

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 03. 014

# 无锡锡北污水处理厂运行评估及优化改造方案

魏翔<sup>1</sup>, 李怀波<sup>2</sup>, 郑凯凯<sup>2,3</sup>, 王燕<sup>2,3</sup>, 李激<sup>2,4,5</sup>

(1. 无锡市锡山区住房和城乡建设局, 江苏 无锡 214000; 2. 江南大学 环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122; 3. 无锡普汇环保科技有限公司, 江苏 无锡 214028; 4. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏 无锡 214122; 5. 江苏高校水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

**摘要:** 以无锡锡北污水处理厂为例, 通过全流程测试和活性污泥特性研究, 分析存在的问题, 并提出改造方案。结果表明, 该污水厂的硝化速率(以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 计)为 $1.2 \text{ mg}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$ , 处于较低水平, 且曝气生物滤池无实际硝化效果, 导致冬季氨氮存在超标风险。此外, 由于同步化学除磷的抑制作用, 活性污泥的最大厌氧释磷速率(以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 计)为 $0.66 \text{ mg}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$ , 处于偏低水平, 生物除磷效果较差。为了解决该污水厂存在的问题, 同时遵循尽量依托已有构筑物、减少工程投资及运行费用的原则, 通过在好氧池设计悬浮填料系统来弥补硝化速率低及水力停留时间较短的不足; 将现有曝气生物滤池改造为反硝化滤池, 强化系统脱氮效果; 此外, 新建高效沉淀池, 消除同步化学除磷对生物除磷的不利影响。

**关键词:** 提标改造; 污水处理厂; 全流程测试分析; 活性污泥特性

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0095-06

## Operation Evaluation of Xibei Wastewater Treatment Plant in Wuxi and Its Optimization

WEI Xiang<sup>1</sup>, LI Huai-bo<sup>2</sup>, ZHENG Kai-kai<sup>2,3</sup>, WANG Yan<sup>2,3</sup>, LI Ji<sup>2,4,5</sup>

(1. Housing and Urban Rural Development Bureau of Wuxi Xishan District, Wuxi 214000, China; 2. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China; 3. Wuxi Puhui Environmental Protection Technology Co. Ltd., Wuxi 214028, China; 4. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi 214122, China; 5. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Water Treatment Technology and Materials, Suzhou 215009, China)

**Abstract:** This paper analyzed the existing problems and proposed the improvement scheme of Xibei Wastewater Treatment Plant in Wuxi according to the whole process test and activated sludge characteristics. The nitrification rate (measured by  $\text{NH}_3\text{-N}$ ) of the plant was at a low level of  $1.2 \text{ mg}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$ , and the existing biological aerated filter had no actual nitrification ability, resulting in the risk of exceeding the ammonia nitrogen limit specified in the discharge standard in winter. In addition, due to the inhibition of simultaneous chemical phosphorus removal, poor biological phosphorus removal performance was obtained, and the maximum specific anaerobic phosphorus release rate (measured by  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) of activated sludge was at a low level of  $0.66 \text{ mg}/(\text{gVSS}\cdot\text{h})$ . The low nitrification rate and short hydraulic

retention time were compensated by constructing suspension filler system in the aerobic tank, so as to solve the problems existing in the plant, follow the principle of relying on the existing structures as much as possible, and reduce the project investment and operating costs. The existing biological aerated filter was transformed into a denitrification filter to enhance the nitrogen removal performance of the system, and a new high-efficiency sedimentation tank was built to eliminate the adverse effects of simultaneous chemical phosphorus removal on biological phosphorus removal.

**Key words:** upgrading and reconstruction; wastewater treatment plant; full process test analysis; characteristics of activated sludge

太湖流域是我国经济最具活力的地区之一,该地区人口急剧增长,工业化与城镇化进程不断加速,与此同时产生和排放的工业废水及生活污水造成的水环境污染问题已严重影响了人们的正常生活与经济的可持续发展。2018年,江苏省出台了《太湖地区城镇污水处理厂及重点工业行业主要水污染物排放限值》(DB 32/1072—2018),该标准对现有污水处理厂提出了更高的排放要求,因此新一轮提标改造已是大势所趋。但是,如何在原有工艺基础上科学地制订提标改造方案,在稳定达到新标准的同时,尽量减少新增工艺单元,以降低投资及运行成本,是摆在众多水务企业及设计行业面前的难题。

笔者以位于太湖流域的无锡锡北污水处理厂为例,对该污水厂开展全流程技术评估,分析主要污染物的沿程变化特征及各功能区运行现状;通过对活性污泥特性的分析,了解活性污泥中不同功能菌群的性能,评估其对污染物的去除能力。此外,结合该污水厂现有设备设施运行状况,根据全流程测试及活性污泥特性分析结果,科学制订提标改造方案。

## 1 材料与方法

### 1.1 污水处理厂概况

无锡锡北污水处理厂于2013年投入运行,设计规模为22 500 m<sup>3</sup>/d,工业废水约占30%,主体采用A<sup>2</sup>O工艺,利用生物脱氮除磷和同步化学除磷相结合的方式,二沉池出水经曝气生物滤池(BAF)过滤和消毒后排入附近河道,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。由于该污水厂位于太湖地区其他区域,因此需将排放标准由一级A提升至DB 32/1072—2018中表2规定的排放限值,其中TN排放限值由15 mg/

L提升至12 mg/L, NH<sub>3</sub>-N排放限值由5 mg/L提升至4 mg/L,其余水质指标排放限值维持不变。

### 1.2 全流程测试分析

全流程测试分析可为污水处理工艺的运行状态及调控提供依据,其本质是根据污水处理工艺功能区的划分,在每个功能区进行布点取样,根据各功能区目标污染物浓度的变化,对该功能区的运行状态进行评价,最终对该工艺提出优化运行方案<sup>[1]</sup>。为了解无锡锡北污水处理厂A<sup>2</sup>O工艺不同单元对污染物的去除情况,分别在进水泵房、预处理阶段、生物处理阶段和出水口等进行取样检测,测试总氮、氨氮、硝态氮、总磷、磷酸盐等指标的变化。采样点位置见图1,主要采样检测部分为生化处理阶段,以评估活性污泥对污染物的去除效果。

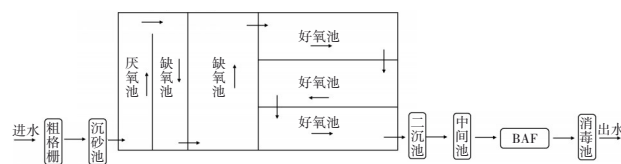


图1 采样点位置

Fig.1 Location of sample point

### 1.3 活性污泥特性分析

为分析无锡锡北污水处理厂生化系统脱氮除磷性能,测定了活性污泥硝化速率、反硝化速率及潜力、释磷潜力。其中硝化速率是在氨氮及碱度充足的情况下,单位污泥在单位时间内所降解的氨氮量,可反映活性污泥中硝化菌群的相对丰度;反硝化速率是单位污泥在单位时间内利用进水中有机物进行反硝化脱氮的量,反映了进水中可供反硝化菌群利用的碳源浓度情况;反硝化潜力是在提供充足碳源条件下,活性污泥的最大反硝化能力,可反映反硝化菌群的相对丰度。以上指标参照文献<sup>[2]</sup>测定。释磷潜力是在厌氧情况下,当碳源充足时活

性污泥进行释磷的能力,可反映活性污泥中聚磷菌群的相对丰度,参照文献[3]测定。

#### 1.4 水质指标及检测方法

TN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,COD采用重铬酸盐法测定,BOD<sub>5</sub>采用稀释与接种法测定。水样采用定性滤纸过滤后测定溶解性总氮(STN)、溶解性总磷(STP)、氨氮及硝态氮,其中STN采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,STP采用钼酸铵分光光度法测定。溶解性磷酸盐采用钼锑抗分光光度法测定,NH<sub>3</sub>-N采用纳氏试剂分光光度法测定,硝态氮采用紫外分光光度法测定,DO采用便携式溶氧仪测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 总氮及氨氮分析

工艺沿程氮元素的变化如图2所示。可知,进水和沉砂池出水2个采样点TN浓度平均值为31.5 mg/L,STN为TN的主要组成成分,平均浓度为21.3 mg/L,占比为67.6%,部分TN存在于悬浮物中,但由于进水水质具有波动性,且沉砂池除砂效果不佳,对于悬浮性总氮的去除效果不明显。另外,NH<sub>3</sub>-N为STN的主要组成成分,平均浓度为18.5 mg/L,占比达到86.9%。进水和沉砂池出水中的硝态氮浓度较低,均值为1.86 mg/L。进入生化池后,由于稀释作用,STN浓度显著降低。厌氧及缺氧工艺段由于无硝化效果,STN组成中以NH<sub>3</sub>-N为主,浓度维持在10 mg/L左右。缺氧池反硝化效果良好,前端即将内、外回流中的硝态氮完全去除,浓度降低至0,而最终出水总氮浓度在5 mg/L左右。结合内回流比为100%的运行参数可知,回流比偏低,适当提高内回流量可进一步提高脱氮效率。从好氧1廊道开始,NH<sub>3</sub>-N浓度逐渐降低,NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N浓度逐渐升高。但因好氧段前端DO浓度较低,可能存在同步硝化反硝化现象<sup>[4]</sup>,因此好氧1廊道的硝态氮始终维持在2 mg/L以下。经过好氧2廊道和3廊道的持续硝化作用,硝态氮升高至3.9 mg/L,而NH<sub>3</sub>-N则降低至0.934 mg/L。STN在生化池降低了11.6 mg/L,NH<sub>3</sub>-N降低了13.4 mg/L,表明活性污泥系统硝化效果良好。BAF池由于滤料流失严重,无实际硝化效果,且消毒工艺投加的次氯酸钠药剂量较少,因此这两个点位的出水NH<sub>3</sub>-N和TN基本无变化。最终

出水TN为5.7 mg/L,NH<sub>3</sub>-N浓度为0.606 mg/L,均实现了达标排放。该污水处理厂进水工业废水占比较高,进水COD浓度在100~1 250 mg/L之间波动,均值为400 mg/L,进水中的有机物相对充足,在无外加碳源的情况下实现了80%左右的脱氮效率。但由于该污水厂进水COD浓度波动较大,无法确保进水碳源时刻充足,进而影响反硝化效率。生化池无碳源投加装置,因此针对本次TN提标改造工程,建议设置碳源投加系统,必要时进行碳源投加,强化脱氮效果。

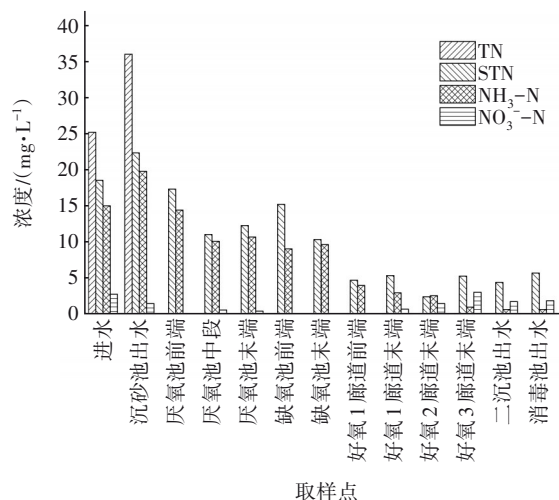


图2 工艺沿程氮元素的变化

Fig.2 Change of nitrogen along the process

### 2.2 总磷分析

工艺沿程磷元素的变化如图3所示。可知,进水和沉砂池出水TP浓度具有一定的波动性,平均值为3.91 mg/L,其中STP浓度均值为2.34 mg/L,占比为59.8%,存在1.57 mg/L的悬浮态磷。此外,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P为STP的主要组成成分,平均值为2.29 mg/L,占比达到97.8%。厌氧池前端磷酸盐浓度为4.06 mg/L,相比进水和沉砂池出水磷酸盐浓度(1.69和2.88 mg/L)有所提高,存在一定的释磷现象。由于外回流的混合稀释作用,厌氧中段和后端磷酸盐浓度有所下降,分别为1.49和1.55 mg/L。该污水处理厂采用同步化学除磷工艺,二沉池回流污泥中携带了残余的除磷药剂回到生化池,聚磷菌在与除磷药剂竞争磷源的过程中处于劣势,因此长期以来聚磷菌的活性受到抑制,生物释磷和吸磷能力减弱<sup>[5]</sup>,完全依靠生物除磷无法实现出水总磷的达标排放。进入好氧池后,由于存在氧气电子受



体,聚磷菌进行吸磷作用,再结合剩余除磷药剂的持续化学絮凝作用,对STP的去除效果明显,STP可降低至0.50 mg/L左右。由于除磷药剂投加点位位于好氧池末端,所以二沉池出水中STP浓度进一步降低。消毒出水中STP浓度为0.3 mg/L,以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 为主。出水总磷浓度虽可达到排放标准,但该污水厂生物除磷效率相对较低,化学除磷药剂投加量较大,达到150 mg/L左右,运行费用较高。

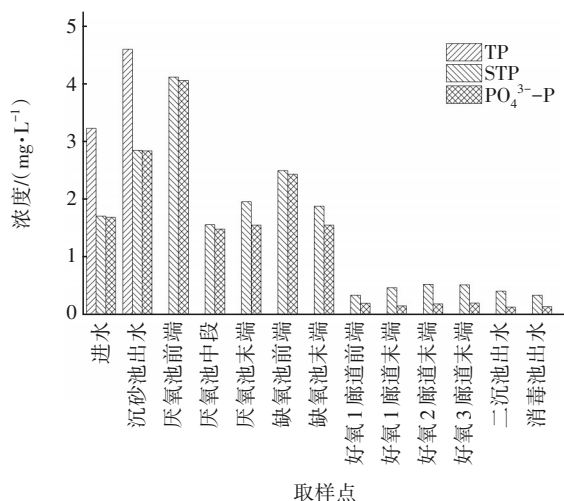


图3 工艺沿程磷元素的变化

Fig.3 Change of phosphorus along the process

### 2.3 COD分析

锡北污水处理厂进水中含有30%左右的工业废水,导致该污水厂存在一定浓度的难降解有机物,影响出水COD的稳定达标排放。由于该污水厂好氧池水力停留时间(HRT)相对较短,仅为8.6 h,为分析出水COD是否还有一定的降低空间,取好氧池末端的泥水混合液进行延时曝气实验。经过3 h延时曝气后,COD浓度没有显著下降,始终维持在45~50 mg/L。因此可以初步判断,生化池出水COD浓度基本为溶解性难降解COD,出水COD浓度存在较大的超标风险(一级A标准为50 mg/L),在提标改造中需设置COD深度去除单元。

### 2.4 活性污泥特性分析

#### 2.4.1 硝化速率

硝化速率测定实验中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化如图4所示。可知,活性污泥的硝化能力(以 $\text{NH}_3\text{-N}$ 计)为4.81 mg/h,结合MLVSS为4.0 g/L,核算出硝化速率为1.2 mg/(gVSS·h)。以目前实际停留时间(HRT=9 h)核算,可硝化约54.1 mg/L的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 。有研究表

明,在5~30℃范围内,温度每下降10℃,硝化速率将下降约50%<sup>[6]</sup>。本实验的水温在22℃左右,而根据历史水温数据可知,锡北污水处理厂冬季水温最低可降至12℃左右,按照硝化速率降低50%核算,活性污泥系统在冬季低温条件下可实现的氨氮降解量约为27.0 mg/L。根据近一年的历史进水氨氮浓度可知,该指标基本可满足要求,但是存在一定的超标风险。

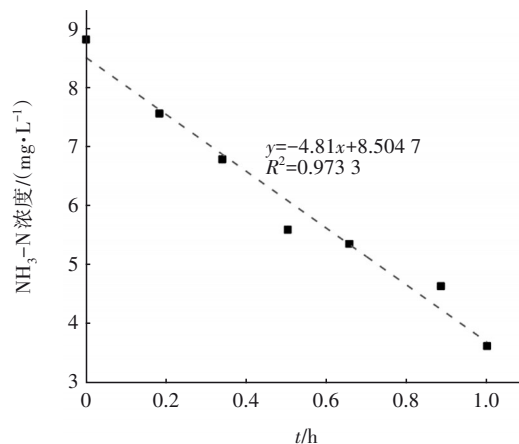


图4 硝化速率测定实验中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的变化

Fig.4 Change of ammonia nitrogen concentration in specific nitrification rate test

#### 2.4.2 反硝化速率及反硝化潜力分析

反硝化速率/潜力测定实验中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的变化如图5所示。

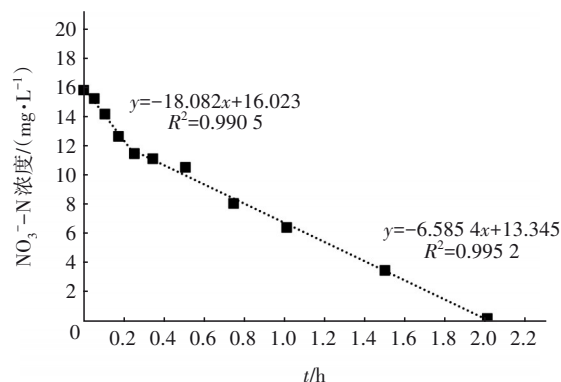


图5 反硝化速率测定实验中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 浓度的变化

Fig.5 Change of nitrate nitrogen concentration in specific denitrification rate test

从图5可知,在MLSS为5.0 g/L、MLVSS为2.6 g/L条件下,该污水厂活性污泥的反硝化速率过程分为两段,第一段和第二段的反硝化速率(以 $\text{NO}_3\text{-N}$ 计)分别为6.85和2.5 mg/(gVSS·h)。第一段反硝化利用进水中碳源进行快速反应(快速碳源),时间

为0.25 h,反硝化速率较大。反硝化作用去除硝态氮主要发生在第二段,该阶段反硝化速率相对较小,但维持时间较长(1.75 h),说明进水中可供生物利用的快速碳源较少,所利用的碳源种类可能是慢速可降解碳源。

受工业废水的影响,在MLSS为11.0 g/L、MLVSS为6.2 g/L条件下,该污水厂反硝化潜力为3.8 mg/(gVSS·h),而理论反硝化速率为3~5 mg/(gVSS·h)时,在碳源充足的情况下,按照设计污泥浓度及污泥有机质含量,反硝化潜力应在5 mg/(gVSS·h)以上<sup>[7]</sup>。因此该污水厂反硝化潜力处于偏低水平,这表明活性污泥中反硝化菌群的相对丰度较低。经核算,在碳源充足的情况下,该污水厂活性污泥系统的硝态氮去除量可超过45 mg/L,但是考虑到进水水质的波动性较大,部分时间无法提供较为充足的碳源。由于已有的BAF滤料流失严重,实际上无氨氮去除效果,建议改建为反硝化滤池,对于出水总氮的稳定达标排放具有保障作用。

#### 2.4.3 厌氧释磷潜力

厌氧释磷潜力拟合方程为 $y=2.9189x-0.1834$  ( $x$ 为时间, $y$ 为 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度, $R^2=0.984$ ),该污水厂活性污泥厌氧释磷能力(以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 计)为2.92 mg/h,当MLVSS为4.43 g/L时,核算出释磷潜力(以 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 计)为0.66 mg/(gVSS·h),而具备较高生物除磷效率的城镇污水处理厂厌氧释磷潜力在5 mg/(gVSS·h)以上<sup>[8]</sup>。由此可知,该污水厂的释磷潜力处于较低水平。原因主要为该污水厂采用的同步化学除磷方式抑制了聚磷菌的活性,使得活性污泥中聚磷菌群的相对丰度较低,生物除磷效果较差<sup>[5]</sup>,因此除磷药剂投加量较高。在提标改造过程中可增加后置化学除磷单元,逐渐恢复生化系统中聚磷菌群的活性。根据进水总磷浓度及组成,以生物除磷效率为60%进行预估,药剂投加量可降低至90 mg/L,在实现稳定达标的基础上,除磷药剂费用将减少40%。

#### 2.4.4 活性炭吸附深度去除COD的效果

为分析活性炭对于该污水厂难降解COD的去除效果,进行了活性炭吸附柱去除COD实验。实验用水为锡北污水处理厂出水,COD为47 mg/L,将活性炭吸附HRT设为10和30 min。经过10 min的吸附后,COD降低至13 mg/L,污水中的大部分难降解有机物被有效去除。将吸附时间延长至30 min后,

COD进一步下降至12 mg/L。实验结果表明,活性炭对于锡北污水处理厂难降解COD的去除效果显著,可通过设置粉末活性炭投加装置或活性炭吸附滤池构筑物来保障出水COD的稳定达标排放。

#### 2.5 提标改造工程方案

由全流程分析及活性污泥特性分析可知,锡北污水处理厂活性污泥的反硝化性能及生物除磷效果较差,且进水中的难降解有机物浓度较高,对于COD的稳定达标存在风险。建议进行如下提标改造:①在生化池增设碳源投加系统,必要时进行碳源投加,以强化脱氮效果;②由于同步化学除磷方式导致生物除磷效率低、化学除磷药剂投加大、运行费用高,建议增设高效沉淀池,进行后置化学除磷,逐步恢复生物除磷能力,减少药剂投加量,实现节能降耗<sup>[9]</sup>;③原有BAF工艺滤料流失严重,实际无氨氮去除效果,建议改造为反硝化滤池,对出水总氮的稳定达标排放起到保障作用;④锡北污水处理厂活性污泥系统硝化速率较低,且好氧HRT相对较短,在无法新建生化池的情况下,建议将好氧池改造为MBBR泥膜混合系统,通过悬浮填料的加入,富集硝化菌,强化系统的氨氮去除能力<sup>[10]</sup>;⑤由于锡北污水处理厂进水中难降解COD浓度较高,且目前厂内已无空地新建COD深度去除构筑物,因此建议生化池增设粉末活性炭投加装置,用于深度去除COD,确保出水稳定达标排放。

#### 3 结论

① 通过全流程测试和污泥特性分析,并结合现场各工艺单元的运行情况,制订了无锡锡北污水处理厂提标改造设计方案:预处理段新建曝气沉砂池和初沉池,强化对进水中悬浮物的去除,并减少水质水量的冲击影响;生化段设计MBBR悬浮填料系统,弥补硝化速率低和好氧段HRT较短的不足,确保不利条件下对氨氮的有效去除;此外,生化池设计粉末活性炭应急投加系统,在受工业废水冲击影响的情况下可保证出水COD的稳定达标排放;深度处理段将原有BAF工艺改造为反硝化滤池,并新建高效沉淀池,强化氮、磷的去除,为远期再提标提供技术保障。

② 城镇污水处理厂提标改造方案的设计应尽量挖掘工艺潜能,充分利用原有构筑物,根据因地制宜、经济适用的原则,既能满足排放标准要求,

又尽可能地减少深度处理单元的设置,从而达到降低投资及运行成本的目的。

#### 参考文献:

- [1] 陈明飞,郑凯凯,王燕,等. 基于全流程分析的污水厂高硝态氮进水优化运行[J]. 中国给水排水, 2019, 35(17): 118-122, 128.
- CHEN Mingfei, ZHENG Kaikai, WANG Yan, *et al.* Optimized operation of a wastewater treatment plant with high nitrate nitrogen concentration influent based on whole process analysis method [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(17): 118-122, 128 (in Chinese).
- [2] 吴代顺,方燕蓝. 氧化沟工艺污水处理厂的活性污泥特性分析[J]. 中国给水排水, 2018, 34(11): 109-113.
- WU Daishun, FANG Yanlan. Characteristic analysis on activated sludge in a wastewater treatment plant with oxidation ditch process [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(11): 109-113 (in Chinese).
- [3] 罗固源,张园,许晓毅. SUFR系统中活性污泥特性及反硝化除磷稳定性[J]. 环境科学研究, 2011, 24(1): 85-89.
- LUO Guyuan, ZHANG Yuan, XU Xiaoyi. Characteristics of activated sludge and stability of denitrifying phosphorus removal in SUFR system [J]. Research of Environmental Sciences, 2011, 24(1): 85-89 (in Chinese).
- [4] CHAI H X, XIANG Y, CHEN R, *et al.* Enhanced simultaneous nitrification and denitrification in treating low carbon-to-nitrogen ratio wastewater: treatment performance and nitrogen removal pathway [J]. Bioresource Technology, 2019, 280: 51-58.
- [5] 袁林江,刘传波,罗大成,等. 同步化学除磷对污水处理系统及A<sup>2</sup>/O单元的影响研究[J]. 安全与环境学报, 2017, 17(6): 2353-2359.
- YUAN Linjiang, LIU Chuanbo, LUO Dacheng, *et al.* Influence of simultaneous chemical phosphorus precipitation on sewage treatment system and A<sup>2</sup>/O unit [J]. Journal of Safety and Environment, 2017, 17(6): 2353-2359 (in Chinese).
- [6] 王淑莹,刘旭,吴蕾. 温度和游离氨对颗粒与絮状污泥硝化性能影响的对比研究[J]. 北京工业大学学报, 2013, 39(2): 297-303.
- WANG Shuying, LIU Xu, WU Lei. Effects of temperature and free ammonia concentration on nitrification between the aerobic granular and the floccular sludges [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39(2): 297-303 (in Chinese).
- [7] 李激,王燕,罗国兵,等. 城镇污水处理厂一级A标准运行评估与再提标重难点分析[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 1-12.
- LI Ji, WANG Yan, LUO Guobing, *et al.* Operation evaluation of urban sewage treatment plants implementing grade I-A standard and analysis on emphasis and difficulties in upgrading the standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 1-12 (in Chinese).
- [8] 黄筹,王燕,郑凯凯,等. 城镇污水处理厂除磷影响因素及优化运行研究[J]. 环境工程, 2020, 38(7): 58-65.
- HUANG Chou, WANG Yan, ZHENG Kaikai, *et al.* The influencing factors and optimal operation of phosphorus removal in urban wastewater treatment plants [J]. Environmental Engineering, 2020, 38(7): 58-65 (in Chinese).
- [9] 尹小斌. 某县城污水处理厂提标改造实践[J]. 中国给水排水, 2019, 35(22): 87-90.
- YIN Xiaobin. Upgrading and reconstruction practice of a county sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(22): 87-90 (in Chinese).
- [10] ABTAHI S M, PETERMANN M, FLAMBARD A J, *et al.* Micropollutants removal in tertiary moving bed biofilm reactors (MBBRs): contribution of the biofilm and suspended biomass [J]. Science of the Total Environment, 2018, 643: 1464-1480.

作者简介:魏翔(1976-),男,甘肃靖远人,博士,高级工程师,主要从事污水处理厂的建设管理工作。

E-mail:xiangwei1123@163.com

收稿日期:2020-08-11

修回日期:2020-10-18

(编辑:任莹莹)