

工程实例

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.20.016

HPB 技术应用于污水处理厂原位扩容改造

巢真¹, 韩红波¹, 陈思源¹, 李玉强¹, 史文燕¹, 高世平¹,
易境¹, 万丽², 戴晓虎³

(1. 湖南三友环保科技有限公司, 湖南长沙 410205; 2. 湖南五方环境科技研究院有限公司, 湖南长沙 410205; 3. 同济大学环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 为消除厂外管网溢流污染,江苏某污水处理厂面临着处理规模从 $3.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $4.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的扩容需求,同时需采用工期短、占地小、投资省和运营成本低的解决方案。针对上述需求,采用了高浓度复合粉末载体生物流化床(HPB)工艺对该厂进行原位扩容改造。改造结果表明,HPB技术大幅提高了处理水量(稳定在 $4.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 以上),出水主要指标满足 $\text{COD}\leq 30\text{ mg/L}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}\leq 1.5\text{ mg/L}$ 、 $\text{TN}\leq 10\text{ mg/L}$ 、 $\text{TP}\leq 0.3\text{ mg/L}$ 的排放标准;在不增加占地的情况下,改造总工期仅85 d,且全程不停水。与改造前相比,碳源投加量减少50 mg/L,运行成本节省约0.09元/ m^3 。

关键词: 高浓度复合粉末载体生物流化床; 原位扩容; 溢流污染; 不停水改造

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)20-0098-06

Application of HPB Process in In-situ Capacity Expansion and Reconstruction of a WWTP

CHAO Zhen¹, HAN Hong-bo¹, CHEN Si-yuan¹, LI Yu-qiang¹, SHI Wen-yan¹,
GAO Shi-ping¹, YI Jing¹, WAN Li², DAI Xiao-hu³

(1. Hunan Sanyou Environmental Protection Co. Ltd., Changsha 410205, China; 2. Hunan Wufang Environmental Science & Technology Research Institute Co. Ltd., Changsha 410205, China; 3. College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to eliminate the overflow pollution of the pipe network outside the plant in Jiangsu Province, a wastewater treatment plant (WWTP) is facing the requirements of promoting the treatment capacity from $3.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ to $4.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, and solutions with short construction period, small land occupation, low investment and low operation cost. In view of the above requirements, high concentration powder carrier bio-fluidized bed (HPB) technology is adopted to carry out in-situ expansion and reconstruction of the WWTP. The transformation results show that the HPB technology has greatly increased the wastewater treatment capacity as stably above $4.0\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$, the main effluent quality indexes meet the discharge standards of $\text{COD}\leq 30\text{ mg/L}$, $\text{NH}_3\text{-N}\leq 1.5\text{ mg/L}$, $\text{TN}\leq 10\text{ mg/L}$, and $\text{TP}\leq 0.3\text{ mg/L}$, respectively. Without increasing land occupation and without water suspension throughout the whole process, the total construction period of the reconstruction is only 85 days. Compared with pre-renovation,

the dosage of carbon source is reduced by 50 mg/L, and the operating cost is saved by 0.09 yuan/m³.

Key words: high concentration powder carrier bio-fluidized bed; in-situ capacity expansion; overflow pollution; renovation without water suspension

为解决污水厂提标或扩容改造期间溢流污染和污水入河等问题,多采用一次性应急的大型一体化污水处理设施提高污水处理能力,其优点是工期较短、见效较快,但存在投资大且易浪费、运行成本高、寿命短、运维管理不便、需另行征地且极易与规划用地冲突等问题。基于此,针对现阶段污水厂提标扩容以及改造期间溢流污染等问题,需采用处理效率高、工期短、投资省、运营成本低、占地面积小、使用年限长的处理工艺或设施。

高浓度复合粉末载体生物流化床(简称 HPB 技术)是基于传统的污水处理工艺,通过向生化池中投加复合粉末载体,提高生化池污泥浓度,构建悬浮生长和附着生长的“双泥”共生的微生物系统;并通过回收系统实现“双泥龄”,强化生物脱氮除磷效果^[1-3]。前期已进行了大量的 HPB 技术中试和工程应用^[1,4],验证了该技术应用于污水厂原位提标扩容的可行性。

江苏省某污水厂面临着迫切的扩容任务,拟采用大型一体化污水处理设施进行临时扩容,但存在工期较长、投资大、运行成本高、占地较大、运维管理不便等问题。针对该污水厂扩容的难点以及重点问题,拟采用 HPB 技术进行改造,进一步验证 HPB 技术应用于污水厂原位扩容改造的可行性,考察工程改造前后在进出水水质、工程投资、运行成本等方面的差异,可为国内类似水质污水厂原位扩容提供借鉴。

1 工程概况

1.1 污水厂现状

该污水厂现状设计规模为 3.0×10⁴ m³/d, 现状处理工艺见图 1。

2021 年 1 月 1 日以前,该厂出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级 A 标准,之后执行苏州市特别排放限值,处理能力降至 2.6×10⁴ m³/d,厂外管网面临溢流污染。为解决溢流问题,需对该污水厂进行扩容改造。扩容改造后处理规模需提升至 4.0×10⁴ m³/d,出水仍执行苏州市特别排放限值要求。

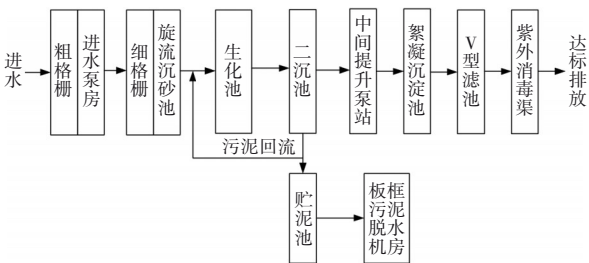


图 1 现状工艺流程

Fig.1 Current process flow diagram

设计进、出水水质见表 1。

表 1 设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality mg·L⁻¹

项 目	COD	BOD ₅	NH ₃ -N	TN	TP	SS
原设计进水水质	430	180	36	48	7	200
改造设计进水水质	480	250	45	55	7	200
改造设计出水水质	≤30	≤10	≤1.5	≤10	≤0.3	≤10

1.2 工程设计难点

① 生化池停留时间偏短,处理能力不足

本次扩容工程需将处理规模从 3.0×10⁴ m³/d 提升至 4×10⁴ m³/d,生化池平均停留时间将从 13.34 h 减至 10.01 h,生化池现状工艺不能满足出水水质标准要求。另外,生化池内现状曝气盘使用年限较长,存在老化现象,处理规模提升后曝气盘的通气量已无法满足扩容需求,故需增加曝气器的供氧能力。

② 实际进水水质超原设计值

该污水厂地处工业区,工业企业较多,进水中含有一部分工业废水,进水水质经常超出原设计值,尤其是冬季水质浓度更高。

③ 不停水改造

在工程建设期间,厂区需维持现有处理能力,无法进行停产或减产改造,改造期间的各项工程措施不能影响厂区正常生产。

④ 深度处理设施处理能力不足

现状深度处理设施设计处理规模为 3.0×10⁴ m³/d,经对深度处理设施工艺参数进行复核,其处理能力不满足扩容需求。

2 改造思路与方案设计

2.1 改造思路

本次扩容工程有以下 3 种改造思路方案：

方案一：采用 HPB 技术对现状生化池进行改造，提高其处理能力，二沉池部分出水超越深度处理直接进入消毒池，实现整体处理规模原位扩容至

$4.0\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

方案二：采用 MBBR 技术对现状生化池进行改造，其余同方案一。

方案三：在厂外溢流口附近新建 1 套一体化处理装置，处理规模为 $1.0\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 。

上述 3 种方案的技术经济比较分析见表 2。

表 2 扩容改造方案比选

Tab.2 Comparison and selection of expansion and reconstruction schemes

项目	方案一:HPB 技术改造	方案二:MBBR 技术改造	方案三:新建一体化装置
主要工程量	采用 HPB 技术改造生化池,新增载体投加系统、生物载体分离回收系统	采用 MBBR 技术改造生化池,增设导流墙,填料区增设拦网,整体改造施工难度大	需新建一体化预处理、生化处理、深度处理、污泥处理等设备和土建基础
新增占地/m ²	在原厂区内扩容,不征地	在原厂区内扩容,不征地	约 2 000
工程投资/万元	约 1 000	约 1 500	约 4 000
抗冲击负荷	兼具活性污泥和生物膜双重特点,且生物膜量大,抗冲击负荷能力强,能适应水量、水质在较大范围内波动	兼具活性污泥和生物膜双重特点,生物膜量较大,抗冲击负荷能力较强	为单一的活性污泥法,抗冲击负荷能力一般
运行难易程度	运行与常规工艺类似,运行成本较常规工艺低	运行与常规工艺类似,运行成本较常规工艺低	运行较复杂,新增的一体化设备运行成本较高
对厂区运行的影响	可实现不停水改造,对厂区运行无影响	生化池难以实现不停水改造,停产时间约 2 个月	对现状厂区运行无影响
改造工期	设备供货、安装、调试达标约 3 个月	设备供货、安装、调试达标约 5 个月	建设工期较长,约 5 个月

从表 2 可看出,在占地、工程投资、抗冲击负荷、改造工期、日常运行等方面,方案一均占优,因此选择方案一作为扩容方案。

2.2 方案设计

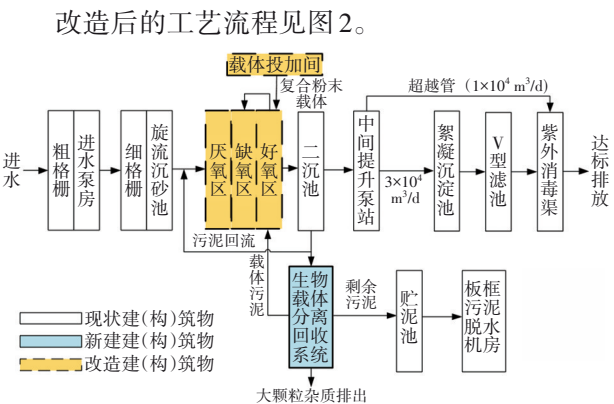


图 2 原位扩容工程工艺流程

Fig.2 Process flow diagram of in-situ expansion project

经复核,现状粗格栅及进水提升泵站、细格栅及旋流沉砂池、二沉池、紫外消毒池、鼓风供氧、加药、脱水等配套辅助设施建设规模为 $3.0\times10^4\text{ m}^3/\text{d}$,但其处理能力尚有一定的余量,均可满足本次扩容要求,仅生化池和深度处理设施不满足本次扩容要

求,需进行原位强化改造。考虑到工期十分紧张,本次原位扩容改造工程宜多采用设备安装,减少土建,以达到缩短工期的目的。

具体改造方案如下：

① 生化池改造。增设载体投加管道和回收管道,向 AAO 生化池中投加复合粉末载体(微米级填料),提高混合液浓度,构建双泥共生的流化床系统,大幅提高生化池的整体处理能力;更换好氧区已损坏的推流器,将厌氧区推流器更换为大功率设备,提高底流速度,防止初始载体沉积;为解决供氧不足问题,拟在好氧区增设曝气器。上述推流器和曝气器均采用不停水安装方式,其中推流器固定在混凝土墩上后整体吊装至生化池,曝气装置采用插入式管式曝气器,在池面安装。

② 载体投加间。将现状鼓风机房部分区域隔断并改造为复合粉末载体投加间,1 座, $L\times B\times H=4.5\text{ m}\times9\text{ m}\times5.4\text{ m}$,内设复合粉末载体投加系统 1 套,集溶解、配制和投加于一体。

③ 生物载体分离回收系统。新建 1 套, $L\times B\times H=9.0\text{ m}\times2.3\text{ m}\times5.5\text{ m}$ (一体化成套集成设备),对剩余污泥中的生物载体进行高效分离和循环利用,

同时将剩余污泥排放至污泥处理系统。

④ 采用HPB技术改造后,二沉池出水COD、BOD₅、TN、NH₃-N、TP可直接达到本次设计出水标准,一般情况下出水SS在20 mg/L以下。为解决深度处理设施处理能力不够的问题,考虑 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 二沉池出水通过超越管(现状)接至紫外消毒渠,与深度处理出水 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (SS $\leq 5 \text{ mg/L}$)混合后可满足设计出水标准。

生化池、二沉池主要设计参数分别见表3、4。

表3 生化池主要设计参数

Tab.3 Main design parameters of biochemical tank

设计指标	改造前	改造后
厌氧区水力停留时间/h	1.59	1.19
缺氧区水力停留时间/h	2.73	2.05
好氧区水力停留时间/h	9.02	6.77
总水力停留时间/h	13.34	10.01
污泥浓度/(g·L ⁻¹)	4	6~8
内回流比/%	300	225
外回流比/%	100	75
污泥龄/d	17.18	19.78
好氧BOD ₅ 负荷/(kgBOD ₅ ·kg ⁻¹ MLSS·d ⁻¹)	0.073 1	0.092 7
气水比	6.65	6.00

表4 二沉池主要设计参数

Tab.4 Main design parameters of the secondary sedimentation tank

设计参数	改造前	改造后
二沉池直径/m	43	43
池数/座	1	1
表面水力负荷/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	0.86	1.15
固体负荷/(kg·m ⁻² ·d ⁻¹)	83.53	194.41
沉淀时间/h	4.64	3.48

3 工程实施与调试

3.1 工程目标

① 采用HPB技术进行原位扩容改造,不新增用地,实现处理规模从 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水水质稳定达到苏州市特别排放限值要求。

② 90 d内完成工程实施(含工程设计、设备采购、施工安装)和工程调试,且全程实现不停水改造,不对污水厂日常运行造成影响。

③ 在达到水质水量目标的前提下,实现工程投资和运行成本的节省。

3.2 工程实施

针对扩容中的难点,采用HPB技术对现状生化池进行改造,改造全过程实现不停水、不减产,且过程中未对厂区日常生产造成影响。工程实施改造(含工程设计设备采购及施工安装)耗时55 d。

3.3 工程调试

工程调试分为以下3个阶段:第一阶段为初始阶段,向AAO生化池中投加复合粉末载体(初始投加量为50 mg/L),同时启动生物载体分离回收装置,为载体表面微生物挂膜提供生长条件,待污泥浓度提高至5 500 mg/L,且出水水质良好的情况下,逐步将处理水量提升至 $3.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。第二阶段为强化提升阶段,适当降低载体投加量,待污泥浓度提高至6 000 mg/L且出水水质良好的情况下,逐步将处理水量提升至 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上。第三阶段为稳定阶段,进一步降低载体投加量,稳定控制在3 mg/L左右,在保证水质达标的前提下,处理水量持续稳定在 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上。以上工程调试耗时30 d。

4 实际运行效果

本工程的工期为2022年4月—10月,其中设计、设备采购、安装和调试周期共耗时85 d。调试运行期间,设备设施均运行良好。采用HPB技术进行原位扩容改造后,实现了处理规模从 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,出水指标稳定达到苏州市特别排放限值要求。

4.1 处理水量、水质

将2022年HPB技术改造后调试和稳定运行期间(6月16日—10月8日)与改造前2021年同期的处理水量进行对比。2021年同期的处理水量日均值为 $2.82 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。2022年6月16日开始投加复合粉末载体进行HPB技术调试,水量逐渐提升,6月30日处理水量提升至 $4.03 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。6月30日—8月5日,处理水量稳定达到 $4.00 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 及以上,峰值水量为 $4.56 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,日均值为 $4.07 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,达到原位扩容的目标。

改造前、后、出水水质对比见表5。

改造后处理规模由 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要出水水质指标与改造前基本持平,且出水稳定达到苏州市特别排放限值要求。二沉池出水TP均在0.3 mg/L以下,与深度处理出水TP基本相同。二沉池出水SS均在20 mg/L以下,均值约

14 mg/L,深度处理出水SS均值约5 mg/L,二者混合后SS可稳定控制在10 mg/L以下。

表5 改造前、后实际进、出水水质对比

Tab.5 Comparison of actual influent and effluent quality before and after reconstruction $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$

项 目			改造前	改造后
COD	进水	范围	172.00~487.00	174.00~656.00
		均值	319.92	319.05
	出水	范围	11.00~28.00	15.00~29.00
		均值	21.32	24.22
$\text{NH}_3\text{-N}$	进水	范围	15.60~45.00	14.40~48.20
		均值	33.62	33.65
	出水	范围	0.09~0.70	0.11~0.84
		均值	0.27	0.26
TN	进水	范围	20.90~66.00	16.80~50.20
		均值	41.64	41.01
	出水	范围	2.56~9.27	4.80~8.66
		均值	6.61	7.16
TP	进水	范围	2.64~9.84	2.28~10.80
		均值	4.96	4.85
	出水	范围	0.03~0.26	0.06~0.28
		均值	0.11	0.14
SS	进水	范围	66.00~198.00	86.00~252.00
		均值	131.18	144.68
	出水	范围	6.00~8.00	6.00~9.00
		均值	7.13	7.17

4.2 MLSS、 SV_{30} 和产泥量

本工程改造前、后同期实际运行的MLSS、 SV_{30} 和剩余污泥产量对比见表6。

表6 改造前、后MLSS、 SV_{30} 和产泥量对比

Tab.6 Comparison of MLSS, SV_{30} and sludge production before and after reconstruction

项 目		改造前	改造后
MLSS/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	范围	5 510~8 250	4 780~8 912
	均值	7 072	6 202
$\text{SV}_{30}/\%$	范围	36.00~73.00	18.00~40.00
	均值	52.40	22.93
剩余污泥产量/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	范围	0.08~0.90	0.09~0.68
	均值	0.26	0.23

污泥浓度的控制是污水系统日常运行的指标之一,影响有机物、氮、磷的去除。改造后MLSS低于2021年改造前同期,但处理水量从 $2.8\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $4.0\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。其原因是在生化池投加复合粉末载体后,其表面附着大量的微生物构成了附着生长和悬浮生长“双泥”共生的微生物系统,通过生

物载体分离回收系统,优化了生化池内的微生物群落结构,增加了微生物的多样性,大幅提高了脱氮除磷效果^[5-6]。

SV_{30} 值越小,表示污泥沉降性能越好;其值越大,表示污泥沉降性能越差^[7]。改造后的 SV_{30} 值远低于同期改造前,说明投加复合粉末载体对污泥的沉降性能有明显的改善,有利于提高二沉池的抗水量冲击负荷能力,为原位扩容提供了保障^[8]。由于二沉池沉降性能好,出水SS较低,处理水量较大时部分污水可以超越深度处理运行,确保总出水水质稳定达标。

改造后进水水质除SS略有升高外,其他水质基本与改造前持平,但改造后单位产泥量略低于改造前,说明HPB技术不会增加污泥产量。从物料平衡来看,载体的回收率为90%~95%,会有少量流失,需定期补充,稳定运行后补充量约3 mg/L,因载体流失增加的污泥量较少。另外,HPB生化系统中活性污泥与生物膜共存,二者的产泥量相差较大,生物膜产泥量远小于活性污泥。综上所述,改造后载体少量流失,增加产泥量,但HPB技术载体表面附着性微生物的产泥量小于单一活性污泥法,二者增减相抵,因此,HPB技术的产泥量基本与常规活性污泥法的产量相当。

4.3 技术经济分析

经分析比较,在厂外采用一体化污水处理设备扩容 $1.0\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (原解决方案),工程费用约4 000万元,在厂内采用HPB技术进行原位扩容,工程费用约1 000万元,可节省3 000万元,经济效益十分显著。

本工程改造后,因处理水量增加,实际吨水电耗减少 $0.045 8 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{m}^3$,折算成本费用减少 $0.061 \text{ 元}/\text{m}^3$;日常载体补充量为3 mg/L,折算成本费用增加 $0.015 \text{ 元}/\text{m}^3$;碳源投加量实际减少50 mg/L,折算成本费用减少 $0.044 8 \text{ 元}/\text{m}^3$;PAC投加量减少152 kg/d,投加费用节省80%,折算成本费用减少 $0.007 6 \text{ 元}/\text{m}^3$;改造后单位经营成本(电耗+药耗)约节省 $0.098 4 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。

5 结论

① 该污水厂采用HPB技术原位扩容改造后,实现了处理规模由 $3.0\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 提升至 $4.0\times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,且出水主要指标(COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN和TP)均可稳定

达到苏州市特别排放限值要求。

② 该污水厂采用HPB技术原位扩容改造,未新增用地,90 d内完成了工程实施(含工程设计、设备采购、施工安装)和工程调试,且全程实现不停水改造,未对污水厂日常运营造成影响。

③ 该污水厂采用HPB技术原位扩容改造后,工程费用相比一体化污水处理设备方案节省3 000万元,运行成本节省0.098 4元/m³,经济效益显著。

④ 该污水厂采用HPB技术原位扩容改造后,其运行管理方式与改造前AAO工艺基本一致,对厂区运行人员无特殊要求。运行后设备设施运行良好,生化池内未发现载体沉积,亦未发现载体对设备有磨损。

参考文献:

- [1] 柴晓利,韩红波,张宏亮,等. HPB工艺用于污水厂提标扩容改造的生产性试验研究[J]. 中国给水排水, 2021, 37(1): 9-15.
CHAI Xiaoli, HAN Hongbo, ZHANG Hongliang, *et al.* Full-scale test of HPB process applied in upgrading and capacity expansion of a wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37 (1): 9-15 (in Chinese).
- [2] 徐文征,金伟,曹达文,等. 悬浮硅藻土生物反应器的低温启动[J]. 净水技术, 2006, 25(1): 13-15, 68.
XU Wenzheng, JIN Wei, CAO Dawen, *et al.* Start-up of diatomite earth bioreactor in low temperature condition [J]. Water Purification Technology, 2006, 25 (1): 13-15, 68(in Chinese).
- [3] 金伟,赵雅萍,徐祖信,等. 硅藻土复合生物反应器处理生活污水[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(12): 1626-1629.
JIN Wei, ZHAO Yaping, XU Zuxin, *et al.* Treatment of municipal wastewater using combined bio-diatomaceous earth [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2005, 33(12): 1626-1629 (in Chinese).
- [4] 牟悦,柴晓利,韩红波,等. 城镇污水处理厂提标改造HPB技术中试研究[C]//《中国给水排水》杂志社. 中国污水处理厂提标改造高级研讨会论文集. 天津:《中国给水排水》杂志社, 2019: 257-260.
MOU Yue, CHAI Xiaoli, HAN Hongbo, *et al.* Pilot

study on HPB technology for upgrading urban sewage treatment plant [C]//China Water & Wastewater Editorial Office. Proceedings of Advanced Symposium on Upgrading of Wastewater Treatment Plants in China. Tianjin: China Water & Wastewater Editorial Office, 2019: 257-260 (in Chinese).

- [5] 杨志斌,黄勇,潘杨. 采用双泥系统的废水脱氮除磷工艺的研究现状与进展[J]. 环境科学与管理, 2006, 31(6): 67-71.
YANG Zhibin, HUANG Yong, PAN Yang. Present situation and progress of biological nitrogen and phosphorus removal using two-sludge systems [J]. Environmental Science & Management, 2006, 31 (6): 67-71 (in Chinese).
- [6] 罗宁,罗固源,吉方英,等. 新型双泥生物反硝化除磷脱氮系统中微生物的组成[J]. 给水排水, 2003, 29(8): 33-35.
LUO Ning, LUO Guyuan, JI Fangying, *et al.* Microorganism groups in biological P and N removal process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2003, 29(8): 33-35 (in Chinese).
- [7] 左金龙,王淑莹,彭赵旭,等. 低溶解氧下微膨胀污泥对污染物的去除性能[J]. 中国给水排水, 2009, 25(15): 11-14.
ZUO Jinlong, WANG Shuying, PENG Zhaoxu, *et al.* Pollutants removal efficiency of micro-bulking sludge under low DO [J]. China Water & Wastewater, 2009, 25 (15): 11-14 (in Chinese).
- [8] 徐行勋,刘振肖,黄丽. A/O+硅藻土强化脱氮工艺处理城市污水试验研究[J]. 环境影响评价, 2011, 33(2): 24-26, 37.
XU Xingxun, LIU Zhenxiao, HUANG Li. Experimental study on treatment effects on municipal sewage by A/O and diatomite nitrogen removal process [J]. Environmental Impact Assessment, 2011, 33 (2): 24-26, 37 (in Chinese).

作者简介:巢真(1990-),男,湖南岳阳人,硕士,高级工程师,主要研究方向为污(废)水处理与利用。

E-mail: 983546365@qq.com

收稿日期: 2022-11-10

修回日期: 2022-12-08

(编辑:衣春敏)