

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.06.026

CSTR:32310.14.stbcb.2025.06.026

宁少雄, 庞琪, 蔡耀辉, 等. 聚乙烯装配式沉沙结构设计及多相流数值模拟[J]. 水土保持学报, 2025, 39(6): 383-393.

NING Shaoxiong, PANG Qi, CAI Yaohui, et al. Design of polyethylene assembled sedimentation structure and multiphase flow numerical simulation [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6): 383-393.

聚乙烯装配式沉沙结构设计及多相流数值模拟

宁少雄¹, 庞琪¹, 蔡耀辉^{2,3,4}, 陈妮⁵, 文明宜¹,
揣峻峰⁶, 高晓东^{2,3,4}, 赵西宁^{2,3}

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 西北农林科技大学旱区农业新疆研究院, 乌鲁木齐 830091; 5. 陕西省现代农业培训中心, 西安 710018; 6. 领先生物农业股份有限公司, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: [目的] 为有效减少黄土高原聚乙烯集雨窖泥沙淤积问题, 缓解精准灌溉物理堵塞风险, 提出防治策略和产品, 提升集雨补灌水资源的效能。[方法] 应用 SolidWorks 针对聚乙烯集雨窖设计泥沙沉降结构, 根据沉降结构特性和堵塞颗粒级配, 采用 Fluent Realizable $k-\epsilon$ 湍流模型和欧拉固-液-气三相流模型模拟泥沙沉降规律, 系统分析泥沙粒径(0.01~0.1 mm)与进口流速(0.1~1.0 m/s)对沉沙效率的影响。[结果] 沉沙结构具有良好的沉沙效率, 且与理论沉沙误差 $\leq 3.7\%$, 其中粒径 ≥ 0.075 mm 的颗粒在 0.2~0.5 m/s 流速下沉沙效率为 82.6%, 0.038 mm 颗粒在 0.3 m/s 流速时沉沙效率为 69.6%, 而细颗粒(0.01 mm)在 0.1 m/s 流速时沉沙效率为 35.7%。[结论] 研究提出具有过滤区、过滤塞、装配式挡水板及水位调控的沉沙结构装置, 沉降效率良好, 研究结果为黄土高原聚乙烯集雨补灌系统的良久运行提供理论依据与设计优化方案。

关键词: 集雨补灌; Fluent; 泥沙沉降; 沉沙结构; 多相流; 黄土高原

中图分类号: S275.9

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0383-11

Design of Polyethylene Assembled Sedimentation Structure and Multiphase Flow Numerical Simulation

NING Shaoxiong¹, PANG Qi¹, CAI Yaohui^{2,3,4}, CHEN Ni⁵, WEN Mingyi¹,
CHUAI Junfeng⁶, GAO Xiaodong^{2,3,4}, ZHAO Xining^{2,3}

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Xinjiang Research Institute of Agriculture in Arid Areas, Northwest A&F University, Urumqi 830091, China; 5. Shaanxi Modern Agricultural Training Center, Xi'an 710018, China; 6. Leading Pioneer Bio-Agriculture Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: [Objective] To effectively reduce sediment deposition in polyethylene (PE) rainwater harvesting tanks on the Loess Plateau and mitigate the risk of physical clogging in precision irrigation, this study proposes prevention strategies and products to enhance the efficiency of rainwater harvesting and supplemental irrigation systems. [Methods] A sedimentation structure was designed for polyethylene rainwater harvesting tanks using SolidWorks. Based on the characteristics of the sedimentation structure and the particle size distribution of clogging sediments, sedimentation patterns were simulated using the Realizable $k-\epsilon$ turbulence model and an Eulerian three-

收稿日期: 2025-05-18

修回日期: 2025-06-19

录用日期: 2025-07-03

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-08-13

资助项目: 国家自然科学基金项目(52009113); 国家重点研发计划项目(2021YFD1900700); 唐仲英基金项目; 陕西省重点研发计划项目(2023-ZDLNY-48)

第一作者: 宁少雄(1995—), 男, 博士研究生, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: shaoxiongning@163.com

通信作者: 蔡耀辉(1991—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事节水灌溉理论与技术研究。E-mail: caiyh@nwsuaf.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

phase (solid-liquid-gas) flow model in Fluent. The influence of sediment particle size (0.01–1 mm) and inlet flow velocity (0.1–1.0 m/s) on sedimentation efficiency was systematically analyzed. [Results] Numerical simulations showed that the sedimentation structure achieved good sedimentation efficiency, with deviation from theoretical predictions within 3.7%. Specifically, for particles with diameters ≥ 0.075 mm, the sedimentation efficiency reached 82.6% at flow velocities of 0.2–0.5 m/s. For 0.038 mm particles, the sedimentation efficiency was 69.6% at 0.3 m/s, while fine particles (0.01 mm) achieved an efficiency of 35.7% at 0.1 m/s. [Conclusion] This study proposes a sedimentation structure device incorporating a filtration zone, filter plug, assembled baffle plate, and water level control mechanism, which demonstrates favorable sedimentation efficiency. These findings provide a theoretical basis and optimized design solution for the long-term operation of polyethylene rainwater harvesting and supplemental irrigation systems on the Loess Plateau.

Keywords: rainwater harvesting and supplemental irrigation; Fluent; sediment deposition; sedimentation structure; multiphase flow; Loess Plateau

Received: 2025-05-18

Revised: 2025-06-19

Accepted: 2025-07-03

Online(www.cnki.net): 2025-08-13

黄土高原是我国水土流失最为严重的区域之一,水资源时空分布不均,严重制约着区域果园和粮食作物产能。为实现高效用水、稳定增产,集雨补灌技术作为一种基于地表径流调控的节水型措施,在丘陵区果园与设施农业中得到广泛应用,显著提升了果实品质和产量^[1-4]。其中,聚乙烯集雨窖因其材料轻便、安装灵活、适配性强等特点,成为黄土丘陵区分散经营农户实施集雨补灌的重要载体^[5],被称为果树灌溉的“救命水”系统。然而,聚乙烯集雨水窖面临的淤积与灌溉堵塞问题已成为制约其高质量发展的主要瓶颈。

分散经营果园常因极端气候、地形和土壤结构条件复杂,导致所收集的雨水通常为高水沙混合物^[6],聚乙烯集雨窖因泥沙沉积频繁淤满,运行效率严重受限。在系统的首部设置有效的减沙防控措施,已被证明是保障灌溉系统正常运作的重要环节^[7-8],基于泥沙动力学特性,诸多有效的沉沙装置逐步提出并应用,如圆中环沉沙排沙过滤池、鱼鳃式沉沙池及旋流沉沙装置等^[9-12]。此外,在首部引入过滤器或采用静置沉降可有效减少堵塞现象^[13]。然而,这些措施多用于平原地区的水资源管理,尚缺乏针对黄土丘陵区分散农业经营条件的聚乙烯集雨窖设计与应用方案。

目前常见沉沙池以混凝土、砖砌或土质结构为主,虽沉沙效果良好,但存在造价高、施工复杂、与聚乙烯窖体兼容性差等问题^[14-16]。聚乙烯材料的一体成型和模块化制造技术为构建经济、轻质、高效的沉沙结构提供了新路径^[17]。然而,如何基于典型泥沙颗粒级配和集流水力特性,研发与聚乙烯集雨窖相匹配的沉沙产品尚未研究。因此,本研究聚焦黄土

丘陵区分散经营果园中聚乙烯集雨窖所面临的泥沙淤积和堵塞难题,结合集雨过程中泥沙级配特性和水力条件,设计并优化适用于该区域的沉沙结构装置。通过 SolidWorks 建立三维模型,并利用 Fluent 对不同泥沙粒径与入口流速条件下的沉沙效率进行数值模拟,探索高效、便捷的沉沙技术方案。研究结果将为聚乙烯集雨补灌系统的结构升级和高效运行提供理论依据与技术支持。

1 模型设计

采用 SolidWorks 2021 软件设计可装配式聚乙烯材质沉沙结构(图 1),该结构利用注塑成型工艺,通过零件装配固定于聚乙烯集雨窖上,具有便于拆装、安装、运输的优点,结构内部通过分级设计理念逐步实现泥沙沉降,最终沉降后的水汇入集雨窖内。沉沙结构几何参数见表 1。

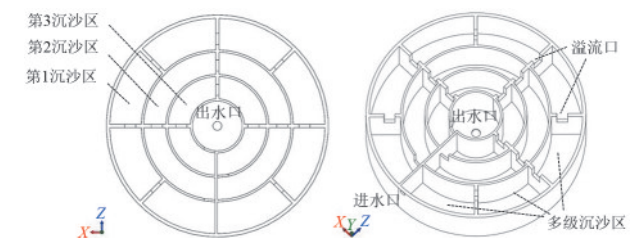


图 1 沉沙结构设计示意

Fig.1 Schematic diagram of sedimentation structure design

表 1 沉沙结构设计参数

Table 1 Design parameters of sedimentation structure

参数	尺寸/mm	参数	尺寸/mm
直径	500	挡水板厚度	7.5
高度	115	溢流口高度	35
第 1 沉沙区宽度	70	溢流口宽度	25
第 2、3 沉沙区宽度	50	进水口直径	15
挡水板高度	115	出水口直径	20

2 数值模拟方法

2.1 数学模型

依据黄土高原水沙特性,利用 Fluent 2021 R1 模拟水 ($\rho=998.2 \text{ kg/m}^3, \mu=1.003 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$)、沙 ($\rho=2650 \text{ kg/m}^3$)、空气 ($\rho=1.225 \text{ kg/m}^3, \mu=1.789 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$) 在泥沙沉降结构中的流动特性,选用 Realizable $k-\epsilon$ 模型和欧拉固、液、气三相流模型模拟水沙混合物进入沉沙结构,其中欧拉模型(双流体模型)通过独立连续性方程和动量方程。此外,将固-液-气多相流视为相互渗透的独立相。连续性方程和动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_q \rho_q) + \nabla(\alpha_q \rho_q \vec{u}_q) = 0 \quad (1)$$

式中: t 为时间; 下标 q 为 q 相; α_q 为 q 相体积分数(无量纲); ρ_q 为 q 相密度, kg/m^3 ; \vec{u}_q 为 q 相速度矢量。

动量方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \vec{u}_i) + \nabla(\alpha_i \rho_i \vec{u}_i^2) = -\alpha_i \nabla p + \nabla \bar{\tau}_i + \alpha_i \rho_i \vec{g} + K_{ji}(\vec{u}_j - \vec{u}_i) \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_j \rho_j \vec{u}_j) + \nabla(\alpha_j \rho_j \vec{u}_j^2) = -\alpha_j \nabla p + \nabla \bar{\tau}_j + \alpha_j \rho_j \vec{g} + K_{ij}(\vec{u}_i - \vec{u}_j) \quad (3)$$

其中:

$$\bar{\tau}_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{u}_q + \nabla \vec{u}_q^T) + \alpha_q (\nu_q - \frac{2}{3} \mu_q) \nabla \cdot \vec{u}_q \vec{I} \quad (4)$$

式中: i 为连续相; j 为分散相; P 为压力, Pa ; $\bar{\tau}_i$ 为剪应力, N/m^2 ; μ 为体积黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; \vec{I} 应力张量, N/m^2 。

2.2 网格划分及无关性分析

为保证模拟效果,进一步简化沉沙结构模型。水沙分离涉及多相的复杂相互作用,非结构网格结合多相流模型能显著提升模拟精度^[18],因此采用 Meshing 对沉沙区域进行非结构化网格划分,由于壁面对水、沙、气三相影响较小,壁面采用不加密处理。为了较好地模拟泥沙沉降,参考泥沙粒径、流速及模型特征实际情况,综合考虑计算精度和计算资源,将单元格尺寸设定为 5~15 mm 进行数值模拟,并构建不同密度网格方案(5、10、15 mm)进行网格无关性测试。

在进口流速为 1 m/s 的工况下,对比分析第 1 级沉沙区 8 个均匀分布测点的流速变化曲线(图 2)。结果表明,当网格数量增至 142 998(对应单元尺寸为 10 mm)时,流速变化趋于稳定。因此,后续模拟选用 10 mm 的单元网格(图 3),其平均单元质量为 0.83,显著高于计算要求的阈值 0.7,能够在保证模拟精度的同时兼顾计算效率。

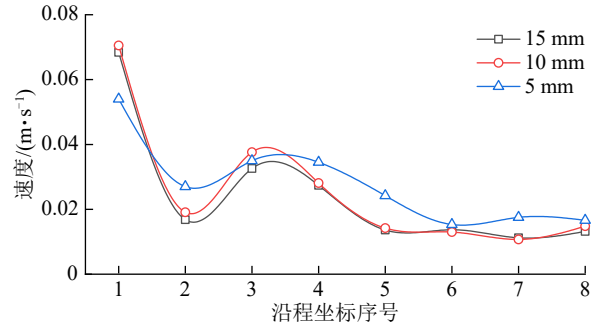


图 2 网格测点速度沿程变化

Fig.2 Velocity variation along longitudinal direction at grid measurement points

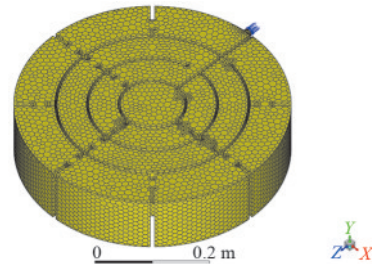


图 3 网格划分示意

Fig.3 Schematic diagram of grid division

2.3 模型设置

选用欧拉模型和 Realizable $k-\epsilon$ 模型,水沙混合物进入沉沙结构采用瞬态模拟,将液相水设为连续相,气相和固相设为离散相。模拟中假设固体颗粒为刚性球体,采用颗粒动力学理论描述颗粒运动,并通过 Gidaspow 模型计算颗粒相黏度。

泥沙粒径在 0.1、0.075、0.038、0.01 mm 区间内会引起灌水器堵塞^[19-23]。基于此,设定不同泥沙颗粒(0.1、0.075、0.038、0.01 mm)和入口流速(表 2),模拟沉沙结构区域从完全是空气至充满水沙混合物的沉积效果。进一步筛选出适于该装置的泥沙粒径和入口流速,提出相应的结构优化方法。

表 2 模拟工况参数

Table 2 Parameters of simulated conditions

泥沙粒径/mm		进口流速/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)		
0.1	0.2	0.5	0.7	1.0
0.075	0.3	0.5	0.7	1.0
0.038	0.1	0.2	0.3	0.5
0.01		0.1		

2.4 边界条件和求解方法

水、沙进口设置为速度进口,高水沙混合物中泥沙含量一般约为 3%~10%^[24],为了更好地模拟沉降,其中泥沙浓度设置为 10%,考虑 Eulerian 模型模拟的计算稳定性和颗粒随机紧密堆积,泥沙填充极限设为最大 0.63。初始阶段流体域内空气体积为 1,出水口设置为压力出口(压力为 0)。固体壁面均采用无滑移边界条件处理,液面处理为自由水面,在求解过程中,使用

瞬态的 Phased Coupled SIMPLE 算法,配合欠松弛法,残差设置为 10^{-6} 。模拟过程中根据泥沙沉降的体积与进口泥沙的体积比获得除沙效率。

3 理论沉沙效率计算方法

为了验证模拟结果的准确性,采用理论方法对沉沙结构的沉沙效率进行计算,将模型简化为串联并与各级沉沙区等宽、底面积相等的溢流结构,进一步对比验证多个流速下理论沉沙效率和模拟沉沙效率。

3.1 泥沙沉降速度计算

根据斯托克斯定律(stokes law),层流区($Re_d < 1$)的泥沙沉降速度公式为:

$$v_s = \frac{g(\rho_s - \rho_w)d^2}{18\mu} \quad (5)$$

式中: g 为重力加速度,取 9.81 m/s^2 ; ρ_s 为泥沙密度,取 2650 kg/m^3 ; ρ_w 为水的密度,取 998.2 kg/m^3 ; d 为泥沙粒径,取 0.1 mm ; μ 为水的动力黏度,取 $1.003 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

泥沙粒径为 0.1 mm 时,沉降速度(v_s)为 0.009 m/s ; 雷诺数(Re_d)为 0.9 ,满足层流假设。

3.2 多级沉沙池理论效率模型

3.2.1 单级效率修正公式 基于理想沉沙池理论与表面负荷法,单级沉沙效率采用指数修正公式:

$$\eta_i = 1 - e^{-\frac{v_s A_i}{Q}} \quad (6)$$

式中: A_i 为沉沙区底面积, m^2 ; Q 为流量, m^3/s 。

第 1、2、3 级沉沙区的单级面积分别取: $A_1=0.01085 \text{ m}^2$ 、 $A_2=0.0107 \text{ m}^2$ 、 $A_3=0.0064 \text{ m}^2$ 。此公式考虑了颗粒分布的非均匀性及水力紊动影响。

3.2.2 多级串联总效率计算 根据串联系统可靠性理论,总效率为各级未去除概率乘积的补集:

$$\eta_{\text{总}} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - \eta_i) \quad (7)$$

研究中沉沙池由 16 不同异规格单元串联构成(8级 $\times 70 \text{ mm}$ 、4级 $\times 50 \text{ mm}$ 、4级 $\times 50 \text{ mm}$),需逐级计算后叠加效率。

4 结果与分析

4.1 0.1 mm 粒径泥沙沉沙特性

粒径为 0.1 mm 粒径的体积分布见图 4。4 种入口流速 0.2 、 0.5 、 0.7 、 1.0 m/s 流速下的除沙效率分别为 98.2% 、 96.4% 、 88.8% 、 72.2% ,表明不同入口流速下沉沙结构对 0.1 mm 粒径泥沙均有较好的沉降效果。入口速度极大影响泥沙颗粒在沉沙装置中的沉降情况,对于入口流速较大,除沙效果相对较低(如 1 m/s , 72.2%),主要由于高动能及水流剪切力下的瞬时流速高于 0.1 mm 粒径的悬浮或扬动流速,进而造成少部分泥沙未能有效沉降。

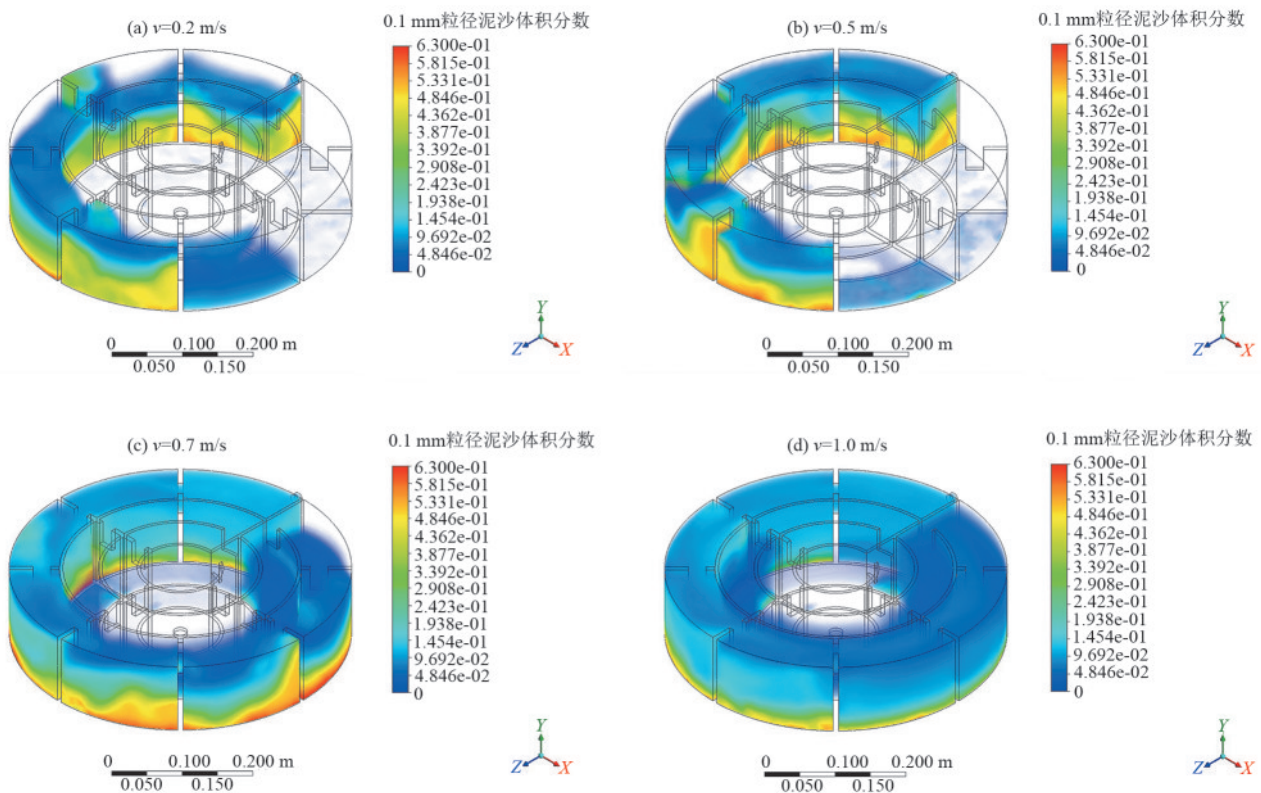


图 4 0.1 mm 粒径泥沙体积分布

Fig.4 Volume fraction distribution of sediment with 0.1 mm particle size

为深入研究沉沙装置底面泥沙沉积情况,选取沉沙结构底面进行泥沙沉积体积分布的观察与计算(图5)。流速0.2~0.5 m/s时,泥沙主要沉积于外围第1级沉沙区的前5~7级扇环段(填充比例>30.1%),而后续区域沉积较少(<4.4%)。当流速增至0.7 m/s时,泥沙主要沉积区域后移至第3~7级扇环段(>49.5%),第1~2级区域则转变为水流缓冲区,部分泥沙被携带至第2级沉沙区末端(<31.5%),而第3级仍未形成明显沉积(<9.3%)。在1 m/s流速

下,泥沙进一步扩散至第2~6级扇环段(>42.5%),并因溢流口冲刷作用,在第2级末端形成局部沉积,其余区域泥沙分布趋势与0.7 m/s时相似。沉积云图显示,低流速条件下,泥沙主要在沉沙区前段沉积,而在中高流速下,水流动能增强,导致沉积范围扩大并向中后段迁移。对于0.1 mm沙粒,当水流充满沉沙装置时,出水口附近无泥沙堆积,颗粒主要富集于前端沉沙区,沉降率达到极高水平,并表现出显著的水流延滞特性。

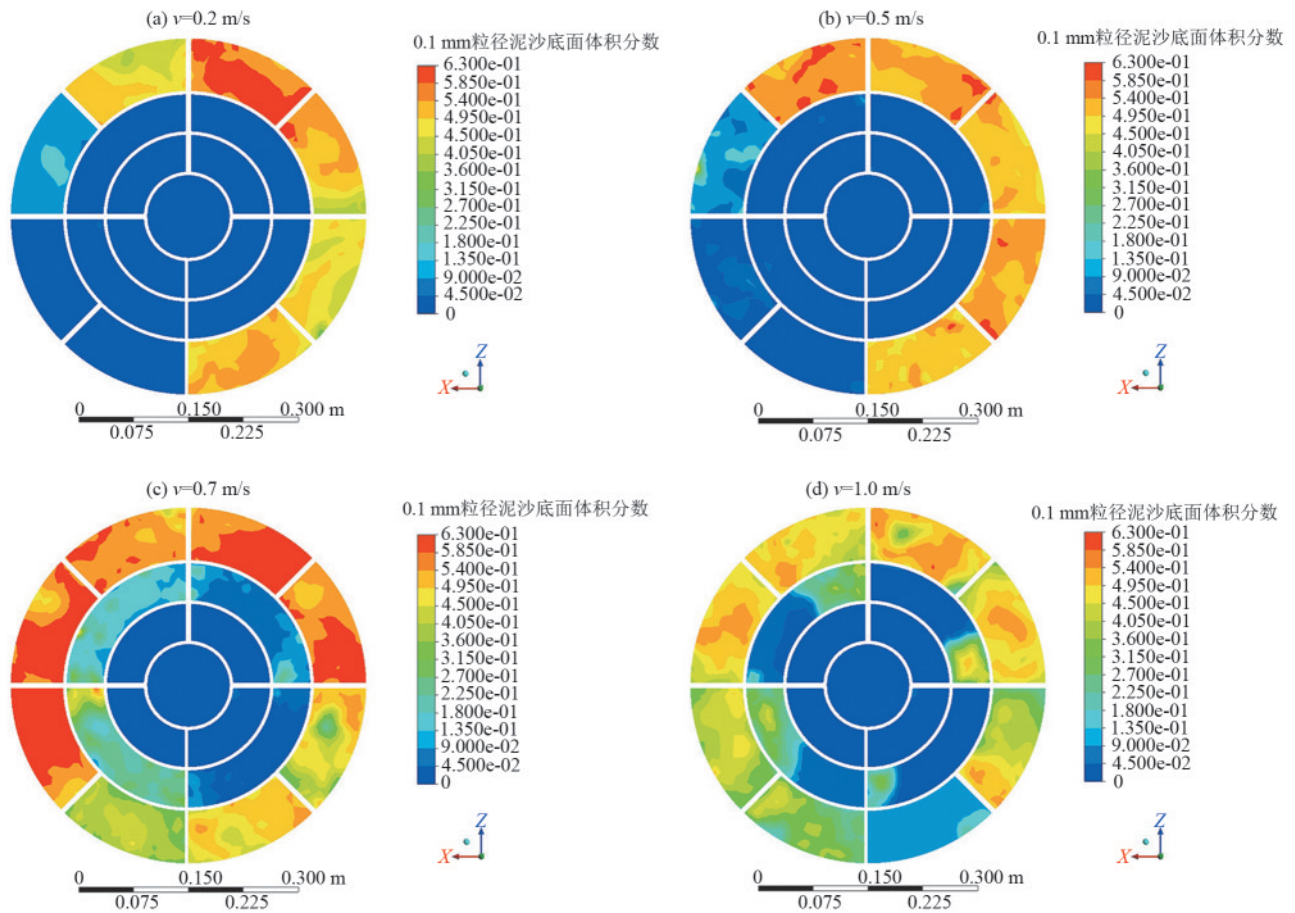


图5 0.1 mm 粒径泥沙底面体积分布

Fig.5 Bottom volume fraction distribution of sediment with 0.1 mm particle size

4.2 0.075 mm 粒径泥沙沉沙特性

粒径为0.075 mm的沙粒在沉沙装置中的体积分布见图6。4种入口流速0.3、0.5、0.7、1.0 m/s流速下除沙效率分别为91.2%、82.6%、73.5%、58.9%。此外,沉沙效率随流速增加表现出不同程度的下降,具体而言,流速为0.3 m/s时,在第1沉沙区泥沙基本完全沉积,当流速为1.0 m/s时,更多泥沙颗粒被水流携带至后面沉沙区域,这是由于过大流速使泥沙颗粒(0.075 mm)悬浮和扬动所致。

根据斯托克斯定律,泥沙颗粒的沉降速度与其直径的平方成正比,与其密度和流体的黏度呈反比。表明大颗粒比小颗粒的沉降速度更快。模拟过程中

不同工况设置的液体的黏度和密度一致,因此减小沙粒粒径后,沉沙结构对泥沙的沉沙效率随之减小。进一步地选取沉沙装置底面,对沉沙装置底面的泥沙沉积和分布情况进行观察与计算(图7)。

泥沙沉积分布表现出显著的流速依赖性。当流速为0.3 m/s时,泥沙主要沉积于1级沉沙区前5个扇环段,其中第2、4段填充比例达58.3%~63.0%,接近极限值;第1扇环虽沉积量较高(>49.3%),但主要作用转为水流减速,促使泥沙向第2扇环迁移。随着前段空间的占用,第3扇环成为新的降速核心,驱动泥沙进一步向第4扇环富集,而2级区沉积量不足4.5%,3级区未形成有效沉降。

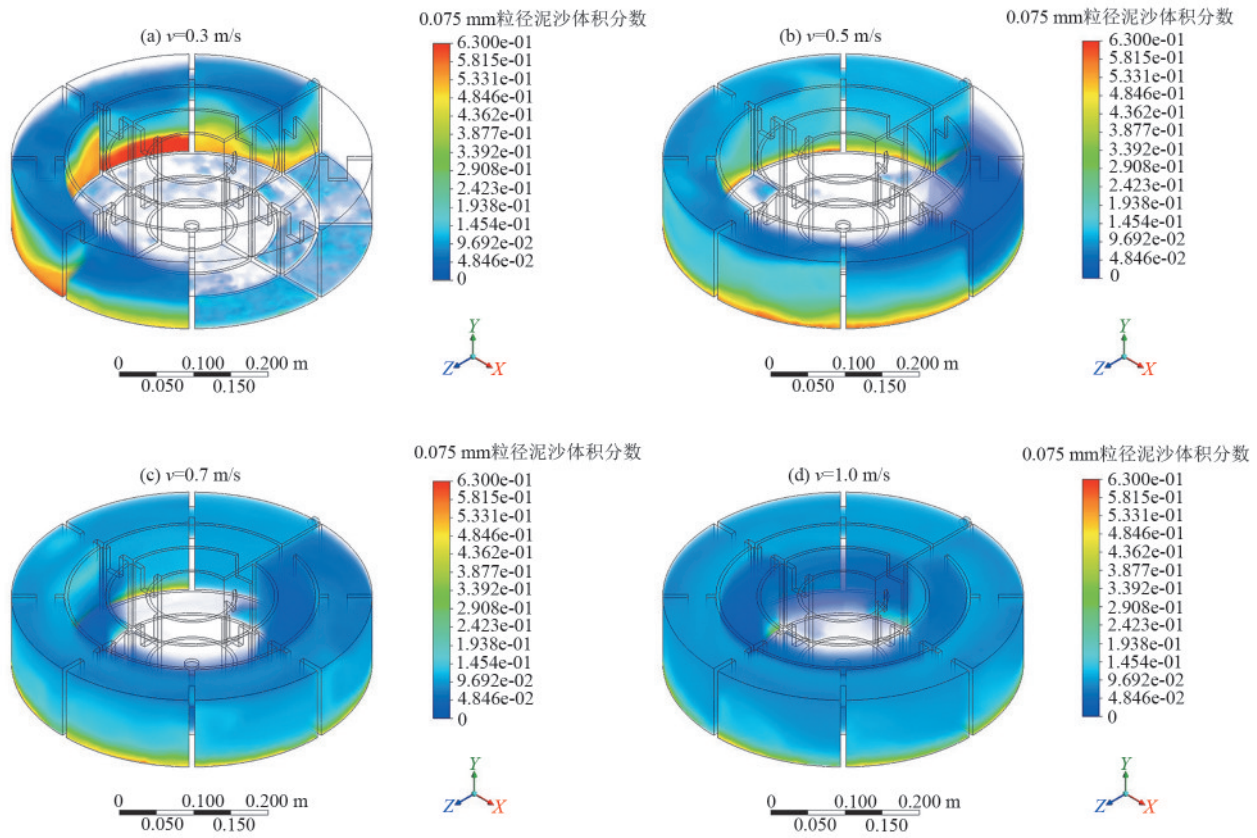


图 6 0.075 mm 粒径泥沙体积分布

Fig.6 Volume fraction distribution of sediment with 0.075 mm particle size

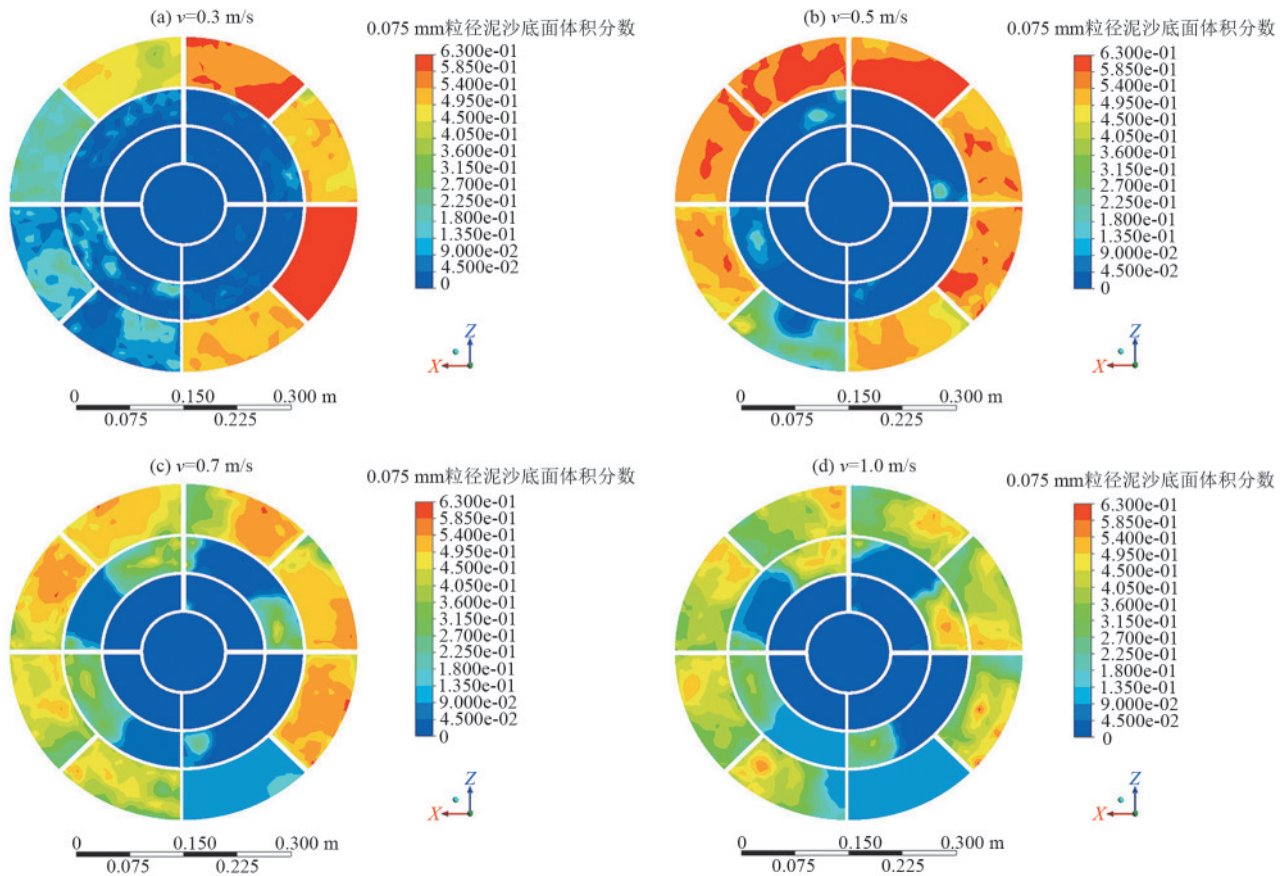


图 7 0.075 mm 粒径泥沙底面体积分布

Fig.7 Bottom volume fraction distribution of sediment with 0.075 mm particle size

当流速增至 0.5 m/s,泥沙扩散至 1 级区全部 8 个扇环段,溢流口附近的冲刷效应导致 2 级区末端形成局部沉积,而 1 级区仍承担 80% 以上的沉降负荷。流速升至 0.7 m/s 时,第 1 扇环因水流动能过强丧失沉积功能,沉积重心后移至 2 级区末端(沉积比例增至 12%~15%),3 级区仍无有效沉积。当流速达 1.0 m/s,沉积模式与 0.7 m/s 相似,但 1 级区沉积量较 0.5 m/s 工况减少 45%,2 级区末端沉积量衰减 30%,整体表现出“前段冲刷-中段分散”特征。表明 0.3 m/s 为最优沉降效率临界点(1 级区填充率 > 95%),当流速超过 0.7 m/s 时,系统进入冲刷主导状态,溢流口剪切力引发的再悬浮效应成为泥沙跨区迁移的主要机制,而 3 级区因动能余留过高始终未形成有效沉积(填充率 < 4.5%)。对于粒径 0.075 mm 的沙粒,当水

流刚好充满沉沙装置时,出水口区域无泥沙残留,颗粒主要富集于前端沉沙区,大部分泥沙在沉沙装置内完成沉降。

4.3 0.038 mm 粒径泥沙沉沙特性

粒径为 0.038 mm 的沙粒在沉沙装置中的体积分布见图 8。靠近出水口前的扇环沉沙段在不同流速条件下表现出不同程度的泥沙沉积。当入口流速为 0.1 m/s 时,大部分泥沙在外围沉沙段完全沉积,少部分沿水流方向逐步沉降,仅极少量泥沙进入出水口。随着流速增加,泥沙的有效沉积时间随之缩短,导致沉沙区内的完全沉积量逐渐减少。当流速增至 0.5 m/s,大部分泥沙仍处于沉降过程中,而更多泥沙随水流流出装置。在 0.1、0.2、0.3、0.5 m/s 入口流速下,沉沙装置的泥沙去除效率分别为 97.6%、83.4%、69.6%、56.7%。

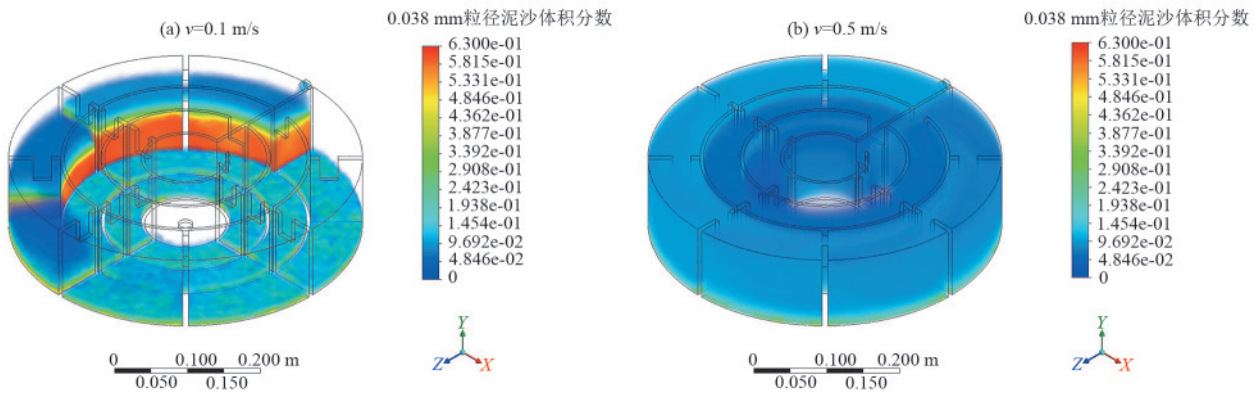


图 8 0.038 mm 粒径泥沙体积分布

Fig.8 Volume fraction distribution of sediment with 0.038 mm particle size

由图 9 可知,在 0.3 m/s 流速下,0.038 mm 粒径受到布朗运动,并且受到扬动作用影响^[24]泥沙沉降作用减小,尽管泥沙未完全沉积,但沿程递减至第 3 沉沙区时已显著减少,表明沉沙结构的长度能够满足

沉降需求,但水力停留时间相对不足。当流速增至 0.5 m/s,粒径 0.038 mm 的泥沙因沉降时间不足,与水流混合后被排出,验证了在该流速下,装置的沿程长度无法有效截留泥沙,从而降低沉沙效率。

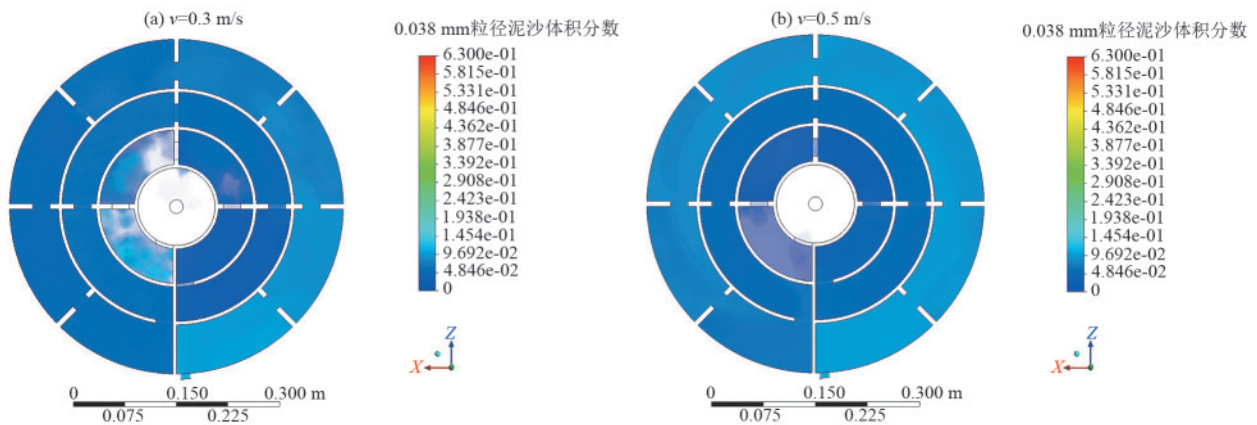


图 9 0.038 mm 粒径泥沙体积分布俯视图

Fig.9 Top views of volume fraction distribution of sediment with 0.038 mm particle size

由图 10 可知,当流速 0.1 m/s 时,63% 的泥沙在第 1 级沉沙区前四级扇环完成沉积,剩余沿程均有分布;流速升至 0.2 m/s 后,泥沙主要在 1、2 级沉沙区前

段沉积(填充率仍 ≈ 63%);当流速 ≥ 0.3 m/s 时,粒径为 0.038 mm 的泥沙因水力停留时间不足,未完全沉降的泥沙比例较大。

对于粒径为 0.038 mm 的泥沙,可通过延长沿程沉降路径以增加沉降时间,从而满足该粒径颗粒的重力沉降需求。在出水口前设置过滤结构亦可有效截留少量未及时沉降的泥沙,提高沉沙。

4.4 0.01 mm 粒径泥沙沉沙特性

对于粒径为 0.01 mm 的细颗粒泥沙,在入口流速 0.1

m/s 条件下,其体积分布见图 11a。该流速下泥沙未能完全沉积,沿程泥沙体积分布逐渐减少,完全沉积的比例较低,大部分泥沙仍处于沉降过程中,部分泥沙随水流逸散出装置。在该工况下,沉沙装置对粒径 0.01 mm 泥沙的除沙效率为 35.7%。由于颗粒细小且水力停留时间不足,泥沙随水流外排,导致除沙效果明显下降。

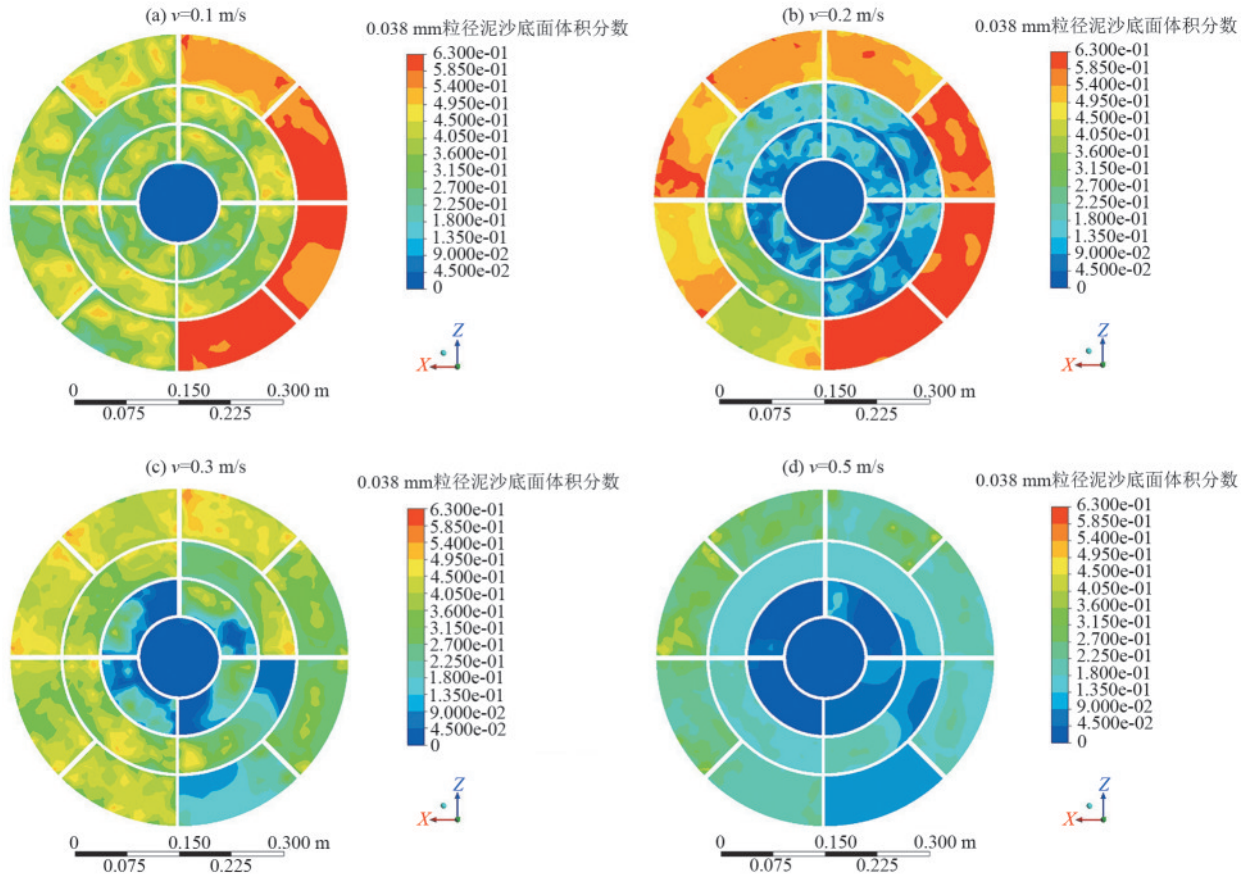


图 10 0.038 mm 粒径泥沙底面体积分布

Fig.10 Bottom volume fraction distribution of sediment with 0.038 mm particle size

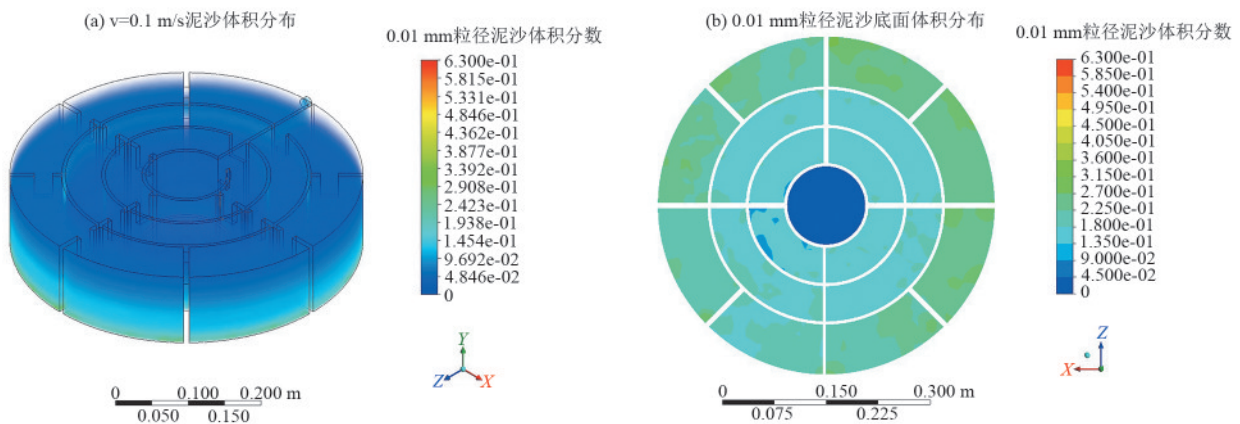


图 11 0.01 mm 粒径泥沙体积分布

Fig.11 Volume fraction distribution of sediment with 0.01 mm particle size

沉沙装置底面的泥沙分布情况见图 11b。对于粒径 0.01 mm 的沙粒,即使入口流速仅为 0.1 m/s,沉沙装置仍无法实现其完全沉积。由于大部分泥沙仍处于

沉降过程中,可通过增大沉沙装置的尺寸或在进水口增设消能装置以进一步降低流速,从而延长泥沙在装置内的停留时间,提高沉降效率,促使泥沙充分沉积。

5 沉沙结构优化与应用策略

5.1 沉沙效率验证

以粒径为 0.1 mm, $v=0.2$ m/s 为例, $Q=3.534 \times 10^{-5}$ m³/s, 单级效率:

$$\eta_{11} = 1 - e^{-\frac{0.009 \times 0.01085}{3.534 \times 10^{-5}}} = 0.937$$

串联效率:

$$\eta_{\text{总}} = 1 - (1 - 0.937)^8 \approx 0.999$$

计算不同流速下的沉沙效率和模拟结果对比见表 3。

表 3 沉沙效率计算

Table 3 Calculation of sedimentation efficiency

出流流速 (v)/(m·s ⁻¹)	流量 (Q)/(m ³ ·s ⁻¹)	理论沉沙效率($\eta_{\text{总}}$)/%	模拟沉沙效率(η_s)/%	误差/%
0.2	3.53×10^{-5}	99.9	97.1	2.8
0.5	8.84×10^{-5}	97.2	94.3	2.9
0.7	1.24×10^{-4}	89.5	85.8	3.7
1.0	1.77×10^{-4}	73.8	70.2	2.6

将理论计算结果与模拟结果进行对比, 模拟得到的沉沙效率与理论值的误差均在合理范围内 ($\leq 3.7\%$), 表明模拟结果具有较高的准确性。

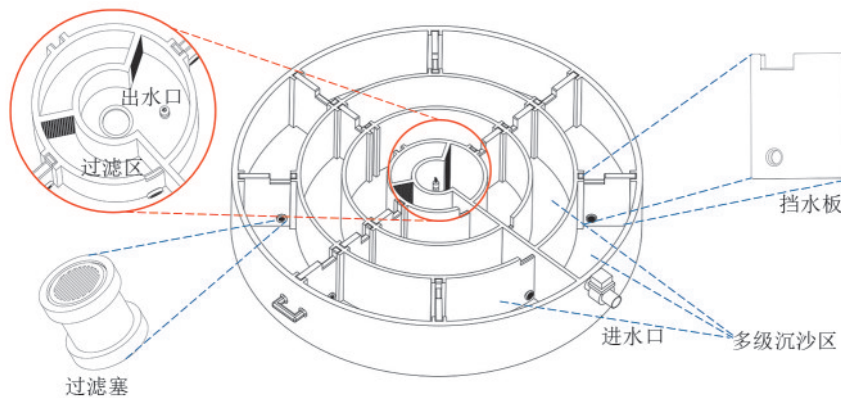


图 12 装配式沉沙装置结构优化

Fig.12 Structural optimization of assembled sedimentation device

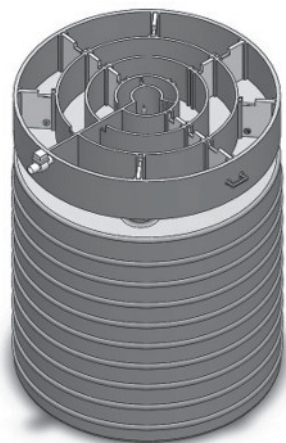


图 13 沉沙装置装配示意

Fig.13 Schematic diagram of sedimentation device assembly

5.2 沉沙结构优化

本研究针对沉沙结构中泥沙沉降不足的问题, 提出多级优化方案(图 12)。在出水口前设置含微孔陶瓷、PP 棉等介质的过滤区(微孔直径可达 10 μ m, 而泥沙中 <0.001 mm 粒径通常不足 3%~5%), 以截留未完全沉降的泥沙, 除沙率应能提升至 95% 以上。其次, 将挡水板改为可抽拉或抬升的装配式结构, 便于雨后排淤清沙, 并在其底部及相邻沉沙区挡板末端开口加装过滤塞, 形成多级连通器结构, 利用水位差驱动水流自然流向出口, 减少池底积水。此外, 在进水口前增设消能设施以降低流速, 提升沉沙稳定性, 从而实现高效沉沙与便捷维护的一体化设计。

本装置通过与聚乙烯集雨窖整体装配优化了集雨流程, 装配效果见图 13。降雨时雨水首先通过集雨面汇流, 随后经进水装置依次流经多级沉沙区和过滤区, 最终从出口排出。当雨量未超过溢流口时, 雨水将通过过滤塞进行分级过滤后汇入集雨桶; 当雨量超出时, 液位开关将联动电磁阀自动调控: 当液位超限时, 阀门关闭以降低水位; 当液位不足时, 阀门开启以维持稳定水位, 从而确保沉降过程连续可控, 并实现泥沙杂质的高效拦截和过滤后的雨水统一收集。

5.3 沉沙装置应用策略

基于黄土高原典型降雨特征与集雨系统运行需求, 本研究通过参数化分析提出沉沙装置的应用适配方案。以混凝土集雨面(径流系数 $C=0.9$)为例, 结合黄土高原 10 a 重现期、30 min 历时数据的平均降雨强度($i_a=2.0$ mm/h)及 50 m² 集雨面积^[25-26], 计算公式为:

$$v = \frac{Q}{A_0} = \frac{CiA_c}{\pi r^2} \quad (8)$$

式中: C 为径流系数, 混凝土取 0.9; i 为降雨强度, mm/h; A_c 为集雨面积, 取 50 m²; A_0 为进水口面积, m²。

计算得进水口平均流速 $v_a \approx 0.14$ m/s。结果表

明,在 0.14 m/s 工况下对粒径 ≥ 0.038 mm 的泥沙沉降效率达 95% 以上,满足黄土高原典型短历时降雨的泥沙拦截需求。

进一步分析显示,装置性能对极端降雨事件(如 1 h 降雨强度 > 30 mm)具有适应性冗余。通过增设消能设施可将入口流速限制在 0.5 m/s 以内,结合多级沉沙区与过滤模块,可确保高含沙水流(泥沙浓度 $\leq 10\%$)下的稳定运行。针对地形坡度差异导致的汇流速度波动,建议采用模块化扩展设计:坡度较大区域可串联多级沉沙结构以延长水力停留时间;平缓区域则通过调节挡水板高度优化流态分布。装置装配式结构与水位联控系统的结合,可实现雨季自动清淤与旱季维护便捷化,显著降低人工管理成本。

6 结论

1) 沉沙效率受泥沙粒径与进口流速耦合影响显著。0.1 mm 颗粒在 0.2 m/s 下沉沙效率达 98.2%,流速每升高 0.1 m/s,效率下降约 8%~10%;0.038 mm 颗粒在 0.3 m/s 时效率降至 69.6%。

2) 沉沙主要集中于第 1 沉降区($> 80\%$),低流速下前段扇环主导沉积,高流速(> 0.7 m/s)时末端涡流引发再悬浮,整体效率下降 15%~20%。分区设计有助于优化流态、集中沉积、提升清淤效率。

3) 结构优化可显著提升装置效能。过滤区与过滤塞可进一步提升装置沉沙效率;装配式挡水板通过结构抬升可提高清淤效率,配合水位自动调控系统,有助于保障集流稳定与杂质沉降效果。

参考文献:

- [1] XING Y Y, CHEN M R, WANG X K. Enhancing water use efficiency and fruit quality in jujube cultivation: A review of advanced irrigation techniques and precision management strategies [J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 307: e109243.
- [2] FENG N, HUANG Y, TIAN J, et al. Effects of a rain-water harvesting system on the soil water, heat and growth of apricot in rain-fed orchards on the Loess Plateau [J]. *Scientific Reports*, 2024, 14(1): e9269.
- [3] 张炜, 刘帅. 半干旱地区温室大棚集雨补灌设施技术 [J]. *中国科技信息*, 2023(18): 118-120.
- [4] ZHANG W, LIU S. Technology of rainwater harvesting and supplementary irrigation facilities in greenhouse in semi-arid area [J]. *China Science and Technology Information*, 2023(18): 118-120.
- [5] DAI H S, WANG R S, CHEN L, et al. Effects of different micro-irrigation methods on water use and the economic benefits of an apple-soybean intercropping system [J]. *Agronomy*, 2023, 13(4): e1143.
- [6] SUN M, GAO X R, ZHANG Y L, et al. A new solution of high-efficiency rainwater irrigation mode for water management in apple plantation: Design and application [J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 259: e107243.
- [7] DUAN J, LIU Y J, TANG C J, et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous in situ observations [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 278: e111537.
- [8] 陶洪飞, 邱秀云, 李巧, 等. 不同鳃片倾斜角下的分离鳃内部流场三维数值模拟 [J]. *水电能源科学*, 2015, 33(1): 157-161.
- [9] TAO H F, QIU X Y, LI Q, et al. Three-dimensional numerical simulation of internal flow field in gill-piece separation device under different gill-piece tilt angle [J]. *Water Resources and Power*, 2015, 33(1): 157-161.
- [10] 杨晓军, 刘飞, 吴玉秀, 等. 新疆农田节水灌溉系统首部过滤设备选型探讨 [J]. *中国农村水利水电*, 2014(5): 76-80.
- [11] YANG X J, LIU F, WU Y X, et al. A discuss on the first part filtration equipment selection in Xinjiang agricultural water-saving irrigation system [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(5): 76-80.
- [12] 戚印鑫, 耿凡坤, 李江峰, 等. 鱼鳃式沉沙池结构参数与沉沙效果试验研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2023, 21(1): 179-185.
- [13] QI Y X, GENG F K, LI J F, et al. Experimental study on structural parameters and sedimentation effect of fish gill sedimentation pool [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2023, 21(1): 179-185.
- [14] 刘宝星, 侍克斌, 李玉建, 等. 圆中环沉沙排沙过滤池水工模型试验研究 [J]. *水力发电学报*, 2013, 32(4): 82-87.
- [15] LIU B X, SHI K B, LI Y J, et al. Hydraulic model test on sediment desilting filter of circular ring [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2013, 32(4): 82-87.
- [16] YE Z W, ZHAO Y, PANG Y L, et al. Mechanisms and experimental research on sand transport and settlement of a new sand cleaning system [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2023, 48(12): 16543-16555.
- [17] YAN H X, LIPEME KOUYI G, GONZALEZ-MERCHAN C, et al. Computational fluid dynamics modelling of flow and particulate contaminants sedimentation in an urban stormwater detention and settling basin [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, 21(8): 5347-5356.

- [13] 陶洪飞,戚印鑫,杨海华,等.河水滴灌重力沉沙过滤池中浑水流场分布规律[J].排灌机械工程学报,2017,35(9):785-791.
TAO H F, QI Y X, YANG H H, et al. Study on characteristics of muddy water flow field in gravity sand sedimentation pool for drip irrigation with river water [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2017, 35(9):785-791.
- [14] DAFTARDAR A, VICHARE S. Design tables for cylindrical concrete water tank with annular footing [J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2021, 26(1):e04020067.
- [15] 樊恒辉,高建恩,吴普特,等.土壤固化剂集流面不同施工工艺比较[J].农业工程学报,2006,22(10):73-77.
FAN H H, GAO J E, WU P T, et al. Comparison of different construction techniques for the catchment area with soil stabilizer [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(10):73-77.
- [16] MA Y C, LIU Y J, TIAN L, et al. Roles of soil surface roughness in surface-subsurface flow regulation and sediment sorting [J]. Journal of Hydrology, 2023, 623: e129834.
- [17] KHANAM P N, AL ALI ALMAADEED M. Processing and characterization of polyethylene-based composites [J]. Advanced Manufacturing: Polymer and Composites Science, 2015, 1(2):63-79.
- [18] 陶洪飞,邱秀云,赵丽娜,等.水沙分离器内部流场的数值模拟[J].农业工程学报,2013,29(17):38-46.
TAO H F, QIU X Y, ZHAO L N, et al. Numerical simulation of internal flow field in gill-piece separation device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(17):38-46.
- [19] 吴泽广,张子卓,张珂萌,等.泥沙粒径与含沙量对迷宫流道滴头堵塞的影响[J].农业工程学报,2014,30(7):99-108.
WU Z G, ZHANG Z Z, ZHANG K M, et al. Influence of particle size and concentration of sediment on clogging of labyrinth channels emitters [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(7):99-108.
- [20] 葛令行,魏正英,曹蒙,等.微小迷宫流道中的沙粒沉积规律[J].农业工程学报,2010,26(3):20-24.
GE L X, WEI Z Y, CAO M, et al. Deposition law of sand in labyrinth-channel of emitter [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(3):20-24.
- [21] 闫大壮,杨培岭,任树梅.滴头流道中颗粒物运移动态分析与CFD模拟[J].农业机械学报,2007,38(6):71-74.
YAN D Z, YANG P L, REN S M. Study on dynamic analysis of particle movement in drip emitter based on CFD [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(6):71-74.
- [22] ADIN A, SACKS M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1991, 117(6):813-826.
- [23] BUCKS D A, NAKAYAMA F S, GILBERT R G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance [J]. Agricultural Water Management, 1979, 2(2):149-162.
- [24] 宁少雄,孙耀民,吴文勇,等.引黄灌区首部枢纽泥沙输移特性与流速试验研究[J].排灌机械工程学报,2022,40(4):359-365.
NING S X, SUN Y M, WU W Y, et al. Experimental study on sediment transport characteristics and velocity of first hub in Yellow River Diversion Irrigation Area [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2022, 40(4):359-365.
- [25] 解河海,郝振纯,杨红卫,等.岔巴沟流域分布式产流产沙的计算机模拟[J].系统仿真学报,2008,20(13):3393-3396.
XIE H H, HAO Z C, YANG H W, et al. Computer simulation of distributed runoff and sediment yield in Chabagou watershed [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13):3393-3396.
- [26] 翟媛.黄土高原地区降雨径流理论分析[J].人民黄河,2015,37(9):14-16.
ZHAI Y. Theoretical analysis of the rainfall and runoff in Loess Plateau area [J]. Yellow River, 2015, 37(9):14-16.