

沈磊. 双模式 MSBR 工艺在城镇污水厂雨季工况中的中试试验[J]. 净水技术, 2024, 43(4):85-94, 168.

SHEN L. Pilot test of dual-mode MSBR for wet weather flow treatment in urban WWTP[J]. Water Purification Technology, 2024, 43(4):85-94, 168.

双模式 MSBR 工艺在城镇污水厂雨季工况中的中试试验

沈磊*

(可事托环保设备<上海>有限公司, 上海 200030)

摘要 我国城镇污水处理厂在雨季往往面临短时间激增的水力冲击负荷,因污水厂二级处理系统通常按旱季流量设计,无法应对超量的雨季合流污水,导致厂前溢流或厂内超越,严重污染了受纳水体。研究采用含多点进水功能的双模式改良型序批间歇反应器(MSBR)在浙江某污水处理厂模拟雨季超量合流污水的生化处理,通过中试试验证明了该工艺可在合流污水达到 2~4 倍旱季设计流量的条件下,确保 COD_{Cr}、氨氮、总氮(TN)等主要出水指标稳定达到并优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 标准,其中出水氨氮平均质量浓度小于 1.0 mg/L, TN 平均质量浓度小于 10 mg/L。其处理效果显著优于物理-化学强化一级处理工艺,为大幅提升污水处理厂的雨季峰值流量处理能力,有效削减雨季受纳水体的冲击性污染,消除城镇黑臭水体提供了新的解决方案。

关键词 城镇污水处理厂 双模式 MSBR 工艺 多点进水 雨季合流污水处理 合流制溢流污染控制

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2024)04-0085-11

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2024.04.011

Pilot Test of Dual-Mode MSBR for Wet Weather Flow Treatment in Urban WWTP

SHEN Lei*

(CorStar Environmental Equipment Shanghai Co., Ltd., Shanghai 200030, China)

Abstract Domestic urban WWTPs experience hydraulic shock loads which increase drastically during wet weather. The WWTPs are insufficient in handling the peak wet weather combined flow as the treatment capacity of secondary treatment processes is based on dry weather flowrate, which causes overflow ahead of WWTPs or internal bypass inside the WWTPs. The overflow and bypass lead to severe pollution of receiving water. This pilot test was conducted in a WWTP in Zhejiang to determine the peak wet weather biological treatment capacity achievable of dual-mode MSBR with step feed capability. The results demonstrated that a peak wet weather secondary treatment capacity from 2~4 times dry weather flow rate could be maintained, meanwhile the effluent limits such as COD_{Cr}, ammonia nitrogen, total nitrogen(TN) could be maintained at or lower than first class A criteria specified of *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918—2002), among which average ammonia-nitrogen was below 1.0 mg/L, average TN was below 10 mg/L. The results also demonstrated that dual-mode MSBR is remarkably better than any physical-chemical enhanced primary treatment processes in removal efficiency. A new solution is provided to achieve a significant increase in peak wet weather treatment capacity of WWTPs, a remarkable decrease in receiving water's pollution, and the end of malodorous and black water.

Keywords urban wastewater treatment plant(WWTP) dual-mode MSBR step feed wet weather combined flow treatment CSO pollution control

1 研究背景

在水体黑臭治理及海绵城市建设过程中,我国很多城市兴建了沿河截污设施,并提高了截流倍数,

通过集中式城镇排水系统对汇水区域的雨季流量进行快速收集及输送。但处于排水系统末端的污水厂处理规模通常按照旱季流量进行设计,并未考虑雨季峰值流量的处理,导致雨季超出污水厂处理能力的混合污水在厂前或中途管线溢流形成合流制溢流(CSO)污水,造成严重的沿途或受纳水体“返黑返

[收稿日期] 2023-03-20

[通信作者] 沈磊(1984—),男,工程师,研究方向为城镇水污染治理及资源化利用, E-mail: Lshen@corstarco.com。

臭”问题^[1]。

近年来,我国上海、昆明及武汉等市的部分城镇污水厂通过新建化学强化一级处理(CEPT)、高效沉淀池等物化处理工艺对雨季合流制混合污水进行处理,在优化药剂选型及运行工况的条件下,其有机物(COD_{Cr})去除率可达50%~80%,悬浮物(SS)去除率为60%~90%,总磷(TP)去除率为70%~90%,但对于氨氮、总氮(TN)等指标的去除极其有限^[2-3],且新建处理单元还可能面临投资过大和旱季设备闲置等问题^[3]。理论上二级处理对合流污水的净化效果更优,但大部分污水处理厂的二级生化处理系统受水力停留时间(HRT)、微生物增长速率和二沉池活性污泥流失等因素限制,无法应对雨季合流污水剧烈的流量和水质变化,不具备与之匹配的处理能力^[4]。

改良型序批间歇反应器(MSBR)是一种高效稳定且具备较强抗冲击负荷能力的二级生化处理工艺,已在国内外污水处理厂得到了较为广泛的应用。本研究以浙江某污水处理厂为场所,通过中试试验

研究,考察了双模式 MSBR 工艺应对雨季连续冲击负荷的效果,为该厂的运行控制提供指导思路,同时为提高我国城镇污水处理厂对雨季合流污水的处理能力,削减雨季接纳水体污染负荷提供一种新的有效途径。

2 试验材料与方法

2.1 污水处理厂概况

浙江某污水处理厂现状处理规模为60万m³/d,总用地面积为49.88万m²,主要收集服务片区内生活污水及部分工业废水。其中一、二期设计处理能力均为30万m³/d,二级处理工艺分别采用了膜生物反应器(MBR)、MSBR池及AAO生物池,出水水质执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级A标准。污水厂近年实际进水水质及设计出水水质如表1所示。该污水厂进水中工业废水比例较高,且服务区域内的污水管网收集系统短板较为明显,雨水的混入较为严重,导致污水厂的进水水质波动较大,对污水厂的稳定运行造成了一定冲击。

表1 污水厂近年进水水质及设计出水水质
Tab.1 Recent Influent and Designed Effluent Quality of WWTP

项目	pH值	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)	SS/(mg·L ⁻¹)	氨氮/(mg·L ⁻¹)	TN/(mg·L ⁻¹)	TP/(mg·L ⁻¹)
2021年进水水质	7.21~7.57	127.90~416.06	115.80~308.75	16.17~30.96	18.82~43.50	3.12~7.37
2022年进水水质	7.03~7.41	116.06~324.40	96.27~253.09	18.76~25.29	23.32~37.58	2.38~4.96
设计出水水质	6~9	50	10	5(8)	15	0.5

注:括号内限值为水温≤12℃时的控制指标,括号外数值为水温>12℃时控制指标。

2.2 试验装置与运行方式

本次双模式 MSBR 中试装置旱季处理规模为12m³/d,外尺寸为3.2m×2.2m×2.1m,采用集约化一池十单元结构。主体包含AAO反应单元、SBR序批单元及污泥浓缩预缺氧单元等区域,配套多点进水等功能,可根据进水量的变化快速切换运行模式,以适应雨季合流污水流量及污染物负荷波动较大、具有非连续性、爆发性、随机性的污染特征^[5]。其旱季和雨季两种运行方式如图1、图2所示。

旱季或初期雨水期间,采用旱季运行模式,原水全部进入中试装置的4号厌氧单元,依次经过多段缺氧、好氧反应后通过1号及7号序批单元交替沉淀出水。序批单元内污泥回流到2号浓缩单元后进入3号预缺氧单元富集,经内源反硝化脱氮后提升进入4号厌氧反应单元与进水混合,浓缩单元上清

液重力自流入后置1A及7A缺/好氧单元。

当雨季合流污水量超过2.0倍旱季流量时,启动雨季运行模式,通过多点进水装置将超量混合污水分流至6号好氧单元末端,两侧1号及7号序批单元同时沉淀出水,并启动强化污泥回流,避免污泥流失;后置1A及7A缺/好氧单元连续好氧曝气,其余各单元运行状态保持不变。

中试装置总有效容积为11.27m³,其中4号厌氧单元为0.66m³,5/5A两级缺氧单元均为0.73m³,6号好氧单元为3.17m³,2号浓缩单元为0.21m³,3号预缺氧单元为0.25m³,后置1A/7A缺/好氧单元均为0.60m³,1/7号序批单元均为2.16m³。

厌氧/缺氧及序批单元采用搅拌器使泥水均匀混合,好氧单元通过微孔曝气头进行供氧及泥水混合,由空压机供气,气量通过流量阀组进行控制。试

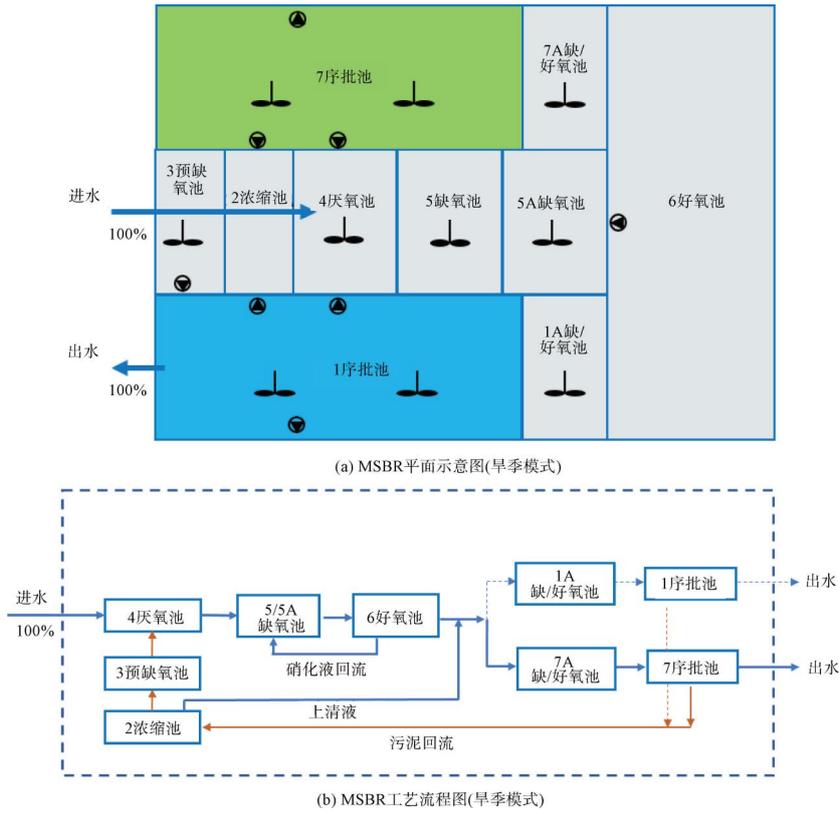


图 1 双模式 MSBR 系统旱季运行模式

Fig. 1 Operation Mode of Dual-Mode MSBR System during Dry Weather

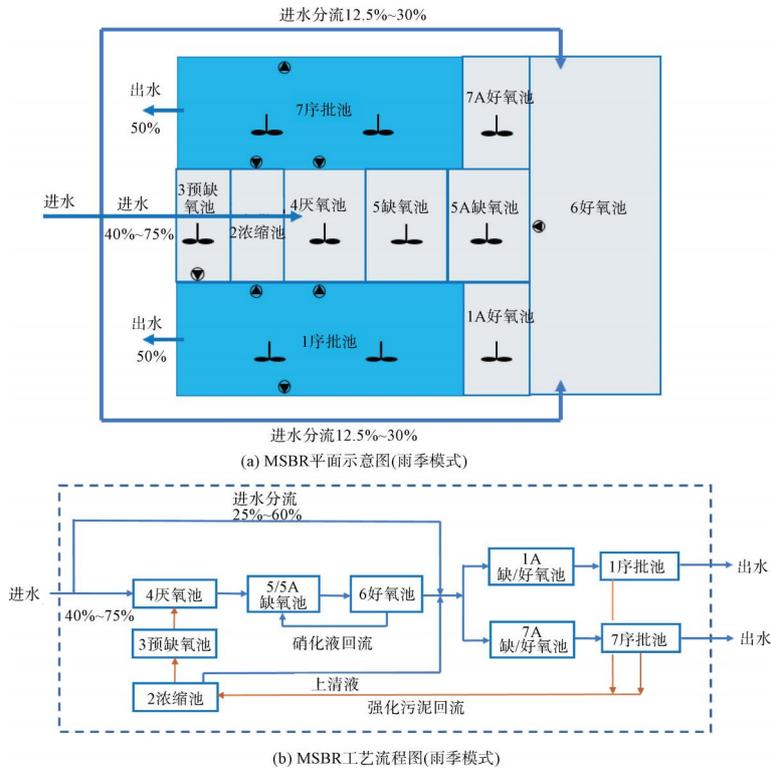


图 2 双模式 MSBR 系统雨季运行模式

Fig. 2 Operation Mode of Dual-Mode MSBR System during Wet Weather

验进水、硝化液回流及污泥回流均采用潜污泵控制,总装机功率为 8.75 kW。中试装置主要工艺设计参数如表 2、表 3 所示。

表 2 双模式 MSBR 中试装置主要设计参数(旱季)

设计参数	设计值
污泥质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	3 500
污泥负荷/[$\text{kg COD}_{\text{Cr}}\cdot(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})^{-1}$]	0.152
污泥龄/d	16.37
HRT/h	
4 号厌氧单元	1.31
5/5A 缺氧单元	1.46/1.46
6 号好氧单元	6.34
2 号浓缩单元	0.42
3 号预缺氧单元	0.50
1A/7A 缺/好氧单元	1.2/1.2
1/7 号序批单元	4.32/4.32
总 HRT	22.53
沉淀区表面水力负荷/[$\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]	0.85
剩余污泥量/($\text{kg DS}\cdot\text{d}^{-1}$)	2.4
空气量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	60.0
设计气水比	7.2 : 1
曝气池溶解氧/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2~4
污泥回流比	100%~200%
好氧单元硝化液回流比	200%~400%
预缺氧浓缩污泥回流比	50%~70%

2.3 试验原水及出水目标

本次试验采用浙江某污水处理厂沉砂池出水作为原水,按 1.0~6.0 倍旱季水力负荷分 6 个工况进行冲击负荷试验,其中不超过 2.0 倍负荷时均采用沉砂池出水,模拟降雨初期较高浓度的冲击负荷;超过 2.0 倍负荷后采用中试装置出水稀释调配原水,模拟降雨中后期大量雨水对于进水水质的稀释作用^[6]。中试装置主要出水水质参考《城镇污水处理

表 3 双模式 MSBR 中试装置主要设计参数(雨季)

设计参数	设计值
污泥质量浓度/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2 500~3 500
污泥负荷/[$\text{kg COD}_{\text{Cr}}\cdot(\text{kg MLSS}\cdot\text{d})^{-1}$]	0.152~0.304
污泥龄/d	16.37
HRT/h	
4 号厌氧单元	0.22~0.66
5/5A 缺氧单元	0.24~0.73/0.24~0.73
6 号好氧单元	1.06~3.17
2 号浓缩单元	0.07~0.21
3 号预缺氧单元	0.08~0.25
1A/7A 缺/好氧单元	0.2~0.6/0.2~0.6
1/7 号序批单元	0.72~2.16/0.72~2.16
总 HRT	3.76~11.26
沉淀区表面水力负荷/[$\text{m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]	0.85~2.55
剩余污泥量/($\text{kg DS}\cdot\text{d}^{-1}$)	2.4~4.8
空气量/($\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$)	90.0~180.0
设计气水比	3.6 : 1~7.2 : 1
曝气池溶解氧/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	2~4
污泥强化回流比	200%~400%
好氧单元硝化液回流比	200%~400%
预缺氧浓缩污泥回流比	100%~140%

厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准,设计进出水水质如表 4 所示。

2.4 试验方案及分析方法

试验按照 1.0~6.0 倍旱季水力负荷分 6 个工况有序展开,其中 1.0~2.0 倍负荷模拟旱季及降雨初期工况,3.0~6.0 倍负荷模拟降雨中后期大水量冲击工况,最后再恢复到 1.0 倍负荷工况运行,考察中试装置在遭受大水力冲击负荷之后的恢复情况。整个试验过程约 5 个月,具体方案进度如表 5 所示。

表 4 双模式 MSBR 中试试验设计进出水水质

项目	pH 值	$\text{COD}_{\text{Cr}}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{SS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	氨氮/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TN/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)
设计进水水质	6~9	≤ 500	≤ 300	≤ 35	≤ 50	≤ 8.0
设计出水水质	6~9	50	10	5(8)	15	0.5
去除率	/	90.0%	96.7%	85.7%	70.0%	93.8%

注:括号内限值为水温 $\leq 12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的控制指标。

表5 双模式MSBR中试装置水力冲击负荷试验

Tab. 5 Hydraulic Shock Load Test for Dual-Mode MSBR Pilot Unit

项目	1	2	3	4	5	6	7
流量/(m ³ ·h ⁻¹)	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	0.5
冲击负荷倍数/倍	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	1.0
HRT/h	22.53	11.26	7.51	5.63	4.50	3.76	22.53
运行时间/d	20	28	30	30	10	5	20

试验期间每天对中试装置进出水取样分析,指标的分析方法均参照《水和废水监测分析方法》(第四版增补版)。其中:COD_{Cr}采用重铬酸钾法,SS采用重量法,氨氮采用纳氏试剂光度法,TN采用过硫酸钾氧化紫外分光光度法,TP采用钼锑抗分光光度法。

3 试验结果分析

3.1 去除效果分析

在完成污泥接种驯化后,水力冲击负荷试验于2022年6月—11月分7个工况进行,共计143 d。

期间取样检测中试装置的进出水水质,分析不同水力负荷下系统对于COD_{Cr}、SS、TN、氨氮及TP的去除效果,最后考察装置经历冲击负荷后的恢复能力。各工况段主要运行数据汇总如表6、表7所示。

由试验数据可知,除个别时段,双模式MSBR中试装置出水COD_{Cr}、TN、氨氮浓度可稳定达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级A排放标准;出水SS及TP浓度则可达到一级B排放标准,通过高效沉淀及过滤等深度处理,可进一步达到一级A排放标准。对于各项指标的达标情

表6 水力冲击负荷试验运行数据

Tab. 6 Operation Data of Hydraulic Shock Load Test of Dual-Mode MSBR Pilot Unit

工况	冲击负荷/倍	进水量/(m ³ ·h ⁻¹)	COD _{Cr} /(mg·L ⁻¹)		SS/(mg·L ⁻¹)		氨氮/(mg·L ⁻¹)		TN/(mg·L ⁻¹)		TP/(mg·L ⁻¹)	
			进水均值	出水均值	进水均值	出水均值	进水均值	出水均值	进水均值	出水均值	进水均值	出水均值
1	1.0	0.5	302.60	44.40	240.85	10.38	25.66	0.68	32.82	7.86	5.11	0.51
2	2.0	1.0	408.29	39.76	297.25	11.34	25.84	0.80	36.61	9.27	5.85	0.66
3	3.0	1.5	216.02	33.43	161.75	12.11	20.60	0.97	29.08	9.26	3.97	0.55
4	4.0	2.0	149.00	37.60	137.02	13.55	15.26	0.81	21.23	8.53	2.82	0.45
5	5.0	2.5	107.00	44.00	64.14	20.17	11.22	1.12	20.49	9.13	2.88	0.66
6	6.0	3.0	98.00	41.00	59.55	23.90	10.27	1.10	19.11	9.23	2.73	0.73
7	1.0	0.5	382.25	49.85	321.05	13.90	22.01	2.51	32.96	13.66	5.38	1.03

表7 水力冲击负荷试验去除率数据

Tab. 7 Removal Rate Data of Hydraulic Shock Load Test of Dual-Mode MSBR Pilot Unit

工况	冲击负荷/倍	进水量/(m ³ ·h ⁻¹)	去除率				
			COD _{Cr}	SS	氨氮	TN	TP
1	1.0	0.5	84.62%	95.29%	97.27%	74.18%	88.65%
2	2.0	1.0	89.81%	95.50%	96.52%	72.92%	87.72%
3	3.0	1.5	84.62%	91.61%	95.38%	66.98%	87.31%
4	4.0	2.0	74.10%	84.48%	94.40%	59.01%	84.02%
5	5.0	2.5	58.37%	66.17%	90.14%	54.65%	76.98%
6	6.0	3.0	56.99%	58.54%	89.18%	51.82%	73.15%
7	1.0	0.5	86.72%	95.49%	89.82%	58.17%	81.85%

况主要有以下分析。

3.1.1 COD_{Cr} 去除效果分析

如图 3 所示,在 1.0~4.0 倍水力负荷条件下,系统的有机物降解较为充分,COD_{Cr} 平均去除率最高可达到 89.81%,出水 COD_{Cr} 质量浓度在 30~50 mg/L,可达到一级 A 排放标准。而在 5.0~6.0 倍水力负荷条件下,由于采用出水回流稀释,进水总有机负荷变化并不大,但 COD_{Cr} 的去除率仍然呈较为明显的下降趋势。结合出水 SS 指标的变化情况,

可以判断出水 COD_{Cr} 的增加大部分是由沉淀时间减少后出水中颗粒性有机物的上升引起的。在生物菌种的总量没有严重流失的情况下,尽管整体 HRT 有所减少,生长迅速的异养菌仍可在很短时间内完成有机物降解作用。因此,在出水不发生跑泥的情况下,水量冲击负荷的增加对于 COD_{Cr} 的去除并不会产生很大影响。通过适量投加混凝剂及物理过滤等手段可进一步提高出水 COD_{Cr} 的排放标准。

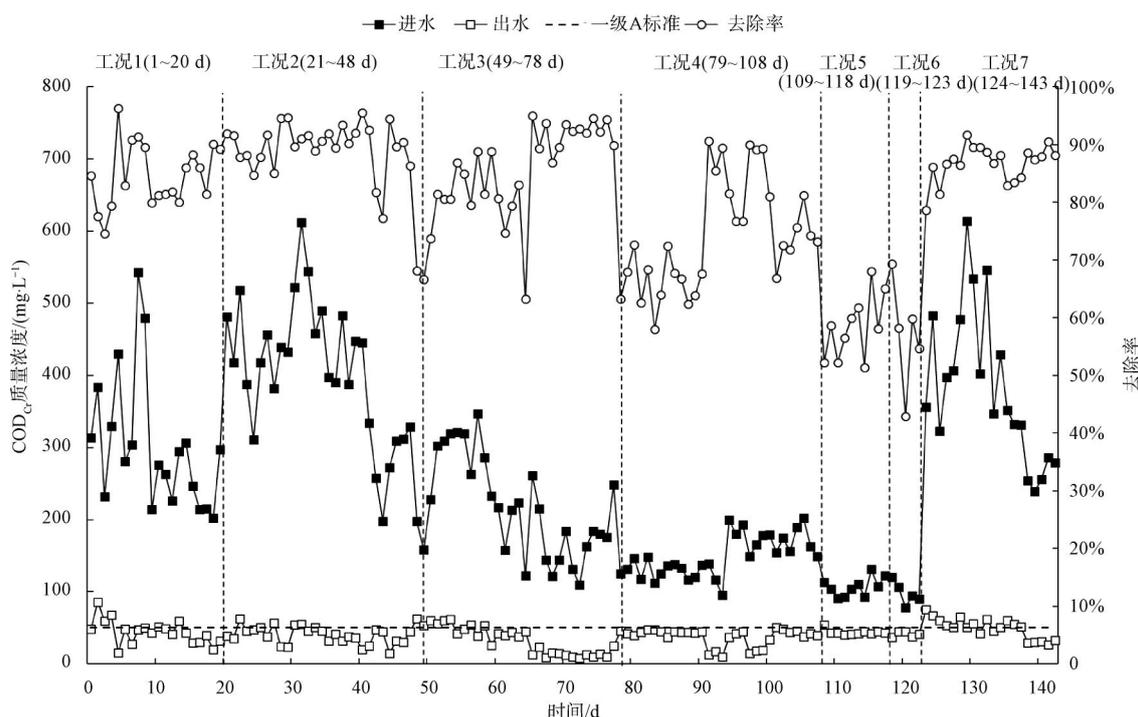


图 3 试验阶段 COD_{Cr} 去除效果统计

Fig. 3 Removal Efficiency of COD_{Cr} during Hydraulic Shock Load Test

3.1.2 SS 的去除效果分析

由图 4 可知,试验过程中出水 SS 可维持在较低水平,但 2.0 倍以上的水力冲击负荷对于 SS 的去除率影响逐渐增大,出水 SS 质量浓度也较难以继续稳定在 10 mg/L 以下。

MSBR 中试装置通过启动多点进水及污泥强化回流,可有效避免大量活性污泥快速地被带入到沉淀区域,从而降低了沉淀区域的入流固体负荷^[7];而雨季模式下的两侧序批单元同时出水,提高了沉淀区域可承受的表面水力负荷及固体负荷,避免大量污泥流失和出水水质严重超标;MSBR 沉淀区域设置的中间挡板优化了水力学性能,当水力负荷增加时起到消能作用,使得底部带

起的 SS 有了二次沉淀效应,避免出水堰口附近污泥层的破坏,保证了出水水质^[8]。但在 5.0~6.0 倍水力负荷条件下,沉淀区域的入流负荷超过了设计上限,导致了活性污泥的溢出和出水 SS 较为明显的波动。

3.1.3 氨氮去除效果分析

试验阶段各工况下的氨氮去除如图 5 所示。除工况 7 恢复阶段初期,在不同水量负荷条件下系统的硝化去除率未出现明显波动。由于雨季运行模式的启动确保了系统生物量在整个冲击负荷试验中未发生明显流失,系统污泥龄可保持大于硝化菌世代时间,尽管系统实际的好氧反应时间随着冲击水量的增加有所减少,但在水温较高、曝气充分且硝化菌

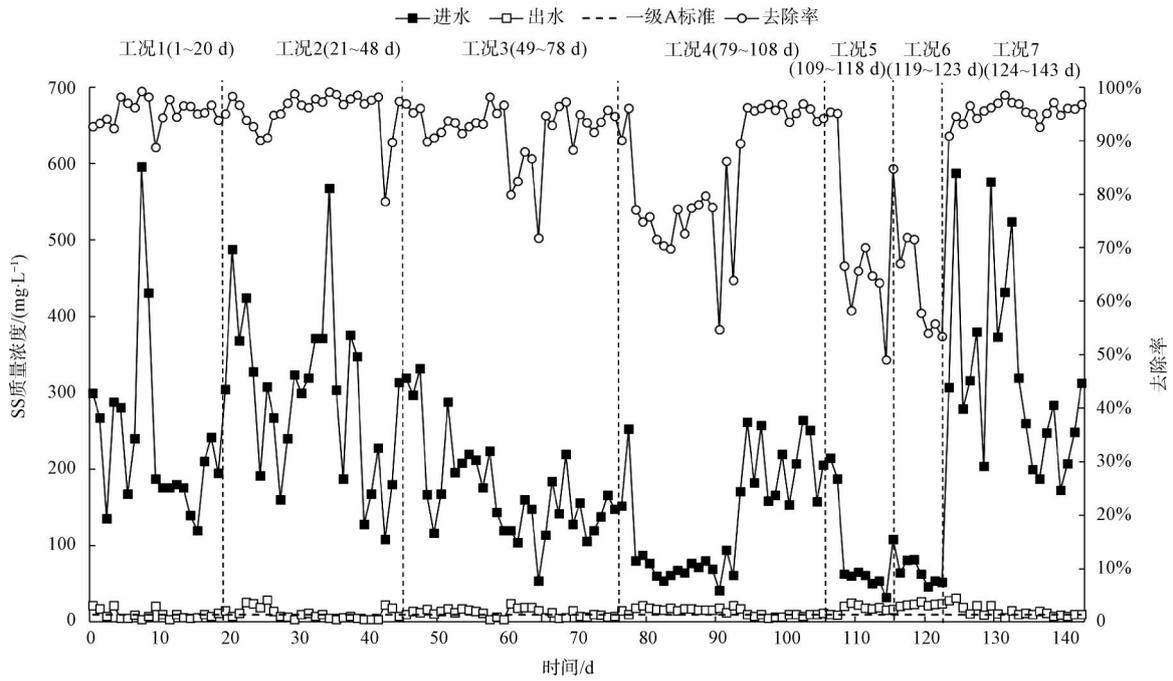


图4 试验阶段 SS 去除效果统计

Fig. 4 Removal Efficiency of SS during Hydraulic Shock Load Test

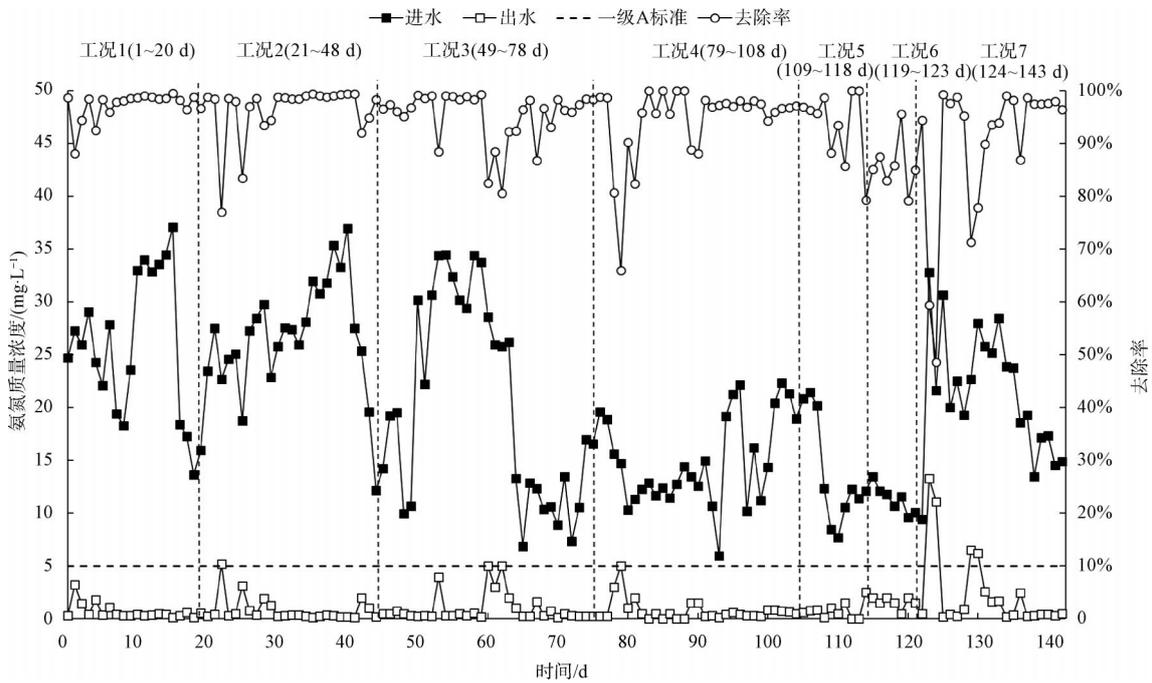


图5 试验阶段氨氮去除效果统计

Fig. 5 Removal Efficiency of Ammonia Nitrogen during Hydraulic Shock Load Test

种数量基本稳定的情况下,系统仍可保证良好的硝化效果。整个试验阶段氨氮去除率大部分时间保持在 89.18%~97.27%,出水氨氮平均浓度显著优于一级 A 排放标准。

3.1.4 TN 去除效果分析

图 6 展示了各工况条件下 TN 的去除情况。在 1.0~6.0 倍水力负荷条件下,随着进水 TN 负荷总量的增加,中试装置出水 TN 指标在大部分时段均

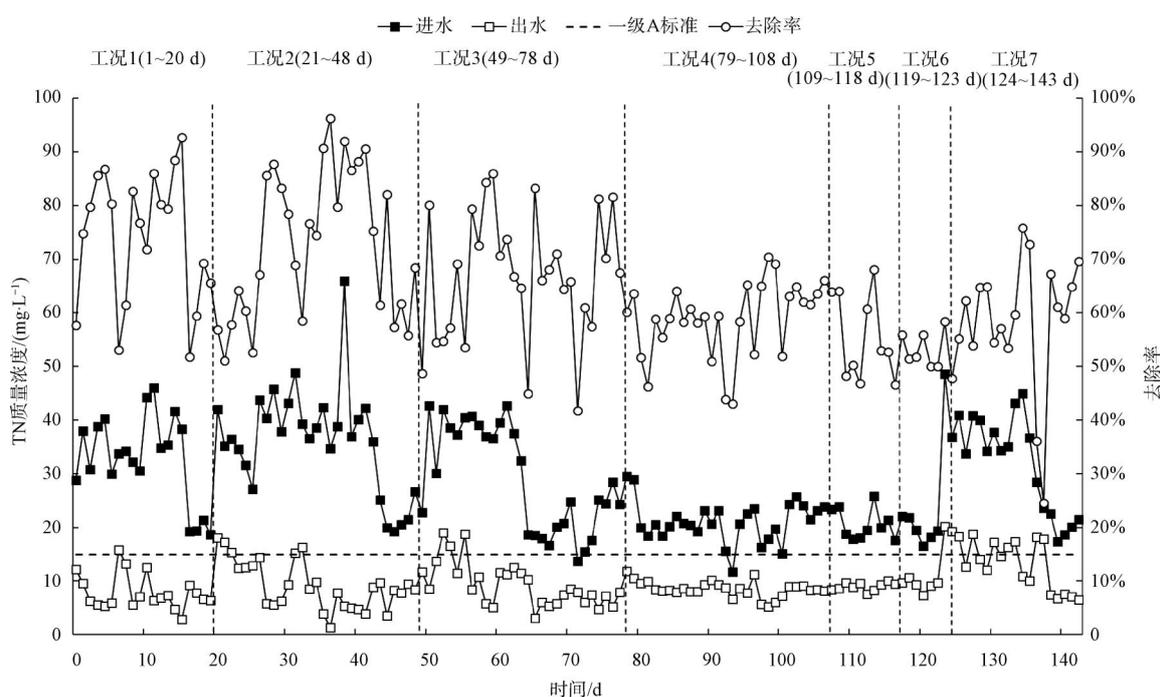


图6 试验阶段 TN 去除效果统计

Fig. 6 Removal Efficiency of TN during Hydraulic Shock Load Test

优于一级 A 排放标准,且能基本稳定维持在 10 mg/L 以下,说明开启多点进水可有效降低雨季合流污水对于系统前端脱氮功能的冲击。但进水量的上升造成了碳源及硝酸盐的稀释、溶解氧的上升以及系统缺氧时间的缩短,且多点进水的启动也导致一部分进水碳源无法进入缺氧池而被反硝化菌利用,这些因素造成系统反硝化所需的电子供体及动力不足,导致系统脱氮效率呈下降趋势,而出水 SS 的波动也会影响到 TN 去除的稳定性。由此可知,在水量提升的过程中通过采取加强曝气区域的溶解氧控制,降低回流硝化液的溶解氧浓度,优化多点进水的流量分配比来提高缺氧池碳源总量^[9],同时控制出水 SS 等措施,是进一步提高系统在水力冲击负荷条件下脱氮效率的关键。

3.1.5 TP 去除效果分析

试验期间各工况条件下系统对于 TP 的去除情况如图 7 所示,在不采取化学除磷的情况下,出水 TP 平均质量浓度在 0.5~1.0 mg/L。通常厌氧 HRT 的变化对于生物除磷的影响较为有限,但随着进水量的上升,进水碳源尤其是挥发性脂肪酸(VFA)浓度被稀释,多点进水亦导致部分碳源无法被聚磷菌有效利用;由于系统脱氮效率的下降,回流污泥中的硝酸盐浓度有所上升,这也会影响到聚磷菌在厌氧

区的生物释磷效果。此外,当出水 SS 浓度随着水力负荷的增加而上升时,出水中的颗粒性 TP 也会同步上升。以上因素均导致了水力负荷提升的过程中,中试装置出水 TP 的波动及除磷率下降。MSBR 系统通过对回流污泥进行浓缩预缺氧处理来降低其中的硝酸盐浓度,尽可能地消除硝酸盐对于厌氧释磷的抑制作用,此举可使厌氧释磷进行得较为充分,为后续缺氧或好氧阶段的过量吸磷创造良好的前置条件^[10]。但影响生物除磷的因素较多,为进一步提高本系统在雨季冲击负荷下的 TP 去除率,确保出水 TP 稳定达到并优于一级 A 排放标准,可考虑辅以化学除磷,作为生物除磷的补充^[11]。

3.1.6 冲击负荷后的恢复情况评估

由以上数据统计可知,本中试装置在水力负荷提高到 4.0 倍旱季流量以上时,运行稳定性及处理效率下降,出水有活性污泥溢出现象发生,可见 4.0 倍水力负荷为本中试装置可承受的极限冲击负荷。为避免生物量的持续流失,将进水量由 6.0 倍恢复至 1.0 倍水力负荷运行,观察装置经历冲击负荷后的运行状况。通过分析发现,中试装置在恢复初期由于污泥浓度下降、进水水质浓度上升及水温较低等不利因素,出水指标出现较大波动,运行稳定后期各项指标的去除率逐步恢复到初始时的 1.0 倍负荷

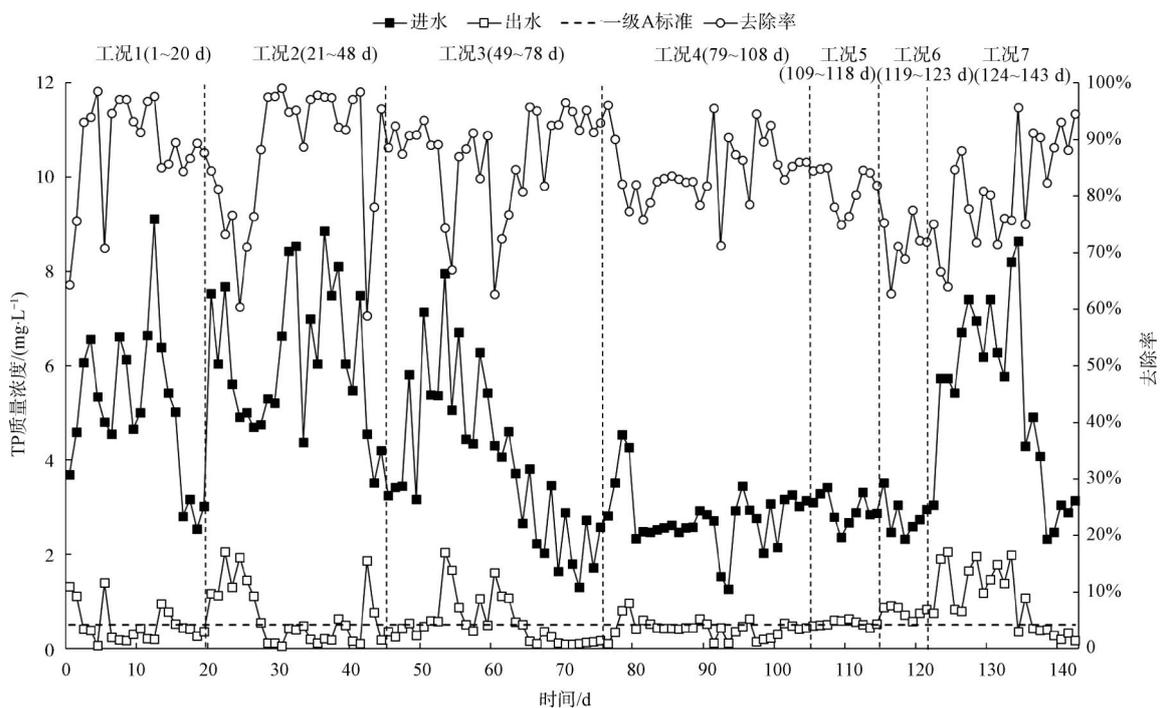


图7 试验阶段 TP 去除效果统计

Fig. 7 Removal Efficiency of TP during Hydraulic Shock Load Test

工况。可见,本中试装置在经历了 2.0~6.0 倍水力负荷冲击之后,仍能较快地恢复到初始时的运行状态。

3.2 水温对于 MSBR 中试装置运行的影响分析

我国暴雨季节多发于夏季,因此本次试验选择在 6 月启动。菲尔普斯(Phelps)公式表征温度对于污水生物处理过程中反应速率常数影响,如式(1)。

$$K_T = K_{20}\theta^{(T-20)} \quad (1)$$

其中: K_T —— T °C 时的反应速率常数, d^{-1} ;

K_{20} ——20 °C 时的反应速率常数, d^{-1} ;

T ——设计温度, °C;

θ ——温度系数,一般取 1.02~1.08。

根据式(1),夏季时污水中活性微生物的反应速率最高可达到冬季的一倍以上,因此,有条件将 MSBR 系统生物反应所需的部分空间和时间转换为沉淀所需的容积和时间^[12]。同时夏季污水温度升高,水的黏滞性降低,活性污泥微生物絮体间的吸附、凝聚力增强,使得沉降所需时间缩短。根据 MSBR 系统特殊的构造,在雨季模式可将两侧 SBR 单元均作为沉淀池使用,此时沉淀区域可承受的表面水力负荷及固体负荷可提高至旱季时的 2.0 倍。

通过试验也证明,当水温在 22~32 °C 时,在雨季运行模式下 MSBR 中试装置可稳定通过最大 400% 的旱季设计流量。

3.3 多点进水在 MSBR 中试装置上的应用分析

将多点进水工艺融入 MSBR 系统,在雨季运行模式下将超量污水分流至好氧单元末端,可有效避免系统前端活性污泥在峰值流量期间过快地被推至沉淀区域,因沉淀区域负荷陡增造成系统出水跑泥及整体处理效率下降等问题。旱季和初雨时期将全部合流污水通过 MSBR 系统全流程处理,以保证污染物降解效果及底物的充分吸附;降雨后期随着径流量不断增大,进水水质浓度由于雨水的稀释而下降,超量污水从 MSBR 池后端接入,经过短时间曝气及沉淀回流处理实现“接触-稳定”,与经过 MSBR 系统全流程处理的部分出水汇合后沉淀排放,可达到较为理想的出水水质。该运行方式与国外的 3W 法(Wet Weather Wastewater)^[13]有异曲同工之处。

3.4 投资运行成本分析

双模式 MSBR 工艺可兼顾旱季及雨季污水处理,无需专门建设物理-CEPT 等雨季合流污水处理构筑物,可有效节省项目投资及用地,且无旱季设备

闲置等问题。在试验过程中,本中试装置包括污水厂一级处理段的运行能耗为 $0.25 \sim 0.40 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,合 $0.18 \sim 0.28 \text{ 元}/\text{m}^3$,略高于常规活性污泥法,其主要原因是中试装置设计规模较小,搅拌器、水泵及空压机等选型偏大,且雨季模式下污泥回流及风量需求快速上升。本次试验未投加碳源、聚合氯化铝(PAC)及聚丙烯酰胺(PAM)等药剂,因此双模式 MSBR 工艺的综合运行成本低于常规活性污泥法+物理-CEPT 等工艺组合。

4 结论及建议

(1) 试验结果显示,当水力冲击负荷不超过 4.0 倍旱季设计流量时,双模式 MSBR 中试装置可连续稳定运行,出水 COD_{Cr} 平均质量浓度为 $33.43 \sim 49.85 \text{ mg/L}$,去除率为 $74.10\% \sim 89.81\%$;出水 SS 平均质量浓度为 $10.38 \sim 13.90 \text{ mg/L}$,去除率为 $84.48\% \sim 95.50\%$;出水氨氮平均质量浓度为 $0.68 \sim 2.51 \text{ mg/L}$,去除率为 $89.82\% \sim 97.27\%$;出水 TN 平均质量浓度为 $7.86 \sim 13.66 \text{ mg/L}$,去除率为 $58.17\% \sim 74.18\%$;出水 TP 平均质量浓度为 $0.45 \sim 1.03 \text{ mg/L}$,去除率为 $81.85\% \sim 88.65\%$ 。各项指标均优于物理-CEPT 工艺,可有效缓解氮磷营养物等向水体的转移释放。

(2) 融合多点进水工艺的双模式 MSBR 工艺,进一步提升了抗冲击负荷能力及操作灵活性,可对进水量水质的波动做出快速响应,有效避免雨季超量混合污水冲击情况下,活性污泥的大量流失及污水处理程度的下降,系统在经历大水量冲击负荷后可迅速恢复至初始状态进行旱季流量的处理。该工艺可有效提升城镇污水处理厂雨季峰值流量的处理能力,减少合流污水溢流量,削减接纳水体的污染负荷。

(3) 双模式 MSBR 工艺兼顾旱季及雨季污水处理,可有效节省投资及用地,其中试装置运行能耗为 $0.25 \sim 0.40 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$,合 $0.18 \sim 0.28 \text{ 元}/\text{m}^3$,因无需投加药剂,其综合运行成本低于常规活性污泥法+物理-CEPT 等工艺组合。

(4) 为确保雨季峰值流量下双模式 MSBR 工艺出水指标可稳定达到或优于《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准,建议通过高效沉淀及过滤等后续工艺进一步提高 SS、TP 指标的去除率;考虑到雨水所携带

的大量泥砂等无机物,建议在一级处理段增设初沉池以有效减轻雨季泥砂水对于双模式 MSBR 工艺的冲击。

(5) 本次中试试验暂未考虑在降雨初期,由于初期雨水冲刷地面携带进入污水处理厂的大量泥沙、黏滞泥、重金属等污染物对水厂生化系统的影响,且试验方案中各工况的持续运行时间长于实际降雨历时。在下一阶段试验中,将重点考察实际降雨过程中初期雨水所携带的这部分污染物,以及短时大流量冲击负荷等因素对于双模式 MSBR 工艺运行的影响及可行有效的应对措施。

参考文献

- [1] 王文亮,张昱,蔡然,等. 美国金县合流制溢流控制案例之技术与标准[J]. 中国给水排水, 2022, 38(8): 99-107.
WANG W L, ZHANG Y, CAI R, et al. Introduction to the combined sewer overflow control technologies and standards in King County, USA[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(8): 99-107.
- [2] 张维,孙永利,李家驹,等. 合流制溢流污染快速净化处理技术进展与思考[J]. 给水排水, 2022, 48(9): 157-164.
ZHANG W, SUN Y L, LI J J, et al. Technical progress and thinking on high-rate treatment of combined sewer overflow[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(9): 157-164.
- [3] 刘智晓,刘龙志,王浩正,等. 流域治理视角下合流制雨季超量混合污水治理策略[J]. 中国给水排水, 2020, 36(8): 20-29.
LIU Z X, LIU L Z, WANG H Z, et al. Watershed management and control strategies for urban combined sewer overflows during peak wet weather flow conditions [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(8): 20-29.
- [4] 曹业始, ABEGGLEN Christian, 刘智晓, 等. 改造当前国内污水管网需要综合考虑的四个因素[J]. 给水排水, 2021, 47(8): 125-137.
CAO Y S, ABEGGLEN C, LIU Z X, et al. Integrated considerations of the four factors to improve and upgrade current sewer systems in China[J]. China Water & Wastewater, 2021, 47(8): 125-137.
- [5] 孙巍,赵红兵. 武汉市黄孝河合流制溢流强化处理设施工艺设计[J]. 中国给水排水, 2022, 38(10): 101-105.
SUN W, ZHAO H B. Design of Wuhan Huangxiao River combined sewer overflow enhanced treatment facility[J]. China Water & Wastewater, 2022, 38(10): 101-105.
- [6] 时玉龙,鲍海鹏,李伟,等. 城镇污水处理厂进水污染物负荷变化规律系统性分析[J]. 给水排水, 2022, 48(10): 64-71.

(下转第 168 页)

了消防系统设计的优化、简化,是城市公园地下式污水处理厂消防设计思路的新选择。

(5)充分利用污水热能、太阳能等绿色能源,年标准煤节约达到 83.47 t,年 CO₂ 排放量减少 218.69 t。

参考文献

- [1] 房阔,王凯军. 我国地下式污水处理厂的发展与生态文明建设[J]. 给水排水, 2021, 57(8): 49-55.
FANG K, WANG K J. Development of underground wastewater treatment plant and eco-civilization in China [J]. Water Wastewater Engineering, 2021, 57(8): 49-55.
- [2] 罗穆喜,朱宇峰. 山坡半地下式污水处理厂总体设计方案[J]. 净水技术, 2020, 39(11): 34-38.
LUO M X, ZHU Y F. Overall design scheme of semi-underground WWTP at hillside [J]. Water Purification Technology, 2020, 39(11): 34-38.
- [3] 何国钢,侯锋,邵彦青,等. 贵阳青山下沉式污水处理厂设计[J]. 中国给水排水, 2016, 32(4): 51-54.
HE G G, HOU F, SHAO Y Q, et al. Design of Qingshan underground treatment plant in Guiyang City[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(4): 51-54.

- [4] 张毅,刘永代,万玉生. 全地下式污水处理厂埋置深度设计优化[J]. 中国给水排水, 2016, 32(18): 49-52.
ZHANG Y, LIU Y D, WAN Y S. Buried depth design optimization of whole underground sewage treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(18): 49-52.
- [5] 肖艳. 上海首座全地下式污水处理厂消防设计研究[J]. 给水排水, 2020, 56(12): 30-35.
XIAO Y. Study of fire protection design for the first underground wastewater treatment plant in Shanghai [J]. Water Wastewater Engineering, 2020, 56(12): 30-35.
- [6] 陈秀成. 全地下污水处理厂防淹设计要点及工程案例[J]. 给水排水, 2022, 58(5): 50-54, 59.
CHEN X C. Key points of flood prevention design and engineering examples of underground municipal wastewater treatment plant [J]. Water Wastewater Engineering, 2022, 58(5): 50-54, 59.
- [7] 李亮,胡文慧,刘武平. 某地下式污水厂地下空间消防设计与探究[J]. 净水技术, 2019, 38(5): 34-40.
LI L, HU W H, LIU W P. Design and exploration of underground space fire protection for an underground type WWTP [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(5): 34-40.

(上接第 94 页)

- SHI Y L, BAO H P, LI W, et al. Systematically analyzing variation of influent pollutant load for municipal wastewater treatment plant[J]. Water & Wastewater Engineering, 2022, 48(10): 64-71.
- [7] DAIGGER G T, SICZKA J S, SMITH T F, et al. Marrying step feed with secondary clarifier improvements to significantly increase peak wet weather treatment capacity: An integrated methodology[J]. Water Environment Research, 2017, 89(8): 724-731.
- [8] 沈磊, YANG Chester. 新一代多单元 MSBR 在梅村污水厂四期扩建工程中的应用[J]. 净水技术, 2019, 38(4): 46-53.
SHEN L, YANG C. Application of multi-unit MSBR processes in phase IV expansion project of Meicun WWTP [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(4): 46-53.
- [9] 刘建明. 多点进水倒置 A²/O + 浸没式超滤用于某半地下污水厂[J]. 中国给水排水, 2021, 37(18): 111-115.
LIU J M. Application of multi-point influent reversed A²/O and submerged ultrafiltration process in a semi-underground WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(18): 111-115.
- [10] 吕利平,李航,张欣,等. 多点进水对前置预缺氧 A²/O 工艺脱氮除磷的影响[J]. 中国给水排水, 2021, 37(15): 8-13.
LÜ L P, LI H, ZHANG X, et al. Effect of step-feed on nitrogen and phosphorus removal of pre-anoxic A²/O process [J]. China Water & Wastewater, 2021, 37(15): 8-13.
- [11] 许谦,贝德光,陈程程,等. MSBR 工艺除磷——以武鸣污水处理厂为例[J]. 净水技术, 2021, 40(6): 71-76.
XU Q, BEI D G, CHEN C C, et al. Phosphorus removal by MSBR process——A case of Wuming WWTP [J]. Water Purification Technology, 2021, 40(6): 71-76.
- [12] 关永年,刘洪波,秦松,等. 污水处理厂总氮提标多模式切换运行[J]. 净水技术, 2022, 41(3): 73-78.
GUAN Y N, LIU H B, QIN S, et al. Multi-mode switching operation of upgrading standard for total nitrogen removal in WWTP [J]. Water Purification Technology, 2022, 41(3): 73-78.
- [13] 杨正,赵杨,车伍,等. 典型发达国家合流制溢流控制的分析与比较[J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 29-36.
YANG Z, ZHAO Y, CHE W, et al. Analysis and comparison of combined sewer overflow (CSO) control in representative developed countries [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(14): 29-36.