

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.002

内循环频次对氧化沟反硝化除磷的影响

常国松^{1,2,3}, 于静洁^{1,2,3}, 王少坡^{1,2,3}, 马华继^{1,2,3}

(1. 天津城建大学 环境与市政工程学院, 天津 300384; 2. 天津市水质科学与技术重点实验室, 天津 300384; 3. 天津城建大学 环境与市政市级实验教学示范中心, 天津 300384)

摘要: 以环状廊道前设置厌氧区、环状廊道内设置缺氧区和好氧区的改良氧化沟为研究对象,通过测定反硝化聚磷菌占总聚磷菌的比例(DPAOs/PAOs)以及水相和泥相的含磷量,对系统中的磷进行质量平衡分析,考察环状廊道内混合液的内循环频次(单位时间内混合液在环状廊道内循环流动的圈数,IRF)在0.52~18.74圈/h范围变化时对系统中污染物去除和磷转化途径的影响。结果表明,当IRF≤1.62圈/h时,有利于将更多的磷储存在细胞内形成胞内多聚磷酸盐;当IRF在3.36~7.53圈/h之间时,有利于反硝化除磷,且系统可获得较好的同步脱氮除磷效果,此时DPAOs/PAOs可达50%左右,COD、TN、TP的平均去除率分别可达到92%、80%和93%以上;当IRF≥11.35圈/h时,TN去除效果不佳,无法实现高效同步脱氮除磷。

关键词: 氧化沟; 内循环频次; 好氧除磷; 反硝化除磷; 胞外聚合物

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0012-08

Effect of Internal Recirculation Frequency on Denitrifying Phosphorus Removal in Oxidation Ditch

CHANG Guo-song^{1,2,3}, YU Jing-jie^{1,2,3}, WANG Shao-po^{1,2,3}, MA Hua-ji^{1,2,3}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Aquatic Science and Technology, Tianjin 300384, China; 3. Municipal Experimental Teaching Demonstration Center of Environmental and Municipal Engineering, Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China)

Abstract: The phosphorus mass balance in a modified oxidation ditch (OD) with anaerobic zone in front of the circular corridor and anoxic and aerobic zones in the circular corridor was analyzed by determining the proportion of denitrifying phosphorus accumulating bacteria in the total phosphorus accumulating bacteria (DPAOs/PAOs) and the phosphorus concentration in wastewater and sludge. The effects of the internal recirculation frequency (cycles number of mixed liquor circulating in circular corridor per unit time, IRF) of the mixed liquor in the circular corridor on pollutants removal and phosphorus conversion pathways were investigated when the IRF varied from 0.52 circles/h to 18.74 circles/h. When IRF was not more than 1.62 circles/h, it was beneficial to store more phosphorus in cells to form intracellular polyphosphates. When IRF was between 3.36 circles/h and 7.53 circles/h, it was

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51108299、51678388)

通信作者: 于静洁 E-mail: yjj.mary@163.com

conductive to denitrifying phosphorus removal, and the system achieved better simultaneous nitrogen and phosphorus removal performance. In addition, the ratio of DPAOs to PAOs was approximately 50%, and the average removal rates of COD, TN and TP reached above 92%, 80% and 93%, respectively. When IRF was not less than 11.35 circles/h, the TN removal performance was not good, and it was not conducive to efficient simultaneous nitrogen and phosphorus removal.

Key words: oxidation ditch; internal recirculation frequency; aerobic phosphorus removal; denitrifying phosphorus removal; extracellular polymers

氧化沟工艺具有结构简单和处理效果好等优点,在国内的污水处理厂得到了广泛应用^[1-5]。混合液在环状廊道中不断往复地循环流动,是氧化沟工艺区别于其他生物处理工艺的显著特点。20世纪60年代,氧化沟工艺应用最初阶段,只用于去除污水中的有机物,沟内溶解氧供给仅考虑满足有机物的去除即可^[6],所以此时无需考虑混合液在环状廊道内的循环回流特性。随着环境保护标准日益严格,在去除有机物的同时,还需要同时去除污水中的氮、磷营养物质。

谷静丽等人^[7]采用厌氧-氧化沟相结合的工艺处理农村污水, BOD_5 、COD、SS、 NH_3-N 、TP、TN 的去除率分别可以达到 94.62%、89.66%、95.00%、88.00%、93.57%、72.73%,在去除有机物的同时实现了良好的脱氮除磷效果。郭昌梓等人^[8]探讨了氧化沟不同好氧、缺氧分区对脱氮除磷效果的影响,结果表明,在相同的供氧条件下,分段曝气(分段连续曝气)单个缺氧/好氧分区长,反硝化菌和聚磷菌对碳源利用多,脱氮除磷效果优于分点曝气(分散瞬时曝气),在满足硝化反应的前提下,缺氧区和好氧区比例越大,越有利于脱氮除磷。但是,对于前置厌氧区、环状廊道内有缺氧区和好氧区,具有同步脱氮除磷功能的氧化沟工艺,还未见有进行内循环频次(单位时间内混合液在环状廊道内循环流动的圈数,IRF)对胞内、胞外磷转化途径的分析研究。为此,笔者以改良氧化沟装置为研究对象,通过改变IRF来比较不同工况下污染物的去除效果和磷的转化途径,以此探究混合液在环状廊道内的循环流动特性(即内循环频次)对氧化沟同步脱氮除磷的影响。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验装置如图1所示。改良氧化沟池(100 L)

和竖流二沉池(24 L)采用透明有机玻璃制成。二沉池的沉淀时间为2.4 h,表面水力负荷为 $0.16 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,径深比为0.5。改良氧化沟池包含3个厌氧区(共15 L)、4个缺氧区和3个好氧区(共85 L),泥水混合液可以在缺氧区和好氧区组成的环状廊道内循环流动,其中环状廊道右侧区域体积为23.8 L, DO浓度介于 $0.5 \sim 1.5 \text{ mg/L}$,故环状廊道右侧区域归于好氧区。各厌氧区及环状廊道转弯处设有搅拌器推动泥水混合液流动,好氧区廊道底部设置微孔曝气器,进行充气供氧。在好氧1区和缺氧1区始端设置缓流板,用以调节IRF,通过蠕动泵来定量控制系统进水量及污泥回流量。

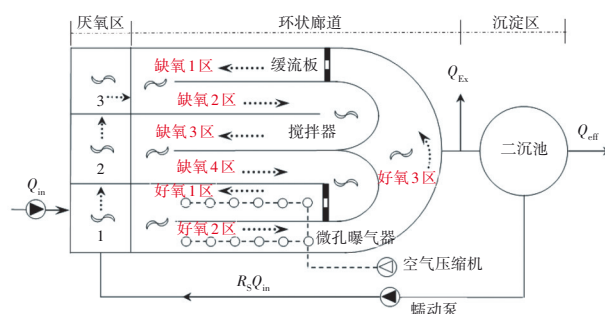


图1 改良氧化沟示意

Fig.1 Schematic diagram of improved oxidation ditch device

1.2 试验用水和接种污泥

稳定的进水水质有利于对活性污泥系统进行质量平衡分析^[9-10],而实际污水处理厂中的进水水质通常波动较大,因此本试验采用人工配水作为系统进水,主要组分为 CH_3COONa 、淀粉、葡萄糖、蛋白胨、 NH_4Cl 和 KH_2PO_4 , COD、TN和TP浓度分别为400、40和7 mg/L;其他组分包括57.31 mg/L KCl、100 mg/L $MgSO_4$ 、55.5 mg/L $CaCl_2$ 、550 mg/L $NaHCO_3$ 和0.2 mL/L微量元素溶液。微量元素溶液的组分:1.5 g/L H_3BO_3 、1.5 g/L $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 、0.3 g/L $CuSO_4 \cdot$

5H₂O、16.1 g/L FeCl₃·6H₂O、1.8 g/L KI、1.2 g/L MnCl₂·4H₂O、0.6 g/L Na₂MoO₄·2H₂O、1.5 g/L NiCl₂·6H₂O、1.2 g/L ZnSO₄·7H₂O和15 g/L EDTA。

试验接种污泥取自天津市某污水处理厂。

1.3 试验运行条件

改良氧化沟装置连续进、出水,连续回流污泥。试验设置了IRF值不同的6种工况,分别记为I~VI,IRF分别为0.52、1.62、3.36、7.53、11.35、18.74圈/h。为了使6种工况中各区域的DO浓度维持在恒定范围,I~IV阶段沿好氧区各廊道底部条状均匀曝气,曝气量为10 L/min;V和VI阶段在好氧区各廊道起端点状曝气,曝气量为9 L/min。厌氧1~3区、缺氧1~4区、好氧1区、好氧2区和好氧3区的DO浓度分别为0、0~0.5、1.0~1.5、1.5~2.0、1.5~0.5 mg/L。

其他运行参数如下:进水量(Q_{in})为240 L/d,污泥回流比(R_s)为80%,水力停留时间(HRT)为10 h(厌氧区+环状廊道),污泥龄(SRT)为12.5 d,剩余污泥排放量(每日从环状廊道出水中排出的泥水混合液量,记为 Q_{ex})为8 L/d,污泥浓度(MLSS)为3 600~4 000 mg/L,污泥负荷率(L_0)为0.24~0.27 kgCOD/(kgMLSS·d),反应温度(T_0)为20~25 °C。

1.4 磷的质量平衡分析方法

1.4.1 进入系统和排出系统的TP量

改良氧化沟中的TP由进水带入;少部分TP随二沉池上清液排出系统,大部分TP通过排放含磷剩余污泥排出系统。所以,对于改良氧化沟系统,TP的物料平衡公式如下:

进入系统的TP量 $M_{TP,in}$ (mg/d):

$$M_{TP,in} = Q_{in} C_{TP,in} \quad (1)$$

式中: $C_{TP,in}$ 为进水中的TP浓度,mg/L。

随出水排出系统的TP量 $M_{TP,eff}$ (mg/d):

$$M_{TP,eff} = Q_{eff} C_{TP,eff} + Q_{ex} C_{TP,eff} = Q_{in} C_{TP,eff} \quad (2)$$

式中: Q_{eff} 为二沉池出水流量,L/d; $C_{TP,eff}$ 为出水中的TP浓度,假定也等于每日排出的8 L泥水混合液中水相的TP浓度,mg/L。

随剩余污泥排出系统的TP量 $M_{TP,ex}$ (mg/d):

$$M_{TP,ex} = M_{TP,in} - M_{TP,eff} \quad (3)$$

1.4.2 厌氧区磷的物料平衡

活性污泥中的微生物大都以菌胶团的形式存在,在细胞的周围存在着大量具有黏性的物质,即

胞外聚合物(EPS)。有研究发现,EPS能吸收污水中的磷。龙向宇等人^[11]考察了EPS在生物除磷中的作用,结果表明,在含磷污水的厌氧和好氧生物处理过程中,EPS进行了厌氧释磷和好氧吸磷;张倩等人^[12]的研究结果表明,EPS可以去除系统中12%的磷;方振东等人^[13]研究了磷酸盐形态对生物除磷过程的影响,结果表明,污泥中的磷主要分布于EPS中,EPS不仅是生物除磷过程的中转站,而且参与了生物聚磷过程。因此,厌氧区内发生的释磷过程包括:胞内多聚磷酸盐水解产生正磷酸盐释放到液相中以及EPS释磷。进入厌氧区的磷也包括两部分:一是进水中的磷;二是回流污泥所携带的磷。另外,厌氧区释放的磷等于厌氧区出水中的磷减去进入厌氧区的磷。所以,对于厌氧区,TP的物料平衡公式如下所示:

厌氧区内TP的释放量 $M_{TP,厌氧}$ (mg/d):

$$M_{TP,厌氧} = (1 + R_s) Q_{in} C_{TP,厌氧} - Q_{in} C_{TP,in} - R_s Q_{in} C_{TP,回流} \quad (4)$$

式中: $C_{TP,厌氧}$ 为厌氧3区水相中的TP浓度,mg/L; $C_{TP,回流}$ 为回流污泥水相中的TP浓度,mg/L。

厌氧区胞内多聚磷酸盐的释磷量 $M_{PP,厌氧}$ (mg/d):

$$M_{PP,厌氧} = R_s Q_{in} C_{PP,回流} - (1 + R_s) Q_{in} C_{PP,厌氧} \quad (5)$$

式中: $C_{PP,回流}$ 为回流污泥中的胞内多聚磷酸盐浓度,mg/L; $C_{PP,厌氧}$ 为厌氧3区活性污泥中的胞内多聚磷酸盐浓度,mg/L。

厌氧区EPS的释磷量 $M_{EPS-P,厌氧}$ (mg/d):

$$M_{EPS-P,厌氧} = R_s Q_{in} C_{EPS-P,回流} - (1 + R_s) Q_{in} C_{EPS-P,厌氧} \quad (6)$$

式中: $C_{EPS-P,回流}$ 为回流污泥中EPS所含磷浓度,mg/L; $C_{EPS-P,厌氧}$ 为厌氧3区活性污泥中EPS所含磷浓度,mg/L。

厌氧区内磷的释放平衡率 $\rho_{P-厌氧}$ (%):

$$\rho_{P-厌氧} = \frac{M_{TP,厌氧}}{M_{PP,厌氧} + M_{EPS-P,厌氧}} \times 100\% \quad (7)$$

1.4.3 环状廊道及沉淀区中磷的物料平衡

由于沉淀区内生化反应不显著、磷的转化量较少,故将环状廊道和沉淀区合并称为主沉区进行磷的物料平衡分析。主沉区内液相中的大部分磷酸盐在好氧和缺氧环境中会被聚磷菌(PAOs)和反硝化聚磷菌(DPAOs)所吸收,并将其转移到细胞内;另

有一部分磷会储存在EPS中。对于主沉区,TP的物料平衡公式如下:

主沉区内磷的同化吸收量 $M_{TP,吸收}$ (mg/d):

$$M_{TP,吸收} = (1 + R_s)Q_{in}C_{TP,反出} - Q_{in}C_{TP,eff} - R_sQ_{in}C_{TP,回流} \quad (8)$$

主沉区内EPS的吸磷量 $M_{EPS-P,吸收}$ (mg/d):

$$M_{EPS-P,吸收} = R_sQ_{in}C_{EPS-P,回流} - (1 + R_s) \times Q_{in}C_{EPS-P,反出} \quad (9)$$

主沉区生成胞内多聚磷酸盐的量 $M_{PP,吸收}$ (mg/d):

$$M_{PP,吸收} = R_sQ_{in}C_{PP,回流} - (1 + R_s)Q_{in}C_{PP,反出} \quad (10)$$

通常认为所有聚磷菌都能进行好氧吸磷,而能进行好氧吸磷的聚磷菌中有一部分还可以进行反硝化吸磷。缺氧区体积占环状廊道的48%,则主沉区内发生的反硝化吸磷反应占所有可形成胞内多聚磷酸盐的吸磷反应的比例 γ 可由下式求得:

$$\gamma = \frac{(DPAOs/PAOs) \times 0.48}{(DPAOs/PAOs) \times 0.48 + (1 - 0.48) \times 100\%} \quad (11)$$

式中:DPAOs/PAOs为活性污泥中反硝化聚磷菌占总聚磷菌的比例。

由此可得,主沉区内反硝化吸磷量 $M_{PP,反吸} = M_{PP,吸收} \times \gamma$,好氧吸磷量 $M_{PP,好吸} = M_{PP,吸收} \times (1 - \gamma)$ 。

主沉区内磷的吸收平衡率 $\rho_{P-主沉区}$ (%):

$$\rho_{P-主沉区} = \frac{M_{TP,吸收}}{M_{PP,吸收} + M_{EPS-P,吸收} + M_{P-微生物}} \times 100\% \quad (12)$$

式中: $M_{P-微生物}$ 为微生物生长繁殖同化吸收的磷量,mg/d。

1.4.4 磷的转化途径分析

1.4.3节计算得到的 $M_{PP,反吸}$ 、 $M_{PP,好吸}$ 和 $M_{EPS-P,吸收}$ 为主沉区全部活性污泥吸收的磷量,但是每天排出系统的剩余污泥仅是全部活性污泥中的少部分,大部分污泥存留在系统中进行下一轮释磷和吸磷反应,所以也仅有少部分被吸收的磷随剩余污泥排出系统。因此,在改良氧化沟系统中,每天通过好氧吸磷去除的磷量为: $M_{PP,好吸}/SRT$;每天通过反硝化吸磷去除的磷量为: $M_{PP,反吸}/SRT$;每天通过EPS吸磷去除的磷量为: $M_{EPS-P,吸收}/SRT$;每天随水流出系统的磷量为: $M_{TP,eff}$,故每天微生物生长繁殖同化吸收的

磷量为:

$$M_{P-微生物} = M_{TP,in} - (M_{PP,吸收}/SRT) - (M_{EPS-P,吸收}/SRT) - M_{TP,eff} \quad (13)$$

1.5 DPAOs/PAOs的测定方法

PAOs可以在好氧条件下以氧气为电子受体进行吸磷,DPAOs可以在缺氧条件下以硝酸盐氮为电子受体进行吸磷,因此可以利用充分厌氧释磷后的活性污泥进行好氧吸磷试验和缺氧吸磷试验,以氧气为电子受体的最大好氧吸磷速率记为O-PUR,以硝酸盐氮为电子受体的最大缺氧吸磷速率记为N-PUR,因此DPAOs/PAOs可以用N-PUR/O-PUR表示^[14-15]。

具体操作过程如下:取厌氧3区完全释磷的活性污泥混合液3.1 L,静置沉淀后去除上清液,加入超纯水恢复至原体积,然后搅拌混合液清洗污泥;再次静置沉淀弃去上清液,如此重复清洗污泥3次后,加入超纯水恢复体积至3.1 L,而后取出100 mL用于测定混合液的MLVSS,之后将剩余的3 L混合液平均分为2份,置于窄口锥形瓶中,分别进行好氧吸磷试验和缺氧吸磷试验。每个锥形瓶中均通过投加 KH_2PO_4 使磷的起始浓度为30 mg/L。在好氧吸磷试验中,连续供给氧气,并控制 $DO > 4$ mg/L;在缺氧吸磷试验中,一次性投加 KNO_3 ,使 $NO_3^- - N$ 初始浓度为15 mg/L。两个锥形瓶均采用磁力搅拌器进行慢速搅拌。试验过程中,控制pH为7.2~7.5、温度为 $(25 \pm 1)^\circ C$ 。反应10 min后,分别从每个锥形瓶中取水样测定TP浓度,而后计算O-PUR和N-PUR。

1.6 测定项目与方法

1.6.1 常规指标的测定

COD:重铬酸钾法;TN:碱性过硫酸钾消解-紫外分光光度法; $NO_3^- - N$:紫外分光光度法;TP:过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法; $NH_4^+ - N$:纳氏试剂分光光度法;生物相:显微镜观察;MLSS、MLVSS:重量法; SV_{30} :沉降法;DO和pH:WTW340i水质分析仪。

1.6.2 EPS中磷的测定

取50 mL活性污泥混合液置于离心管中,以4 000 r/min离心5 min,弃去上清液,然后用0.9%的NaCl溶液使其体积恢复至50 mL。将含有NaCl的恢复溶液以7 300 r/min离心5 min,弃去上清液,目的是洗去聚合物中的黏液。再次用0.9%的NaCl溶液使其体积恢复至50 mL,倒入烧杯中,用1 mol/L的NaOH溶液调节混合液pH为11,然后在120 r/min下

匀速慢搅 10 min,使混合液中的反应充分进行,再将混合液倒入离心管中,在 7 300 r/min 下离心 10 min,用 0.45 μm 滤膜过滤离心后的液体以去除杂质^[16],将滤液稀释一定倍数后测定 TP 浓度。

1.6.3 胞内多聚磷酸盐的测定

在离心管中放置一定量的活性污泥混合液,以 5 000 r/min 离心,弃去上清液,用超纯水润洗两次,将清洗过后的污泥样品在 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下冷冻干燥脱水 20 h;然后将 0.9 mg 脱水后的污泥样品、100 mL 超纯水和 40 mL 5% 的过硫酸钾溶液置于 250 mL 锥形瓶中,盖紧瓶塞,裹紧纱布后放入压力灭菌锅,在 $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下消解 30 min;消解结束后,使消解液冷却至室温,将消解液用 250 mL 容量瓶定容,测定 50 mL 定容后溶液中的正磷酸盐浓度,即为活性污泥中的 TP 量。胞内多聚磷酸盐的量等于此活性污泥中的 TP 量与 1.6.2 节中 EPS 中测得的 TP 量的差值^[17]。

2 结果与分析

2.1 不同 IRF 对 DPAOs/PAOs 的影响

不同 IRF 条件下的好氧和缺氧吸磷速率以及 DPAOs/PAOs (即 DPAOs:PAOs) 见图 2。当 IRF 为 0.52 圈/h 时, O-PUR 值最高,达到 26.5 $\text{mg}/(\text{gMLVSS}\cdot\text{h})$,但 N-PUR 仅为 2.1 $\text{mg}/(\text{gMLVSS}\cdot\text{h})$,此时 DPAOs/PAOs 最低,为 7.99%;随着 IRF 的增大, O-PUR 呈现先降低后升高的趋势,而 N-PUR 和 DPAOs/PAOs 均是先升高后降低。当 IRF 为 3.36 和 7.53 圈/h 时, DPAOs/PAOs 值较高,在 50% 左右。

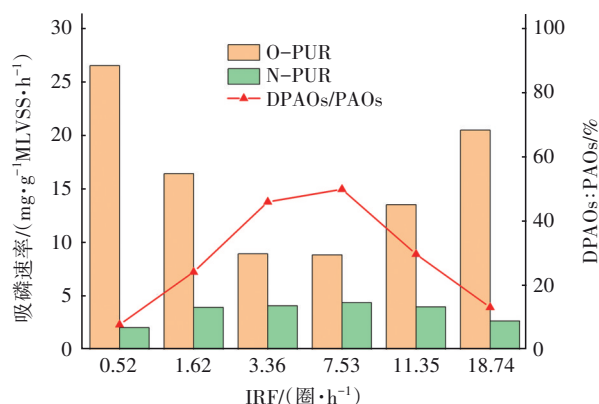


图2 不同 IRF 下的好氧和缺氧吸磷速率以及 DPAOs/PAOs

Fig.2 Oxic and anoxic phosphorus uptake rates and DPAOs/PAOs at different IRF

为了阐明 O-PUR、N-PUR 和 DPAOs/PAOs 出现以上变化趋势的原因,表 1 列出了改良氧化沟各工况下的 IRF 和混合液在环状廊道内环流一圈所用的

时间 T 。

表 1 改良氧化沟在各工况下的 IRF 及 T

Tab.1 IRF and T of each condition in improved oxidation ditch

工况	IRF/(圈·h ⁻¹)	T/min	$T_{\text{好氧}}/\text{min}$	$T_{\text{缺氧}}/\text{min}$
I	0.52	115.9	60.3	55.6
II	1.62	36.9	19.2	17.7
III	3.36	17.9	9.3	8.6
IV	7.53	7.9	4.1	3.8
V	11.35	5.3	2.8	2.5
VI	18.74	3.2	1.7	1.5

注: $T_{\text{好氧}}$ 和 $T_{\text{缺氧}}$ 分别为混合液环流一圈在好氧区和缺氧区所停留的时间。

由表 1 可知,当 IRF 为 0.52 圈/h 时,混合液环流一圈在好氧区和缺氧区停留的时间分别为 60.3 和 55.6 min,此时 $T_{\text{好氧}}$ 足够长,好氧区内的混合液能够充分消耗细胞内的聚羟基脂肪酸酯(PHA)进行好氧吸磷,进而导致混合液流经缺氧区时胞内的 PHA 不足,因此即便此时 $T_{\text{缺氧}}$ 也足够长,缺氧区内的反硝化除磷反应也是受限的,长期运行,就会导致工况 I 的 DPAOs/PAOs 值较低。

当 IRF 依次增加至 1.62、3.36、7.53 圈/h 时, O-PUR 逐渐降低, N-PUR 和 DPAOs/PAOs 逐渐升高, $T_{\text{好氧}}$ 依次缩短至 19.2、9.3 和 4.1 min,这就导致 PHA 在好氧区的消耗量逐渐减少,从而有利于缺氧区内反硝化除磷反应的进行。

当 IRF 逐渐增至 11.35、18.74 圈/h 时,混合液在好氧区和缺氧区的停留时间都很短,通常认为所有除磷菌都能进行好氧吸磷,只有部分除磷菌能进行缺氧吸磷,因此在非常短的停留时间内好氧吸磷还是要强于反硝化吸磷,长期运行就会导致 DPAOs/PAOs 值降低。

2.2 不同 IRF 对污染物去除的影响

不同 IRF 条件下的污染物去除率和出水浓度如图 3 所示。可知,当 IRF 从 0.52 圈/h 增至 18.74 圈/h 时, COD 去除率变化不大。当 IRF 为 0.52、1.62 圈/h 时,混合液流经好氧区和缺氧区时能进行充分的硝化和反硝化,有利于反硝化脱氮和好氧除磷,故系统中 TN 和 TP 去除率分别可达到 80% 左右和 91% 以上。当 IRF 增至 11.35、18.74 圈/h 时,混合液在好氧区和缺氧区停留的时间均不断缩短,这对好氧区的硝化反应和缺氧区的反硝化反应很不利,

致使出水 NO_3^- -N 和 TN 浓度增加, TN 去除率显著下降;此时,随回流污泥回流至厌氧区的 NO_3^- -N 量也增加,会对厌氧释磷造成不利影响,因此导致出水 TP 浓度增加、TP 去除率降低。当 IRF 为 3.36、7.53 圈/h 时,系统内除了发生反硝化脱氮和好氧除磷外,更有利于反硝化脱氮除磷的进行, COD、TN、TP 去除率分别可以达到 92%、80% 和 93% 以上,高于其他工况。

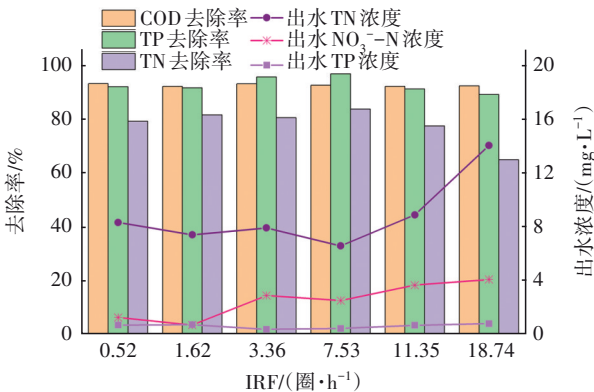


图3 不同 IRF 下的污染物去除率和出水浓度

Fig.3 Pollutants removal rates and effluent concentrations at different IRF

2.3 不同 IRF 对磷转化途径的影响

改良氧化沟各取样点的磷浓度测定结果见表 2,用于磷的质量平衡及转化途径分析。

表 2 改良氧化沟内各取样点的磷浓度

Tab.2 Phosphorus concentration of different sampling points in improved oxidation ditch $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

工况	I	II	III	IV	V	VI
$C_{\text{TP},\text{in}}$	6.99	6.97	6.49	6.67	6.79	6.56
$C_{\text{TP},\text{厌氧}}$	42.17	42.37	30.06	31.36	29.06	26.12
$C_{\text{PP},\text{厌氧}}$	73.53	78.53	94.33	93.58	64.33	36.25
$C_{\text{EPS-P},\text{厌氧}}$	10.77	8.97	12.10	12.25	10.35	10.58
$C_{\text{TP},\text{回流}}$	0.66	0.69	0.35	0.41	0.65	0.77
$C_{\text{PP},\text{回流}}$	250.29	255.42	264.74	265.39	194.26	125.68
$C_{\text{EPS-P},\text{回流}}$	25.13	26.44	36.40	36.87	35.24	34.92
$C_{\text{TP},\text{eff}}$	0.66	0.69	0.35	0.41	0.65	0.77

2.3.1 厌氧区内磷的转化

不同 IRF 条件下磷在厌氧区内的转化量见图 4。将图 4 中的数据代入式(7)可算得,在工况 I~VI 条件下,厌氧区内磷的释放平衡率分别为 99.70%、101.11%、95.95%、96.37%、91.50%、90.16%,均高于 90%,故试验数据较准确,平衡结果可靠。

由图 3 可知,随着 IRF 的增大,回流至厌氧区的

NO_3^- -N 量逐渐增多,使得厌氧区内的传统反硝化反应逐步增强,消耗的碳源也逐渐增多,厌氧释磷可利用的碳源逐渐减少,对厌氧释磷的不利影响逐渐增大。因此导致图 4 所示的结果,即随着 IRF 的增大,厌氧区胞内多聚磷酸盐的释磷量 $M_{\text{PP},\text{厌氧}}$ 逐渐降低。由于 $M_{\text{PP},\text{厌氧}}$ 显著高于 $M_{\text{EPS-P},\text{厌氧}}$,所以随着 IRF 的增大,厌氧区内 TP 的释放量 $M_{\text{TP},\text{厌氧}}$ 也逐渐降低。此外,由图 4 可知,随着 IRF 的增大, EPS 释磷量 $M_{\text{EPS-P},\text{厌氧}}$ 呈增加趋势。

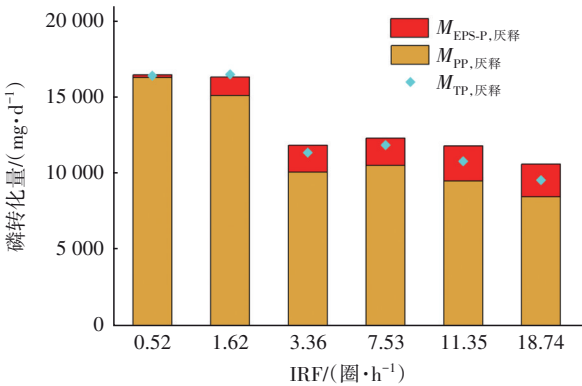


图4 不同 IRF 下磷在厌氧区内的转化量

Fig.4 Transformation of phosphorus in anaerobic zone at different IRF

2.3.2 主沉区内磷的转化

不同 IRF 条件下磷在主沉区的转化量见图 5。将图 5 的数据代入式(12)可算得,在工况 I~VI 条件下,主沉区内磷的吸收平衡率分别为 107.60%、109.00%、103.78%、104.19%、99.53%、98.25%,均接近 100%,故试验数据较准确,平衡结果可靠。

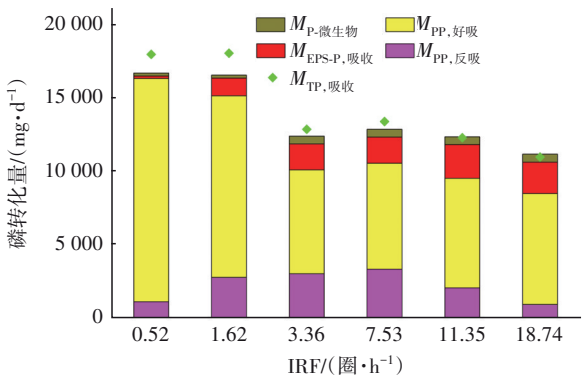


图5 不同 IRF 下磷在主沉区的转化量

Fig.5 Transformation of phosphorus in main sedimentation area at different IRF

由图 5 可知,随着 IRF 的增大,微生物吸磷量和 EPS 吸磷量均增大,好氧吸磷量与反硝化吸磷量之

和减小。结合图4可知,随着IRF的增大,EPS在厌氧区的释磷量逐渐增大,故EPS在主沉区的吸磷量也呈逐渐增大的趋势;而在厌氧区由于胞内多聚磷酸盐的释磷量逐渐减少,故在主沉区好氧吸磷量与反硝化吸磷量之和也呈逐渐减少的趋势;当IRF由0.52圈/h增至7.53圈/h时,厌氧区的释磷量虽然呈减小趋势,但与主沉区吸磷量能达到较好的平衡,即厌氧区释放的磷能在主沉区被较好地吸收去除,故TP去除率并未随着厌氧区释磷量的减小而下降。此外,随着IRF由0.52圈/h增至18.74圈/h时,如图2所示DPAOs/PAOs先增大后减小,故图5中主沉区内的反硝化吸磷量也呈现先增后减的趋势。

2.3.3 改良氧化沟系统内磷的转化途径

不同IRF条件下改良氧化沟系统中磷的转化途径如图6所示。可知,当IRF为3.36和7.53圈/h时,随出水排放的磷较其他工况要少,为 $(5.77 \pm 0.53)\%$;DPAOs吸磷所占比例较其他工况要高,为 $(16.04 \pm 0.82)\%$ 。由于PAOs对磷的吸收速率远高于微生物的生长速率,故当IRF为0.52和1.62圈/h时,厌氧释磷、好氧吸磷和缺氧吸磷反应较彻底,较多的磷由PAOs吸收在胞内形成多聚磷酸盐,而作为营养元素用于微生物生长繁殖所同化吸收的磷所占比例较少;用于微生物生长繁殖所消耗的磷较少,很可能会影响微生物的生长繁殖,进而会影响到EPS量,所以当IRF为0.52和1.62圈/h时,EPS吸磷所占比例较其他工况要低。反之,当IRF增至3.36、7.53、11.35和18.74圈/h时,微生物生长繁殖作为营养元素所消耗的磷和EPS吸磷所占比例均升高。

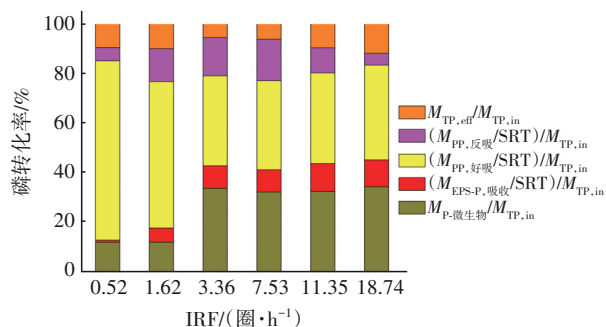


图6 不同IRF下改良氧化沟系统中磷的转化途径

Fig.6 Transformation pathway of phosphorus in improved oxidation ditch system at different IRF

3 结论

在试验条件下,对于环状廊道前置厌氧区、内

设好氧区和缺氧区的改良氧化沟,当 $IRF \leq 1.62$ 圈/h时,有利于将更多的磷储存在细胞内形成多聚磷酸盐;当IRF在3.36~7.53圈/h之间时,DPAOs/PAOs最高可达到50%左右,有利于反硝化除磷,而且系统可获得较好的同步脱氮除磷效果;当 $IRF \geq 11.35$ 圈/h时,TN去除效果不佳,无法实现高效同步脱氮除磷。

参考文献:

- [1] 杨登,袁敏忠,钟毓,等. 潮州某污水厂A/O氧化沟工艺不停产提标扩容改造[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 119-123.
YANG Deng, YUAN Minzhong, ZHONG Yu, et al. Upgrading and expansion without shutdown of a WWTP in Chaozhou with A/O oxidation ditch process [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 119-123 (in Chinese).
- [2] 李亮,邱宏俊. 改良A²/O氧化沟强化生化处理技术用于污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2020, 36(20): 124-128.
LI Liang, QIU Hongjun. Application of improved A²/O oxidation ditch enhanced biochemical treatment process for upgrading the wastewater treatment plant [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(20): 124-128 (in Chinese).
- [3] 田亚军,彭贵龙,王海源,等. 鄂尔多斯某污水处理厂提标改造工程实践[J]. 中国给水排水, 2020, 36(6): 107-111.
TIAN Yajun, PENG Guilong, WANG Haiyuan, et al. Upgrading and retrofitting practice of a wastewater treatment plant in Ordos [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(6): 107-111 (in Chinese).
- [4] 陈金灿,陈永军,张权沛. MBBR氧化沟/超滤/O₃工艺用于工业区污水厂提标改造[J]. 中国给水排水, 2020, 36(2): 69-73.
CHEN Jincan, CHEN Yongjun, ZHANG Quanpei. Application of combined process of MBBR oxidation ditch, ultrafiltration and ozone for upgrading and reconstruction of WWTP in an industrial park [J]. China Water & Wastewater, 2020, 36(2): 69-73 (in Chinese).
- [5] 刘晋,刘金星,张万里. 某Carrousel氧化沟工艺污水处理厂达标改造设计[J]. 中国给水排水, 2020, 36(10): 47-51.
LIU Jin, LIU Jinxing, ZHANG Wanli. Reaching

- standard and renovation project design of a wastewater treatment plant with Carrousel oxidation ditch process [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(10): 47–51 (in Chinese).
- [6] 于静洁, 邓宏, 郑淑平, 等. 氧化沟工艺应用研究进展[J]. *工业水处理*, 2013, 33(6): 1–5.
YU Jingjie, DENG Hong, ZHENG Shuping, *et al.* Progress in the research and application of oxidation ditch [J]. *Industrial Water Treatment*, 2013, 33(6): 1–5 (in Chinese).
- [7] 谷静丽, 洪军, 张帆, 等. 厌氧-氧化沟工艺处理某农村乡镇污水工程设计[J]. *环境工程*, 2014, 32(7): 40–42, 104.
GU Jingli, HONG Jun, ZHANG Fan, *et al.* Engineering design of anaerobic-oxidation ditch process for a municipal sewage treatment [J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(7): 40–42, 104 (in Chinese).
- [8] 郭昌梓, 陈雪梅, 王琦. 氧化沟不同分区脱氮除磷研究[J]. *水处理技术*, 2012, 38(2): 107–111.
GUO Changzi, CHEN Xuemei, WANG Qi. Study on the efficiency of biological nitrogen and phosphorus removal of different A/O partitioning zones in oxidation ditch [J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, 38(2): 107–111 (in Chinese).
- [9] MANTZIARAS I D, KATSIRI A. Reaction rate constants and mean population percentage for nitrifiers in an alternating oxidation ditch system [J]. *Bioprocess and Biosystems Engineering*, 2011, 34(1): 57–65.
- [10] CHEN X Q, FUJIWARA T, NAKAMACHI K, *et al.* Evaluation of a novel oxidation ditch system with dual DO control technology for biological nutrient removal by mass balance analysis [J]. *Desalination*, 2012, 286(1): 24–33.
- [11] 龙向宇, 方振东, 唐然, 等. 胞外聚合物在生物除磷中作用的研究[J]. *环境科学学报*, 2012, 32(4): 784–789.
LONG Xiangyu, FANG Zhendong, TANG Ran, *et al.* Roles of extracellular polymer substances in biological dephosphorization [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(4): 784–789 (in Chinese).
- [12] 张倩, 李孟, 王弘宇, 等. 反硝化除磷菌胞外聚合物的提取及除磷研究[J]. *武汉理工大学学报*, 2013, 35(2): 130–133.
ZHANG Qian, LI Meng, WANG Hongyu, *et al.* Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from denitrifying polyphosphate-accumulating organism (DPAO) and its action on phosphorus removal [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2013, 35(2): 130–133 (in Chinese).
- [13] 方振东, 仙光, 龙向宇, 等. 胞外聚合物磷酸盐形态对生物除磷过程的影响研究[J]. *环境科学学报*, 2014, 34(9): 2205–2212.
FANG Zhendong, XIAN Guang, LONG Xiangyu, *et al.* Effect of phosphate species in extracellular polymer substances on biological phosphorus removal process [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(9): 2205–2212 (in Chinese).
- [14] MEINHOLD J, FILIPE C D M, DAIGGER G T, *et al.* Characterization of the denitrifying fraction of phosphate accumulating organisms in biological phosphate removal [J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(1): 31–42.
- [15] WACHTMEISTER A, KUBA T, VAN LOOSDRECHT M C M, *et al.* A sludge characterization assay for aerobic and denitrifying phosphorus removing sludge [J]. *Water Research*, 1997, 31(3): 471–478.
- [16] 唐金花, 许国仁, 萧静, 等. 活性污泥胞外聚合物提取条件的优化[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(6): 3505–3507, 3535.
TANG Jinhua, XU Guoren, XIAO Jing, *et al.* Optimization of extraction conditions of extracellular polymeric substances from activated sludge [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(6): 3505–3507, 3535 (in Chinese).
- [17] 由阳. EBPR系统中聚磷菌与聚糖菌的竞争和调控的基础研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
YOU Yang. Basic Research on the Competition and Control of PAO and GAO in EBPR System [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2008 (in Chinese).

作者简介: 常国松(1997–), 男, 河北唐山人, 硕士研究生, 主要研究方向为污水处理与工艺系统模拟。

E-mail: cgs181151765@163.com

收稿日期: 2021-02-25

修回日期: 2021-04-12

(编辑: 刘贵春)