

## 供排水企业运行及管理成果专栏

孙贤鹏,包苏俊,王萌,等. 基于示踪试验和数值模拟的二沉池翻泥问题分析[J]. 净水技术, 2025, 44(2): 198-207,215.

SUN X P, BAO S J, WANG M, et al. Analysis of sludge flipping problem in secondary sedimentation tank based on tracer tests and numerical simulation [J]. Water Purification Technology, 2025, 44(2): 198-207,215.

## 基于示踪试验和数值模拟的二沉池翻泥问题分析

孙贤鹏<sup>1,2,\*</sup>,包苏俊<sup>3</sup>,王萌<sup>2,4</sup>,汪剑<sup>1,2</sup>,刘旭阳<sup>5</sup>,唐明跃<sup>6</sup>,顾瑞环<sup>4</sup>

(1. 青岛市排水运营服务中心,山东青岛 266000;2. 青岛市海润自来水集团有限公司,山东青岛 266000;3. 上海市政工程设计研究总院<集团>有限公司,上海 200092;4. 青岛水务集团有限公司,山东青岛 266000;5. 青岛百发海水淡化有限公司,山东青岛 266041;6. 青岛水务集团环境能源有限公司,山东青岛 266000)

**摘要** 【目的】为了解决冬季低温条件下污水处理厂因维持较高污泥浓度而导致的二沉池翻泥问题,【方法】研究针对实际周边进水、周边出水辐流式二沉池,在不同好氧池污泥浓度和二沉池表面负荷条件下进行了示踪试验,并采用计算流体力学(CFD)方法对不同裙板深度条件下二沉池内的水力流态进行了数值模拟。【结果】研究结果显示,在表面负荷为 $0.92 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 的条件下,当好氧池污泥质量浓度为 $5\,500 \text{ mg/L}$ 时,各测试点位处出水的悬浮颗粒物(SS)较高,并且二沉池内存在一定程度的短流区域;当好氧池污泥质量浓度为 $4\,300 \text{ mg/L}$ 时,虽然测试点位处出水的SS满足滤布滤池进水要求,但二沉池内短流问题反而更加严重。进一步研究表明,保持好氧池污泥质量浓度为 $5\,500 \text{ mg/L}$ 不变,降低表面负荷至 $0.82 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,各测点出水SS满足后续深度处理进水要求,且二沉池内短流问题得到缓解,但处理水量无法达到设计要求。针对上述问题,使用CFD数值模拟来评估增加二沉池挡水裙板深度对缓解二沉池翻泥问题的效果。【结论】结果表明,在好氧池污泥质量浓度为 $5\,500 \text{ mg/L}$ 条件下,当二沉池挡水裙板深度由 $0.6 \text{ m}$ 延长至 $1.2 \text{ m}$ ,对进水冲击的消能效果明显,水流触底后的折返向上角度变小,降低了短流的可能性,可起到不降低工艺进水量而解决二沉池翻泥问题的效果。研究结果对周进周出二沉池的运行和改造提供了经验借鉴和理论依据。

**关键词** 周进周出辐流式二沉池 示踪试验 表面负荷 翻泥 计算流体力学(CFD)

**中图分类号:** X703 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-0177(2025)02-0198-11

**DOI:** 10.15890/j.cnki.jsjs.2025.02.023

## Analysis of Sludge Flipping Problem in Secondary Sedimentation Tank Based on Tracer Tests and Numerical Simulation

SUN Xianpeng<sup>1,2,\*</sup>, BAO Sujun<sup>3</sup>, WANG Meng<sup>2,4</sup>, WANG Jian<sup>1,2</sup>, LIU Xuyang<sup>5</sup>, TANG Mingyue<sup>6</sup>, GU Ruihuan<sup>4</sup>

(1. Qingdao Drainage Operation Service Center, Qingdao 266000, China;

2. Qingdao Hairun Water Supply Group Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

3. Shanghai Municipal Engineering Design Institute <Group> Co., Ltd., Shanghai 200092, China;

4. Qingdao Water Group, Co., Ltd., Qingdao 266000, China;

5. Qingdao Baifa Seawater Desalination Co., Ltd., Qingdao 266041, China;

6. Qingdao Water Group Environment Energy Co., Ltd., Qingdao 266000, China)

**Abstract** [Objective] To address the issue of sludge blanket disturbance in secondary sedimentation tanks caused by maintaining a high sludge concentration at wastewater treatment plants(WWTPs) under low winter temperatures, [Methods] this study focused on the actual peripheral influent and peripheral effluent radial-flow secondary sedimentation tank, conducting tracer experiments under

[收稿日期] 2024-05-08

[通信作者] 孙贤鹏(1986—),男,硕士,高级工程师,研究方向为水处理技术,E-mail:xianpengandyou@163.com。

different system sludge concentrations and secondary sedimentation tank surface load conditions, and using computational fluid dynamics (CFD) methods to numerically simulate the hydraulic flow state in secondary sedimentation tank under different skirt depth conditions. [Results] The results showed that under the condition of a surface load of  $0.92 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , when the system sludge mass concentration was  $5\,500 \text{ mg/L}$ , the suspended solid (SS) values of the water at various monitoring points were high, and there was a certain degree of short-circuiting in secondary sedimentation tank; when the system sludge mass concentration was  $4\,300 \text{ mg/L}$ , although the SS values of water at various monitoring points meet the requirements for influent to the filter tank, the short-circuiting problem in secondary sedimentation tank was more serious. Further research showed that keeping the system sludge mass concentration at  $5\,500 \text{ mg/L}$  constant, and reducing the surface load to  $0.82 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , the SS values of water at all monitoring points meeting the influent requirements for subsequent advanced treatment, and the short-circuiting problem in secondary sedimentation tank was alleviated, but treatment volume could not meet the design requirements. To address the aforementioned issues, CFD numerical simulation was used to evaluate the effect of increasing the depth of the water-blocking skirt in secondary sedimentation tank on alleviating the problem of sludge turnover. [Conclusion] The results show that under the condition of a system sludge mass concentration of  $5\,500 \text{ mg/L}$ , when the depth of the secondary sedimentation tank's water-blocking skirt is extended from  $0.6 \text{ m}$  to  $1.2 \text{ m}$ , the energy dissipation effect of the influent shock was significant, the upward angle of the water flow after touching the bottom was reduced, which reduces the possibility of short-circuiting, and can solve the sludge resuspension problem in secondary sedimentation tank without reducing the process influent volume. The research results provide experience and theoretical basis for the operation and reconstruction of peripheral week-in week-out radial-flow secondary sedimentation tank.

**Keywords** peripheral-in/out radial-flow secondary sedimentation tank tracer test surface loading sludge turning computational fluid dynamics (CFD)

周进周出辐流式二沉池以其沉降历时短、耐冲击能力强、水力负荷高、沉淀区容积利用率高等特点而被广泛应用。与中进周出辐流式二沉池<sup>[1]</sup>相比,其设计表面负荷相比可提高1倍<sup>[2]</sup>。然而,周进周出辐流式二沉池的配水渠底部配有布水管,与之相邻的出水渠可能在污泥混合液通过配水渠进入二沉池时产生冲击<sup>[3-4]</sup>,当二沉池表面负荷过大或配水渠配水不均匀时,污泥可能会直接从出水堰流出,引发短流、翻泥等问题<sup>[5]</sup>。在污水处理厂排放标准下日益加严的背景下<sup>[6]</sup>,尤其在冬季低温条件时期,上述问题将会加大后续过滤单元的处理负担,并提高出水悬浮固体(SS)超标的风险<sup>[7-8]</sup>。

针对周进周出辐流式二沉池出现的短流和翻泥问题,国内外学者进行了深入研究。魏迅等<sup>[9]</sup>在无锡芦村污水处理厂进行了二沉池水力性能的测试,发现当二沉池表面负荷提升后,由于二沉池的污泥层无法保持稳定,从而引发了翻泥现象。李鹏等<sup>[10]</sup>利用污水厂内中水系统作为冬季应急期间的二沉池,以降低现有二沉池的表面负荷,同时调整中水系统运行参数确保其出水达标,保障了Y污水处理厂的稳定运行。陈斌等<sup>[11]</sup>则利用两相流非定常数值计算对周进周出矩形沉淀池中的配水孔流量进行仿真模拟,并通过优化配水孔的布置方式,找到最佳布

置参数并在实际场景中进行应用。朱贻鸣等<sup>[12]</sup>采用计算流体力学(CFD)对二沉池的流场变化及污泥质量浓度分布情况进行了二维瞬态数值模拟,比较了不同负荷、不同回流比对二沉池内部的流场变化和污泥质量浓度分布的影响,对二沉池进口部分设计参数应结合回流比进行了适当的调整。Gao等<sup>[13]</sup>采用CFD方法研究风向对周进周出二沉池处理效果的影响,并成功减小了刮风天气下二沉池翻泥的风险。周雷<sup>[14]</sup>对超高污泥浓度混合液二沉池的部分结构参数进行了研究,通过调整二沉池池底坡度、挡水裙板深度、挡水裙板与池壁距离以及折流板与配水槽配水短管口距离,优化了沉淀效果,确定了二沉池的最优设计结构。然而,对实际运行的周进周出辐流式二沉池进行示踪试验的报道<sup>[15]</sup>仍然较少,许多针对二沉池的数值模拟研究规模停留在中试阶段,其研究结果对实际生产的指导价值有限。

研究选择青岛某污水处理厂的周进周出辐流式二沉池为研究对象,在不同好氧池污泥浓度和二沉池表面负荷条件下,开展了二沉池示踪试验和出水SS测试。通过观察出水示踪剂浓度变化和出水SS浓度变化,评估了二沉池的短流和翻泥状态。同时,基于周进周出辐流式二沉池示踪试验结果所反映出的问题,应用ANSYS Fluent软件模拟了不同二沉池

裙板深度条件下二沉池模拟断面的流畅分布,评估增加二沉池挡水裙板深度对缓解二沉池翻泥问题的可行性。研究的结果为冬季低温环境下周进周出辐流式二沉池的运行提供了方法参考,并为周进周出辐流式二沉池的改造工作提供了理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验对象简介

#### 1.1.1 青岛某污水处理厂

青岛某污水处理厂三期采用改良缺氧-缺氧-好氧(AAO)+移动床生物反应器(MBBR)工艺,设计水量为  $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设计进水化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ )、五日生化需氧量( $\text{BOD}_5$ )、SS、氨氮、总氮(TN)、总磷(TP)的质量浓度分别为 950、500、750、58、80、13 mg/L,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。在冬季常规工艺运行条件下,实际处理水量为  $4.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,系统的内回流比为 200%,外回流比为

100%,好氧池污泥质量浓度保持为 5 500 mg/L。

#### 1.1.2 周进周出辐流式二沉池

本试验以青岛某污水处理厂三期的周进周出辐流式二沉池作为研究对象。该二沉池直径为 36 m,侧壁池深为 4.57 m,底坡坡度为 0.005,设计表面负荷为  $1.2 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。来自生化池的活性污泥混合液经配水井配水进入二沉池的配水渠道。配水渠道内部配有 96 个配水孔,由入水管处逐渐变窄。二沉池采用重力排泥方式,刮泥机采用中心传动单管吸泥机。二沉池的平面图、示踪剂投加点和取样点布置如图 1 所示。由图 1(a)可知,示踪剂投加在二沉池配水渠进水始端,1#~4#取样点设置于出水溢流堰处,5#取样点设置于二沉池出水口;由图 1(b)可知,6#-1、6#-2 取样点分别设置于距离二沉池圆周 3 m 的水下 0.5 m 和 2 m 对应的位置;相应地,7#-1、7#-2 取样点分别设置于距离二沉池圆周 15 m 的水下 0.5 m 和 2 m 对应的位置。试验工况如表 1 所示。

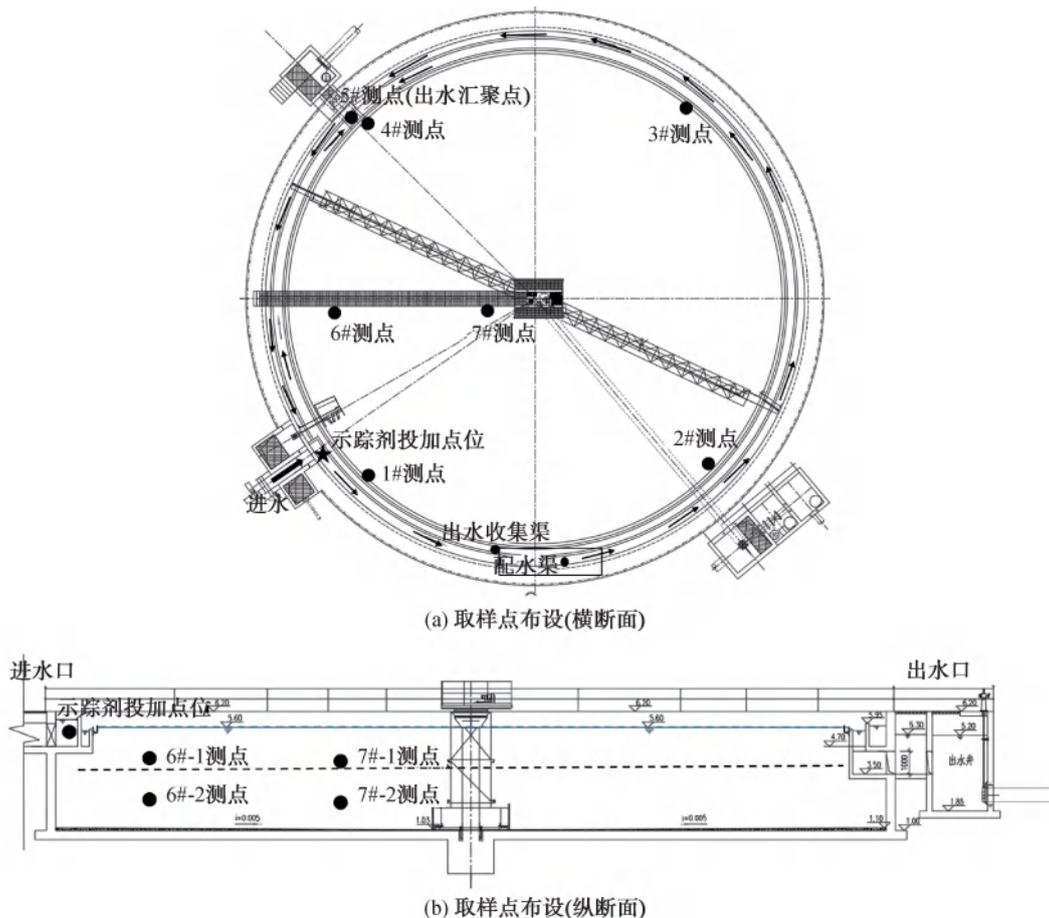


图 1 周进周出辐流式二沉池平面图及取样点设置

Fig. 1 Plan and Sampling Point Setup of Peripheral-In/Out Radial-Flow Secondary Sedimentation Tank

表 1 试验工况  
Tab. 1 Test Conditions

工况	表面负荷/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	污泥质量浓度/ ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	水温/ $^{\circ}\text{C}$
工况一	0.92	5 500	8
工况二	0.92	4 300	12
工况三	0.82	5 500	7

## 1.2 二沉池示踪试验方法

### 1.2.1 仪器与试剂

示踪试验采用的仪器为 UVmini-1240 紫外分光光度计,试剂为荧光素钠。

荧光素钠母液的配制:准确取 0.150 6 g 荧光素钠固体,采用去离子水溶解后转入 200 mL 的容量瓶中,用去离子水定容至刻度线,摇匀后备用。此溶液中荧光素钠的质量浓度为 0.752 5 g/L。通过对母液进行稀释得到荧光素钠标准系列溶液。

乙酸钠溶液配制:称取 68.0 g 固体乙酸钠,用 500 mL 去离子水溶于广口瓶后得到 1 mol/L 乙酸钠溶液。

### 1.2.2 测定方法

移取 5~10 mL 荧光素钠溶液于 25 mL 比色管中,加入 2 mL 乙酸钠溶液,用去离子水定容至刻度线并摇匀。用 5 cm 比色皿,在波长为 485 nm 条件下测量荧光素钠溶液的吸光度<sup>[16]</sup>。

### 1.2.3 荧光素钠作为示踪剂的可行性分析

于生物池取适量的活性污泥于 5 L 烧杯中,另一个烧杯加入等量的清水,在 2 个烧杯中加入等量、相同浓度的荧光素钠溶液,在 0、30、60、180 min 时取样,测得上清液的荧光素钠质量浓度分别为 0.033 4、0.033 0、0.029 0、0.034 4  $\mu\text{g}/\text{mL}$  和 0.033 0、0.033 2、0.032 8、0.032 4  $\mu\text{g}/\text{mL}$ 。这表明荧光素钠在清水和活性污泥中的浓度基本一致,且浓度没有减小,可以认为在一定时间内,荧光素钠不会被活性污泥降解和吸附,也不会见光分解,可以作为本次试验的示踪剂<sup>[17-18]</sup>。

### 1.2.4 示踪试验方法

水样采集所使用的单向阀取样器采样现场如图 2(a) 所示,二沉池池面如图 2(b) 所示,二沉池出水如图 2(c) 所示。首先,在二沉池进水渠始端,通过漏斗和加药管向进水中投加 100 g 荧光素钠。随后,在投加示踪剂后的第 5、10、15、20、25、30、45、60、120、180、240、300 min 同时采集各测点水样。将

采集的水样经滤纸过滤后,取 10 mL 样品于 25 mL 的比色管中。加入 2 mL 浓度为 1.0 mol/L 的乙酸钠溶液,并用去离子水定量至刻度线,摇匀混合。使用 5 cm 的比色皿,将紫外分光光度计波长设置为 485 nm,测量荧光素钠溶液的吸光度。

## 1.3 二沉池数值模拟方法

### 1.3.1 模型及其模拟域设置

为了使模拟结果更接近实际情况,本次模拟采用了 1:1 的比例建模。但这也会导致较高的计算强度和较长的计算时间,因此在模拟中选择使用二维 CFD 模型,模拟软件为 ANSYS Fluent 18。模型遵循质量守恒[式(1)]及动量守恒[式(2)],选用的求解器为专门描述活性污泥沉淀的 DriftFluxFoam<sup>[19]</sup>,实现软件为 OpenFOAM 5.0<sup>[20]</sup>。二沉池模拟断面俯视图和模拟域如图 3 所示,经网格无关性测试后,确定计算网格数量约为 20 万个,其尺寸为 0.000 1~0.004 0 m。

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dx dy dz + \iint_A \rho v \cdot n dA = 0 \quad (1)$$

其中: $V$ ——控制体,  $\text{m}^3$ ;

$A$ ——控制面,  $\text{m}^2$ ;

等式左边第一项——控制体  $V$  内部质量的增量;

等式左边第二项——通过控制表面流入控制体的净通量。

$$\rho \frac{dv}{dt} = \rho F - \text{grad}P + \mu \nabla^2 v \quad (2)$$

其中: $F$ ——单位质量流体上的质量力,  $\text{N}$ ;

$\text{grad}$ ——梯度表示某个标量场(如压力、温度或浓度)的变化率和方向;

$P$ ——流体内应力张量的分量,  $\text{N}/\text{m}^2$ ;

$\rho$ ——密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$\mu$ ——流体黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;

$v$ ——流体流速,  $\text{m}/\text{s}$ 。

### 1.3.2 模拟工况设置

CFD 模拟测试的工况如表 2 所示。为验证模型精度,设定了一个模型验证工况,并以池内泥位作为校验标准。在这个工况中,模型的边界条件设定为一个无裙板、无进出流,且其内均匀布满混合液悬浮固体浓度(MLSS)质量浓度为 5 500  $\text{mg}/\text{L}$  混合液

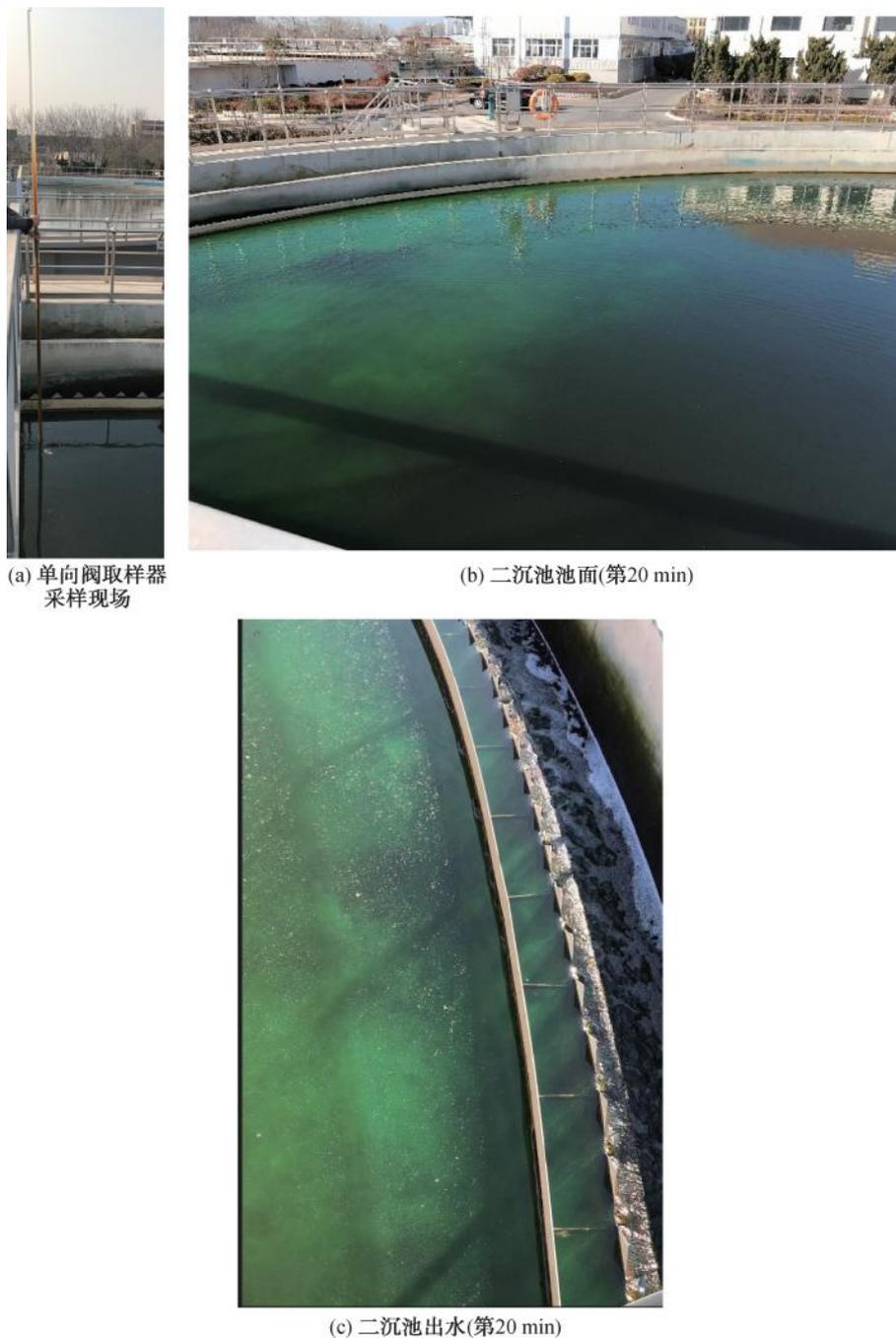


图2 示踪试验取样器采样现场和现场试验照片

Fig.2 Tracer Test Sampler Sampling Site and Field Test Photos

的二维 CFD 模型,以验证模型精度。二沉池配水渠下方的挡水裙板能够使污泥混合液以较低的速度均匀流入池内,然后以平缓的环流态返回到周围的出水槽,从而充分利用了整个池的容积,消除了可能形成短流的涡动。如表 2 所示,模拟工况一和模拟工况二分别比较了二沉池挡水裙板深度由 0.6 m 延长

到 1.2 m 后二沉池内流场的变化情况。

### 1.3.3 模拟验证结果

CFD 模型校验结果如表 3 所示。模拟得到的泥位比实际泥位高出 11.5%,在工程允许的误差范围之内,因此可以使用该模型进行后续的工况模拟。

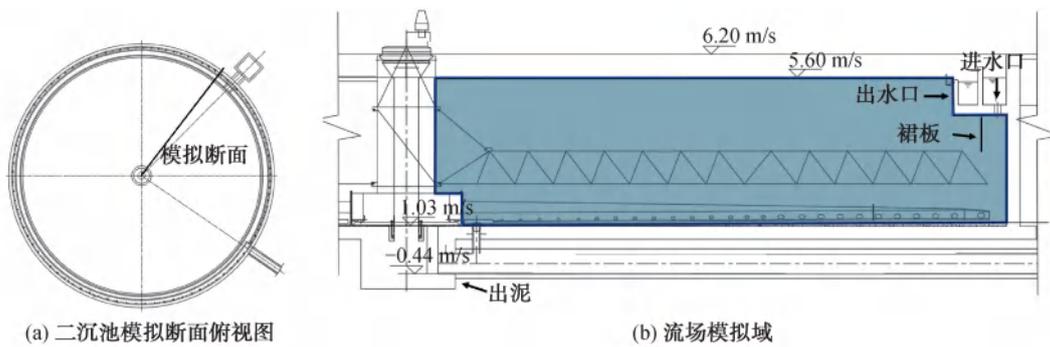


图3 二沉池模拟断面和流场模拟域

Fig. 3 Simulation Section and Flow Field Simulation Domain of Secondary Sedimentation Tank

表2 CFD模拟测试工况

Tab. 2 CFD Simulation Test Conditions

模拟工况	裙板深度/m	进水量/( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	MLSS/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )	表面负荷/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	模拟时间/h
模型验证工况	0.6	/	5 500	/	0.5
模拟工况一	0.6	45 000	5 500	0.92	24.0
模拟工况二	1.2	45 000	5 500	0.92	24.0

表3 CFD模型校验结果

Tab. 3 CFD Model Validation Results

裙板深度/m	表面负荷/( $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )	现场泥位/m	模拟泥位/m	差异度
0.6	0.92	2.78	3.10	11.5%

#### 1.4 二沉池出水SS测定方法

在投加示踪剂后的第5、10、15、20、25、30、45、60、120、180、240、300 min,使用取样桶采集各测点水样,1#~4#测点的出水SS分析方法参考《水和废

水监测分析检测方法》(第4版)。

## 2 试验结果

### 2.1 二沉池示踪试验结果

#### 2.1.1 工况一条件下二沉池示踪试验结果

工况一的试验条件设定好氧池污泥质量浓度为5 500 mg/L,二沉池表面负荷为0.92  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,二沉池理论停留时间为326 min。图4展示了在工况一条件下,各测点处荧光素钠浓度随时间的变化情况。如图4(a)所示,示踪剂加入进水渠始端后,

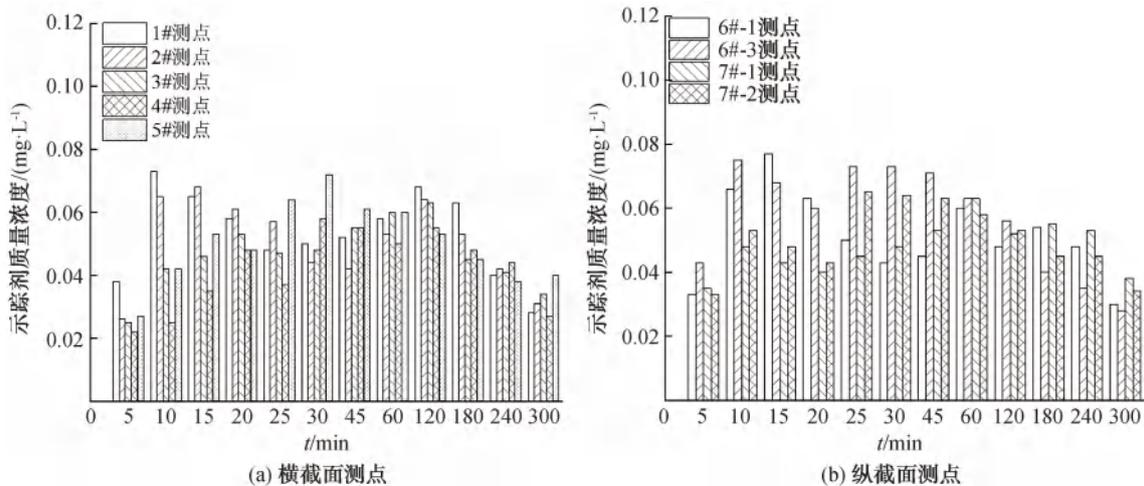


图4 工况一条件下二沉池各测点的示踪剂浓度随时间变化规律

Fig. 4 Variation of Tracer Concentration with Time at Various Test Points in Secondary Sedimentation Tank under Operation Condition One

1#、2#测点在试验开始的第5~20 min时检测到较高的示踪剂浓度,这表明由于受到进水冲击,这2个测点存在明显的短流流态,同时池面也出现了示踪剂荧光绿色[图2(b)],并且出水堰处存在翻泥现象。随后,这2个测点处的示踪剂呈现了升高-降低-升高-降低的变化趋势,这反映出示踪剂在二沉池内呈环形流动的典型流态。如图4(b)所示,示踪剂在二沉池纵断面的浓度整体上先升高后降低;在试验第10 min时,与出水测点的示踪剂变化趋势相符,靠近1#测点的6#-1、6#-2测点的示踪剂浓度增长速度较快,这验证了1#测点存在短流流态的推测。

### 2.1.2 工况二条件下二沉池示踪试验结果

工况二的试验条件为设定好氧池污泥质量浓度为4 300 mg/L,二沉池表面负荷为 $0.92 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,二沉池理论水力停留时间为326 min。图5展示了在工况二条件下,各测点处荧光素钠浓度随时间的变化情况。如图5(a)所示,在进水渠始端加入示踪剂后,1#、2#测点在试验开始的第5~20 min时检测到较高的示踪剂浓度,这表明在工况二条件下,1#、2#测点存在短流区域,与工况一的结果一致。然而,不同之处在于,从感官上看,现场并未出现翻泥现象;同时,在试验的第5~20 min时,1#、2#测点检测到的示踪剂浓度高于工况一条件下的测试结果。这可能是因为在工况一条件下,二沉池的泥层较厚,阻挡了一部分上升趋势。因此,在高污泥浓度条件下,池内短流程度较轻,而低污泥浓度条件下,池内短流

程度更加严重。如图5(b)所示,示踪剂加入进水渠始端后,靠近1#测点的6#-1、6#-2测点的示踪剂浓度显著提高,然后呈现降低-升高-降低的变化趋势,这符合二沉池内的环流流态变化规律。从工况一和工况二的试验结果来看,虽然1#、2#测点存在短流区域,但通过降低好氧池污泥浓度的措施,可以缓解二沉池翻泥现象。然而,在这种运行工况条件下,系统无法满负荷运行,造成了工艺处理能力的下降。

### 2.1.3 工况三条件下二沉池示踪试验结果

工况三的试验条件设定污泥质量浓度为5 500 mg/L,二沉池表面负荷为 $0.82 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,二沉池理论停留时间为366 min。相较于工况一,工况三将二沉池表面负荷由 $0.02 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降低至 $0.82 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。图6表示工况三条件下,各测点处荧光素钠浓度随时间的变化情况,各测点的示踪剂浓度随时间整体先增加后降低。如图6(a)所示,在进水渠始端加入示踪剂后,1#、2#测点在试验开始的第5~20 min示踪剂浓度相对于3#、4#测点有较大幅度的提高,但示踪剂浓度低于工况一的测试结果,这表明二沉池进水区域易发生短流的问题得到了改善。同时,从试验现场观察,二沉池出水堰出水清澈,翻泥问题也得到了改善。如图6(b)所示,在进水渠始端加入示踪剂后,在二沉池纵断面方向,相比于工况一,工况三条件下靠近1#测点的6#-1、6#-2测点的示踪剂浓度并未出现激增趋势,这说明进水经触底

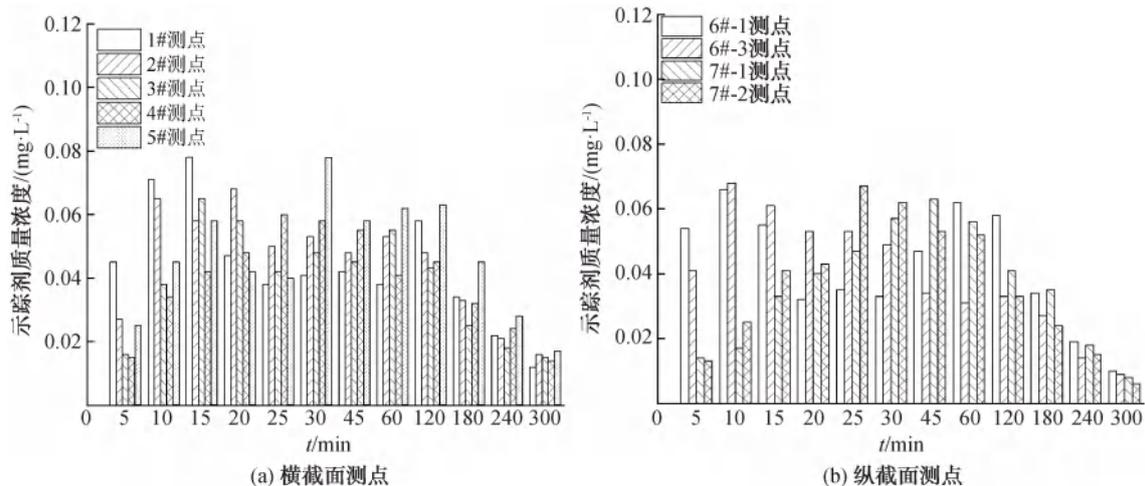


图5 工况二条件下二沉池各测点的示踪剂浓度随时间变化规律

Fig. 5 Variation of Tracer Concentration with Time at Various Test Points in Secondary Sedimentation Tank under Operation Condition Two

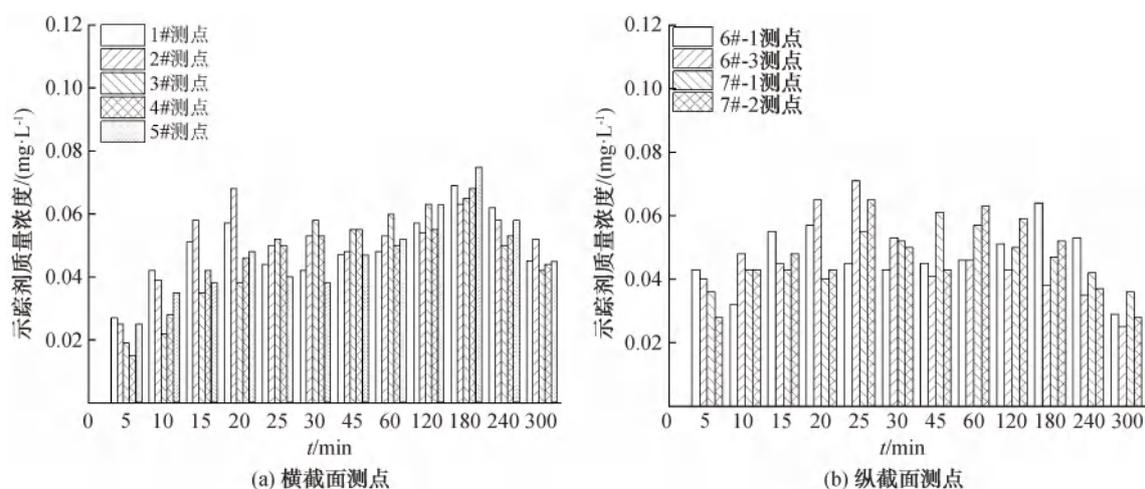


图6 工况三条件下二沉池各测点的示踪剂浓度随时间变化规律

Fig. 6 Variation of Tracer Concentration at Each Measuring Point in Secondary Sedimentation Tank under Operation Condition Three

折流后,流经 6#-1 测点处的水流流量减小。由工况三的试验结果可以看出,在好氧池维持高污泥浓度的运行条件下,通过降低二沉池表面负荷,能有效缓解二沉池内短流现象。

### 2.2 二沉池出水 SS 测试结果

在试验进行过程中,针对 3 个工况条件下二沉池出水堰的 1#~4#测点的 SS 进行了取样和分析,结果如图 7 所示。由图 7 可知,在工况一的试验条件下,在二沉池出水堰处发生了严重的翻泥现象。原因是冬季条件下好氧池保持了较高的污泥浓度,导致二沉池内泥层较高,在进水冲击以及池体内本身存在短流区域的影响下,导致出水携带着污泥从二沉池出水堰流出<sup>[21]</sup>。同时,在工况二和工况三条件下,通过降低好氧池的污泥浓度或者降低二沉池的表面负荷,可以有效地缓解二沉池翻泥的问题,二沉池出水 SS 均满足滤布滤池进水要求(SS 质量浓度小于 30 mg/L)。

### 2.3 二沉池水力流态模拟结果

图 8 展示了在不同裙板深度条件下二沉池内断面流速矢量图。由图 8(a)可知,在挡水裙板深度为 0.6 m 的条件下,高速、高浓度的活性污泥混合液通过配水孔从配水渠进入池内,然后沿着裙板导流进入低速、低浓度的流场内。这里的活性污泥混合液受到浓度差和速度差的影响,会吸引旁侧流体并沿着池壁向下运动<sup>[22]</sup>。同时,由于这个活性污泥混合液流束的动能较大,触底后部分流体会折返向池表

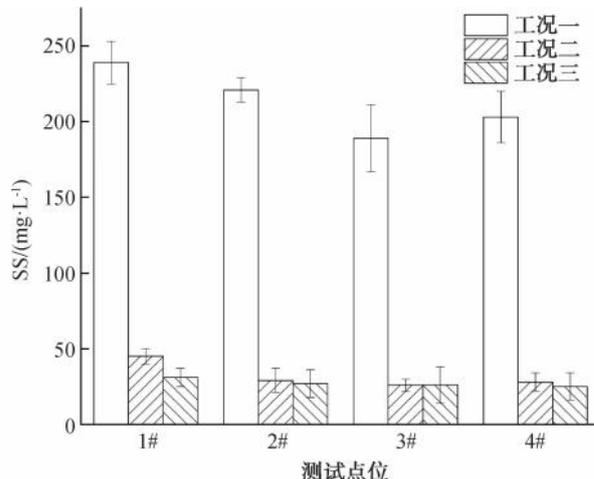
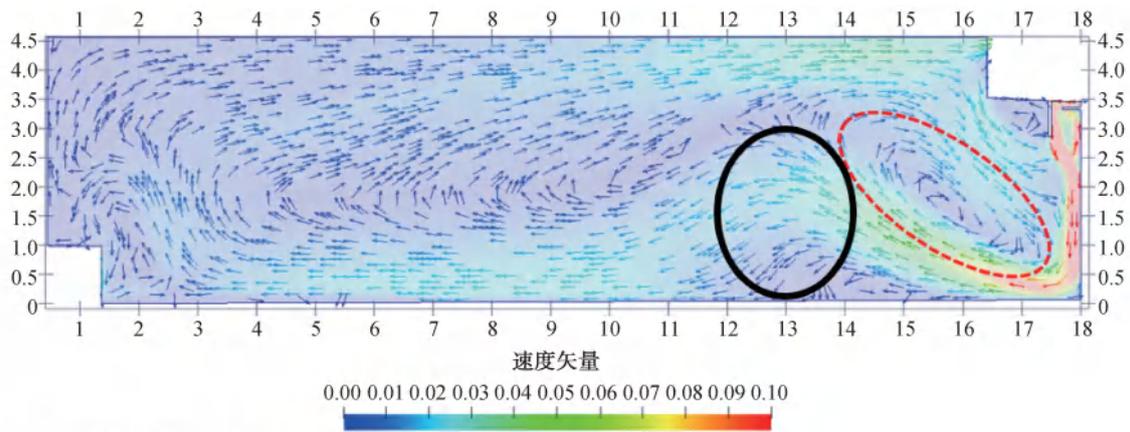


图7 不同工况下各测试点出水 SS 浓度

Fig. 7 SS Concentration of Effluent at Various Test Points under Different Operation Conditions

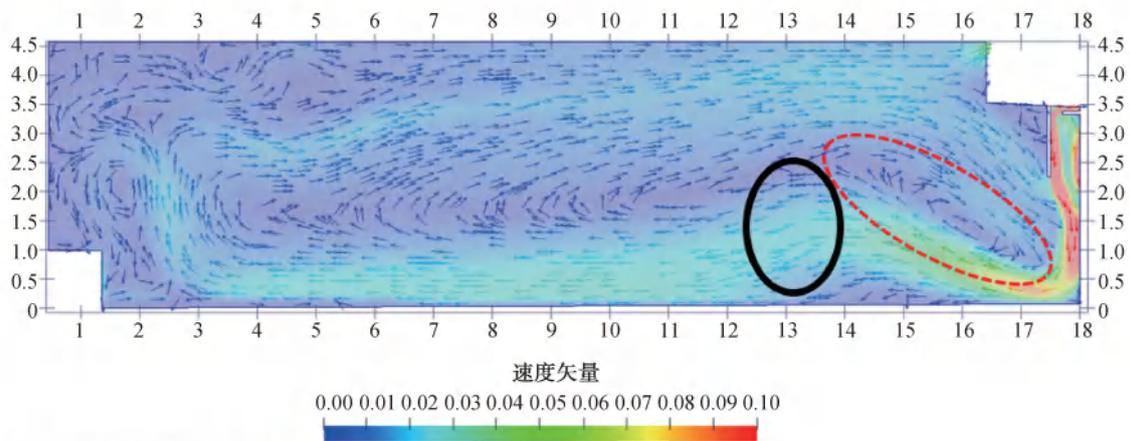
面,并与吸引的流体形成小循环[图 8(a) 虚线圆圈];而其余的流体则会沿着池轴向继续向池中心运动并正常进行泥水分离过程,不受进水冲击的影响。

由图 8(b)可知,在挡水裙板深度为 1.2 m 的条件下,因为裙板深度增长的影响,入水流对旁侧流体的吸引作用位置降低,裙板与池壁之间的流体混合空间增大,消能效果增强。如图 8(b) 实线圆圈所示,当流束落入裙板下方区域时,动能减小,触底后折返向上的角度相对工况一[图 8(a) 实线圆圈]减小,从而使得二沉池内发生短流的概率降低。



注:图中矢量水流速度单位为m/s。

(a) 0.6 m挡水裙板模拟工况



注:图中矢量水流速度单位为m/s。

(b) 1.2 m挡水裙板模拟工况

图8 不同裙板深度工况下二沉池内断面流速矢量

Fig. 8 Velocity Vector of Sectional Flow Speed in Secondary Sedimentation Tank under Different Skirt Depth Conditions

### 3 结论

(1)二沉池示踪试验结果表明,在好氧池污泥质量浓度为 5 500 mg/L,二沉池表面负荷为 0.92  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的运行工况条件下,二沉池进水渠始端存在短流问题,导致二沉池出水堰发生翻泥现象;当表面负荷保持不变,降低好氧池污泥质量浓度至 4 300 mg/L 时,二沉池出水堰的翻泥现象缓解,但二沉池进水渠始端的短流问题反而加重;当保持好氧池污泥质量浓度为 5 500 mg/L 不变,降低二沉池表面负荷至 0.82  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,二沉池进水渠始端的短流问题及出水堰的翻泥现象均得到了缓解,但在这种运行工况条件下,系统无法满负荷运行,造成工艺处理能力的下降。

(2)根据二沉池示踪试验结果所反映出的问题,使用 CFD 数值模拟来评估增加二沉池挡水裙板

深度对缓解二沉池翻泥问题的效果。结果显示,在好氧池污泥浓度维持较高水平的运行条件下,将二沉池垂直的裙板深度从 0.6 m 增加到 1.2 m,可以有效降低入流水流对旁侧流体的吸引作用,同时增大了裙板与池壁之间的流体混合空间,提高了对进水水流的消能效果,使得进水水流触底后折返向上的角度减小,从而降低了二沉池短流和翻泥的风险。

(3)本研究只是基于示踪试验结果以及应用数值模拟进行了问题的解决方案描述,并未进行实际的工程实践验证,但研究结果对周进周出二沉池的运行和改造提供了经验借鉴和理论依据。

### 参考文献

- [1] 刘流,倪黄蕾,梁军,等.二沉池不同径向分布活性污泥对脱氮除磷的影响[J].中国给水排水,2022,38(15):104-

- 108.
- LIU L, NI H L, LIANG J, et al. Effect of different radial distribution of activated sludge on nitrogen and phosphorus removal in secondary settling tank [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(15): 104-108.
- [ 2 ] 刘百仓, 刘凤凯, 万欣, 等. 辐流式二沉池水质信息场的测量与分析[J]. *中国给水排水*, 2012, 28(17): 108-112.
- LIU B C, LIU F K, WAN X, et al. Wastewater quality field measurement and analysis of radial flow secondary sedimentation tanks[J]. *China Water & Wastewater*, 2012, 28(17): 108-112.
- [ 3 ] 方杰. 周进周出沉淀池流体动力学分析计算[D]. 太原: 太原科技大学, 2010.
- FANG J. Analysis and calculation of fluid dynamics in the in-and-out sedimentation tank [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [ 4 ] 陈璐. 对《室外排水设计标准》中二沉池设计方法的讨论与建议[J]. *给水排水*, 2023, 59(4): 25-30.
- CHEN J. Discussion and proposals on the design of final clarifier of *Standard for Design of Outdoor Wastewater Engineering* [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 59(4): 25-30.
- [ 5 ] NGO N N, WINCKEL T V, MASSOUDIEH A, et al. Towards more predictive clarification models via experimental determination of flocculent settling coefficient value [J]. *Water research*, 2021, 190: 116294. DOI: 10.1016/j.watres.2020.116294.
- [ 6 ] 金涛, 刘晓静, 马文明, 等. 更严格排放标准下低温条件的某新建污水处理厂工程设计与运行[J]. *净水技术*, 2023, 42(9): 168-175.
- JIN T, LIU X J, MA W M, et al. Engineering design and operation of a newly built wastewater treatment plant under more strict emission standards and low temperature conditions [J]. *Water Purification Technology*, 2023, 42(9): 168-175.
- [ 7 ] 杨平, 徐康康, 周家中, 等. MBBR+磁混凝用于A<sup>2</sup>/O微曝氧化沟污水厂提标扩容[J]. *中国给水排水*, 2023, 39(10): 67-74.
- YANG P, XU K K, ZHOU J Z, et al. Application of MBBR and magnetic coagulation process in upgrading and expansion of a WWTP with A<sup>2</sup>/O microporous aeration oxidation ditch [J]. *China Water & Wastewater*, 2023, 39(10): 67-74.
- [ 8 ] 周家中, 宋平周, 张爽, 等. 占地受限下北方某高标准新建污水厂工程设计[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(12): 76-82.
- ZHOU J Z, SONG P Z, ZHANG S, et al. Engineering design of a new high-standard wastewater treatment plant with limited footprint area in North China [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(12): 76-82.
- [ 9 ] 魏迅, 李伟, 姚念民, 等. 周进周出二沉池的水力性能测试[J]. *中国给水排水*, 2006(8): 105-108.
- WEI X, LI W, YAO Z M, et al. Hydraulic performance test for water flow secondary clarifier. [J]. *China Water & Wastewater*, 2006(8): 105-108.
- [ 10 ] 李鹏, 张强, 夏海霞. 利用中水系统解决二沉池冬季稳定运行的运营实践[J]. *净水技术*, 2021, 40(11): 158-163.
- LI P, ZHANG Q, XIA H X. Operational practice of solving the stable operation of secondary sedimentation tank in winter using reclaimed water system [J]. *Water Purification Technology*, 2021, 40(11): 158-163.
- [ 11 ] 陈斌, 汪源, 张华, 等. 周进周出矩形沉淀池配水孔分布的数值模拟[J]. *给水排水*, 2016, 52(4): 54-57.
- CHEN B, WANG Y, ZHANG H, et al. Numerical simulation of water inlet and outlet hole distribution in rectangular sedimentation tank [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 52(4): 54-57.
- [ 12 ] 朱贻鸣, 刘振鸿. 基于CFD的竖流式二沉池实际工况的模拟[J]. *净水技术*, 2019, 38(9): 54-59.
- ZHU Y M, LIU Z H. Simulation of the actual working condition of vertical flow secondary sedimentation tank based on CFD [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(9): 54-59.
- [ 13 ] GAO H, STENSTROM M. The influence of wind in secondary settling tanks for wastewater treatment—A computational fluid dynamics study. Part II: Rectangular secondary settling tanks [J]. *Water Environment Research*, 2020, 92(4): 551-561.
- [ 14 ] 周雷. 基于CFD对超高污泥浓度混合液二沉池的模拟及优化研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- ZHOU L. Simulation and optimization research on secondary sedimentation tank of ultra-high sludge concentration mixed liquid based on CFD [D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [ 15 ] Al-ASAD H A, PARNISKE J, QIAN J Y, et al. Development and application of a predictive model for advanced wastewater treatment by adsorption onto powdered activated carbon [J]. *Water research*, 2022, 217: 118427. DOI: 10.1016/j.watres.2022.118427.
- [ 16 ] OLEYIBLO O J, CAO J S, FENG Q, et al. Evaluation and improvement of wastewater treatment plant performance using BioWin [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2014, 33: 468-476. DOI: 10.1007/s00343-015-4108-8.
- [ 17 ] JAMES O O, CAO J S, KABO-BAH A T, et al. Assessing the impact of solids retention time (SRT) on the secondary clarifier capacity using the state point analysis [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2014, 19: 1265-1270. DOI: 10.1007/s12205-014-0106-1.
- [ 18 ] 郭亚兵, 胡钰贤. 污水处理工艺中的状态点分析法运用分析[J]. *太原重型机械学院学报*, 2001(1): 24-27.
- GUO Y B, HU Y X. The application of the state point analysis in waste water treatment technology [J]. *Journal of Taiyuan Heavu Machinery Institute*, 2001(1): 24-27.

(下转第215页)

- WU Y P, WANG X D. Study on primary sludge hydrolysis as biological nitrogen and phosphorous removal[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology ( Natural Science Edition), 2005, 37(4): 501-503, 508.
- [ 4 ] 吉芳英, 陈思, 刘娜. 污水处理中微生物反硝化脱氮过程及代谢规律[J]. 四川理工学院学报(自然科学版), 2013, 26(4): 10-14.
- JI F Y, CHEN S, LIU N. Denitrifying denitrification process and metabolic rule of microorganisms in wastewater treatment [ J ]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering ( Natural Science Edition ), 2013, 26(4): 10-14.
- [ 5 ] 吴芳磊, 贺航运, 陈博涵, 等. 低 C/N 进水城镇污水厂低溶解氧运行效能及微生物变化[J]. 环境工程学报, 2022, 16(8): 2711-2719.
- WU F L, HE H Y, CHEN B H, et al. The efficiency and microbial change of urban sewage plant with low C/N influent based on low DO strategy[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(8): 2711-2719.
- [ 6 ] 甘露, 张磊, 姜洋彬, 等. 我国污水处理厂主要运行工艺分析[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(5): 196-198.
- GAN L, ZHANG L, JIANG Y B, et al. Analysis of main operating processes of domestic wastewater treatment plants in China[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2021, 39(5): 196-198.

(上接第 207 页)

- [ 19 ] KARPINSKA A M, BRIDGEMAN J. CFD-aided modelling of activated sludge systems—A critical review[J]. Water research, 2016, 88: 861-879. DOI: 10.1016/j.watres.2015.11.008.
- [ 20 ] GAO H, STENSTROM M K. Turbulence and interphase mass diffusion assumptions on the performance of secondary settling tanks[J]. Water Environment Research, 2019, 91(2): 101-110.
- [ 21 ] MINNIE J, GASZYNSKI C, BASITERE M. Modelling filamentous bacteria in activated sludge systems and the advancements of secondary settling tank models; A review[J]. Biochemical Engineering Journal, 2022, 186: 108598. DOI: 10.1016/j.bej.2022.108598.
- [ 22 ] GUYONVARCH E, RAMIN E, KULAHCI M, et al. iCFD: Interpreted computational fluid dynamics-degeneration of CFD to one-dimensional advection-dispersion models using statistical experimental design—The secondary clarifier [ J ]. Water research, 2015, 83: 396 - 411. DOI: 10.1016/j.watres.2015.06.012.