

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.010

# 工业园区污水厂准IV类水质提标改造工程设计

姜 鸣<sup>1</sup>, 石芳永<sup>1</sup>, 顾雪峰<sup>1</sup>, 饶政柱<sup>2</sup>

(1. 北控<杭州>生态环境投资有限公司, 浙江 杭州 310000; 2. 南京市市政设计研究院有  
限责任公司, 江苏 南京 210000)

**摘 要:** 盱眙县某工业园区污水处理厂提标改造工程建设规模为 $2\times 10^4$  m<sup>3</sup>/d, 污水处理厂出水水质除COD $\leq 30$  mg/L、TP $\leq 0.4$  mg/L外, 其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级A标准。原工艺为水解酸化+DN/CN组合滤池+D型滤池+消毒池。提标改造工程针对进水以工业废水为主, 水质波动大、浓度高的特点, 将主体工艺改造为水解酸化+“七段式”生化法+深度处理+紫外消毒。污水处理厂尾水经过人工湿地后, 出水达到地表水准IV类标准。实际运行数据表明, 污水处理厂调试运行期出水基本能够达到设计标准。该工艺充分利用生化单元解决脱氮问题, 且通过深度处理保证难降解有机物的去除。

**关键词:** 工业园区; 提标改造; 准IV类标准

中图分类号: TU992.3 文献标识码: B 文章编号: 1000-4602(2022)02-0059-05

## Design of a Wastewater Treatment Plant Upgrading Project in an Industry Park to Meet Quasi-IV Surface Water Standard

JIANG Ming<sup>1</sup>, SHI Fang-yong<sup>1</sup>, GU Xue-feng<sup>1</sup>, RAO Zheng-zhu<sup>2</sup>

(1. Beijing Enterprises <Hangzhou> Ecological Environment Investment Co. Ltd., Hangzhou 310000, China; 2. Nanjing Municipal Design and Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** The design scale of a wastewater treatment plant (WWTP) upgrading project in Xuyi is  $2\times 10^4$  m<sup>3</sup>/d. Except COD and TP in the effluent which are required to be no more than 30 mg/L and 0.4 mg/L, the effluent quality of the WWTP shall comply with the first level A criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918-2002). The original treatment process was hydrolytic acidification, DN/CN combined filter, D-type filter and disinfection tank. As the influent (mainly industrial wastewater) is characterized by high concentration and large fluctuation of the water quality, the main process of the upgrading project was transformed into hydrolytic acidification, seven-stage biochemical process, advanced treatment and ultraviolet disinfection. After the tail water of the WWTP was purified by the constructed wetland, the effluent quality reached the quasi-IV surface water standard. The trial operation data showed that the effluent quality of the WWTP generally reached the design standard. The process makes full use of the biochemical units to solve the problem of nitrogen removal and ensures the removal of refractory organic pollutants through advanced treatment.

**Key words:** industrial park; upgrading; quasi-IV standard

## 1 项目背景

盱眙县位于淮河下游,洪泽湖南岸。近年来,随着盱眙县经济开发区的快速发展,工业园区内企业数量及规模不断扩大,污水排放波动性大且经常性超标,原有污水处理厂由于工艺存在缺陷,设施老化,对工业废水处理能力有限,导致大量未达标污水直接排入维桥河,对环境造成不利影响。

为改善维桥河水环境,保证盱眙县经济开发区的健康稳步快速发展,开发区对原有污水厂进行提标改造。提标改造工程建设规模  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,采用预处理+水解酸化+“七段式”生化法+深度处理+紫外消毒工艺,污水处理厂出水水质除  $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.4 \text{ mg/L}$  外,其余指标执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。出水达标后进入人工湿地进一步净化,达到地表水 IV 类标准后排入维桥河。

## 2 污水厂现状

污水厂已建规模为  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,远期为  $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。占地面积为  $4.12 \text{ hm}^2$ ,设计出水水质执行一级 A 标准。提标前污水处理工艺流程见图 1。



图 1 提标前污水厂工艺流程

Fig.1 Process flow chart before upgrading

污水厂进水量约  $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,其中工业废水约占 80%,其余为生活污水。工业废水主要来源于皮革加工、机械制造、生物制药、食品加工、电池生产、废油提炼等企业。实际进水水质见表 1。可见,进水水质波动较大,除 SS、TP 外,其他指标经常性超标。进水  $\text{B/C}=0.37$ ,可生化性一般; $\text{C/N}=2.58$ ,原水碳源不足; $\text{C/P}=76$ ,可以生物除磷。此外进水中还含有氰化物、重金属等有毒有害物质。

表 1 提标改造前进水水质

Tab.1 Influent quality before upgrading

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
设计进水	400	180	250	30		4
95% 概率进水	932	398	92	91	102	2.5
平均进水	385	145	89	47	56	1.9
最大值	1 800	584	121	152	164	2.9
最小值	44	13.5	76	4	10.6	1.1

污水厂主要存在以下问题:①原应急池调节区停留时间不足,无法满足进水波动性大的特点,造成系统受冲击严重;②水解酸化池池型设计不合理,各单元易发生短流,实际停留时间不足,严重影响水解酸化效果;③生化段采用 DN 滤池+CN 滤池工艺,不适合处理工业废水,由于运营管理不善,滤池内微生物量很低,滤料污染严重,生化功能基本丧失,且绝大部分设备、管道、阀门等锈蚀、损坏严重。由于存在以上设计缺陷,原工艺无法正常运营,出水 COD、氨氮、TN 等指标无法达标。为应付环保检查,出水口投加大量掩蔽剂(次氯酸钠),导致接纳水体严重污染。

## 3 提标改造目标

根据现状水量及盱眙经济开发区发展情况,本次提标改造工程设计规模为  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。

结合实际进水浓度高、水质波动大、经常性超标的特点,确定设计进水水质。设计出水水质执行《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的 IV 类水质标准( $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$ 、 $\text{TP} \leq 0.4 \text{ mg/L}$ ),其余指标执行一级 A 标准。设计进、出水水质见表 2。

表 2 设计进、出水水质

Tab.2 Design influent and effluent quality

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
进水	500	180	210	45	65	4
出水	30	10	10	5(8)	15	0.4

## 4 设计思路

本次改造工程主要应对措施如下:

① 进水水质波动性大,经常性超标,为此,改造原应急池并新建调节池调节水质水量。

② 进水以工业废水为主,存在难降解有机物,且要求出水  $\text{COD} \leq 30 \text{ mg/L}$ ,因此需要通过水解酸化、高级氧化、吸附等工艺保证出水 COD 达标<sup>[1]</sup>。原系统仅有水解酸化池分解难降解有机物,设计不合理,且水力高程不满足改造方案的需求,改造方案将原细格栅+水解酸化池拆除,新建水解酸化池,以提高废水的可生化性,利于后续的好氧处理。通过工艺比选,深度处理单元最终选定臭氧接触氧化+BAF+活性炭滤池工艺,确保难降解有机物的有效去除。

③ 进水 C/N 低、TN 较高,应尽可能在生化处

理单元完成脱氮,节约外加碳源<sup>[2]</sup>。原DN/CN组合滤池不宜作为工业废水的生化处理单元,改造后仅利用曝气生物滤池部分。新建生化系统采用“七段式”生化组合池,确保氨氮、TN在生化阶段去除。

④ 原系统采用D型滤池作为过滤单元,运行效果不佳,本次改造时废除。新建高效沉淀池,辅助化学除磷,确保SS和TP达标。

改造工艺流程见图2。

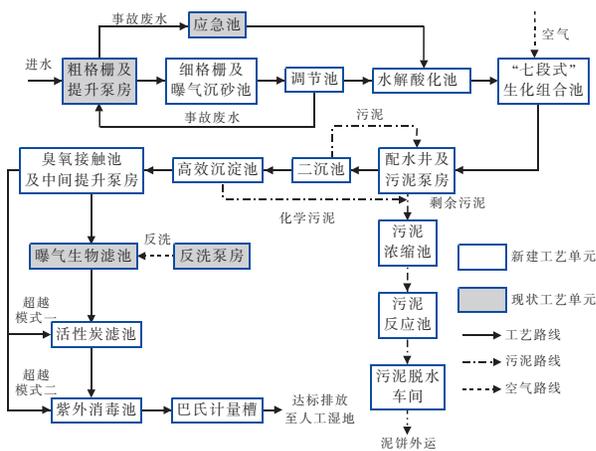


图2 改造后工艺流程

Fig.2 Process flow chart after upgrading

由于原流程简单、工艺不合理,本次改造工程中能够利用或改造的单体有限。除粗格栅和提升泵房、应急池、曝气生物滤池及反洗泵房改造外,其他主要构筑物均为新建。考虑到工艺流程较长,为降低运行成本,深度处理单元设置了超越模式:当进水水质良好,出水水质在臭氧接触池+活性炭滤池处理后即可达标时,可超越曝气生物滤池(超越模式一);出水水质在臭氧接触池处理后即可达标时,可超越曝气生物滤池和活性炭滤池(超越模式二)。

## 5 主要处理构筑物及设计参数

### 5.1 应急池(利旧改造)及新建调节池

应急池建设规模 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (远期),分为反应区、沉淀区、提升区和调节区。当发生事故时,废水进入调节区暂存,同时启动应急池反应区,投加药剂对事故废水进行预处理,去除进水中的有毒有害物质,再进入后续单元。对应急池出水管线进行改造,调节区出水进入新建调节池。反应区反应时间16 min,沉淀区表面负荷 $4.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,调节区停留时间4.8 h。反应区设框式搅拌机3台,轴功率依次

为0.37、0.25、0.18 kW。沉淀区设桁车式刮吸泥刮渣机1台,排泥泵2台(1用1备)。提升区设潜污泵2台(1用1备), $Q=850 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=95 \text{ kPa}$ , $N=45 \text{ kW}$ 。调节区设潜水搅拌机6台, $N=7.5 \text{ kW}$ 。

新建调节池规模 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,补充发生事故时应急池调节区容积,待事故解除后再小流量均匀排入后续单元。调节池停留时间14 h,内设潜污泵3台(2用1备,1台变频), $Q=210 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=70 \text{ kPa}$ , $N=7.5 \text{ kW}$ 。设潜水搅拌机8台, $N=7.5 \text{ kW}$ 。

### 5.2 水解酸化池

新建水解酸化池 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,1座2组,可独立运行。采用布水器均匀布水,上升流式,提高水解酸化效果。有效停留时间12 h,有效水深5.5 m,出口堰负荷 $0.36 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ,上升流速 $0.73 \text{ m/h}$ ,污泥浓度 $10 \text{ g/L}$ ,污泥层厚度4.5 m,清水层厚度1 m。内设布水器60套,36头,配水量 $15 \text{ m}^3/\text{h}$ 。出水堰24套,尺寸为 $27 \text{ m} \times 0.3 \text{ m} \times 0.45 \text{ m}$ , $\delta=12 \text{ mm}$ 。

### 5.3 “七段式”生化组合池

该工艺是在Bardenpho工艺基础上增加预缺氧区和脱气区,基于多点进水和多模式运行的可强化脱氮除磷系统<sup>[3]</sup>。新建生化池 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,1座2组,可独立运行。预缺氧区、厌氧区、缺氧区I、好氧区I、脱气区、缺氧区II、好氧区II停留时间分别为0.3、1.5、7、9.8、0.4、1、1 h,总停留时间21 h,有效水深5.5 m,污泥浓度 $3500 \text{ mg/L}$ ,气水比9.4:1,污泥回流比50%~100%,硝化液回流比150%~300%,总氮负荷 $0.043 \text{ kgTN}/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ , $\text{BOD}_5$ 负荷 $0.090 \text{ kgBOD}_5/(\text{kgMLSS} \cdot \text{d})$ 。

生化组合池设潜水搅拌机(预缺氧区2套, $N=0.85 \text{ kW}$ ;厌氧区4套, $N=2.2 \text{ kW}$ ;缺氧区I 12套, $N=2.2 \text{ kW}$ )、潜水推进器(好氧区I 4套, $N=4 \text{ kW}$ )。设内回流泵5套(2台变频,冷备1台), $Q=648 \text{ m}^3/\text{h}$ , $H=28 \text{ kPa}$ , $N=9.0 \text{ kW}$ ;管式曝气器1480套, $L=1000 \text{ mm}$ ,曝气量不小于 $5 \sim 7.5 \text{ m}^3/\text{h}$ 。鼓风机房设空气悬浮风机3台(2用1备,变频), $Q=65 \text{ m}^3/\text{min}$ , $H=6 \text{ kPa}$ , $N=110 \text{ kW}$ 。

每组生化池设7组曝气器,通过开启相应的曝气器和闸门,可实现改良 $\text{A}^2\text{O}$ 和“七段式”生化组合池工艺。通过开闭进水渠道闸门可实现预缺氧区、厌氧区、前置缺氧区多点进水,充分利用进水中碳源。并在前置缺氧区和后置缺氧区设置碳源投加点,强化脱氮效果。“七段式”生化组合池见图3。

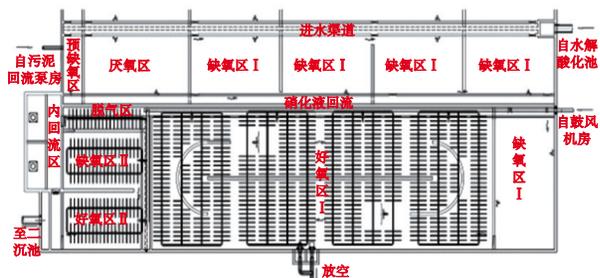


图3 “七段式”生化组合池工艺图(单池)

Fig.3 Seven-stage biochemical tank(single tank)

### 5.4 二沉池

新建二沉池 2 座,单座  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。采用周进周出辐流式,直径为 26 m,有效水深 3.0 m,表面负荷  $0.78 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。内设中心传动单管吸泥机 2 套,  $N=0.37 \text{ kW}$ 。

### 5.5 高效沉淀池

新建高效沉淀池  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,1 座两组。进一步去除污水中的 SS、TP 等污染物。设计混合时间 1.0 min,絮凝时间 15.0 min,斜管沉淀区表面负荷  $7.95 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ,污泥回流量 2%~5%。内设混合搅拌机 1 台,絮凝搅拌机 2 台,剩余污泥泵、回流污泥泵、备用污泥泵各 2 台,  $Q=21 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=50 \text{ kPa}$ ,  $N=0.55 \text{ kW}$ 。

### 5.6 臭氧接触氧化池+曝气生物滤池

由于进水中工业废水占比较大,存在相当一部分难降解有机物,因此需要进行深度处理。提标改造采用高级氧化+生化法组合工艺,即臭氧接触氧化+曝气生物滤池工艺<sup>[4]</sup>。新建臭氧接触氧化池 1 座,规模  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,臭氧接触时间 60 min。臭氧发生间 1 座,设臭氧发生器 2 台(1 用 1 备),  $15 \text{ kg/h}$ ,  $N=113 \text{ kW}$ 。液氧站 1 座,  $V=30 \text{ m}^3$ 。

对现状曝气生物滤池进行改造,更换所有填料、滤板、滤头、设备及管阀件等。更换曝气罗茨风机 10 台(8 用 2 备),  $Q=7.17 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $H=70 \text{ kPa}$ ,  $N=15 \text{ kW}$ ,全部变频;更换反洗罗茨风机 2 台(1 用 1 备),  $Q=40.5 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $H=78 \text{ kPa}$ ,  $N=75 \text{ kW}$ ,全部变频。对现状中间水池及泵房进行改造,更换回流泵 3 台(2 用 1 备,1 台变频),  $Q=460 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=120 \text{ kPa}$ ,  $N=22 \text{ kW}$ ;更换反洗泵 2 台(1 用 1 备,1 台变频),  $Q=882 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=150 \text{ kPa}$ ,  $N=55 \text{ kW}$ 。

### 5.7 活性炭滤池及反冲洗泵房

污水经过臭氧氧化和曝气生物处理后,COD 可达到优于一级 A 标准甚至可以接近  $30 \text{ mg/L}$  的要求,为确保最终出水达标,通过活性炭滤池对难降解

COD 进行处理,同时保证出水 SS 和 TP 达标。

新建活性炭滤池及反冲洗泵房 1 座,规模  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。单格滤池面积  $30.4 \text{ m}^2$ ,共 4 格,平均滤速  $7.0 \text{ m/h}$ ,有效水深 3.5 m。反冲洗方式:气冲强度  $14 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ,反冲时间 4~5 min;水冲强度  $12 \text{ L}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ ,冲洗时间 10~15 min。采用柱状煤质活性炭,碘值  $>900 \text{ mg/g}$ ,比表面积  $\geq 900 \text{ m}^2/\text{g}$ 。反冲洗泵房内设反冲洗卧式离心泵 3 台(2 用 1 备,变频),  $Q=650 \text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=150 \text{ kPa}$ ,  $N=45 \text{ kW}$ ;反冲洗罗茨风机 2 台(1 用 1 备),  $Q=26 \text{ m}^3/\text{min}$ ,  $P=68.6 \text{ kPa}$ ,  $N=55 \text{ kW}$ 。

### 5.8 人工湿地

污水处理厂尾水进入人工湿地进行进一步净化后排放至维桥河。人工湿地设计规模  $2 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,设计进、出水水质见表 3。工艺流程为进水池+水平潜流湿地+垂直潜流湿地+表面流湿地+生态塘+清水池。设计参数:进水池  $\text{HRT}=4 \text{ h}$ ;水平潜流湿地设计水力负荷  $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,  $\text{HRT}=0.8 \text{ d}$ ,填料深度 1.2 m;垂直潜流湿地设计水力负荷  $0.3 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,  $\text{HRT}=1 \text{ d}$ ,填料深度 1.6 m;表面流湿地设计水力负荷  $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,  $\text{HRT}=0.26 \text{ d}$ ,平均水深 0.4 m;景观生态塘设计水力负荷  $0.1 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ,  $\text{HRT}=0.69 \text{ d}$ ,平均水深 1.5 m;清水池  $\text{HRT}=5 \text{ h}$ ,应急出水回流比 50%。

表 3 人工湿地设计进、出水水质

Tab.3 Design influent and effluent quality of the constructed wetland  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
进水	30	10	10	5	15	0.4
出水	30	6		1.5		0.3

### 6 运行效果

提标改造工程于 2020 年 4 月建成并调试运行,平均进水水量约  $1.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ,工艺运行稳定,出水水质基本能够达到设计水质。2020 年 4 月—10 月实际进、出水水质见表 4。可见,除 COD 外,其他出水指标 90% 概率出水水质均优于污水处理厂设计出水标准,且满足人工湿地设计出水标准。

COD 平均出水浓度优于设计指标,但仍有个别天数出水指标超标。分析原因如下:①随着国家环保督查日趋严格,工业企业废水偷排漏排现象减少,且由于疫情原因,2020 年上半年部分企业尚未生产,因此进水水质较往年同期水质偏好。②由于

提标改造工程主要工艺单元均为新建,设计参数较为合理,各项污染物均能达到预期的去除率。③由于曝气生物滤池改造工程尚未完成,实际超越运行,单独开启臭氧氧化工艺对COD的处理效果有限,且运行成本较高,因此臭氧氧化工艺并未经常性开启,造成个别天数COD超标。待曝气生物滤池等工艺段完全运行后,可保证出水COD稳定达标。

表 4 调试运行期间实际进、出水水质

Tab.4 Actual influent and effluent quality during commissioning operation  $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项 目	COD	BOD <sub>5</sub>	SS	NH <sub>3</sub> -N	TN	TP
实际进水平均值	207	70	147	24	32	2.8
90% 概率进水水质	350	119	263	36	48	4.4
实际出水平均值	21	5.6	5.5	0.3	7.5	0.09
90% 概率出水水质	30	7.3	9	0.6	10	0.17

## 7 经济技术分析

提标改造工程总投资约 1.42 亿元,其中工程费约 1.2 亿元,新增用地 6.25  $\text{hm}^2$ 。

运行成本:本项目设备全部运行时吨水电耗约 0.55  $\text{kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$ , PAC (10% 液体) 投加平均浓度 84  $\text{mg}/\text{L}$ , 阴离子 PAM 平均投加浓度 0.5  $\text{mg}/\text{L}$ , 葡萄糖 (80% 液体) 平均投加浓度为 70  $\text{mg}/\text{L}$ , 吨水直接运行成本约 1.2  $\text{元}/\text{m}^3$ 。

## 8 设计亮点

①对于含有难降解有机物的工业园区污水厂,采用水解酸化及深度处理组合工艺(臭氧氧化+BAF+活性炭滤池),确保 COD 稳定达标。②采用“七段式”生化组合工艺,通过多段 AO、多点进水和多模式运营方式,能够在高效脱氮的同时,降低碳源投加量,对于 C/N 比低、TN 高的工艺废水处理具有明显优势。③污水厂与人工湿地联动,在确保高品质出水的前提下,大幅降低投资和运行成本。

## 9 结论

本项目采用预处理+水解酸化池+“七段式”生化组合法+深度处理+紫外消毒工艺,出水水质除  $\text{COD}\leq 30\text{ mg}/\text{L}$ 、 $\text{TP}\leq 0.4\text{ mg}/\text{L}$  外,其余指标达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准。污水厂尾水经人工湿地处理后,出水达到地表水准 IV 类标准。调试运行期生产数据表明,出水水质基本能够达到设计标准,且存在提升

空间。该项目的实施对进水以工业废水为主的污水厂提标改造具有示范意义。

## 参考文献:

- [1] 申世峰,李劭,郭兴芳,等. 工业集聚区集中污水处理厂难降解有机物高标准深度处理研究[J]. 给水排水, 2020, 46(10): 59-64.  
SHEN Shifeng, LI Mai, GUO Xingfang, *et al.* Study on high standard advanced treatment of refractory organic matter in centralized wastewater treatment plant of industrial agglomeration area [J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 46(10): 59-64 (in Chinese).
- [2] 周文明,何钦雅,黄荣敏,等. 污水厂扩建及提标多段强化脱氮改良 A<sup>2</sup>/O 工艺工程实例[J]. 水处理技术, 2019, 45(12): 133-136.  
ZHOU Wenming, HE Qinya, HUANG Rongmin, *et al.* A WWTP expansion and upgrading example with improved A<sup>2</sup>/O process by multi-stage enhanced denitrification [J]. Technology of Water Treatment, 2019, 45(12): 133-136 (in Chinese).
- [3] 李宏斌,刘保成,李昌兵,等. 杭州某城镇污水处理厂五段式 Bardenpho 工艺调试运行[J]. 中国给水排水, 2020, 36(12): 150-154.  
LI Hongbin, LIU Baocheng, LI Changbing, *et al.* Commissioning and operation of five-stage Bardenpho process in a municipal sewage treatment plant in Hangzhou [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(12): 150-154 (in Chinese).
- [4] 岳志芳,杨海燕,闫永利,等. 水解/多段多级 AO/曝气生物滤池处理开发区污水[J]. 中国给水排水, 2019, 35(18): 107-111.  
YUE Zhifang, YANG Haiyan, YAN Yongli, *et al.* Treatment of wastewater from a development zone by hydrolysis acidification/multi-stage and multi-level AO/biological aerated filter process [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(18): 107-111 (in Chinese).

作者简介:姜鸣(1984—),男,江苏南通人,博士,高级工艺工程师,长期从事污水处理设计与研究工作。

E-mail:jiangming@bewg.net.cn

收稿日期:2020-12-07

修回日期:2021-01-27

(编辑:孔红春)