),表现为V形斜管布置形式优于常规斜管布置形式,并且以倾角 60° 、 45° 的Fv2斜管布置形式最佳。

关键词:黄河泥沙;沉沙池;斜管;斜管布置形式

中图分类号: S277.9

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2023040

OSID:



查映东,侯鹏,刘泽元,等.斜管布置形式对沉沙池沉积黄河泥沙的影响[J].灌溉排水学报,2023,42(8):127-135.

ZHA Yingdong, HOU Peng, LIU Zeyuan, et al. The Impact of Pipe Inclination on Sediment Deposition at the Sedimentation Basin in the Yellow River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(8): 127-135.

0 引言

【研究意义】黄河流域水资源缺乏,农业用水约占流域用水量的70%^[1],耗水量大但利用率偏低,发展精量可控的黄河水滴灌已成为缓解黄河沿线灌区水资源紧缺的有效途径之一^[2-3],但由于黄河水泥沙质量浓度高达 $3.7 \sim 26.5 \text{ kg/m}^3$ ^[4],且以细颗粒($d < 63 \mu\text{m}$)泥沙为主^[5],极易造成灌水器堵塞^[6-7]。因此,有效去除黄河水细颗粒泥沙成了滴灌技术推广应用的首要问题。

【研究进展】沉淀是处理泥沙最有效的技术手段,而重力沉沙池是最常规的泥沙处理设施,但由于黄河泥沙粒径细,进而导致泥沙沉降速度慢、池内停留时间长,通常黄河泥沙沉淀池占地面积大、建设成本高,限制了其快速应用推广^[8-10]。复合型重力式沉沙池、圆中环沉沙池、斜板沉沙池、翼片式沉沙池、重力式斜管沉沙池等先后用于解决泥沙问题。其中重力式斜

管沉沙池因其斜管设置,对细颗粒泥沙去除效果显著^[11-14],且占地面积小^[15],被认为是其中最具有发展前景的黄河泥沙沉沙池之一^[16-17]。斜管作为其主要部件,合理的斜管布置被认为是高效去除细颗粒泥沙的关键^[18-19]。Salem等^[20]提出斜管沉沙池内水力性能和斜管过水间距平等分配时,水沙分离效率最高。黄廷林等^[21]研究发现,斜管布水均匀性受沉沙池长宽比影响最大,增加斜管布置高度、减小管径可以提高布水均匀性。涂有笑^[22]通过数值模拟研究发现,增大配水区高度有利于提高布水均匀性。Demir^[23]提出了斜板布置角度与泥沙沉积效率的经验方程,得出了不同泥沙质量浓度下斜管的最佳安装角度。Doroodchi等^[24-25]研究发现,斜管垂直高度60 cm、倾角 60° 时,去除效果最好;Balwan等^[26]通过试验得出,斜管垂直高度60 cm、布置角度 45° 时,去除效果最好;Thomas等^[27]通过试验得出,斜管倾角 55° 时,泥沙去除效果最佳。由于斜管的泥沙去除效果受水源水质、沉沙池结构、运行模式等影响^[21-23],不同学者得出了不同的结论。【切入点】然而对斜管的研究主要集中于常规单层斜管,对双层甚至多层、不同倾角组合斜管布置的研究相对缺乏,斜管的最优布置形式尚不明确。

【拟解决的关键问题】基于此,本文针对重力式

收稿日期: 2023-02-09 修回日期: 2023-05-04 网络出版日期: 2023-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51790531)

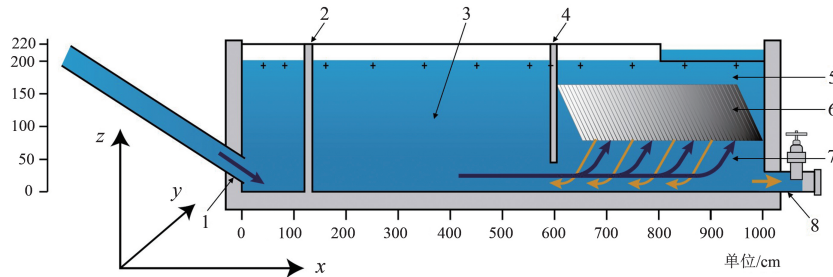
作者简介: 查映东(1996-),男,硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: 1955475338@qq.com

通信作者: 王春霞(1979-),女,教授,主要从事节水灌溉技术理论研究。

E-mail: 410443356@qq.com

©《灌溉排水学报》编辑部,开放获取 CC BY-NC-ND 协议

斜管沉沙池, 设置了 3 种斜管布置形式, 应用黄河上游段^[28]、中游段^[29]、下游段^[30]典型泥沙粒径的配水, 在 2 种运行流量下进行原型沉沙试验研究, 对比分析 3 种斜管布置形式对不同黄河泥沙的沉降效果, 旨在摸清斜管最优布置形式, 优化斜管布置参数, 提高斜管沉积效果; 明确不同斜管布置下不同黄河泥沙及相关泥沙组分的沉降特性, 重力式斜管沉沙池适宜运行模式。



注 1.底孔引流; 2.调流板; 3.主要沉降区; 4.挡板; 5.清水区; 6.斜管区; 7.布水区; 8.排沙阀。

图中“+”为取样点, 取样水层为 $Z=195\text{ cm}$; 图中深蓝色箭头表示水流方向, 棕黄色箭头表示泥沙沉降、运动方向。

图1 重力式斜管沉沙池

Fig.1 Gravity inclined pipe sand sedimentation basin

1.2 试验设置

试验于 2021 年 6—10 月在中国内蒙古自治区巴彦淖尔市磴口县乌兰布沙漠灌溉试验站进行, 位于黄河上游段。试验模拟黄河上游段 (Su)、中游段 (Sm)、下游段 (Sd) 的典型黄河水, 针对其泥沙量、粒径特征, 取沈乌干渠河道淤积泥沙, 采用旋转振动筛筛取不同粒径范围 ($0\sim100$ 、 $100\sim150$ 、 $150\sim200$ 、 $200\sim250\text{ }\mu\text{m}$) 泥沙, 模拟配置 3 种不同混合粒径泥沙的黄河水 (表 1)。

表 1 典型黄河水泥沙体积质量、粒径

Table 1 Typical Yellow River sediment volume mass and particle size

水源	泥沙体积 质量 $C/(\text{kg m}^{-3})$	泥沙量/%			
		0~100 μm 粒径	100~150 μm 粒径	150~200 μm 粒径	200~250 μm 粒径
Su	5.0	85	15		
Sm	11.6	70	15	10	5
Sd	18.5	60	20	15	5

试验用水为沈乌干渠水流, 试验设置了 2 种运行流量 (Q_q 、 Q_s), 分别为 36 、 $72\text{ m}^3/\text{h}$ 。

试验设置了 3 种斜管布置形式 (F_s 、 F_{v1} 、 F_{v2}) (图 2), 其中 F_s 为常规斜管布置, 斜管长度 100 cm , 布置角度为 60° ; F_{v1} 、 F_{v2} 为 V 形斜管布置形式, 其中 F_{v1} 布置形式的下层、上层斜管长度均为 50 cm , 布置角度均为 60° ; F_{v2} 布置形式的下层、上层斜管长度也均为 50 cm , 下层布置角度为 60° , 上层布置角度为 45° 。

1 材料与方法

1.1 重力式斜管沉沙池

重力式斜管沉沙池剖面图如图 1 所示, 其主要包括底孔引流、调流板、主要沉降区、挡板、清水区、斜管区、布水区、冲沙阀。沉沙池长 (x 轴) 1000 cm , 宽 (y 轴) 200 cm , 深 (z 轴) 220 cm , 调流板设置于 $x=120\text{ cm}$ 处, 挡板设置于 $x=600\text{ cm}$ 处, $0\leq x\leq 600\text{ cm}$ 为主要沉降区, $600\text{ cm}\leq x\leq 1000\text{ cm}$ 为斜管布置区域。

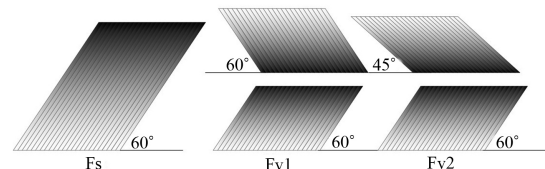


图2 斜管布置形式

Fig.2 Layout of inclined pipe

1.3 测定方法

1.3.1 泥沙量测定与计算

在沉沙池表层水流取样, 每个取样点取 3 个样品作为重复, 取样位置见图 1。对所取水样进行烘干处理, 采用精度为 0.1 mg 的天平称量烘干泥沙质量, 泥沙体积质量计算式为:

$$C = \frac{m \times 1000}{v} \quad (1)$$

式中: C 为泥沙体积质量 (kg/m^3); m 为泥沙干质量 (g); v 为水样体积 (mL)。

为进一步探明斜管对泥沙及其相关砂粒、粉粒、黏粒的去除能力, 分别引入斜管泥沙沉积率、砂粒沉积率、粉粒沉积率、黏粒沉积率指标。斜管泥沙沉积率为进口、出口泥沙体积质量差值与进口泥沙体积质量的比值。本研究的进口泥沙体积质量为挡板前表层水流泥沙体积质量, 出口泥沙体积质量为斜管上端清水区的泥沙体积质量。泥沙沉积率计算式为:

$$R_s = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \quad (2)$$

式中: R_s 为泥沙沉积率 (%); C_{in} 为进口泥沙体积质量 (kg/m^3); C_{out} 出口泥沙体积质量 (kg/m^3)。

砂粒沉积率、粉粒沉积率、黏粒沉积率即进口、

出口的砂粒体积质量、粉粒体积质量、黏粒体积质量差值与进口砂粒体积质量、粉粒体积质量、黏粒体积质量的比值。

1.3.2 泥沙粒度测量

泥沙粒度测量,采用激光粒度分析仪器(马尔文2000)对烘干后泥沙进行测试。分析仪的搅拌器速度和阴影范围分别保持在 2 500 rpm 和 10%~20%。试验前,称取 0.35 g 样品放入 50 mL 三角瓶,加入少量去离子水浸润土壤,加入 3~5 mL 过氧化氢去除有机质并进行短时间沙浴加热。向冷却后三角瓶中加入 1 mL 分散剂(六偏磷酸钠)和 35 mL 左右去离子水,再次进行沙浴加热,样品冷却后即可测量。

为了解沉沙池中泥沙及其相关砂粒、粉粒、黏粒的沿程沉降特性,对比斜管区域砂粒、粉粒、黏粒的沉降差异,依据美国农业部粒径分级划分砂粒($d \geq 50 \mu\text{m}$)、粉粒($2 \mu\text{m} \leq d \leq 50 \mu\text{m}$)和黏粒($d \leq 2 \mu\text{m}$)^[31]。

2 结果与分析

2.1 沿程泥沙体积质量变化

2 种运行流量、3 种斜管布置形式下不同黄河泥沙体积质量沿程变化如图 3 (a)、图 3 (b)、图 3

(c) 所示。由图 3 可知,水流流经调流板泥沙体积质量发生大幅骤减,调流板后泥沙稳定沉降,至挡板前泥沙体积质量降至 $1.06 \sim 3.01 \text{ kg/m}^3$; 流经斜管区域,泥沙体积质量再次发生大幅骤减,出口泥沙体积质量降至 $0.342 \sim 1.354 \text{ kg/m}^3$ 。不同斜管布置间出口泥沙体积质量存在明显差异($P < 0.05$),其中 Fv2 处理的出口泥沙体积质量为 $0.342 \sim 0.991 \text{ kg/m}^3$,较 Fv1、Fs 处理分别降低了 10.01%~20.95、26.82%~38.83%。Su 处理的出口泥沙体积质量为 $0.342 \sim 0.773 \text{ kg/m}^3$,较 Sm、Sd 处理分别降低了 32.98%~46.28%、42.91%~55.18%,表明不同黄河泥沙出口泥沙体积质量存在差异。Qq 处理的出口泥沙体积质量为 $0.342 \sim 1.132 \text{ kg/m}^3$,较 Qs 处理降低了 16.36%~37.12%,表明小流量工况下泥沙沉降效果更佳。以 Fs 处理出口泥沙体积质量为自变量(x),Fv1、Fv2 处理出口泥沙体积质量为因变量(y),不同斜管布置间出口泥沙体积质量的相关关系如图 3 (d) 所示。由图 3 (d) 可知,Fv1、Fv2 处理与 Fs 处理出口泥沙体积质量显著线性相关($P < 0.05$),其中 Fv2 处理的拟合斜率最小,Fv1 处理次之。

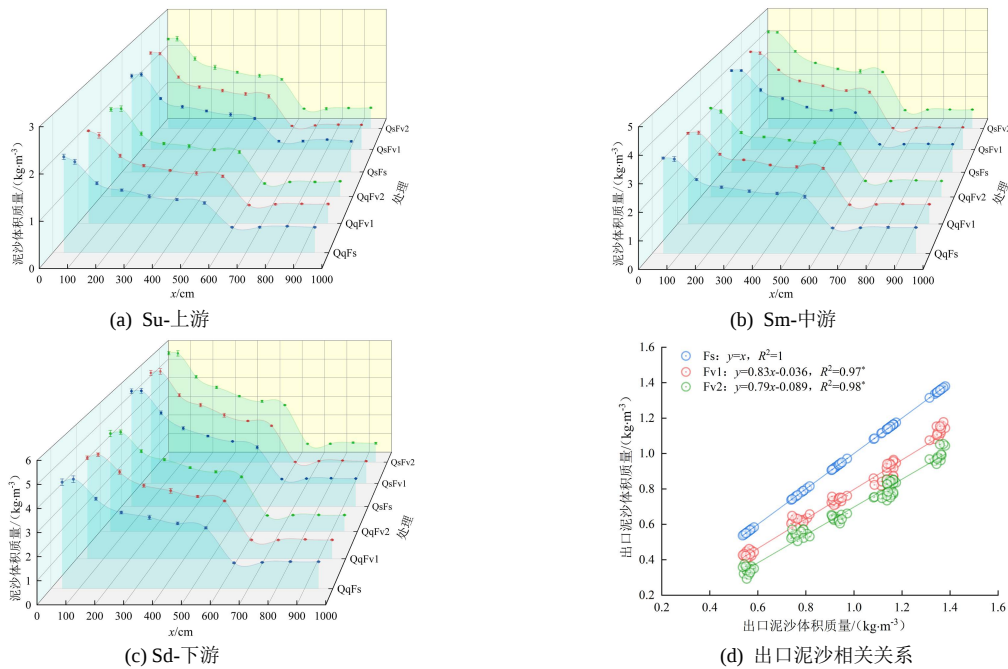


图 3 泥沙体积质量沿程变化

Fig.3 Sediment volume mass changes along the path

2.2 沿程砂粒体积质量变化

2 种运行流量、3 种斜管布置形式下不同黄河泥沙砂粒体积质量沿程变化如图 4 (a)、图 4 (b)、图 4 (c) 所示。由图 4 可知,砂粒体积质量在调流板处、斜管区域的减小趋势更明显,至挡板前砂粒体积质量降至 $0.040 \sim 0.251 \text{ kg/m}^3$,出口砂粒体积质量降为 $0 \sim 0.018 \text{ kg/m}^3$,其中 SuQqFv2 处理的出口砂粒体

质量为 0。不同斜管布置出口砂粒体积质量差异明显($P < 0.05$),Fv2 处理的出口砂粒体积质量最低,Fv1、Fs 处理依次次之。Qq 流量工况下,SuFv2 处理的出口砂粒体积质量为 0,较 SuFv1、SuFs 处理分别减少了 0.000 3、0.001 kg/m^3 ; Qq 流量工况下,SmFv2 处理的出口砂粒体积质量为 0.003 kg/m^3 ,较 SmFv1、SmFs 处理分别减少了 41.81%、73.90%; Qq 流量工

况下, SdFv2 处理的出口砂粒体积质量为 0.004 kg/m^3 , 较 SdFv1、SdFs 处理分别减少了 34.67%、71.15%。不同流量下, SuQs 处理的出口砂粒体积质量较 SuQq 处理增加了 $0.000 \sim 0.005 \text{ kg/m}^3$, SmQs 处理的出口砂粒体积质量较 SmQq 处理增加了 38.91%~49.61%, SdQs 处理的出口砂粒体积质量较 SdQq 处理增加了 19.90%~41.32%。故不同黄河水的出口砂粒体积质量

存在差异, 且小流量工况下砂粒沉降更充分。以 Fs 处理出口砂粒体积质量为自变量 (x), Fv1、Fv2 处理出口砂粒体积质量为因变量 (y), 不同斜管布置间出口砂粒体积质量的相关关系如图 4 (d) 所示。由图 4 (d) 可知, Fv1、Fv2 处理与 Fs 处理出口砂粒体积质量显著线性相关 ($P<0.05$), 其中 Fv2 处理的拟合斜率最小, Fv1 处理次之。

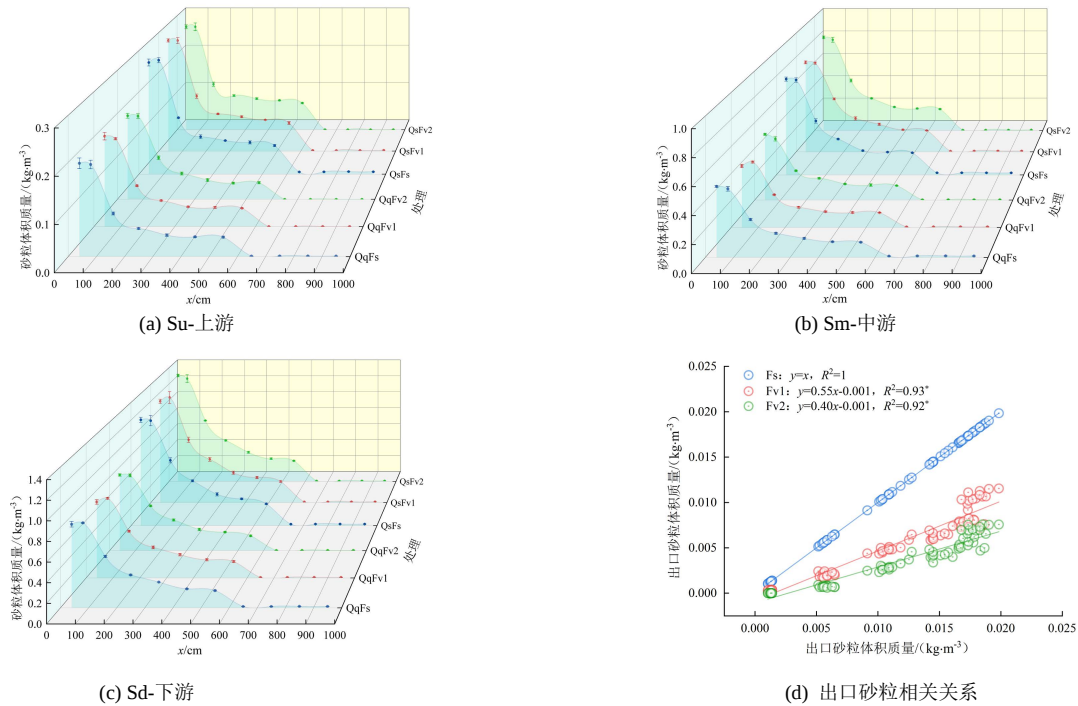


图 4 砂粒体积质量沿程变化

Fig.4 Sand volume mass changes along the path

2.3 沿程粉粒体积质量变化

2 种运行流量、3 种斜管布置形式下不同黄河泥沙粉粒体积质量沿程变化如图 5 (a)、图 5 (b)、图 5 (c) 所示。由图 5 可知, 粉粒体积质量变化趋势与泥沙体积质量相似, 至挡板前粉粒体积质量降至 $0.875 \sim 2.367 \text{ kg/m}^3$, 出口粉粒体积质量降为 $0.271 \sim 1.182 \text{ kg/m}^3$ 。不同斜管布置间出口粉粒体积质量差异明显 ($P<0.05$), 其中 Fv2 处理的出口粉粒体积质量为 $0.271 \sim 0.843 \text{ kg/m}^3$, 较 Fv1、Fs 处理分别降低了 11.76%~22.84%、28.65%~42.51%。Su 处理的出口粉粒体积质量为 $0.271 \sim 0.662 \text{ kg/m}^3$, 较 Sm、Sd 处理分别减少了 33.42%~47.06%、43.98%~57.26%, 表明不同黄河泥沙出口粉粒体积质量存在差异。Qq 处理的出口粉粒体积质量为 $0.271 \sim 0.976 \text{ kg/m}^3$, 较 Qs 处理减少了 17.39%~38.69%, 表明小流量工况利于粉粒沉降。以 Fs 处理出口粉粒体积质量为自变量 (x), Fv1、Fv2 处理出口粉粒体积质量为因变量 (y), 不同斜管布置间出口粉粒体积质量的相关关系如图 5 (d) 所示。由图 5 (d) 可知, Fv1、Fv2 处理与 Fs 处理出口粉粒体积质量显著线性相关 ($P<0.05$), 其中 Fv2 处理的拟合斜率最小, Fv1 处理次之。

2.4 沿程黏粒体积质量变化

2 种运行流量、3 种斜管布置形式下不同黄河泥沙黏粒体积质量沿程变化分别如图 6 (a)、图 6 (b)、图 6 (c) 所示。由图 6 可知, 黏粒体积质量在挡板前呈缓慢减少趋势, 在斜管区域发生大幅骤减, 至挡板前黏粒体积质量降至 $0.155 \sim 0.317 \text{ kg/m}^3$, 出口黏粒体积质量降为 $0.071 \sim 0.154 \text{ kg/m}^3$ 。不同斜管布置出口黏粒体积质量差异明显 ($P<0.05$), 其中 SdQq 工况下, Fv1 处理的出口黏粒体积质量为 0.122 kg/m^3 , 较 Fv2、Fs 处理分别减少了 1.56%、12.02%; 其余工况下表现为 Fv2 处理的出口黏粒体积质量最低, 为 $0.071 \sim 0.140 \text{ kg/m}^3$, 较 Fv1、Fs 处理分别减少了 0.63%~12.17%、3.99%~17.83%。Su 处理的出口黏粒体积质量为 $0.071 \sim 0.105 \text{ kg/m}^3$, 较 Sm、Sd 处理分别减少了 22.78%~41.74%、27.54%~43.10%, 其中 Sm 处理和 Sd 处理的出口黏粒体积质量差异较小。Qq 处理的出口黏粒体积质量为 $0.071 \sim 0.141 \text{ kg/m}^3$, 较 Qs 处理减少了 4.98%~29.77%。以 Fs 处理出口黏粒体积质量为自变量 (x), Fv1、Fv2 处理出口黏粒体积质量为因变量 (y), 不同斜管布置间出口黏粒体积质量的相关关系如图 6 (d) 所示。由图 6 (d) 可知, Fv1、Fv2 处理

与Fs处理出口黏粒体积质量显著线性相关($P<0.05$), 其中Fv1处理的拟合斜率最小,Fv2处理次之。

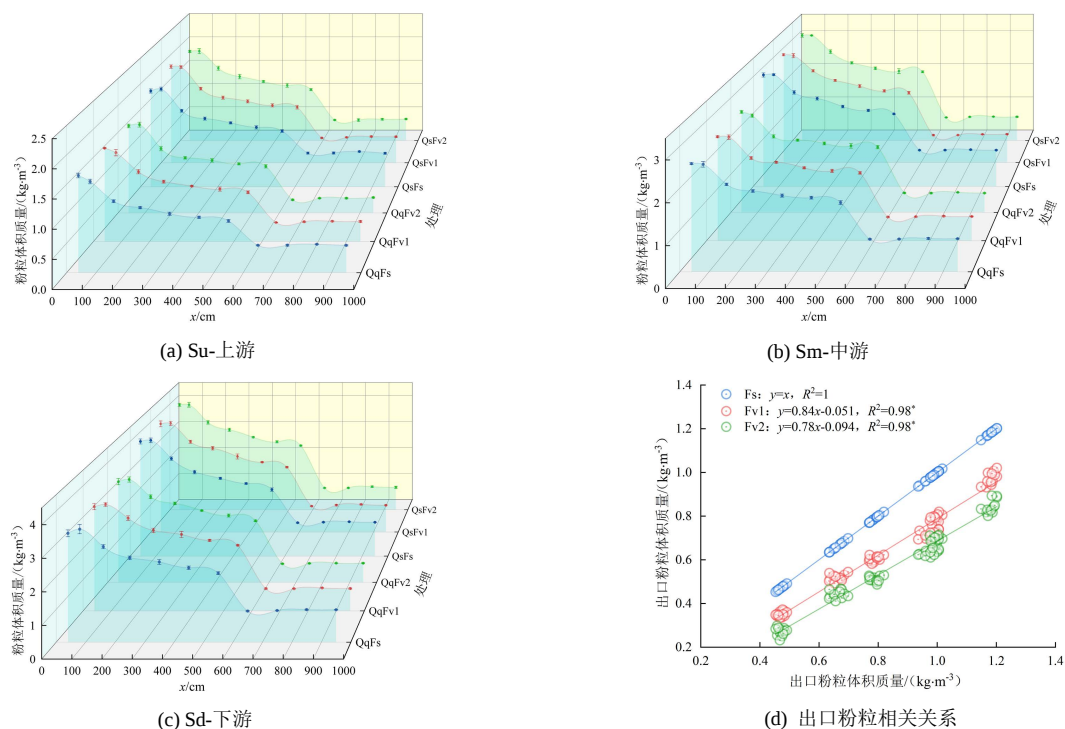


图5 粉粒体积质量沿程变化

Fig.5 Silt volume mass changes along the path

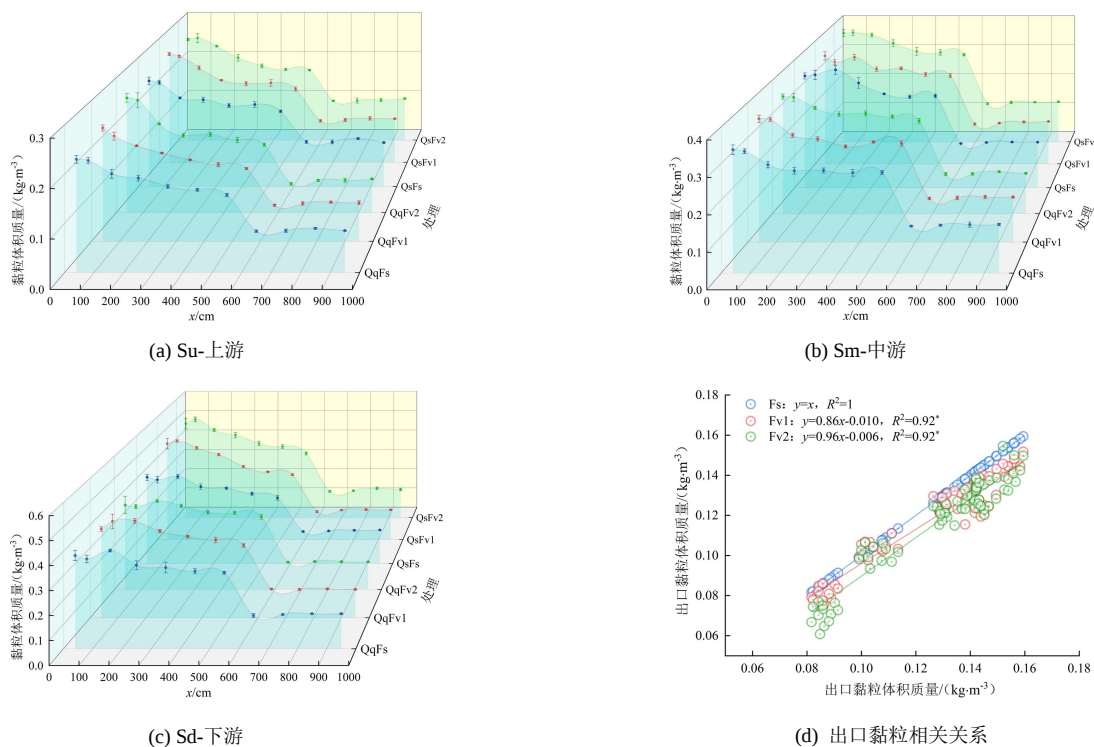


图6 黏粒体积质量沿程变化

Fig.6 The clay volume mass changes along the path

2.5 斜管的泥沙沉积特性

水流进入斜管区域前大量粗颗粒泥沙已发生沉降, 较低体积质量 ($1.06\sim 3.01\text{ kg/m}^3$)、细颗粒 ($d<75\text{ }\mu\text{m}$) 泥沙主要在斜管区域沉降, 不同工况下的斜管泥沙及相关组分沉积率如图7所示。不同斜管布置的泥沙沉积能力差异明显 ($P<0.05$), 其中Fv2处理的

泥沙沉积率为 $58.82\%\sim 70.04\%$, 较Fv1、Fs处理分别提高了 $2.89\%\sim 8.08\%$ 、 $13.75\%\sim 19.41\%$; Fv2处理的砂粒沉积率达 $97.08\%\sim 100\%$, 较Fv1、Fs处理分别提高了 $0.80\%\sim 1.87\%$ 、 $3.01\%\sim 7.35\%$; Fv2处理的粉粒沉积率为 $58.82\%\sim 70.05\%$, 较Fv1、Fs处理分别提高了 $3.44\%\sim 8.93\%$ 、 $15.55\%\sim 22.28\%$; Fv2处理的黏粒沉积

率为 42.74%~61.90%，较 Fv1、Fs 处理分别提高了 1.20%~5.24%、2.89%~7.76%。故 3 种斜管布置形式对泥沙的沉积能力以 Fv2 处理最佳，Fv1、Fs 处理次之。

水流流经斜管区域，砂粒、粉粒、黏粒发生了不同程度的沉降。其中砂粒沉积率达 90.18%~100%，远高于泥沙沉积率，表明砂粒发生充分沉降；粉粒沉积率为 38.82%~70.05%，与泥沙沉积率相当；黏粒沉积率为 39.85%~61.90%，低于泥沙沉积率。不同黄河泥沙在斜管区域的沉降存在差异，其中泥沙沉积率、粉粒沉积率、黏粒沉积率表现为 Su 处理低于 Sm、Sd 处理，砂粒沉积率表现为 Su 处理高于 Sm、Sd 处理。

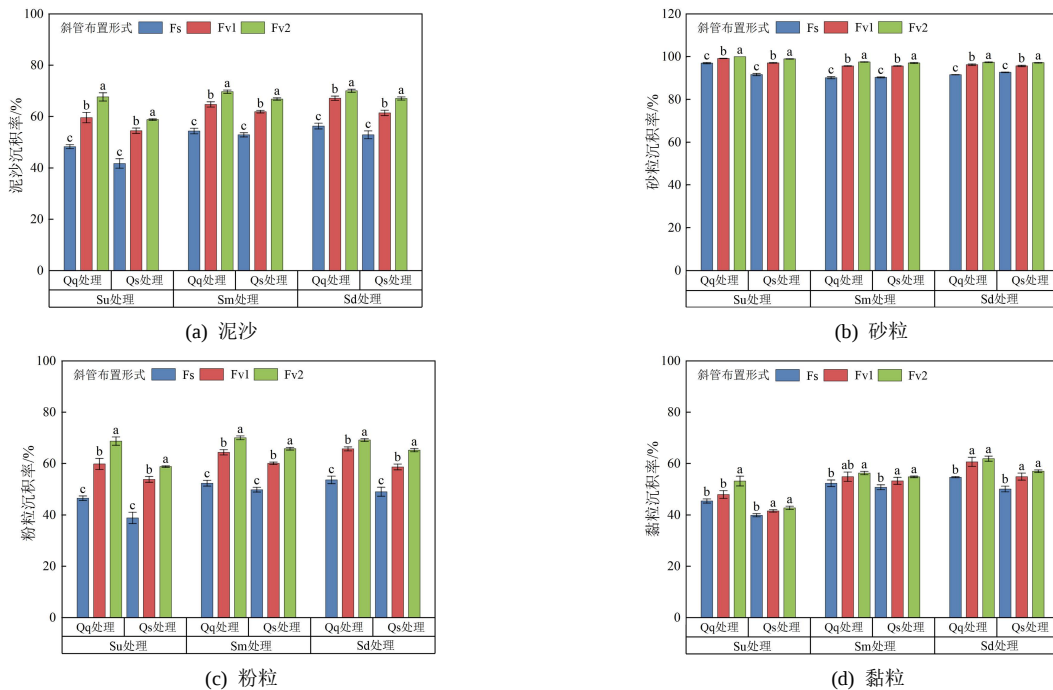


图 7 泥沙、砂粒、粉粒、黏粒沉积率

Fig.7 Sedimentation rate of sediment, sand, silt and clay

3 讨论

3.1 斜管沉沙池加速泥沙沉降机理

斜管是重力式斜管沉沙池高效沉沙的关键，而斜管的泥沙沉降效果受布水均匀性和管内流速的影响^[21, 35]，其中斜管布置是显著影响布水均匀性和斜管内部流速的主要因素^[36]。本文研究表明，3 种斜管布置形式的黄河泥沙沉降能力差异显著 ($P<0.05$)，V 形斜管 (Fv1、Fv2 处理) 泥沙沉降能力优于常规斜管 (Fs 处理)，且以倾角 60°、45° 组合的 V 形斜管 (Fv2 处理) 最佳。其中 V 形斜管的泥沙沉降效果优于常规斜管，这可能是由于 V 形斜管为斜管长度 50 cm 的双层布置，常规斜管为斜管长度 100 cm 的单层布置，而适当减少斜管长度有利于充分发挥斜管的沉积作用^[34]；同时含沙水流从斜管底部进入，V 形斜管的底层斜管初步改善了水流流态^[32]，使得进入上层斜管的水流均匀性更好；上层斜管则主要承担了

其中 Su 处理的泥沙沉积率为 41.73%~67.67%，较 Sm、Sd 处理分别减少了 2.03%~11.17%、2.37%~11.16%；Su 处理的粉粒沉积率为 38.82%~68.76%，较 Sm、Sd 处理分别减少了 1.29%~10.99%、0.42%~10.18%；Su 处理的黏粒沉积率为 39.85%~53.17%，较 Sm、Sd 处理分别减少了 3.14%~12.07%、8.73%~14.29%。SuQsFs 处理的砂粒沉积率为 91.66%，较 SmQsFs 处理增加了 1.33%，较 SdQsFs 处理减少了 1.04%；其余工况下，Su 处理的砂粒沉积率最高为 96.99%~100%，较 Sm、Sd 处理分别增加了 1.33%~6.81%、1.42%~5.39%。

溢流堰出流的吸附作用，减弱了溢流堰出流对底层斜管的影响，使得进入底层斜管水流的均匀性优于常规单层斜管。而 V 形斜管 60°、45° 组合优于 60°、60° 组合，这主要是因为 Fv1 处理和 Fv2 处理的上层斜管倾角差异引起的，倾角 45° 较倾角 60° 的管内沉淀面积大，竖直方向沉降距离小，更利于细颗粒泥沙沉降^[37]。

砂粒、粉粒、黏粒在斜管区域发生了不同程度沉降，其中砂粒沉积率最高，出口砂粒体积质量趋近于 0，粉粒沉积率与泥沙沉积率相当，黏粒沉积率低于泥沙沉积率。这是由于大粒径泥沙临界沉降速大^[38-39]，流经斜管区域砂粒优先发生沉积，受斜管布置形式的影响显著；而粉粒较砂粒粒径较小，临界沉降速度相对较小，受斜管布置形式影响也相对较小，同时进入斜管区域的泥沙以粉粒 (75%~85%) 为主，沉积水平与泥沙相当，可作为表征黄河泥沙沉积特性的主要指标；反之极小粒径泥沙的临界沉降速度极小，而黏粒的沉积主要与较粗颗粒泥沙絮凝发生沉降^[40-41]，受斜

管布置形式影响最小。

3.2 沉沙池斜管布置与工程应用

传统沉沙池通常存在占地面积大、成本高、细颗粒泥沙去除效果不佳的缺点。通过在重力式沉沙池中布设斜管,可高效去除黄河水泥沙,减小沉沙池规模,降低成本。本文研究的重力式斜管沉沙池规模为 44 m^3 ,仅为微灌用重力式沉沙池的 25.38%,出池泥沙质量浓度、粒径均低于微灌用沉沙池^[42-43]。在斜管布置形式上,本文研究发现 V 形斜管(Fv1、Fv2 处理)的泥沙去除效果优于常规斜管(Fs 处理),其中以倾角 60° 、 45° 组合(Fv2 处理)的泥沙去除效果最好,有效控制出口泥沙体积质量 $0.342\sim 0.991 \text{ kg/m}^3$,较常规斜管多沉降了 26.82%~38.83%。结合工程实际,斜管布置于重力式沉沙池后段,中间有挡板分隔。布置过程中,需保持斜管底部到池底的适宜高度($70\sim 90 \text{ cm}$)以确保斜管过水均匀性,保持 V 形斜管中间适当距离($15\sim 20 \text{ cm}$)以防止上层斜管沉降的泥沙滑落引起堵塞,保持清水区一定高度($20\sim 30 \text{ cm}$)以减小溢流堰出流的负面影响。在 V 形斜管倾斜角度设置时,控制斜管倾角 $35^\circ\sim 60^\circ$ 范围满足泥沙沉降、滑落要求^[36],保持底层斜管倾角大、上层斜管倾角小;根据水源泥沙质量浓度、粒径特征,可适当调节斜管倾角,当粗颗粒泥沙多时,适当增大倾角,细颗粒泥沙多时,适当减小倾角。沉沙池实际运行过程中,发现运行流量为 $36 \text{ m}^3/\text{h}$ 时,黄河水 Sm、Sd 处理在调流板前泥沙淤积严重,因此中下游高质量浓度黄河泥沙在 $36 \text{ m}^3/\text{h}$ 的运行流量下需进一步优化调流板的孔洞分布。结合引黄滴灌系统运行,重力式斜管沉沙池的推广应用可进一步缓解滴灌系统首部过滤压力,减少过滤成本,有效降低灌水器堵塞风险。

4 结 论

1) 大量粗颗粒泥沙进入斜管前已发生沉降,斜管主要对较低体积质量($1.06\sim 3.01 \text{ kg/m}^3$)、细颗粒($d<75 \mu\text{m}$)泥沙进行沉降;其有效控制出口泥沙体积质量为 $0.342\sim 1.354 \text{ kg/m}^3$,有效控制出口砂粒体积质量为 $0\sim 0.018 \text{ kg/m}^3$ 。

2) 不同斜管布置对黄河泥沙沉降能力差异显著($P<0.05$),表现为 V 形斜管优于常规斜管,且以 Fv2 处理倾角 60° 、 45° 为优化组合。其中 Fv2 处理的出口泥沙体积质量为 $0.342\sim 0.991 \text{ kg/m}^3$,较 Fv1、Fs 处理分别减少了 10.01%~20.95%、26.82%~38.83%。

3) 黄河泥沙及相关砂粒、粉粒、黏粒在斜管区域发生了不同程度沉降,其中砂粒沉积率达 90.18%~100%,远高于泥沙沉积率;粉粒沉积率为 38.82%~70.05%,与泥沙沉积率相当;黏粒沉积率为

39.85%~61.90%,低于泥沙沉积率。

4) 不同黄河水出口泥沙体积质量及砂粒、粉粒、黏粒体积质量表现为 Su 处理<Sm 处理<Sd 处理,其泥沙沉积率、粉粒沉积率、黏粒沉积率表现为 Su 处理低于 Sm、Sd 处理,砂粒沉积率表现为 Su 处理高于 Sm、Sd 处理。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献:

- [1] 王军涛,李根东,宋常吉,等.黄河灌区高效节水灌溉发展对策与建议[J].灌溉排水学报,2021,40(S2):111-114.
WANG Juntao, LI Gendong, SONG Changji, et al. Development countermeasures and suggestions for highly-efficient water-saving irrigation of the Yellow River irrigation area[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(S2): 111-114.
- [2] 孙景生,康绍忠.我国水资源利用现状与节水灌溉发展对策[J].农业工程学报,2000,16(2):1-5.
SUN Jingsheng, KANG Shaozhong. Present situation of water resources usage and developing countermeasures of water-saving irrigation in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2000, 16(2): 1-5.
- [3] 侯鹏,肖洋,吴乃阳,等.黄河水滴灌系统灌水器结构-泥沙淤积-堵塞行为的相关关系研究[J].水利学报,2020,51(11):1372-1382.
HOU Peng, XIAO Yang, WU Naiyang, et al. Cascade relationship between the emitter structure-sedimentation-clogging behavior in drip irrigation systems with Yellow River water[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(11): 1372-1382.
- [4] 安催花,鲁俊,吴默溪,等.黄河下游河道平衡输沙的沙量阈值研究[J].水利学报,2020,51(4):402-409.
AN Cuihua, LU Jun, WU Moxi, et al. The threshold value of equilibrium sediment transport in the Lower Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 402-409.
- [5] PUIG-BARGUÉS J, LAMM Freddie R. Effect of flushing velocity and flushing duration on sediment transport in microirrigation driplines[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56: 1821-1828.
- [6] HAN S Q, LI Y K, XU F P, et al. Effect of lateral flushing on emitter clogging under drip irrigation with Yellow River water and a suitable method[J]. Irrigation and Drainage, 2018, 67(2): 199-209.
- [7] ZHOU H X, LI Y K, WANG Y, et al. Composite fouling of drip emitters applying surface water with high sand concentration: Dynamic variation and formation mechanism[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215: 25-43.
- [8] 孙贯芳,于健,杜斌,等.过滤后黄河水对滴灌系统的影响[J].排灌机械工程学报,2015,33(10):901-907.
SUN Guanfang, YU Jian, DU Bin, et al. Influence of the Yellow River water filtered on drip irrigation system[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2015, 33(10): 901-907.
- [9] 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 separation system for cement and sand with high sediment concentration[J]. Water Saving Irrigation, 2015(5): 88-91.
- [10] BOVÉ J, PUIG-BARGUÉS J, ARBAT G, et al. Development of a new underdrain for improving the efficiency of microirrigation sand media filters[J]. Agricultural Water Management, 2017, 179: 296-305.
- [11] FUJISAKI K. Enhancement of settling tank capacity using a new type of tube settler[J]. Water Science and Technology, 2010, 62(6): 1213-1220.
- [12] BANDROWSKI J, HEHLMANN J, MERTA H, et al. Studies of sedimentation in settlers with packing[J]. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, 1997, 36(3): 219-229.
- [13] GALVIN K P, NGUYENTRANLAM G. Influence of parallel inclined plates in a liquid fluidized bed system[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(7): 1231-1234.

- [14] LASKOVSKI D, DUNCAN P, STEVENSON P, et al. Segregation of hydraulically suspended particles in inclined channels[J]. Chemical Engineering Science, 2006, 61(22): 7 269-7 278.
- [15] 李建, 王海梅, 白筱莉, 等. 复合沉淀池的衍变及工程应用[J]. 中国给水排水, 2021, 37(12): 31-35.
- LI Jian, WANG Haimei, BAI Xiaoli, et al. Development and engineering application of composite sedimentation tank[J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(12): 31-35.
- [16] 申庚午. 引黄滴灌条件下重力式沉沙-过滤复合系统优化设计与应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2016.
- SHEN Gengwu. Research on optimal design and application of gravity sediment-filtration composite system under drip irrigation[D]. Beijing: China Agricultural University, 2016.
- [17] WANG K Y, LI Y K, REN S M, et al. A case study on settling process in inclined-tube gravity sedimentation tank for drip irrigation with the Yellow River water[J]. Water, 2020, 12(6): 1 685.
- [18] 刘荣光, 彭云霓. 在沉淀构筑物中增设斜板斜管的浅见[J]. 给水排水, 1989, 15(5): 18-20, 38.
- LIU Rongguang, PENG Yunni. My humble opinion on adding inclined plate and inclined tube in precipitation structure[J]. Water & Wastewater Engineering, 1989, 15(5): 18-20, 38.
- [19] SARKAR S, KAMILYA D, MAL B C. Effect of geometric and process variables on the performance of inclined plate settlers in treating aquacultural waste[J]. Water Research, 2007, 41(5): 993-1 000.
- [20] SALEM A I, OKOTH G, THÖMING J. An approach to improve the separation of solid-liquid suspensions in inclined plate settlers: CFD simulation and experimental validation[J]. Water Research, 2011, 45(11): 3 541-3 549.
- [21] 黄廷林, 李玉仙, 张志政, 等. 斜管沉淀池布水均匀性模拟计算与工艺参数分析[J]. 给水排水, 2005, 31(4): 16-19.
- HUANG Tinglin, LI Yuxian, ZHANG Zhizheng, et al. Theoretical analysis on water distribution uniformity and determination of technological parameters of inclined sedimentation tanks[J]. Water & Wastewater Engineering, 2005, 31(4): 16-19.
- [22] 涂有笑. 斜管沉淀池的两相流数值模拟[J]. 工程与建设, 2015, 29(2): 201-203.
- TU Youxiao. Numerical simulation of two-phase flow in inclined tube sedimentation tank[J]. Engineering and Construction, 2015, 29(2): 201-203.
- [23] DEMİR A. Determination of settling efficiency and optimum plate angle for plated settling tanks[J]. Water Research, 1995, 29(2): 611-616.
- [24] DOROODCHI E, ZHOU J, FLETCHER D F, et al. Particle size classification in a fluidized bed containing parallel inclined plates[J]. Minerals Engineering, 2006, 19(2): 162-171.
- [25] DOROODCHI E, FLETCHER D F, GALVIN K P. Influence of inclined plates on the expansion behaviour of particulate suspensions in a liquid fluidised bed[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(17): 3 559-3 567.
- [26] BALWAN Kshitija Sanjay, MUJAWAR Aarju, KARAKE Manisha. To study the effect of tube settler on clarification[M]. Beau Bassin, Mauritius: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2018.
- [27] THOMAS S, SUBRAMANI T, THOMAS S. Experiments on tube settler for the treatment of Fbw and optimization of plant operation for residual reduction[J]. International Journal of Engineering Research and Applications, 2012, 2(4): 190-203.
- [28] 明特, 田军仓. 引黄灌区高含沙水农田非全流过滤试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2020(3): 10-17.
- MING Te, TIAN Juncang. Experimental research on the non-full flow filtration of high sandy water farmland in the Yellow River irrigation district[J]. China Rural Water and Hydropower, 2020(3): 10-17.
- [29] 李素雅, 马红斌, 李红星, 等. 黄河中游多沙粗沙区基础边界数据集[J]. 中国科学数据, 2021, 6(3): 151-157.
- LI Suyu, MA Hongbin, LI Hongxing, et al. The boundary dataset of high and coarse sediment yield in the middle reaches of the Yellow River[J]. China Scientific Data, 2021, 6(3): 151-157.
- [30] 钱胜, 全海杰, 马翠丽, 等. 黄河下游高含沙洪水分组泥沙冲淤特性研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(S2): 20-22, 26.
- QIAN Sheng, TONG Haijie, MA Cuili, et al. Study on the characteristics of sediment erosion and deposition in the lower reaches of the Yellow River with high sediment concentration[J]. Yellow River, 2021, 43(S2): 20-22, 26.
- [31] LI Q, SONG P, ZHOU B, et al. Mechanism of intermittent fluctuated water pressure on emitter clogging substances formation in drip irrigation system utilizing high sediment water[J]. Agricultural Water Management, 2019, 215: 16-24.
- [32] 陈敏生, 梁壁凝, 陈章. 斜管沉淀池设计中的几个问题[J]. 净水技术, 2006, 25(5): 74.
- CHEN Minsheng, LIANG Bining, CHEN Zhang. Several problems in the design of inclined tube sedimentation tank[J]. Water Purification Technology, 2006, 25(5): 74.
- [33] 荆全章, 王守东, 王伟. 斜管沉淀池的积泥问题与改造措施[J]. 中国给水排水, 2000, 16(3): 49-51.
- JING Quanzhang, WANG Shoudong, WANG Wei. Mud accumulation in inclined tube sedimentation tank and its transformation measures[J]. China Water & Wastewater, 2000, 16(3): 49-51.
- [34] 盛国荣. 斜管沉淀池管长若干问题的研究[J]. 给水排水, 1996, 22(6): 57-58.
- SHENG Guorong. Study on some problems of tube length of inclined tube sedimentation tank[J]. Water & Wastewater Engineering, 1996, 22(6): 57-58.
- [35] 黄廷林, 李玉仙, 何文杰, 等. 布水不均匀性对斜管沉淀池临界流速的影响[J]. 水处理技术, 2008, 34(12): 28-31, 35.
- HUANG Tinglin, LI Yuxian, HE Wenjie, et al. Study on the relation of critical settling velocity of inclined settling tank and configuration parameters[J]. Technology of Water Treatment, 2008, 34(12): 28-31, 35.
- [36] 黄廷林, 李玉仙, 何文杰. 斜管沉淀池结构参数优化的理论分析[J]. 给水排水, 2007, 33(4): 20-26.
- HUANG Tinglin, LI Yuxian, HE Wenjie. Theory analysis on the configuration parameters' optimization of inclined settling tank[J]. Water & Wastewater Engineering, 2007, 33(4): 20-26.
- [37] 穆玉均, 王维红, 王思民, 等. V形斜管沉淀池的讨论及应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2013, 11(3): 33-35, 62.
- MU Yujun, WANG Weihong, WANG Simin, et al. Discussion and application for V-shaped inclined-tube sedimentation tank[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(3): 33-35, 62.
- [38] 许春阳, 罗雯, 陈永平, 等. 细颗粒泥沙制约沉降速度计算方法综述[J]. 泥沙研究, 2022, 47(1): 73-80.
- XU Chunyang, LUO Wen, CHEN Yongping, et al. Review on calculation methods of hindered settling velocity for fine sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(1): 73-80.
- [39] PORTELA L I, RAMOS S, TEIXEIRA A T. Effect of salinity on the settling velocity of fine sediments of a harbour basin[J]. Journal of Coastal Research, 2013, 165: 1 188-1 193.
- [40] 郭超. 粘性泥沙絮凝沉降过程与控制机制研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2018.
- GUO Chao. Cohesive sediment flocculation and settling processes and the controlling mechanisms[D]. Shanghai: East China Normal University, 2018.
- [41] 刘俊秀, 吉祖稳, 王党伟. 黏性细颗粒泥沙絮凝试验研究综述[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2): 63-68.
- LIU Junxiu, JI Zuwen, WANG Dangwei. Review on the flocculation test of cohesive sediment[J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2): 63-68.
- [42] 华根福, 刘焕芳, 汤骅, 等. 微灌沉沙池在新疆兵团节水灌溉中的应用研究[J]. 节水灌溉, 2010(4): 44-46, 51.
- HUA Genfu, LIU Huanfang, TANG Hua, et al. Application of sand basin for micro-irrigation in water saving irrigation of Xinjiang production and construction corps[J]. Water Saving Irrigation, 2010(4): 44-46, 51.
- [43] 汤骅, 吴均. 新型矩形沉沙池在节水灌溉中的应用研究[J]. 人民长江, 2011, 42(3): 103-106.
- TANG Hua, WU Jun. Application study of new-type rectangular settling basin in water-saving irrigation[J]. Yangtze River, 2011, 42(3): 103-106.

The Impact of Pipe Inclination on Sediment Deposition at the Sedimentation Basin in the Yellow River

ZHA Yingdong^{1,2}, HOU Peng², LIU Zeyuan², WANG Keyuan², LI Yunkai², WANG Chunxia^{1*}

(1. College of Water Conservancy & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi 832000, China;

2. College of Water Resources and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: **【Objective】** This paper aims to study the optimal layout of inclined pipes in sedimentation basins in attempts to improve sediment removal efficiency in the Yellow River. **【Method】** Three different layouts of inclined pipes were compared: a single layer (Fs), and two double-layer layouts (Fv1, Fv2), in a gravity-operated sedimentation basin. Sediment distribution of three typical particle sizes in the upstream (Su), middle stream (Sm), and downstream (Sd) was measured. Sediment tests were conducted under a low (Qq) and a high (Qs) flow rate to compare the impact of pipe inclination on sedimentation in the three layouts. **【Result】** The large granular sediment settled prior to entering the inclined pipes, while the fine particle sediment ($<75\ \mu\text{m}$) was effectively captured by the inclined pipe. These resulted in an outlet sediment content of $0.342\sim 1.354\ \text{kg/m}^3$ and a sand content of $0\sim 0.018\ \text{kg/m}^3$. Among the different inclined pipe layouts, Fv2 exhibited the lowest sediment and related sand, silt, and clay content at the outlet, followed by Fv1 and Fs. The Fv2 effectively controlled the outlet sediment content at $0.342\sim 0.991\ \text{kg/m}^3$, showing a reduction of $10.01\%\sim 20.95\%$ and $26.82\%\sim 38.83\%$, compared to Fv1 and Fs, respectively. Furthermore, different Yellow River sections showed variations in sediment content, with the Su section exhibiting the lowest sediment and related sand, silt, and clay content. **【Conclusion】** The sediment treatment capacity varied significantly among the three inclined pipe layouts for different Yellow River sediments ($P<0.05$). The V-shaped inclined pipe layout was superior to the conventional layout, with the Fv2 (inclination angles of 60° and 45°) being most effective.

Key words: Yellow River sediment; sediment basin; inclined pipe; inclined pipe layout form

责任编辑：白芳芳

(上接第 126 页)

Optimizing the Materials for U-shaped Channel in Solidified Soda-saline Soils

LI Ming^{1,2}, GAO Jinhua^{1,2*}, ZHANG Hao^{1,2}, SUN Fangcheng³, GAO Yinzhe⁴

(1. Changchun Institute of Technology College of Water Conservancy and Environmental Engineering, Changchun 130012, China;

2. Jilin Province Water Engineering Safety and Disaster Prevention Engineering Laboratory, Changchun 130012, China;

3. Jilin Songyuan Irrigation Area Engineering Construction Co., Ltd., Songyuan 138000, China;

4. Jilin Baishan Powerplant of Song Huajiang Hydropower Co., Ltd., Huadian 132403, China)

Abstract: **【Objective】** Saline soil needs reinforcement in constructing channels. The objective of this paper is to investigate the engineering characteristics of a new material used to reinforce saline soil to resolve issues such as dissolution, erosion and water wastage in west Jilin province. **【Method】** A house-made frost-crack resistant agent was used in the study. It was mixed with the soil at ratios ranging from 20% to 45%, with soil water content varying from 14% to 20%. The hydraulic and mechanical properties of each sample were measured using unconfined compressive strength test, freeze-thaw test, and permeability test, from which we determined the optimal mixing ratio. The ABAQUS software was then used to analyze the stress and displacement of a 2 m U-shaped channel under different operating conditions. **【Result】** The optimal material ratio was 40% with the soil moisture being 16%. Its strength was 14.91 MPa at the optimal age of 28 days. The specimens lost less than 5% of its quality after undergoing more than 200 indoor freeze-thaw cycles; its hydraulic conductivity was $1\times 10^{-7}\ \text{cm/s}$. The numerical simulations revealed that the 2 m U-shaped channel experienced a maximum principal stress of 87.4 kPa and maximum displacement of 0.08 mm under a two-point lifting of the bottom force. Under full water operating conditions, the maximum principal stress was 94.32 kPa, and the maximum displacement was 2.85 mm. Considering the effect of frost heave, the maximum principal stress was 312 kPa, and the maximum displacement was 17 mm. **【Conclusion】** Under the test conditions, the optimal agent ratio was 40%. This ratio reduced the displacement deformation of the U-shaped channel and improved its stability. These findings provide guidance for constructing U-shaped channels in saline soils in western Jilin province and regions with similar environments.

Key words: saline soil solidification; U-shaped channel; material optimization; numerical simulation

责任编辑：韩 洋