排灌机械工程学报
Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering
2020 年 6 月 June 2020 | 第 38 卷 第 6 期 Vol.38 No.6

改进直线型沉沙池在农业微灌中的运行效果


胡松可

胡松可，李文昊*，杨广，刘宁宁
（石河子大学水利建筑工程学院，新疆 石河子 832003）

摘要：针对传统直线型沉沙池存在的泥沙去除率低、适应性弱和占地面积大等缺点，基于泥沙沉淀特性、水流特性和泥沙在池内的分布特征，对引流段和溢流堰进行改进；结合涡流排沙原理，在溢流堰后部设置涡流管，实现双重沉沙.通过搭建物理模型，测试沉沙池不同点位水流流速、泥沙粒径及质量分数，研究双重沉沙池泥沙沿程变化规律及沉沙率.结果表明：一重沉沙主要为推移质泥沙；二重沉沙主要为悬移质泥沙，相对于无溢流槽和涡管其沉沙率分别提高了 12.70%和 18.80%；系统总的沉沙率可达到 96.88%以上，极大提高了池内泥沙的沉沙率，充分说明改进后的沉沙池对改善泥沙沉降效果的作用显著.研究结果可为微灌工程的大规模推广应用提供一定的技术支撑.

关键词：沉沙池；含沙量；调流齿；溢流槽；涡流管
中图分类号：S277.9；TV15　　**文献标志码**：A　**文章编号**：1674-8530(2020)06-0626-06
Doi：10.3969/j.issn.1674-8530.19.0215

胡松可，李文昊，杨广，等. 改进直线型沉沙池在农业微灌中的运行效果[J]. 排灌机械工程学报，2020，38(6)：626-631.
HU Songke，LI Wenhao，YANG Guang，et al. Operation effect of improved straight-line desilting basin in agricultural micro-irrigation[J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering(JDIME)，2020，38(6)：626-631.(in Chinese)

Operation effect of improved straight-line desilting basin in agricultural micro-irrigation

HU Songke，*LI Wenhao**，*YANG Guang*，*LIU Ningning*
(College of Water & Architectural Engineering，Shihezi University，Shihezi，Xinjiang 832003，China)

Abstract：Aiming at the disadvantages of traditional straight-line desilting basin，such as low sediment removal rate，weak adaptability and large footprint area，based on sediment deposition cha-racteristics，flow characteristics and sediment distribution characteristics in the tank，the drainage section and overflow weir were improved. Combined with the principle of eddy current sediment ejection，vortex tubes were set at the back of overflow weir to achieve double desilting. A physical model was built to test the flow velocity，sediment grain size and concentration at different points of the desilting basin，and to study the sediment variation law by distance and the underflow rate of the double desil-ting basin. The results show that single trial sediment is mainly bed load sediment. The second trial sediment is mainly suspended sediment load，which is increased by 12.70% and 18.80% compared with the desilting basin without spillway trough and vortex tube. The total bed cleaning efficiency of the system can reach more than 96.88%，which greatly improves the underflow rate of sediment in the pool. It fully shows that the improved desilting basin can significantly improve the sediment settling effect，and the

收稿日期：2019-08-22；**修回日期**：2019-11-06；**网络出版时间**：2020-05-27
网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20200526.1537.022.html
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFC040320503)
第一作者简介：胡松可(1993—)，男，河南商水人，硕士研究生(304239525@qq.com)，主要从事泥沙动力学研究.
通信作者简介：李文昊(1988—)，男，内蒙古赤峰人，实验师(lwh8510012@163.com)，主要从事节水灌溉理论与技术研究.

research results can provide some technical support for the large-scale application of micro-irrigation engineering.

Key words: desilting basin; sediment content; regulating tooth; spillway trough; vortex tube

新疆是中国 70%以上棉花的生产基地，但区域内年均降水量仅为 147 mm，蒸降比达到 10∶1，是典型的干旱、半干旱绿洲灌溉农业区，80%以上的农田依靠灌溉来完成耕作.新疆的农田灌溉水有效利用系数为 0.532，仍低于发达国家的 0.837[1].为了提高灌溉水利用率，新疆农田多采用微灌工程，但由于山溪性河流含泥沙量大，入管易堵塞微灌系统.沉沙池作为清除灌溉水源泥沙的水工建筑物，对于水质净化起到了关键性作用.沉沙池发展至今，按几何类型可分为直线型、曲线型、漏斗型、混合型和其他类型；按运行方式可分为冲洗式、机械清淤式和淤积式等，不同类型的沉沙池有不同的沉沙和排沙特点[2].

直线型沉沙池已成为中国灌溉水源泥沙处理的主流，具有结构简单、造价低、管理方便、适应性强等优点，但也存在水头损失大、冲沙需断流、沉沙效果不稳定、耗时长等缺点[3].直线型沉沙池的沉沙效果除了受流量的影响外，还与池中颗粒级配、结构形式等因素有关[4].文中基于水力特性、泥沙分布和沉淀特性对传统的直线型沉沙池进行改进，提出一种可同时去除推移质和悬移质泥沙的新型双重沉沙池，即在沉沙池的引流段增设开孔调流齿，在一重沉沙池尾部的溢流堰上增设锯齿状溢流槽，在后设置人字形涡流管，实现二重沉沙.文中主要分析不同来水流量对改进直线型沉沙池沉淀效果的影响，其大大降低后续微灌设备的工作负担，减少微灌系统的堵塞现象，提高灌溉水源水质，达到经济效益持续发展的目的.

1　材料和方法

1.1　理论基础

文中来水流量采用直角三角堰流量进行监测和控制，流量计算公式[5]为

$$Q = 1.343H^{2.47}, \tag{1}$$

式中：Q 为模拟的渠道来水流量，m^3/s；H 为直角三角形溢流堰上的水头高度，m.

泥沙去除率是衡量沉沙池工作性能的主要指标.计算泥沙去除率的公式[6]为

$$R = \frac{C_1 - C_2}{C_1} \times 100\%, \tag{2}$$

式中：R 为泥沙去除率；C_1 为沉沙池来水水源的含沙量，g/L；C_2 为沉沙池出口处的含沙量，g/L.

1.2　模型设计

试验模型根据新疆某生产建设兵团沉沙池原型按 1∶3 比例修建.模型全长 15.0 m，其中引流段长 5.0 m，宽 1.0 m，深 0.6 m.渐变段长 1.0 m，工作段长 8.0 m，宽 2.0 m，尾部高 0.7 m.沉沙池引流段和渐变段坡度为 5‰，工作段坡度为 1%，如图 1 所示.

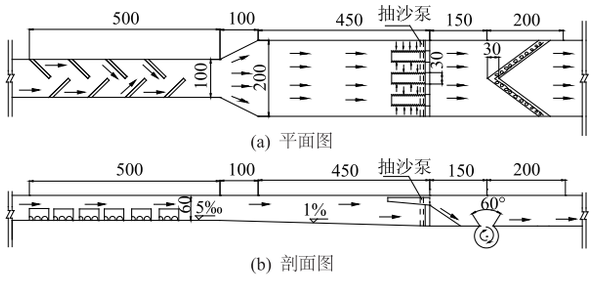


图 1　改进直线型示意图(单位：cm)
Fig.1　Improved linear diagram

1.3　改进措施

1.3.1　增设开孔调流齿

传统直线型沉沙池水流直接经渐变段进入工作段，造成水流剧烈紊动，流场分布不均匀.为改善水流条件，对传统沉沙池增设引流段，并在引流段加设开孔调流齿，如图 2 所示.

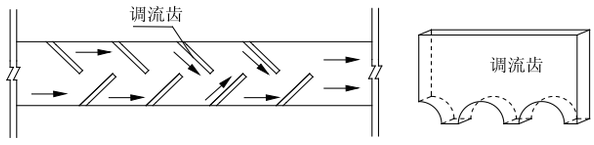


图 2　调流齿示意图
Fig.2　Schematic diagram of flow regulating tooth

主流直接顶冲在调流齿上，然后通过连续的弯曲消能向下游运行，实现总工程不变，最大限度地降低流速.调流齿阻挠较大动能的水流和改变水流运动方向，减缓运动趋势，迫使来水动能和紊动强度降低，降低水流流速，使沉沙池工作段更有利于泥沙的沉降.针对调流齿前泥沙淤积问题，文中对底坡进行了坡度和调流齿开孔设计，使淤积的泥沙能够随水流通过孔洞向下移动.开孔调流齿在一定程度上还增加水流和泥沙运动的迹线长度，起到进一步消能的作用，使水流经过调流板齿后在整个沉沙

池工作段内形成均匀的流态.

1.3.2 增设锯齿状溢流槽

由于池内存在上稀下浓的现象,即越靠近水表面,水流含沙量越小,且相应粒径较小,因此,为了进一步提高沉沙池的沉沙率,需要尽可能取得表层水.本模型在溢流堰上增设锯齿状溢流槽,降低了溢流水流高度,取得表层水,从而大大提高了沉沙池的沉沙率,如图3所示.

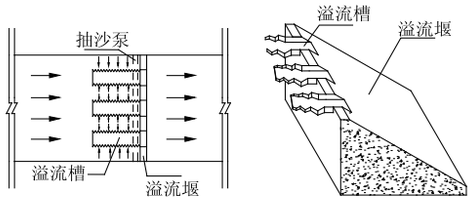


图3 锯齿状溢流槽示意图
Fig.3 Schematic diagram of serrated spillway trough

1.3.3 人字形涡流管

经过第一重除沙后,水流仍含有大量的悬移质泥沙,而传统直线型沉沙池并不能将其除去.本模型利用涡流管原理,设置了人字形涡流管(见图4),大幅度减少涡管堵塞,提高了涡管的排沙效率.涡管利用离心力原理使泥沙与水分离,当涡管两端排沙闸门开启时,利用螺旋流原理实现自动排沙,优化了冲沙设施,实现了二重沉沙.

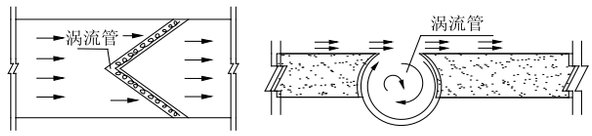


图4 人字形涡流管示意图
Fig.4 Schematic diagram of herringbone vortex tube

1.4 试验方法

文中设置了S1—S7共7个纵向断面(如图5所示),每个纵向断面设置3个垂向测点,根据CYS-Ⅲ型测沙颗分仪测试仪探头大小,含沙量垂向等间距10 cm布置测点,顶端测点位于表面5 cm处.文中采用天然河沙,参考钱宁等著的《泥沙运动力学》[7],本次试验中定义推移质泥沙为0.05 mm以上,悬移质为0.05 mm以下.本次试验主体结构采用混凝土制作,调流齿和溢流槽使用亚力克板预制,涡流管使用PVC管制作.在10,15 L/s两组流量变量条件下,分别对有无调流齿、溢流槽和涡流管条件下沉沙池的沉沙率进行对比分析.

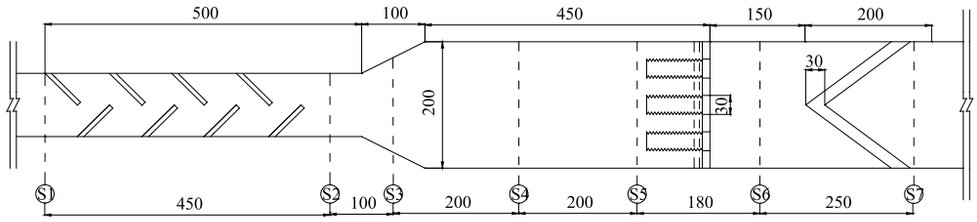


图5 试验点断面布置平面图(单位:cm)
Fig.5 Plan view of test points

2 试验结果与分析

2.1 开孔调流齿对池内泥沙沉降的影响

通过监测改进直线型沉沙池沿程含沙量的变化,判断沉沙效率.试验分别设置了有无调流齿对水流含沙量的影响,并取各个断面的平均含沙量S_0作为代表值.当来水流量为15 L/s时,得到的试验数据如图6所示,其中C_1为来水初始含沙量,l为距离渠道位置.

从图6可得,池内含沙量总体呈现递减趋势,距离调流齿越远,含沙量越低,沉沙效果越好.从池内各断面含沙量的变化可得到,无调流齿的各断面含沙量的沉降率小于有调流齿的沉降率,表明调流齿消能效果显著,能够降低水流流速,促进池内泥沙沉淀.在S3—S4断面,有调流齿的含沙量下降了54.11%,无调流齿的仅为28.64%,调流齿降低了流速,有利于池内泥沙提前沉淀.在沉沙池的后半部,有调流齿的沉沙率趋于稳定,无调流齿的则以某一趋势继续沉淀,表明调流齿能够稳固流态,形成大颗粒泥沙在沉沙池前半部开始沉淀,后半部沉淀小颗粒泥沙.在S7断面有无调流齿的含沙量均值分别为3.07,4.39 g/L,调流齿降低了水流的含沙量.沿程对比发现,有调流齿的沉沙池沉沙量比无调流齿的高10.38%.

2.2 锯齿状溢流槽对泥沙沉降的影响

在改进直线型沉沙池工作段后的溢流堰区域增设锯齿状溢流槽,增加了溢流堰的有效长度,降低了溢流堰的水头.为验证溢流槽对水流含沙量的影响,文中在来水流量为15 L/s的情况下,测得沿

程水流含沙量试验数据，如图 7 所示.

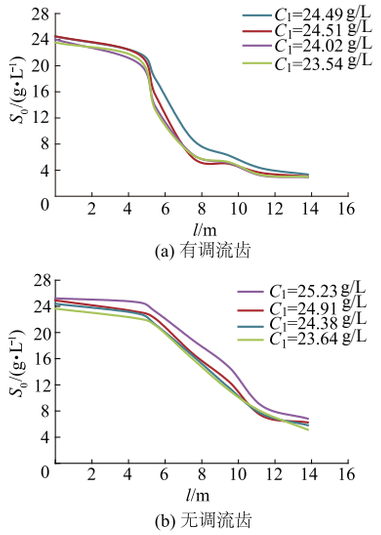


图 6　开孔调流齿含沙量沿程变化

Fig. 6　Variation of sediment concentration along course at flow regulating teeth

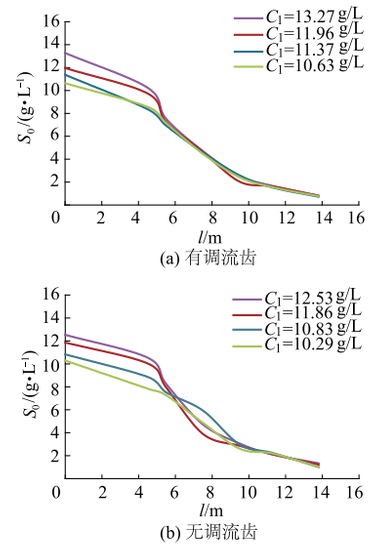


图 7　锯齿状溢流槽含沙量沿程变化

Fig. 7　Sediment content changes along course at zigzag overflow channel

通过图 7 对比发现，增设溢流槽后，泥沙分布规律显著，沿程含沙量的变化趋于稳态. 根据 S3—S7 断面的沿程含泥沙量折线的曲率，增设溢流槽的沿程含沙量降低的速率比无溢流槽高，当无溢流槽时池内含泥沙量波动较大，不利于泥沙沉降；当有溢流槽时，池内流场变化程度较小，泥沙可实现稳步沉淀. 根据末端的含沙量，有溢流槽的含沙量均值为 0.78 g/L，无溢流槽均值为 1.25 g/L，通过 S7 与 S1 断面含沙量的对比，有溢流槽的泥沙沉沙率约 94. 03%，无溢流槽的泥沙沉沙率约 81.33%.

2.3　涡流管对泥沙沉降的影响

根据水流和泥沙特性，设计了人字形涡流管，水流在涡管内产生螺旋流和离心力作用，泥沙将在涡管内以螺旋的形式排出管外，即达到涡管自动排沙的目的. 由于前部已经经过第一重沉淀，所以仅有通过表层水的小颗粒泥沙被带入涡流管内，试验数据如表 1 所示，表中 d 为泥沙粒径，R 为泥沙去除率.

表 1　不同粒径的泥沙沉降效果

Tab.1　Sedimentation effects of different particle sizes

d/mm	R/%		
	无涡流管	有涡流管	增幅
<0.05	68.91	88.51	28.44
[0.05,0.10)	76.34	92.48	21.14
[0.10,0.15)	83.12	97.27	17.02
[0.15,0.25)	86.84	99.13	14.15
[0.25,0.50]	88.25	99.92	13.22

通过涡流管对不同粒径的泥沙沉淀效果分析可得，随着粒径由大到小，除沙率呈现递减的趋势. 增设涡流管后，对于 0.05 mm 以上泥沙颗粒的除沙率可达 96.00%以上，池内的水流流态较为均匀，没有出现泥沙翻滚和偏流现象. 对于小于 0.05 mm 的泥沙颗粒去除率提高了 28.44%，极大地降低了泥沙的出池率，改善出池水质. 针对小于 0.50 mm 的泥沙颗粒，有涡流管比无涡流管对泥沙去除率提高了 18.80%.

2.4　泥沙颗粒级配和泥沙含量的沿程变化

当水流经过引流段时，水流动能经过调流齿消能，流速降低，部分大颗粒沉降的泥沙随水流向下运动，小颗粒泥沙在沉沙池中部和尾部进行沉降. 由于泥沙颗粒大小的不同，池内泥沙出现分层现象. 池内不同断面颗粒级配和泥沙含量如图 8，9 所示，图中 ω 为小于某粒径的泥沙质量分数.

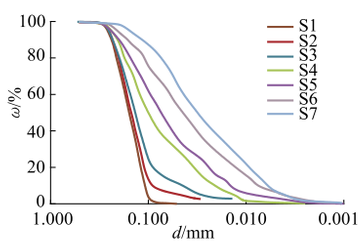


图 8　新型沉沙池各断面颗粒级配曲线图

Fig.8　Grain grading curve of each section of new type grit chamber

从图 8 可得，池内泥沙颗粒粒径主要在 0.001～0.500 mm，且泥沙在池内呈现一定的分布规律：0. 010 mm 以上的泥沙主要沉淀在 S5 断面以前，泥

沙沉淀比达到80.24%以上;0.010 mm以下的泥沙颗粒主要在涡管内沉淀,说明涡流管清除小颗粒泥沙效果显著.通过对比池内S1—S2断面发现,引流段有部分泥沙沉淀,但在试验中并没有发现引流段有明显的淤积,说明引流段结构优化有利于上层泥沙颗粒沉淀,在底部水流和结构作用下向下移动.

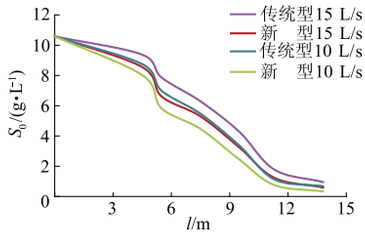


图9　2种沉沙池沿程含沙量变化

Fig.9　Variation of sediment concentration along two desilting basins

沿流动方向,S6之前各断面处粒径大于0.050 mm的推移质泥沙占比逐渐减小,粒径大于0.050 mm泥沙沉淀量占总量的85%以上,总沉沙率达到90%以上;而粒径小于0.050 mm的悬移质泥沙超过75%以上通过溢流堰向下流动.结合表1可得,加涡流管前,悬移质沉降率仅为68.91%;加设涡流管后,悬移质沉降率得到显著提升,可达88.51%.

本试验设计了2个流量级对同一泥沙含量的新旧沉沙池进行组合试验.由图9可得,不同结构类型和来水流量条件对沉沙池沉淀率都有一定的影响.在一定来水流量下,每一断面新型沉沙池的含沙量均小于传统型沉沙池,15 L/s来水流量下,在S7断面检测到新型沉沙池比传统型沉沙池的沉沙量提高了38.21%,沉沙效果显著.在同一类型不同来水流量下,随来水流量的降低,新旧沉沙池沉沙率在15 L/s流量下提升了28.43%,在10 L/s流量下提升了44.07%,说明来水流量影响沉沙率,来水流量越小,沉沙效率越高.

3　讨　论

传统沉沙池主要沉淀推移质泥沙,对悬移质去除率较低.文中利用水力学、结构和泥沙分布特性改进沉沙池,从而极大地提高了悬移质泥沙的去除率.

众多学者[8-10]提出可在池内入口处加设挡板,急速降低水流动能,但存在板前泥沙淤积问题.文中研究显示,引流段调流齿的设计能有效消除来水水流的动能,使泥沙沉淀率提高到87.28%,并有效解决了调流板前泥沙淤积问题,前部沉淀的少量泥沙随底部水流经过开孔向下滚动进入沉淀池内.

宗全利等[11]提出增加沉沙池中溢流堰的长度,可降低出池水流含沙量.文中试验增设锯齿状溢流槽,降低了溢流堰的过水单宽量和取水深度,取得表层水,结合试验分析结果,溢流槽的设计增加了溢流堰的有效长度,提高了15.62%的沉沙率,这与前人研究结论相同.

刘焕芳等[12]和GOTO等[13]都对涡管内的水流运动情况进行了水力特性分析,利用涡管分流的特性,使用较小的分流比除去较多的悬移质泥沙.文中设计人字形涡流管,降低涡流运动路径,更有利于管内螺旋流的产生,可以更加充分地利用好螺旋流和离心力原理,有效降低了对来水流速的要求,针对悬移质泥沙提升了28.44%的沉沙率.

综上,沉沙池内含沙量受流速和结构的影响比较大,改进直线型沉沙池随着流速增加,出口的含沙量也会相应地增加,但相对于传统直线形沉沙池则增加量较小,说明新型沉沙池结构的改进对水流挟沙力和沿程含泥沙量的降低起到关键性作用,进水流量与调流齿、溢流槽长度和涡流管呈正相关性.

4　结　论

新型沉沙池能够有效地处理微灌系统中的泥沙沉积问题,为农业发展提供有效措施.通过本次沉沙池模型试验研究和理论分析,得到池中含沙量的沿程变化规律和颗粒的沉淀区域.

1)在引流段设置开孔调流齿,对来水起到有效的消能作用,明显降低流速,有调流齿的沉沙池比无调流齿的沉沙量提高10.38%,并在引流段无局部泥沙沉淀.

2)增设锯齿状溢流槽,最大限度增加溢流堰的有效长度,降低出池水位取水高度,尽量取得表层水,降低出池水流含泥沙量,使池内泥沙的沉沙率基本维持在94.03%.

3)沉沙池后部设置人字形涡流管,有效提高了悬移质泥沙去除率,最大可达到28.44%,并实现了二重沉沙.

4)新型沉沙池相对于传统类型能够有效地提高沉沙率达28.43%以上,具有明显的沉沙作用,在10 L/s时,出口含泥沙量能达到0.34 g/L,最大沉沙率可达到96.88%,进一步说明新型沉沙池具有良好的运行效果.

参考文献(References)

[1] BAHINIPATI C S, VISWANATHAN P K. Incentivizing resource efficient technologies in India: evidence from diffusion of micro-irrigation in the dark zone regions of Gujarat [J]. Land use policy, 2019, 86:253-260.

[2] 陈治锋. 圆中环沉沙排沙池的设计方法及结构优化研究 [D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2016.

[3] SINHA S, SINGH A P. Sediment removal efficiency estimation criteria for modern day desilting basins [J]. ISH journal of hydraulic engineering, 2019, 25(1): 1426057.

[4] 戚印鑫, 耿凡坤, 刘亚丽, 等. 重力沉沙过滤池模型试验研究 [J]. 泥沙研究, 2016(6): 19-24.
QI Yinxin, GENG Fankun, LIU Yali, et al. Model test of gravity sediment filter [J]. Sediment research, 2016(6): 19-24.(in Chinese)

[5] 赵天龙, 陈生水, 付长静, 等. 堰塞坝泄流槽断面型式离心模型试验研究 [J].岩土工程学报, 2017, 39(10): 1943-1948.
ZHAO Tianlong, CHEN Shengshui, FU Changjing, et al. Centrifugal model test research on section type of discharge chute of dam with weir plug [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2017, 39 (10): 1943-1948. (in Chinese)

[6] 王文鑫. 新型双层平流沉淀池构造与流场特性研究 [D].石河子:石河子大学, 2017.

[7] 钱宁,万兆惠.泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.

[8] 陈秋良,巫世晶,李小勇,等. 基于气力提升技术的河道泥沙输送试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2018, 36(5):397-403.
CHEN Qiuliang, WU Shijing, LI Xiaoyong, et al. Experimental study on sediment transport in river channel based on pneumatic lifting technology [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering, 2018, 36(5): 397-403.(in Chinese)

[9] 吴均, 宗全利, 刘焕芳, 等. 沉沙池中调流板对水流调节作用的试验研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2007, 18(5): 6-9.
WU Jun, ZONG Quanli, LIU Huanfang, et al. Experiment study of flow's adjusting with flow board in sediment basin[J]. Journal of water resources and water engineering, 2007, 18(5): 6-9.(in Chinese)

[10] YU P, HE Y. Study on treatment of secondary tailwater of wastewater treatment plant by new reinforced flocculation sedimentation [J]. IOP conference, 2018, 394(5):052035.

[11] 宗全利, 刘焕芳, 汤骅, 等. 溢流槽对沉沙池溢流堰长度的影响分析研究 [J]. 泥沙研究, 2011(3): 67-72.
ZONG Quanli, LIU Huanfang, TANG Hua, et al. Analysis and study on the influence of overflow tank on the length of overflow weir in sedimentation tank [J]. Sediment research, 2011(3): 67-72. (in Chinese)

[12] 刘焕芳, 张开泉. 涡管排沙工程设计中的几个控制条件[J].水利水电技术, 1999(S1): 5-7.
LIU Huanfang, ZHANG Kaiquan. Several control conditions in the design of vortex tube desilting engineering [J]. Water conservancy and hydropower technology, 1999(S1): 5-7. (in Chinese)

[13] GOTO S, SAITO Y, KAWAHARA G . Hierarchy of antiparallel vortex tubes in spatially periodic turbulence at high Reynolds numbers [J]. Physical review fluids, 2017, 2(6): 064603.

(责任编辑　徐云峰)