

述评与讨论

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.06.005

城镇污水处理厂提标改造技术研究进展

常尧枫¹, 谢嘉玮¹, 谢军祥¹, 郭萌蕾¹, 陆辉², 江磊²,
陈重军^{1,3,4}

(1. 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 江苏 苏州 215009; 2. 苏州高铁苏水水务有限公司, 江苏 苏州 215000; 3. 江苏省环境科学与工程重点实验室, 江苏 苏州 215009;
4. 江苏水处理技术与材料协同创新中心, 江苏 苏州 215009)

摘要: 随着国家和地方排放标准的日趋严格,我国城镇生活污水处理厂的提标改造迫在眉睫。以预处理节省和扩展碳源、二级处理强化脱氮除磷、深度处理氮磷达标为目标,从预处理、二级处理、深度处理三个方面总结分析了碳氮磷提标改造的核心技术原理及应用效果,并认为目前主体工艺的优化加深度处理是保障城镇污水稳定达标的首选,提出了适合我国城镇生活污水处理厂提标改造技术的优选路线。

关键词: 城镇污水处理厂; 提标改造; 工艺优化; 深度处理

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)06-0020-09

Research Progress on Upgrading and Reconstruction Technology of Urban Sewage Treatment Plants

CHANG Yao-feng¹, XIE Jia-wei¹, XIE Jun-xiang¹, GUO Meng-lei¹, LU Hui²,
JIANG Lei², CHEN Chong-jun^{1,3,4}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215009, China; 2. Suzhou Gaotie Sushui Water Co. Ltd., Suzhou 215000, China; 3. Jiangsu Key Laboratory of Environmental Science and Engineering, Suzhou 215009, China; 4. Jiangsu Collaborative Innovation Center of Technology and Material of Water Treatment, Suzhou 215009, China)

Abstract: It has become a national and local trend to formulate strict discharge standards. Accordingly, it is extremely urgent to upgrade and reconstruct the urban domestic sewage treatment plants in China. The aims of this work included reducing the requirement of carbon source and enlarging the sources of carbon by pretreatment, strengthening nitrogen and phosphorus removal by secondary treatment, and reaching the standard of nitrogen and phosphorus by advanced treatment. From the aspects of pretreatment, secondary treatment and advanced treatment, we summarized and analyzed the core

基金项目: 中国博士后科学基金资助项目(2020M671400); 江苏省自然科学基金资助项目(BK20201450); 苏州市民生科技项目(ss2019022); 江苏水处理技术与材料协同创新中心预研项目(XTCXSZ2019-3); 江苏省环境科学与工程重点实验室开放基金资助项目(Zd1804)

通信作者: 陈重军 E-mail: chongjunchen@163.com

technology principles and practical outcomes on the upgrading of carbon, nitrogen and phosphorus removal. It is preferred to optimize the main process and advanced treatment, which could ensure the stability of urban sewage to meet the discharge standards. We further proposed an optimal route, which is suitable for the upgrading and reconstruction of urban domestic sewage treatment plants in China.

Key words: urban sewage treatment plants; upgrading and reconstruction; process optimization; advanced treatment

2015年国务院发布《水污染防治行动计划》(水十条),要求全面控制污染物排放,并明确提出要加快城镇污水处理设施建设改造,敏感区域城镇污水处理设施应于2017年底前全面达到一级A排放标准。同时,近年来多地出台了新的排放标准,排放要求均高于一级A标准,如江苏省在2018年5月发布的《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)、浙江省在2018年12月发布的《城镇污水处理厂主要水污染物排放标准》(DB 33/2169—2018)以及苏州市2018年9月发布的《苏州特别排放限值标准》等,在标准驱动下城镇生活污水处理厂提标改造掀起热潮。目前,我国污水厂主要存在进水碳源缺乏且结构不合理、生化系统低温脱氮效果不理想、化学除磷经济性低和生化系统同步脱氮除磷效果差等问题。针对城镇生活污水处理厂的提标改造技术众多,但均主要针对某一工艺段的强化,难以真正为污水厂稳定提标提供基础。

以城镇污水处理厂排放标准更新为基础,以节约和拓展碳源为起点,从预处理、二级处理、深度处理三个方面综述针对氮磷达标的最新技术研究进展,以期城镇污水处理厂的提标改造提供理论和技术支持。

1 城镇污水处理厂提标改造技术措施

目前,城镇污水处理厂的提标改造技术众多,但多遵循以下原则:先优化运行后再采取工程措施;先利用内部碳源后再外加碳源;先发挥生物除磷后再进行化学除磷。因此以预处理节省和扩展碳源为主线,以强化脱氮除磷为目标,总结分析了节碳、脱氮、除磷及同步节碳脱氮除磷等工艺的核心技术原理及应用效果。

1.1 预处理节省和拓展内部碳源

城镇污水处理厂生物脱氮除磷过程需要碳源作为微生物代谢的基质,因此污水中碳源的质量和

种类直接影响生化系统脱氮除磷的效果。自20世纪90年代,国内污水处理厂开始在预处理单元设置初级沉淀池去除进水中难降解的颗粒态污染物以减轻后续工艺负荷,但颗粒态污染物上附着的大量碳源也随之流失。若不设置初沉池可使进入生物处理单元的碳源增加50%,然而进水携带的高含量颗粒态COD_{ss}增加了对生物处理单元的冲击负荷,造成泥沙淤积严重,严重制约生物脱氮除磷^[1]。因此,关于污水厂前端是否设置初沉池存在较大争议,如何有效解决污水处理厂的碳源不足问题和保障生物处理单元脱氮除磷系统高效运行是研究热点。

1.1.1 跌水区改造节省碳源

我国城镇污水处理厂预处理系统对进水碳源的消耗明显,其中跌水复氧是碳源快速消耗的主因。我国大部分城镇污水处理厂预处理单元(初沉池、沉砂池及出水堰)存在跌水区域,单次跌水的溶解氧DO增加量为2~3 mg/L,增加的DO进入后续管网及构筑物会消耗可生物降解碳源,损耗优质碳源^[2-6]。太湖流域某污水厂SCOD浓度在初沉池之前消耗量达17 mg/L,主要是回流活性污泥、构筑物池壁微生物及进水中的活性微生物利用跌水后的高DO消耗碳源。污水跌落过程带动周围空气形成旋流,污水跌落瞬间破坏水珠的表面张力,瞬间形成的波浪使气水充分混合而加速复氧。对预处理跌水区进行表层覆盖可有效阻断跌水区循环气体与外界大气的交换,比如加盖密闭措施阻断内外空气交换,使出水井内部的溶解氧量比加盖前下降46%^[2]。江边污水处理厂改造工程中采用了跌水复氧技术,在进水提升泵出水渠增加由防水油毡和橡胶卷材制成的控制盖板,溶解氧浓度比改造前降低了2.6 mg/L^[3]。

1.1.2 初沉池改造拓展碳源

有研究表明,初沉池会导致大量可生物降解的

优质碳源消耗。以西安第四污水厂为例,其初沉池进水C/N和C/P比值平均分别为9.44和38.19,而出水C/N和C/P比值平均分别为6.23和25.75,降幅分别约为34%和33%^[6]。利用污泥开发内碳源是解决碳源不足的主要方法,通过初沉污泥和剩余污泥进行厌氧水解酸化,其水解酸化产物挥发性脂肪酸(VFAs)可以弥补反硝化过程和厌氧释磷过程中的碳源不足问题,并实现污泥减量化和资源化。李鹏峰等^[7]利用生物絮凝沉淀和水解发酵工艺,将竖流沉淀池改造为高效初沉发酵单元,以江苏某污水厂沉砂池出水为高效初沉发酵池进水,水力停留时间(HRT)为1 h,研究发现:①高效初沉发酵池对SS的去除率为78%,是污水厂初沉池(去除率为38%)的2倍,同时出水VSS/SS均值提升10%;②出水SCOD可以提高40%,出水SCOD/TN均值可以提升56%;③高效初沉发酵池对TP的平均去除率是初沉池的4倍,而出水C/P可以提升34%。西安市第四污水处理厂采用一种组合机械淘洗装置和初沉污泥发酵的新型活性初沉池APT(Activated Primary Tank)替换传统初沉池^[5-6],在平流沉淀池前端增设机械淘洗装置,并在机械淘洗装置和污泥斗之间设置污泥回流系统,使SCOD和VFAs经过淘洗进入水中,完成颗粒态碳源的转化与释放。改造后APT的出水SCOD和VFAs比改造前传统初沉池分别提高40.54和16.7 mg/L,其中乙酸占75%~85%,且关键功能性发酵细菌也在APT中得到富集^[6]。

1.2 二级处理工艺强化脱氮除磷

城镇污水处理厂二级处理工艺是实现碳、氮、磷同步去除的主体,提标改造一般采取优化运行方式和参数、添加有机碳源、外加填料等措施,强化生化池中功能微生物的活性、生长繁殖及污染物降解作用。

1.2.1 现有工艺参数优化

在污水处理厂运行过程中对污泥龄、混合液回流比、污泥回流比、DO值及缺氧时间等参数的优化控制是有效节碳和提高碳氮磷去除的策略。吴洋^[8]研究了在寒冷地区运营AAO和CAST工艺污水处理厂的运行效能,参数优化前AAO工艺污水厂的污泥龄、混合液内回流比和污泥回流比分别设置为15 d、150%和50%,而将污泥龄、混合液内回流比和污泥回流比分别调整为20 d、200%和75%时,对TN和NH₃-N的去除率分别提高25%和15%;参数优化前

CAST工艺污水厂的污泥浓度、曝气阶段DO和污泥回流比分别设置为2 000~5 000 mg/L、3~4 mg/L和20%,而将污泥浓度、曝气阶段DO和污泥回流比分别调整为4 000~4 500 mg/L、2~3 mg/L和30%时,TN去除率可以提高13%。天津市某污水处理厂在多点进水AAO工艺基础上,将原内回流比由100%~150%提升至100%~250%,并采取多级内回流方式优化碳源分配,增加深度处理措施,TN出水均值由改造前的13.84 mg/L降至8.25 mg/L^[9]。张家口市某污水处理厂采用基于活性污泥1号(ASM1)模型的GPS-X软件建立CASS工艺模型,根据模拟结果延长厌/缺氧时间,改造后春季和冬季出水TN均值分别为9.83和11.45 mg/L,稳定达到一级A标准^[10]。

1.2.2 主体生物处理工艺的改造

对生物段工艺的重建、提升脱氮除磷效能也是重要的提标改造技术之一。上海市某污水处理厂将原CAST池改为调节池,重新构建AAO+MBR工艺,改造后全年出水NH₃-N、TN和TP均值分别为0.2、8.4和0.2 mg/L,去除率分别达到99.1%、71.5%和96.6%^[11]。海宁尖山污水处理厂在原有SBR池的基础上通过隔墙方式将原工艺改造为Bardenpho+MBR工艺,改造后出水TN、NH₃-N和TP均值分别为11.4、0.3和0.3 mg/L,稳定达到一级A标准^[12]。

而MBBR“镶嵌改造”则是通过将MBBR系统嵌入原活性污泥系统,可以在原厂不增容的条件下与现有工艺结合进行原池提标升级。自2008年无锡芦村污水处理厂首次成功应用MBBR工艺进行一级A提标改造后,MBBR已成为国内提标改造的重要技术之一^[13]。表1列举了部分污水厂MBBR提标改造案例^[14-18],其中MBBR的核心悬浮填料可以专性富集硝化/反硝化细菌强化脱氮,高通量测序结果表明,主要的氨氧化菌(AOB)菌属*Nitrosomonas*在MBBR填料和污泥中分别占5.16%和0.8%,主要的亚硝酸盐氧化菌(NO₂-)菌属*Nitrospira*在MBBR填料和污泥中的占比分别为6.54%和1.52%,反硝化菌群在MBBR填料和污泥中的总占比分别为5.89%和5.59%。

此外,可持续升级也是MBBR提标改造的一大亮点。北方某污水厂通过将原主体处理工艺A²/O+MBBR改为Bardenpho+MBBR进行了第二次提标改造,出水由一级A提升至地表水准Ⅳ类标准,且无需新增深度处理设施即可使出水TN均值在10 mg/L

以下。而且 MBBR 也可作为硝化菌群的加载平台, 途径创造条件,有望在污水厂提标改造的同时完成通过释放污泥龄可以为反硝化除磷菌(DPB)的实现 节能降耗^[16]。

表 1 国内部分污水处理厂 MBBR 提标改造案例

Tab.1 MBBR upgrading and reconstruction cases of some domestic sewage treatment plants

项 目	改造时间	处理目标	处理水量/ (10 ⁴ m ³ ·d ⁻¹)	改造工艺	出水 NH ₃ -N/ (mg·L ⁻¹)	出水 TN/ (mg·L ⁻¹)	出水 TP/ (mg·L ⁻¹)	新增深度处 理工艺	悬浮载 体型号
青岛团岛污水 处理厂 ^[14]	2009 年	二级标准 至一级 A	10	改良型 A ² /O+ MBBR	1.63(均值)	10.78 (均值)	0.08(均值)		SPR-I
乌鲁木齐某污 水处理厂 ^[15]	2017 年	二级标准 至一级 A	7	卡鲁塞尔氧化沟+ MBBR	0.94(均值且全年 温度最低的 1 月 份也低于 1 mg/L)	6.73 (均值)		高效混凝 沉淀	SPR-II
山西某污水处 理厂 ^[16]	2016 年	二级标准 至一级 A	6	改良型 A ² /O+ MBBR	0.87(且全年小于 1.5 mg/L)	11.37 (均值)	0.24(均值)		SPR-II
浙江某污水处 理厂 ^[17]	2017 年	二级标准 至一级 A	10	CAST+MBBR	0.75(均值且全年 均低于 5 mg/L)	6.13~14.2 (全年)	0.10(生化池出 水 TP<0.5 mg/L)	磁混凝+纤 维转盘滤池	SPR-II
北方某污水处 理厂 ^[18]	2016 年	一级 A 至 准Ⅳ类	9	原 A ² /O+MBBR 改为 Bardenpho+MBBR	0.54(均值)	8.04 (均值)			SPR-I

1.2.3 侧流除磷辅助生物除磷

侧流除磷(Phostrip)是通过取部分富磷回流污泥至厌氧释磷池,停留 8~12 h 后含磷上清液进行单独的化学除磷,处理后的上清液继续导入缺氧/好氧单元进行生物除磷。这种侧流除磷工艺与 A²/O 工艺结合可以保障出水 TP 在 0.3 mg/L 以下,同时提高主流除磷系统的 C/P 比^[19]。

晋江某污水厂^[20]通过新建侧流除磷系统进行一级 A 提标改造,TP 去除率可以达到 93% 以上,4 月出水 TP 均值仅为 0.17 mg/L。在有足够新建空间的情况下,采用侧流除磷工艺进行污水厂的提标改

造,不但可以保证出水 TP 达标,还可以节省碳源和大量化学除磷药剂。

1.3 深度处理氮磷达标

在预处理阶段优化碳源和生物段强化脱氮除磷的基础上,增加深度处理措施强化氮磷达标也是常用的升级改造技术。

1.3.1 滤池保障脱氮除磷

大部分城镇污水厂通过新增滤池深度处理设施以提升氮磷指标的去除效果,因此滤池成为升级改造中深度处理的主流技术。表 2 列举了部分滤池应用于城镇污水厂提标改造的工程实例^[21-32]。

表 2 滤池在国内城镇污水厂提标改造中的组合实例

Tab.2 Combination examples of filters in upgrading and reconstruction of urban sewage treatment plants

项 目	深度处理用途	深度处理单元工艺组合	应用污水厂名称
反硝化滤池	同时具有反硝化脱氮、过滤去除 SS 和 TP 的功能	混凝沉淀池+反硝化滤池 ^[21]	宜宾某污水处理厂
		磁混凝沉淀池+反硝化滤池 ^[22]	上海某污水处理厂
曝气生物滤池	以硝化为目的的运行方式 N-BAF,以脱氮为目的的运行方式 DN-BAF 以及具有脱氮除磷的 NP-BAF	曝气生物滤池+活性砂滤池 ^[23]	秦皇岛某污水处理厂
		曝气生物滤池+高密度沉淀池 ^[24]	西安市泾渭新城污水厂
滤布滤池	对 SS 去除效果较好,进水 SS≤30 mg/L 时出水 SS≤10 mg/L,同时对 TP 也有一定的去除效果	高效沉淀池+滤布滤池 ^[25]	大同市东郊污水处理厂
		滤布滤池 ^[26]	西安市第三污水处理厂
V 型滤池	对 SS 和 TP 有较好的去除效果,也可升级改造为反硝化 V 型滤池强化脱氮	V 型滤池 ^[27]	昆明某污水处理厂
		V 型滤池 ^[28]	云南某污水处理厂
活性砂滤池	一般用于保障深度处理 SS、TP(投加 PAC)的去除,在滤池前端投加碳源也可以实现反硝化脱氮	混合池+活性砂滤池 ^[29]	银川某污水处理厂
纤维转盘滤池	一般用于保障深度处理 SS、TP(投加 PAC)的去除	混凝沉淀池+纤维转盘滤池 ^[30]	三亚荔枝沟污水处理
		高效澄清池+纤维转盘滤池 ^[31]	长春串胡污水处理
		侧向流斜板沉淀+纤维转盘滤池 ^[32]	河南某污水处理厂

从表2可以看出,反硝化滤池、曝气生物滤池、滤布滤池、V型滤池、活性砂滤池及纤维转盘滤池在提标改造中均有较多应用,其中反硝化滤池、曝气生物滤池以及经过改造的活性砂滤池可以强化脱氮,V型滤池、滤布滤池和纤维转盘滤池可以通过去除SS强化除磷。

当要求污水厂出水 $TN \leq 10 \text{ mg/L}$ 时,深度处理可以考虑采用反硝化深床滤池;当要求污水厂出水 $TN \leq 5 \text{ mg/L}$ 时,可以考虑采用硝化反硝化曝气生物滤池+滤布滤池等非脱氮滤池。此外,滤池与其他深度处理设施之间的组合关系最优是保障脱氮除磷的关键。

以表2中上海某污水处理厂深度处理所采用的“磁混凝沉淀池+反硝化滤池”改造路线为例,该路线使用磁混凝沉淀工艺高效除磷,其出水TP均值可以控制在 0.05 mg/L 以下,但存在导致反硝化滤池生物膜生长所需磷元素不足的风险,从而限制脱氮效率^[1]。大同东郊污水处理厂同样也存在运行风险,其深度处理组合为高效沉淀池+滤布滤池,该组合工艺中的高效沉淀池如果投加过量的聚合氯化铝(PAC)和聚丙烯酰胺(PAM)会造成滤布堵塞,最终影响滤布滤池的正常运行^[1]。

因此在选择滤池时必须论证其与其他深度处理设施的组合效果与制约关系,同时结合前端工艺,保障出水氮、磷达标。

1.3.2 磁混凝澄清强化除磷

磁混凝澄清工艺即在传统混凝沉淀技术的基础上同步投加磁粉,使磁粉与污染物絮凝为一体,以提高沉淀效率,而磁粉可以通过磁分离机回收使用。磁混凝沉淀用作提标改造深度处理工艺对TP去除效果较好,且占地面积小、运行成本低。台州某污水厂^[33]通过新增磁混凝沉淀工艺进行地表水Ⅳ类提标改造,调试期间出水TP稳定在 0.3 mg/L 以下,因减少了混凝剂的投加,所以运行成本仅为 0.189 元/m^3 。江西湖口县双钟污水处理厂^[34]也使用该工艺进行一级A的扩容提标,2018年全年出水TP均值在 0.3 mg/L 以下,运行成本为 0.29 元/m^3 。因此,对于用地紧张且深度处理段已建混凝沉淀池的城镇污水厂,采用磁混凝澄清工艺进行TP的提标具有成本上的优势。

1.3.3 尾水型人工湿地系统脱氮除磷

人工湿地系统处理城镇污水处理厂的尾水具有处理效果好、运行维护简单及景观性强等优势,在污水厂提标改造中的应用日益广泛。尾水人工湿地系统常采用强化预处理系统、潜流湿地、表流湿地及塘系统等四个处理单元,或将各种类型人工湿地单元组合使用,对氮、磷等指标的削减作用显著^[35-40]。

国内部分城镇污水厂尾水人工湿地提标改造案例见表3。

表3 国内部分城镇污水厂尾水人工湿地提标改造案例

Tab.3 Cases of upgrading and reconstruction of constructed wetlands for tail water of some urban sewage treatment plants in China

项 目	深度处理目标	处理水量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	湿地面积/ hm^2	湿地投资/ 万元	工 艺	出水 $\text{NH}_3\text{-N}/$ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 TP/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	出水 TN/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
临安污水处理厂 ^[35]	一级B至一级A	60 000	13.7	13 000	塘系统+表流湿地	0.19(均值)	0.44(均值)	9.14(均值)
长葛污水处理厂 ^[36]	一级A至地表Ⅳ类	60 000	14.7	6 970	微曝气垂直流+潜流+表流+氧化塘	0.49~0.78(全年)	0.3(均值)	
南畲朗污水处理厂 ^[37]	一级A至地表Ⅳ类	100 000	17.9	16 000	生态氧化池+垂直流	0.99±0.18(全年)	0.24±0.08(全年)	
宜兴污水处理厂 ^[38]	一级A基础上TN、TP再削减	5 000	2.4		以建筑废弃块为基质的复合式人工湿地	0.37(均值)	0.03(均值)	5.04
上洋污水厂 ^[39]	一级B至一级A	126 500	23.65	40 200	垂直潜流为主	0.96(均值)	0.22(均值)	
华北某污水厂 ^[40]	一级B至一级A	17 500	5.63		水平潜流+表面流	0.47±0.48(全年)	0.5±0.08(全年)	6.64±3.58(全年)

2 提标改造技术路线选择

综合预处理、强化生物处理和深度处理多途径提标改造,提出了适合我国城镇生活污水处理厂的优化提标改造技术路线,如图1所示。

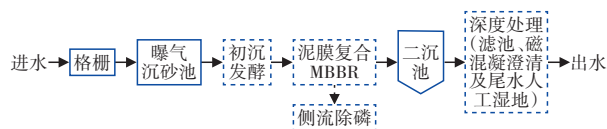


图1 推荐的提标改造技术路线

Fig.1 Recommended technical route for wastewater treatment upgrading and reconstruction process

通过强化预处理挖掘内碳源、强化原生化系统脱氮除磷和新增深度处理保障脱氮除磷三个维度完成氮、磷的高效去除:

① 通过初沉池改造等预处理作用节省和开发污泥内部碳源;

② 重建主体工艺或镶嵌 MBBR 改造将脱氮除磷效能发挥至最佳,同时增加侧流除磷;

③ 合理选用滤池、磁混凝沉淀池及人工湿地等深度处理技术保障氮、磷达标。

3 结语

在城市污水厂面临普遍实施一级A以及更高排放标准的情况下,现行污水处理模式或单一工艺技术提标改造必然难以为继,通过对大量工程案例进行总结,在新一轮的提标改造中,以碳源的全流程利用与强化脱氮除磷为主线,通过构建以“强化预处理-强化主体工艺-深度处理”保障达标的提标改造路线,可以实现城镇污水处理厂高氮磷排放标准条件下的稳定达标。

参考文献:

[1] 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 implemented grade I -A standard and analysis on emphasis and difficulties in upgrading the discharge standard [J]. Environmental Engineering, 2020, 38 (7) : 1-12 (in Chinese).

[2] 李鹏峰,孙永利,隋克俭,等. 某污水厂预处理系统跌水复氧成因初探及控制措施[J]. 中国给水排水, 2017,33(15):85-88.

LI Pengfeng, SUN Yongli, SUI Kejian, *et al.* Study on mechanism and control measures of waterfall oxygenation in pretreatment system in a WWTP [J]. China Water & Wastewater, 2017,33(15):85-88 (in Chinese).

[3] 孙永利,许光明,游佳,等. 常州市污水处理厂提标改造与优化运行成套技术研究与应[J]. 建设科技, 2018(16):114-118.

SUN Yongli, XU Guangming, YOU Jia, *et al.* Research and application of integrated technology for upgrading and optimizing operation of Changzhou municipal wastewater treatment plant [J]. Construction Science and Technology, 2018(16):114-118 (in Chinese).

[4] 孟凡静. 典型城镇污水处理厂碳源回收与利用优化研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2018.

MENG Fanjing. Study on Optimization of Carbon Source Recovery and Utilization in Typical Urban Wastewater Treatment Plants [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2018 (in Chinese).

[5] LIU W, YANG H, YE J J, *et al.* Short-chain fatty acids recovery from sewage sludge via acidogenic fermentation as a carbon source for denitrification: a review [J]. Bioresource Technology, 2020,311:123446.

[6] JIN P K, WANG X B, ZHANG Q H, *et al.* A new activated primary tank developed for recovering carbon source and its application [J]. Bioresource Technology, 2016,200:722-730.

[7] 李鹏峰,郑兴灿,孙永利,等. 高效初沉发酵池处理城市污水的中试研究[J]. 中国给水排水, 2012,28(5):5-8.

LI Pengfeng, ZHENG Xingcan, SUN Yongli, *et al.* Pilot-scale study on efficient primary sedimentation tank with fermentation for treatment of municipal sewage [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28 (5) : 5-8 (in Chinese).

[8] 吴洋. 低温期A²/O工艺及CAST工艺生活污水处理厂运行参数的控制与优化[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2018.

WU Yang. Control and Optimization of Operating Parameters of A²/O Process and CAST Process for Domestic Sewage Treatment [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018 (in Chinese).

[9] 张玲玲,尚巍,孙永利,等. 高标准下天津市津沽污水处理厂提标改造效果分析[J]. 给水排水, 2019,45(10):37-41.

ZHANG Lingling, SHANG Wei, SUN Yongli, *et al.* Analysis of the upgrading effect of Tianjin Jingu

- wastewater treatment plant under high discharge standard [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2019, 45(10): 37-41 (in Chinese).
- [10] 柳蒙蒙, 陈梅雪, 齐嵘, 等. 面向寒冷地区城镇污水处理厂提标改造的ASM模拟优化及其应用[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(4): 1119-1128.
- LIU Mengmeng, CHEN Meixue, QI Rong, *et al.* ASM simulation optimization and practical application on upgrading of urban sewage treatment plant in cold region [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(4): 1119-1128 (in Chinese).
- [11] 高原. AAO-MBR工艺提标改造小型城市污水处理厂[J]. *水处理技术*, 2018, 44(8): 126-128.
- GAO Yuan. Upgrading and reconstruction of small urban wastewater treatment plant by AAO-MBR technology [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(8): 126-128 (in Chinese).
- [12] 高飞亚, 李金河. Bardenpho+MBR工艺用于污水处理厂的升级改造[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(6): 99-101.
- GAO Feiya, LI Jinhe. Application of Bardenpho and MBR process in the upgrading and reconstruction of a WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(6): 99-101 (in Chinese).
- [13] 王翥田, 叶亮, 张新彦, 等. MBBR工艺用于无锡芦村污水处理厂的升级改造[J]. *中国给水排水*, 2010, 26(2): 71-73.
- WANG Zhutian, YE Liang, ZHANG Xinyan, *et al.* Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of Lucun WWTP in Wuxi [J]. *China Water & Wastewater*, 2010, 26(2): 71-73 (in Chinese).
- [14] 韩萍, 许斌, 宋美芹, 等. 团岛污水厂MBBR工艺的升级改造及运行效果[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(12): 110-114.
- HAN Ping, XU Bin, SONG Meiqin, *et al.* Design features and operational effect of Tuandao WWTP upgrading by MBBR in Qingdao [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(12): 110-114 (in Chinese).
- [15] 肖宁, 吴辰平, 吴迪, 等. 新疆某污水厂氧化沟工艺MBBR改造效果分析[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(21): 11-16.
- XIAO Ning, WU Chenping, WU Di, *et al.* Retrofitting effect of oxidation ditch process by MBBR in a wastewater treatment plant in Xinjiang [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(21): 11-16 (in Chinese).
- [16] 吴迪, 周家中, 郑志佳, 等. MBBR用于山西某污水厂提标改造效果分析[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(15): 6-11.
- WU Di, ZHOU Jiazhong, ZHENG Zhijia, *et al.* Application of MBBR process to upgrading and reconstruction of WWTP in Shanxi Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(15): 6-11 (in Chinese).
- [17] 郑志佳, 连来喜, 刘彦华, 等. MBBR+磁混凝用于CAST工艺升级改造的效果分析[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(1): 7-12, 17.
- ZHENG Zhijia, LIAN Laixi, LIU Yanhua, *et al.* Upgrading and reconstruction of CAST process by MBBR and magnetic coagulation process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(1): 7-12, 17 (in Chinese).
- [18] 杨宇星, 吴迪, 宋美芹, 等. 新型MBBR用于类地表Ⅳ类水排放标准升级改造工程[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(14): 93-98.
- YANG Yuxing, WU Di, SONG Meiqin, *et al.* Application of new MBBR in WWTP upgrading to meet class IV surface water standard [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(14): 93-98 (in Chinese).
- [19] 郝晓地, 李天宇, 吴远远, 等. A²/O工艺用于污水处理厂升级改造的适宜性探讨[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(21): 18-24.
- HAO Xiaodi, LI Tianyu, WU Yuanyuan, *et al.* Discussion on suitability of A²/O process for upgrading of wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(21): 18-24 (in Chinese).
- [20] 袁松. 晋江某污水厂升级改造工程设计[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(2): 52-56.
- YUAN Song. Design of upgrading and reconstruction project of a wastewater treatment plant in Jinjiang City [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(2): 52-56 (in Chinese).
- [21] 王杰, 陈钰, 刘颖, 等. 倒置A²/O+反硝化深床滤池在城市污水处理厂中的应用[J]. *水处理技术*, 2020, 46(6): 130-133.
- WANG Jie, CHEN Yu, LIU Ying, *et al.* Application of reversed AAO/denitrification biofilter in a municipal sewage treatment plant [J]. *Technology of Water Treatment*, 2020, 46(6): 130-133 (in Chinese).
- [22] 商佳吉, 洪超, 吕劲衢, 等. 反硝化滤池用于城镇污水处理厂提标改造[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(6): 93-98.
- SHANG Jiagi, HONG Chao, LÜ Jinheng, *et al.*

- Application of denitrification filter in upgrading and reconstruction of an urban wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(6): 93-98 (in Chinese).
- [23] 卫佳,李思倩,王新宇,等. 曝气生物滤池及活性砂过滤系统用于污水厂升级改造[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(16): 58-61, 67.
- WEI Jia, LI Siqian, WANG Xinyu, *et al.* Application of biological aerated filter and activated sand filtration system in upgrading and reconstruction project of sewage treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(16): 58-61, 67 (in Chinese).
- [24] 聂守田,王楠,王璐. 西安市泾渭新城污水厂提标改造及再生水利用工程设计[J]. *中国给水排水*, 2016, 32(14): 44-47.
- NIE Shoutian, WANG Nan, WANG Lu. Design of reconstruction and reclaimed water reuse project of Xi'an Jingwei New Town WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2016, 32(14): 44-47 (in Chinese).
- [25] 危斌,温汝青,马睿,等. 大同市东郊污水处理厂二期工程工艺设计[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(12): 52-55.
- WEI Bin, WEN Ruqing, MA Rui, *et al.* Process design of second-stage project of Dongjiao WWTP in Datong City [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(12): 52-55 (in Chinese).
- [26] 石建会,张雯,郭渊. 西安市第三污水处理厂升级改造工程设计及运行效果[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(22): 98-100.
- SHI Jianhui, ZHANG Wen, GUO Yuan. Design and operation effect of upgrading and retrofitting project in third wastewater treatment plant in Xi'an City [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(22): 98-100 (in Chinese).
- [27] 郭玉梅,李志平,王莹莹,等. A²/O与V型滤池组合工艺强化脱氮除磷性能分析[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(5): 11-15.
- GUO Yumei, LI Zhiping, WANG Yingying, *et al.* Performance of combined process of A²/O and V-type filter for enhanced nitrogen and phosphorus removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(5): 11-15 (in Chinese).
- [28] 王久龙,王连山,梅竹松. 改良型SBR与V型滤池组合工艺处理市政污水[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(4): 83-85.
- WANG Jiulong, WANG Lianshan, MEI Zhulong. Combined process of modified SBR and V-type filter for treatment of municipal sewage [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29(4): 83-85 (in Chinese).
- [29] 张林,肖卫东,徐文刚. 改良A²/O+活性砂滤池工艺用于西北某城市污水处理[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(10): 90-93.
- ZHANG Lin, XIAO Weidong, XU Wengang. Application of improved A²/O and active sand filter technology for municipal wastewater treatment in northwest China [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(10): 90-93 (in Chinese).
- [30] 刘振,鲍广洲,王松,等. AAO氧化沟/纤维转盘滤池用于污水厂改扩建[J]. *中国给水排水*, 2017, 33(22): 67-70.
- LIU Zhen, BAO Guangzhou, WANG Song, *et al.* Application of AAO-oxidation ditch/fiber turntable filter in renovation and expansion project of wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33(22): 67-70 (in Chinese).
- [31] 陈淑芳,张修奎,杨松. A²/O/纤维转盘滤池用于污水处理厂的设计与运行[J]. *中国给水排水*, 2018, 34(12): 57-60.
- CHEN Shufang, ZHANG Xiukui, YANG Song. Design and operation of A²/O/rotary fibre-plate filter for wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2018, 34(12): 57-60 (in Chinese).
- [32] 周丽颖,仲崇川,张玉峰,等. 侧向流斜板沉淀/纤维转盘过滤用于污水厂升级改造[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(14): 104-107.
- ZHOU Liying, ZHONG Chongchuan, ZHANG Yufeng, *et al.* Application of combined process of side-flow inclined-plate settling tank and fiber rotary filter in upgrading and retrofitting project of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(14): 104-107 (in Chinese).
- [33] 杨祝平. 多级AO+双层沉淀+磁混凝澄清工艺用于污水处理[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(8): 53-57.
- YANG Zhuping. Application of step-feed AO + double layer precipitation + magnetic coagulation clarification process in municipal sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(8): 53-57 (in Chinese).
- [34] 魏锋,曹名帅. 改良型氧化沟+磁混凝沉淀工艺用于污水处理厂扩容提标[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(18): 55-57, 63.
- WEI Feng, CAO Mingshuai. Application of improved oxidation ditch and magnetic coagulation sedimentation

- process in expansion and upgrading of WWTP [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (18): 55-57, 63 (in Chinese).
- [35] 孔令为,邵卫伟,梅荣武,等. 浙江省城镇污水处理厂尾水人工湿地深度提标研究[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(2): 39-43.
- KONG Lingwei, SHAO Weiwei, MEI Rongwu, *et al.* Study on constructed wetland for advanced treatment of terminal effluent of wastewater treatment plant in Zhejiang Province [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(2): 39-43 (in Chinese).
- [36] 王翔,朱召军,尹敏敏,等. 组合人工湿地用于城市污水处理厂尾水深度处理[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(6): 97-101.
- WANG Xiang, ZHU Zhaojun, YIN Minmin, *et al.* Application of hybrid constructed wetland in tail water treatment of municipal sewage plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(6): 97-101 (in Chinese).
- [37] 廖波,林武. 强化型垂直流人工湿地用于污水处理厂尾水深度处理[J]. *中国给水排水*, 2013, 29(16): 74-77.
- LIAO Bo, LIN Wu. Application of enhanced vertical flow constructed wetland to advanced treatment of effluent from wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2013, 29 (16): 74-77 (in Chinese).
- [38] 杜曼曼,张琼华,连斌,等. 城市污水处理厂尾水人工湿地净化工程调试与运行[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(9): 94-100, 104.
- DU Manman, ZHANG Qionghua, LIAN Bin, *et al.* Commissioning and operation of constructed wetland project for purification of tail water from municipal wastewater treatment plant [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(9): 94-100, 104 (in Chinese).
- [39] 高祯,宋嘉美,潘彩萍. 人工湿地在深圳坪山河综合整治工程中的应用[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(2): 65-68.
- GAO Zhen, SONG Jiamei, PAN Caiping. Application of constructed wetland in comprehensive control project of Shenzhen Pingshan River [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(2): 65-68 (in Chinese).
- [40] 王楠,王晓昌,熊家晴,等. 人工湿地在工业园区污水处理厂尾水处理中的工程应用[J]. *环境工程*, 2017, 35(12): 11-14, 44.
- WANG Nan, WANG Xiaochang, XIONG Jiaqing, *et al.* Engineering application of constructed wetland for tertiary treatment of tail water from wastewater treatment plants in industrial zone [J]. *Environmental Engineering*, 2017, 35(12): 11-14, 44 (in Chinese).

作者简介:常尧枫(1996-),男,江苏宜兴人,硕士研究生,研究方向为环境污染控制理论与技术。

E-mail:changyaofeng2020@163.com

收稿日期:2020-09-23

修回日期:2020-10-28

(编辑:丁彩娟)

加强湖泊管理保护

改善湖泊生态环境

维护湖泊健康生命