

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.04.018

# 基于河道生态补水的市政污水 $A_pO/M$ 工艺及应用

王健<sup>1,2</sup>, 黄奕龙<sup>2</sup>, 杜朋辉<sup>2</sup>, 管运涛<sup>1</sup>, 景瑞瑛<sup>2</sup>, 李佳琪<sup>2</sup>,  
陈朗<sup>2</sup>, 卢巧慧<sup>2</sup>, 吴景华<sup>2</sup>

(1. 清华大学深圳国际研究生院, 广东深圳 518055; 2. 广东省水务大数据与水生态工程技术研究中心 深圳市水务规划设计院股份有限公司, 广东深圳 518008)

**摘要:** 基于深圳雨源型河道生态补水的水质要求,以多级好氧强化除磷( $A_pO/M$ )技术为主体工艺,建设一座规模为 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的生态补水回用厂。工程实践表明,以 $A_pO/M$ 工艺为主体的污水深度处理取得了良好效果,对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TP和SS的去除率均达到90%以上,满足深圳市生态河道补水《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅲ类水标准(总氮除外)。该工艺出水可作为河道生态补水,还具有投资和运行成本低、紧凑且占地面积小、稳定并抗冲击负荷等技术优势。同步研究发现, $A_pO/M$ 工艺中特别设置的消氧段实现了 $A_p$ 池、O池和M池的协同,达到了生态补水的目标要求,增设消氧段(HRT=1 h)有效实现了 $A_p$ 池和O池的溶解氧梯度,并减少了 $A_p$ 池和O池的综合停留时间。

**关键词:** 强化除磷; 消氧段;  $A_pO/M$ ; 雨源型河道; 生态补水

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2023)04-0101-07

## $A_pO/M$ Process and Its Application in Municipal Sewage Treatment Based on River Ecological Replenishment

WANG Jian<sup>1,2</sup>, HUANG Yi-long<sup>2</sup>, DU Peng-hui<sup>2</sup>, GUAN Yun-tao<sup>1</sup>, JING Rui-ying<sup>2</sup>,  
LI Jia-qi<sup>2</sup>, CHEN Lang<sup>2</sup>, LU Qiao-hui<sup>2</sup>, WU Jing-hua<sup>2</sup>

(1. Tsinghua Shenzhen International Graduate School, Shenzhen 518055, China; 2. Guangdong Provincial Engineering and Technology Research Center for Water Affairs Big Data and Water Ecology, Shenzhen Water Planning and Design Institute Co. Ltd., Shenzhen 518008, China)

**Abstract:** An ecological replenishment recycling plant with capacity of  $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$  is constructed taking a multi-stage aerobic enhanced phosphorus removal technology ( $A_pO/M$ ) as the primary process, according to the water quality requirements of ecological replenishment for rain-source rivers in Shenzhen. The engineering practice shows that the advanced treatment of sewage with the primary process of  $A_pO/M$  technology presents a prominent effect, and the removal rates of COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TP, and SS achieved more than 90%, which meet level quasi-Ⅲ (except total nitrogen) in *Environmental Quality Standard for Surface Water*(GB 3838-2002). The effluent of the process can be used for river ecological replenishment with the technical advantages of low investment and operation cost, compact and small footprint, stability and impact load resistance. The synchronous study illustrates that the special deoxygenation section in the

基金项目: 深圳市科技计划项目(JSGG20210802153010033)

通信作者: 黄奕龙 E-mail: huangyl@swpdi.com

$A_pO/M$  process realizes the coordination of the  $A_p$  tank, O tank, and M tank, which reaches the target requirements of ecological water replenishment. The addition of deoxygenation section ( $HRT=1\text{ h}$ ) effectively achieved the dissolved oxygen gradient of  $A_p$  tank and O tank, and reduced the total residence time of  $A_p$  tank and O tank.

**Key words:** enhanced phosphorus removal; deoxygenation section;  $A_pO/M$ ; rain-source river; ecological replenishment

## 1 项目背景

雨源型河道以小河居多,河短流急,流域的地表径流和地下水主要来源于降雨,有雨即产流,无雨即断流,几乎无环境容量,雨源型河道的生态健康维持更需生态补水<sup>[1-2]</sup>。基于《深圳市城市水务规划2035》和《深圳市水务发展“十四五”规划》,明确了雨源型河道水质需达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)准Ⅲ类水(总氮除外)目标。雨源型河道生态健康以鱼类为指示物种,鱼类对DO、氨氮、余氯和臭氧等较为敏感<sup>[3-5]</sup>,河道生态补水需要满足这一要求。根据雨源型河道补水、深圳治水规划和鱼类生存的综合要求,传统活性污泥法及其改进工艺对雨源型河道生态补水的综合要求针对性不足<sup>[6-10]</sup>。

多级好氧强化除磷( $A_pO/M$ )工艺具有满足雨源型河道生态补水的技术特点,尾水通过强化除磷实现低磷排放<sup>[11-16]</sup>。与传统活性污泥法相比, $A_pO/M$ 工艺不但存在微生物高效降解有机物的过程,而且反应器内膜组件能截留废水中粒径较大的有机物,增加微生物与有机物的接触时间,提高有机物的去除效能。同时,膜组件能对反应器污泥进行有效截留,提高好氧池的活性微生物数量,有利于改善微生物对有机物的去除效果,较高的污泥浓度会促进反应器局部缺氧环境的形成,即形成一定的反硝化环境。膜组件代替了传统活性污泥工艺的二沉池。此外, $A_pO/M$ 工艺流程增设了水力停留时间为1 h的消氧段,有效实现了 $A_p$ 池和O池的溶解氧梯度,具有较高的活性污泥浓度。

多级好氧强化除磷 $A_pO/M$ 工艺很好地响应了深圳市新时期的治水需求,可提供满足雨源型河道补水的准Ⅲ类高品质再生水,在深圳、惠州和揭阳等地有丰富的成功实践,深圳市大望片区污水处理设施为其典范之作,值得进行经验总结和应用推广。

## 2 设计进、出水水质

基于深圳市雨源型河道补水的准Ⅲ类水质要求,本工程的目标是将深圳大望片区的生活污水处理后作为河道生态补水,建设区仅可提供约4 000  $m^2$ 建设用地。

本工程于2018年进行方案设计,通过调查得知,非雨天片区实测污水量为17 273  $m^3/d$ 。据此实测污水量并分析计算,确定污水处理规模为 $2\times 10^4 m^3/d$ ,Kz取1.3。

同时,对片区内排水系统3个主要排口进行7次水质监测,主要指标pH、COD、 $BOD_5$ 、SS、 $NH_3-N$ 和TP分别为7.1~7.6、42~148  $mg/L$ 、31~61  $mg/L$ 、14~324  $mg/L$ 、8.2~21.2  $mg/L$ 、0.49~2.71  $mg/L$ 。根据实测水质数据,考虑片区后续雨污分流完善情况,确定污水处理厂设计进水水质。主要出水水质按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类要求,确定排放标准。污水处理厂设计进、出水水质见表1。

表1 污水处理厂设计进、出水水质

Tab.1 Design influent and effluent quality of the WWTP

项目	pH	COD/ ( $mg\cdot L^{-1}$ )	$BOD_5$ / ( $mg\cdot L^{-1}$ )	SS/ ( $mg\cdot L^{-1}$ )	$NH_3-N$ / ( $mg\cdot L^{-1}$ )	TP/ ( $mg\cdot L^{-1}$ )
进水水质	6~9	200	120	200	30	5
出水标准	6~9	$\leq 20$	$\leq 4$	$\leq 6$	$\leq 1$	$\leq 0.2$

该地区生活污水主要污染物为有机物、SS、 $NH_3-N$ 和TP,可生化性较好,适合采用生物处理。

## 3 工艺流程与主要构筑物设计参数

### 3.1 工艺流程

考虑到建设场地限制以及接纳水体为雨源型河道的特点,结合服务区域污水量、水质排放现状,主体工艺采用改良 $A_pO$ 工艺串联M池膜反应器。 $A_pO/M$ 工艺具有传统A/O活性污泥法和膜分离技术的特点,通过设置消氧段强化厌氧池( $A_p$ )释磷效果,

在好氧池(O)内进行生物强化除磷,同时在好氧池(O)和膜池(M)的连通渠内通过化学除磷剂添加装置投加化学除磷剂到膜池(M),为系统除磷提供“把关式”保障。同时利用膜的高效固液分离,解决了传统工艺中硝化菌长污泥龄和聚磷菌短污泥龄之间的矛盾,强化了脱氮除磷功能<sup>[15]</sup>。主要工艺流程如图1所示。

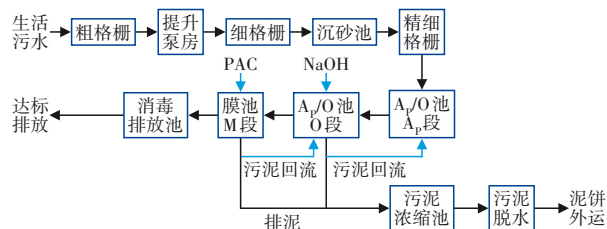


图1 污水处理工艺流程

Fig.1 Flow chart of wastewater treatment process

### 3.2 主要构筑物与设计参数

① 粗格栅。粗格栅尺寸为 $2.4\text{ m}\times 5.6\text{ m}$ ,格栅间隙为 $20\text{ mm}$ ,安装角度 $60^\circ$ 。室内安装回转式齿耙格栅机1台,间歇运行( $4\text{ h/d}$ ),电机功率为 $0.75\text{ kW}$ ,移动速度为 $3\text{ m/min}$ ,有效栅宽为 $240\text{ mm}$ ,机架宽为 $660\text{ mm}$ ,渠宽为 $700\text{ mm}$ 。

② 提升泵。保留原有4台潜污泵( $Q=150\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=220\text{ kPa}$ ,  $N=22\text{ kW}$ ),2用2备,改造新增4台潜污泵( $Q=360\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=110\text{ kPa}$ ,  $N=15\text{ kW}$ ),3用1备。同时,对提升泵房进行密闭改造,将产生的臭气收集并去除。

③ 平流沉砂池。沉砂池为钢筋混凝土结构,工艺尺寸为 $7.0\text{ m}\times 1.6\text{ m}\times 3.1\text{ m}$ ,有效水深 $1.1\text{ m}$ ,停留时间 $42\text{ s}$ ,设沉砂斗1座,有效容积为 $0.96\text{ m}^3$ 。在沉砂池前后分别设置网孔尺寸为 $5\text{ mm}$ 的细格栅和 $1\text{ mm}$ 的精细格栅,均为内进流式网板格栅,安装角度均为 $90^\circ$ 。细格栅平面尺寸为 $4.0\text{ m}\times 1.6\text{ m}$ ,电机功率为 $1.5\text{ kW}$ ,设2台冲洗水泵( $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=800\text{ kPa}$ ,  $N=5\text{ kW}$ ),1用1备。

沉砂池后精细格栅平面尺寸为 $4.9\text{ m}\times 1.6\text{ m}$ ,电机功率为 $1.5\text{ kW}$ ,设2台冲洗水泵( $Q=20\text{ m}^3/\text{h}$ ,  $H=800\text{ kPa}$ ,  $N=5\text{ kW}$ ),1用1备。

④ A<sub>p</sub>/O池。沉砂池出水经精细格栅进一步分离后进入A<sub>p</sub>/O池,A<sub>p</sub>/O池为钢筋混凝土结构,其中A<sub>p</sub>池工艺尺寸为 $12.0\text{ m}\times 8.0\text{ m}\times 7.7\text{ m}$ ,O池为 $37.8\text{ m}\times 11.0\text{ m}\times 7.7\text{ m}$ ,两者容积比为 $1:3.67$ 。A<sub>p</sub>池溶解氧维持在 $0.5\text{ mg/L}$ ,停留时间为 $1.5\text{ h}$ 。O池

溶解氧维持在 $2.0\text{ mg/L}$ 左右,设微孔曝气管155套,气水比为 $(5\sim 6):1$ ,MLSS为 $6\,000\sim 8\,000\text{ mg/L}$ ,混合液回流比为 $180\%\sim 250\%$ ,污泥龄接近 $30\text{ d}$ 。好氧池有效水深 $6\sim 8\text{ m}$ ,停留时间为 $5.5\text{ h}$ ,其中消氧段停留时间为 $1\text{ h}$ 。设混合液回流泵3台,2用1备;设潜水推流器4台;设溶解氧在线监测仪2台。

⑤ M池。在A<sub>p</sub>/O池后通过配水渠接M池,M池系膜分离池,可经M池浓缩过滤作用提高混合液污泥回流浓度,同时实现固液分离,取代二沉池,同时实现满足雨源型河道高标准补水的要求。工艺尺寸为 $25.1\text{ m}\times 20.7\text{ m}\times 5.1\text{ m}$ ,膜池系列数:3,每系列膜箱数:9组,并预留1个空位。采用PVDF膜丝材质,内/外径为 $0.7/1.3\text{ mm}$ 。总膜面积 $56\,700\text{ m}^2$ ;设计膜通量:平均通量 $15.43\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ,瞬时通量 $18.35\text{ L}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ ;膜吹扫风量: $160\,000\text{ m}^3/\text{h}$ (标准状态下),采用间歇式曝气,运行 $8.5\text{ min}$ 后停 $1.5\text{ min}$ ,保持气水比为 $(7\sim 8):1$ 。膜池污泥回流比 $250\%\sim 350\%$ ,水力停留时间为 $0.98\text{ h}$ 。膜系统维护性清洗:次氯酸钠 $500\text{ mg/L}$ ,每周一次;次氯酸钠 $3\,000\text{ mg/L}$ ,每3个月一次;柠檬酸(质量分数为 $0.8\%$ )则视情况而定。膜系统离线清洗:次氯酸钠 $3\,000\text{ mg/L}$ ,柠檬酸质量分数为 $1\%\sim 2\%$ ,碱洗1次/( $12\sim 24$ )h,酸洗1次/( $2\sim 4$ )h。

⑥ 污泥浓缩池。有效容积为 $170\text{ m}^3$ ,分两格,污泥由泵送入板框压滤机脱水,过滤面积为 $150\text{ m}^2$ ,PAM投加量为干泥的 $0.1\%\sim 0.2\%$ 。上清液回流至A<sub>p</sub>/O池,浓缩后的污泥用浓浆螺杆泵输送至污泥一体化脱水设备进行脱水后外运, $Q=12\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=600\text{ kPa}$ , $P=7.5\text{ kW}$ ,1用1备。

⑦ 曝气与投药系统。选用两种型号空气悬浮风机,型号I供气压力为 $66.2\text{ kPa}$ ,流量为 $112\text{ m}^3/\text{min}$ ,电机功率为 $123\text{ kW}$ ;型号II供气压力为 $44.0\text{ kPa}$ ,流量为 $42\text{ m}^3/\text{min}$ ,电机功率为 $62\text{ kW}$ 。两台型号I鼓风机仅对MBR池供气,1用1备;3台型号II鼓风机对O池供气,2用1备。鼓风机房设于地下,可节约占地面积,减少噪声污染。

在M池前段设置混合井,尺寸为 $2.86\text{ m}\times 2.86\text{ m}$ ,投加浓度为 $10\%$ 的聚合氯化铝(PAC)进行化学除磷,投加量为 $15\text{ mg/L}$ 。设2台加药计量泵( $Q=90\text{ m}^3/\text{h}$ , $H=300\text{ kPa}$ , $N=1.5\text{ kW}$ ),1用1备。

本工程调试阶段在A<sub>p</sub>池投加市政污水处理厂脱水污泥作为厌氧接种污泥,投加量约为A<sub>p</sub>池有效



池容的25%,并投加葡萄糖、面粉、尿素和磷等保证驯化阶段合适的C:N:P比例,O池采用A<sub>p</sub>池出水挟带污泥闷曝进行接种,并以渐次进水的方式进行调试。由于进厂污水混有片区清洁基流,进水浓度影响生化池中污泥生长。本工程通过保证曝气强度,严格控制O池溶解氧为2.0 mg/L左右,确保污水与污泥充分混合,污泥处于悬浮状态,保障系统正常运转<sup>[17]</sup>。

## 4 监测与分析研究

### 4.1 监测分析方法

在工程运行稳定后进行水质监测,包括自动监测和人工监测,其监测、采样和分析方法如下:

① 水质自动监测。在污水厂的进水口和出水口安装在线自动监测设施(总磷设备购自广东长天思源环保科技有限公司,氨氮、COD仪购自北京时代华瑞有限公司),共2台同型号设备,一台安装在A池进水口前,另一台安装在M池出水口后,两台设备监测步长均为2 h,监测指标包括TSS、pH、COD、NH<sub>3</sub>-N和TP等(同点位对BOD<sub>5</sub>进行一周的人工采样分析),其监测结果直接导出至电脑。

② 水质人工监测。为了核算A、O和M三个处理单元的污染物去除功效,分别设置采样点进行连续采样分析。其中,在A池进水口设置1个采样点( $C_{A进}$ );O池进水口设置2个采样点(相当于A池出水水质,记为 $C_{O进}$ );O池曝气段至消氧段出口设置2个采样点(记为 $C_{O内}$ );O池末端出水口处设置1个采样点( $C_{O出}$ );M池进水口(记为 $C_{M进}$ );M池回流渠内(记为 $C_{M内}$ )和M池出水口( $C_{M出}$ )各设置1个采样点。

③ 室内化学分析。将人工监测采集的样品在实验室进行分析,COD采用重铬酸钾法(HJ 828—2017),氨氮采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009),TP采用钼酸铵分光光度法(GB 11893—1989)。

### 4.2 进、出水水质分析

采用自动监测站连续监测212次,分析污水厂进、出水水质情况(见表2和图2~4)。由图2~4可知,实际进水COD、NH<sub>3</sub>-N和TP等指标与设计指标相比偏低,这可能与本区域雨污分流未能完全覆盖有关。

进水COD、NH<sub>3</sub>-N和TP分别为(120.53±28.10)、

(15.67±6.57)和(2.42±2.02) mg/L,而相应出水指标分别为(12.56±2.39)、(0.33±0.20)和(0.14±0.10) mg/L,去除率均可达到90%以上,且全部满足《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)的Ⅲ类水要求,达到项目设计目标。

同时在进水指标出现较大波动,如NH<sub>3</sub>-N达到40 mg/L和TP达到10 mg/L左右时,出水水质仍然较为稳定,表明系统抗冲击负荷能力、系统韧性和适应性较强。

表2 A<sub>p</sub>O/M工艺污水厂进、出水水质

Tab.2 Actual influent and effluent quality of A<sub>p</sub>O/M WWTP

项目	pH	COD/ (mg·L <sup>-1</sup> )	BOD <sub>5</sub> / (mg·L <sup>-1</sup> )	SS/ (mg·L <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> -N/ (mg·L <sup>-1</sup> )	TP/ (mg·L <sup>-1</sup> )
进水水质	6.9±0.2	120.53±28.10	58.4±12.4	64.7±29.1	15.67±6.57	2.42±2.02
出水水质	7.2±0.17	12.56±2.39	3.1±1.4	0.94±0.17	0.33±0.20	0.14±0.10

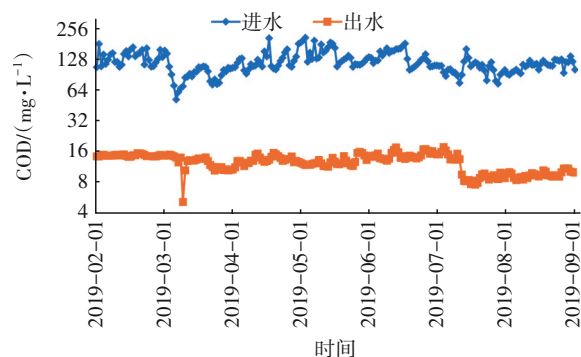


图2 A<sub>p</sub>O/M工艺污水厂进、出水COD

Fig.2 COD in influent and effluent of A<sub>p</sub>O/M WWTP

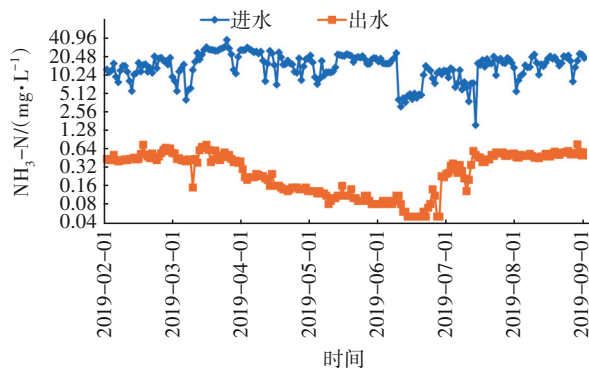
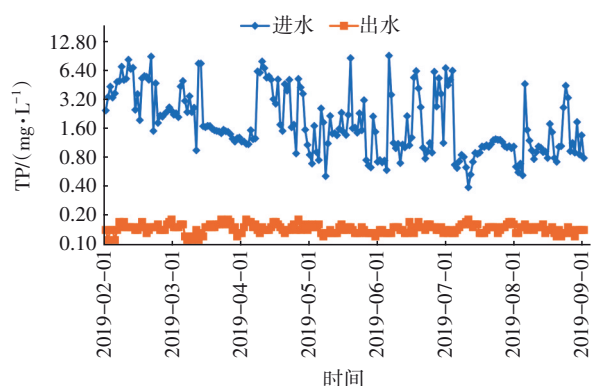


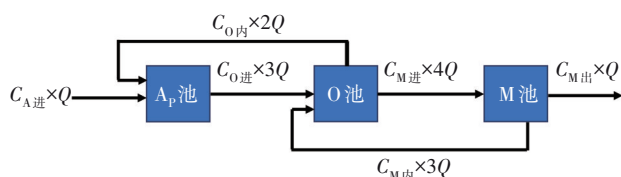
图3 A<sub>p</sub>O/M工艺污水厂进、出水氨氮

Fig.3 NH<sub>3</sub>-N in influent and effluent of A<sub>p</sub>O/M WWTP

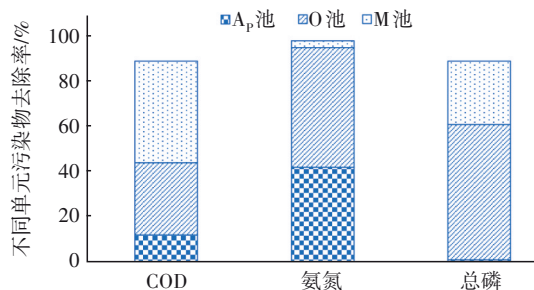
图4 A<sub>p</sub>O/M工艺污水厂进、出水总磷Fig.4 TP in influent and effluent of A<sub>p</sub>O/M WWTP

### 4.3 工艺各段功效分析

为定量分析不同处理单元对污染指标的去除功效,以COD、NH<sub>3</sub>-N和TP为代表,建立A<sub>p</sub>O/M工艺水质指标浓度与水量间的物料平衡模型(见图5),假定单位时间内进水和出水相等且均为 $Q$ ,M池至O池回流比为300%(即为 $3Q$ ),O池至A<sub>p</sub>池回流比为200%(即为 $2Q$ )。

图5 A<sub>p</sub>O/M工艺水质指标与水量间的物料平衡模型Fig.5 Material balance model between water quality and water volume of A<sub>p</sub>O/M technology

A<sub>p</sub>池削减污染通量= $C_{A进} \times Q + C_{O内} \times 2Q - C_{O进} \times 3Q$ , O池削减污染通量= $C_{O进} \times 3Q + C_{M内} \times 3Q - C_{O内} \times 2Q - C_{M进} \times 4Q$ , M池削减污染通量= $C_{M进} \times 4Q - C_{M内} \times 3Q - C_{M出} \times Q$ 。不同处理单元的污染物削减效果见图6。

图6 A<sub>p</sub>O/M工艺不同处理单元的污染物削减效果Fig.6 Pollution reduction effect of different treatment units of A<sub>p</sub>O/M technology

由图6可知,对COD的去除,M池的贡献最大(45%),O池次之(32%),A池为12%;这与设计时的

考虑一致,COD在A池首先通过厌氧作用,将大分子有机物分解,具有一定的削减COD作用;而进入O池,进一步在好氧环境和微生物作用下,对COD进行有效去除;M池在O池的基础上增加了满足过滤要求的短水力停留时间的曝气,通过复合膜过滤和曝气作用,增加有机物降解,可明显去除COD。

对氨氮的去除主要通过硝化作用,因此O池的贡献最大(53%);同时因南方雨水较多和高地下水水位条件,进水氨氮浓度没有达到设计值,导致A池去除率偏高(42%);而污水经过A<sub>p</sub>O/M工艺A池和O池的有效处理,氨氮浓度已经较低,因此M池去除率相对较低(约占3%)。

在TP的去除中,O池好氧条件下,通过聚磷菌的过量摄取,去除贡献达到60%;M池通过膜过滤和化学除磷,去除贡献达到28%;而A池主要聚磷菌厌氧释磷过程,基本没有除磷作用。尽管进水COD偏低影响了优势微生物的繁殖,而本工艺M池发挥了强化化学除磷作用,因此使得出水TP低于0.2 mg/L的限值,体现出工艺对进水具有较强的适应性。

从整体上来说,本工程项目中污染物去除主要依靠好氧降解,A池虽然也有较大的贡献,但有机物厌氧氧化、微生物反硝化作用及厌氧释磷作用仍有提升空间。

### 5 技术经济分析

本工程在可建设用地为4 000 m<sup>2</sup>的约束下,建设了规模为2×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d的生态补水型污水回用厂,实际建设用地仅为3 000 m<sup>2</sup>,单位占地为0.15 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>、建设成本仅为1 200元/m<sup>3</sup>。通过建设现场的综合集成,达到整体工艺效果,项目建设周期仅为40 d。总运行成本,包括药剂费(PAC、PAM和次氯酸钠等0.130元/m<sup>3</sup>)、动力费(外购电力0.163元/m<sup>3</sup>)、膜更换(5年为更换周期,每年计20%,0.171元/m<sup>3</sup>)、污泥处置(运输与处置0.078元/m<sup>3</sup>)、人工费(现场管理人员总成本0.065元/m<sup>3</sup>)和维修费(固定资产维护及膜清洗0.068元/m<sup>3</sup>)等,总计为0.675元/m<sup>3</sup>。

总的来说,本工程实现了雨源型河道补水要求下的经济性和稳定性,与本地其他工艺<sup>[18-19]</sup>相比,有明显的可行性和推广性。

### 6 结论

针对雨源型河道补水要求和深圳治水规划,采

用多级好氧强化除磷 $A_pO/M$ 技术为主体处理工艺,新建了处理规模为 $2\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$ 的污水处理设施。

工程实践表明:①以 $A_pO/M$ 工艺为主体的污水厂具有较好的处理效果,对 $\text{COD}$ 、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{TP}$ 和 $\text{SS}$ 去除率均达到90%以上,出水主要水质指标达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类标准(总氮除外),满足雨源型河道生态补水的要求。②其中, $\text{COD}$ 的去除以 $M$ 池的贡献最大(45%), $O$ 池次之(32%);对氨氮的去除, $O$ 池贡献最大(53%), $A$ 池次之(42%)。③ $A_pO/M$ 工艺投资仅为常规污水厂的40%左右,占地为常规污水厂的35%左右。

同步研究发现:① $A_pO/M$ 工艺中特别设置的消氧段实现了 $A_p$ 池、 $O$ 池和 $M$ 池的协同,达到了生态补水的目标要求,增设消氧段( $\text{HRT}=1\text{ h}$ )有效实现了 $A_p$ 池和 $O$ 池的溶解氧梯度,并减少了 $A_p$ 池和 $O$ 池的综合停留时间。②对主要水质指标 $\text{COD}$ 、氨氮和 $\text{TP}$ 等的去除效率在好氧降解阶段更高,而在厌氧阶段仍有提升空间,表明后续加强 $A$ 池溶解氧的控制,充分发挥微生物反硝化及厌氧释磷作用仍可挖潜。

#### 参考文献:

- [1] 史贵君,全晓辉,汪银龙,等. 城市高度建成区河道生态补水治理方案研究[J]. 人民长江, 2020, 51(4): 75-80.  
SHI Guijun, TONG Xiaohui, WANG Yinlong, *et al.* Study on ecological compensation scheme of rivers in urban built up area [J]. Yangtze River, 2020, 51(4): 75-80(in Chinese).
- [2] 王立新,王健. 高度城市化地区水的综合治理方法和实践[J]. 中国水利, 2020(10): 1-6.  
WANG Lixin, WANG Jian. Comprehensive water treatment methods and practices in highly urbanized areas [J]. China Water Conservancy, 2020(10): 1-6(in Chinese).
- [3] 李云,何志琴,夏训峰,等. 国内外灰水处理技术研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2021, 11(5): 935-941.  
LI Yun, HE Zhiqin, XIA Xunfeng, *et al.* Research progress of greywater treatment technology at home and abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2021, 11(5): 935-941(in Chinese).
- [4] 刘瑶瑶,吴乾元,孙迎雪,等. 基于生态毒性的再生水补给河流氨氮控制目标研究[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(1): 203-207.  
LIU Yaoyao, WU Qianyuan, SUN Yingxue, *et al.* On the ammonia-control demand of the reclaimed water from the urban river augmentation on the basis of the ecological toxicity evaluation [J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(1): 203-207(in Chinese).
- [5] 刘兰芬,郝红,鲁光四. 电厂温排水中余氯衰减规律及其影响因素的实验研究[J]. 水利学报, 2004(5): 94-98.  
LIU Lanfen, HAO Hong, LU Guangsi. Experiment study on attenuation law of residual chlorine in cooling water discharged from thermal power plants [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(5): 94-98(in Chinese).
- [6] 王洪臣. 百年活性污泥法的革新方向[J]. 给水排水, 2014, 40(10): 1-3.  
WANG Hongchen. Innovation direction of century old activated sludge process [J]. Water & Wastewater Engineering, 2014, 40(10): 1-3(in Chinese).
- [7] 白杨. 基于悬浮载体的生物膜与活性污泥复合工艺脱氮除磷性能的研究[D]. 大连:大连理工大学, 2016.  
BAI Yang. Nitrogen and Phosphorus Removal Performances in Integrated Fixed-film and Activated Sludge Process with Suspended Carriers [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016(in Chinese).
- [8] 穆思图,樊慧菊,韩秉均,等. 中空纤维膜的膜污染过程及数学模型研究进展[J]. 膜科学与技术, 2018, 38(1): 114-121.  
MU Situ, FAN Huiju, HAN Bingjun, *et al.* Review of membrane fouling stages and mathematical models for hollow fiber membrane [J]. Membrane Science and Technology, 2018, 38(1): 114-121(in Chinese).
- [9] 许颖,夏俊林,黄霞. 厌氧膜生物反应器污水处理技术的研究现状与发展前景[J]. 膜科学与技术, 2016, 36(4): 139-149.  
XU Ying, XIA Junlin, HUANG Xia. State-of-the-arts/ anaerobic membrane reactor for wastewater treatment and its future development [J]. Membrane Science and Technology, 2016, 36(4): 139-149(in Chinese).
- [10] 李梦晨,肖康,黄霞. 基于红外光谱聚类分析的纳滤膜污染动态发展行为研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2019, 39(2): 421-427.  
LI Mengchen, XIAO Kang, HUANG Xia. Tracking the dynamic evolution of NF membrane fouling through clustering analysis based on ATR-FTIR spectra [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2019, 39(2): 421-427(in Chinese).
- [11] ZOU H, WANG Y. Phosphorus removal and recovery

- from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization[J]. *Bioresource Technology*, 2016, 211: 87-92.
- [12] GE H, BATSTONE D J, KELLER J. Biological phosphorus removal from abattoir wastewater at very short sludge ages mediated by novel PAO clade *Comamonadaceae* [J]. *Water Research*, 2015, 69: 173-182.
- [13] 程笑婕, 李军, 柏永生, 等. 电化学除磷参数的优化及结果分析[J]. *水处理技术*, 2018, 44(4): 50-56.  
CHENG Xiaojie, LI Jun, BAI Yongsheng, *et al.* Optimization of electrochemical phosphorus removal parameters and its results analysis [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(4): 50-56 (in Chinese).
- [14] SCHINDLER D W, CARPENTER S R, CHAPRA S C, *et al.* Reducing phosphorus to Curb Lake eutrophication is a success [J]. *Environment Science Technology*, 2016, 50(17): 8923-8929.
- [15] VITOUSEK P M, PORDER S P, HOULTON B Z, *et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions [J]. *Ecological Apply*, 2010, 20: 5-15.
- [16] 赵晨辰, 张世彦, 毛献忠. 深圳湾流域TN和TP入海年通量变化规律研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(11): 4111-4117.  
ZHAO Chenchen, ZHANG Shiyan, MAO Xianzhong. Variations of annual load of TN and TP in the deep bay watershed Shenzhen [J]. *Environmental Science*, 2014, 35(11): 4111-4117 (in Chinese).
- [17] 冯锦梅, 张海荣. 水环境中的磷研究与富营养化控制[J]. *污染防治技术*, 2013, 26(1): 28-32.  
FENG Jinmei, ZHANG Hairong. Phosphorus and eutrophication control of water environment [J]. *Pollution Control Technology*, 2013, 26(1): 28-32 (in Chinese).
- [18] 林佩斌, 李小江, 李辉, 等. 快速污水处理技术(RPIR)用于深圳水环境治理[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(12): 117-120, 137.  
LIN Peibin, LI Xiaojiang, LI Hui, *et al.* Application of rapid wastewater treatment technology (RPIR) in water environment improvement in Shenzhen [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(12): 117-120, 137 (in Chinese).
- [19] 肖军, 朱有光, 陈大双, 等. 浅析超磁混凝BAF工艺污水处理中的应用[J]. *资源开发与环保*, 2019(7): 61, 66.  
XIAO Jun, ZHU Youguang, CHEN Dashuang, *et al.* Analysis on the application of super magnetic coagulation in BAF wastewater treatment [J]. *Resources Economization & Environmental Protection*, 2019(7): 61, 66 (in Chinese).

作者简介:王健(1969- ),男,江西兴国人,博士研究生,正高级工程师,主要从事给排水设计与研究工作。

E-mail:wangj@swpdi.com

收稿日期:2022-02-25

修回日期:2022-03-25

(编辑:衣春敏)

贯彻执行《中华人民共和国防洪法》