廖 驰,于莉芳,曹 皖,等.A_d/A_r对曝气动力横向内循环反应器中混合液内循环比及脱氮性能影响研究 [J]. 中国环境科学, 2025,45(11):6137-6145.
Liao C, Yu L F, Cao W, et al. Effect of A_d/A_r on internal recycle ratioofmixed liquor and nitrogen removal performance in an airlift transverse internal loop reactor [J]. China Environmental Science, 2025,45(11):6137-6145.

A_d/A_r 对曝气动力横向内循环反应器中混合液内循环比及脱氮性能影响研究

廖 驰[1],于莉芳[1*],曹 皖[2],蒋 睿[1],戴步峰[2],彭党聪[1] (1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西 西安 710055;2.南京市市政设计研究院有限责任公司,江苏 南京 210008)

摘要：采用一种新型曝气动力横向内循环反应器(ATIR)进行模拟城市污水生物脱氮研究,考察 4 种不同的下降区/上升区过流断面比值(A_d/A_r)对 ATIR 混合液内循环比与脱氮性能的影响.结果表明,ATIR 利用曝气动能可以实现高内循环比(52~176). 在 A_d/A_r 为 1:1.5,HRT 为 9h 时,出水总氮为(8.12 ± 1.21) mg/L.与常规内循环模式相比,ATIR 在此 A_d/A_r 时曝气量降低了 27.5%,亚硝酸盐氧化速率/氨氧化速率由 1.31 降至 0.95,亚硝酸盐氧化菌(NOB)-*Nitrospira* 丰度由 3.66%降至 0.88%.而且,此时 ATIR 同步硝化反硝化率达到(26.77 ± 2.36)%,短程硝化反硝化脱氮贡献率达 16.71%.由此可见,ATIR 在 A_d/A_r 为 1:1.5 时具有淘汰 NOB 潜力,且脱氮途径趋向于同步短程硝化反硝化.

关键词：横向内循环；高内循环比；亚硝酸盐；亚硝酸盐氧化菌；同步短程硝化反硝化
中图分类号：X703 **文献标识码**：A **文章编号**：1000-6923(2025)11-6137-09

Effect of A_d/A_r on internal recycle ratioofmixed liquor and nitrogen removal performance in an airlift transverse internal loop reactor.

LIAO Chi[1], YU Li-fang[1*], CAO Wan[2], JIANG Rui[1], DAI Bu-feng[2], PENG Dang-cong[1] (1.School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi′an 710055, China; 2.Nanjing Municipal Design and Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210008, China). *China Environmental Science*, 2025,45(11)：6137~6145

Abstract：An airlift transverse internal loop reactor (ATIR) was operated for the treatment of synthetic municipalwastewater. The nitrogen removal performance and internal recycle ratio of the ATIR with four different ratios of the cross-sectional areas of the downcomer to the riser (A_d/A_r) were investigated. The results indicated that the ATIR achieved high internal recycle ratio (52~176) by utilizing aeration kinetic energy. The efficient nitrogen removal was obtained at an A_d/A_r of 1:1.5 and a hydraulic retention time (HRT) of 9h, with the effluent total nitrogen of (8.12 ± 1.21) mg/L. Compared to the conventional internal recycle mode, the ATIR at this A_d/A_r demonstrated a 27.5% reduction in aeration rate. Furthermore, the ratio of specific nitrite utilization rate to specific ammonia utilization rate decreased from 1.31 to 0.95 and the abundance of nitrite-oxidizing bacteria (NOB-Nitrospira) decreased from 3.66% to 0.88%. Meanwhile, the simultaneous nitrification-denitrification efficiency increased to 26.77%, and the contribution of partial nitrification and denitrification to nitrogen removal corresponding increased to 16.71%. These indicate that spontaneous nitrite-oxidizing bacteria washout in the ATIR had occurred and the nitrogen removal pathway at an A_d/A_r of 1.5 tends towards simultaneous partial nitrification and denitrification.

Key words：transverse internal loop；high internal recycle ratio；nitrite；NOB；simultaneous partial nitrification and denitrification

硝化液回流是传统生物脱氮工艺(硝化-反硝化)必不可少的重要组成部分,一般认为硝化液回流比或者内循环比越高,生物脱氮效率越高[1].为满足污水处理系统脱氮需求,常规硝化液回流是通过增设内回流泵将硝化液从好氧池末端回流至缺氧池前端,但内回流泵的能耗与硝化液回流比成正比.常规城市污水处理系统的回流比一般控制在2~4,其能耗约占系统总能耗的 3.7%~11.6%[2].如何在低能耗条件下实现高硝化液回流比运行对废水生物脱氮的提质增效具有重要意义.

气升式反应器因其能耗低、传质效率高以及优良的流体力学特性等优势,在废水生物处理领域具有广泛的应用前景[3].该反应器能够通过密度差和曝气动力实现硝化液的内循环,从而显著提升处理效率.值得注意的是,反应器的结构参数是决定其性能的关键因素.然而,近年来国内外相关研究主要集中于流体力学模拟分析[4-5],而实验研究则相对匮乏,

收稿日期：2025-04-09
基金项目：陕西省重点研发计划项目(2023-YBSF-314)
* 责任作者, 副教授, yulifang@xauat.edu.cn

亟待进一步加强.本课题组前期提出了一种新型曝气动力横向内循环反应器(ATIR),并通过 CFD 模拟和实验初步证明,ATIR 可以利用曝气动能实现混合液高内循环比运行.在顶间隙率(h_{tc}/h_l)和底间隙率(h_{bc}/h_l)均为 10%时,ATIR 具有良好的脱氮性能[6].然而,下降区与上升区过流断面比值(A_d/A_r)是影响气升式反应器气含率、流体动力学特性及传质效率的关键参数[7-8].目前,关于 A_d/A_r 对 ATIR 混合液内循环特性和脱氮机制的影响尚未明确.

因此,本研究通过在 ATIR 中构建四种不同的 A_d/A_r 比值,考察内循环比、功能菌活性、关键酶活性及同步硝化反硝化(SND)率等指标的变化规律,深入分析 A_d/A_r 对 ATIR 内循环特性与脱氮机制的影响,以期为污水处理厂的原位改造提供理论依据和技术支持.

1 材料与方法

1.1 试验装置与运行

ATIR 反应器结构如图 1 所示,尺寸为 0.30m 长×0.20m 宽×0.60m 高,有效容积为 30L.通过在反应器中间加入导流板将反应器分为上升区和下降区,并通过调整导流板位置实现不同的 A_d/A_r 值,h_{tc}/h_l 和 h_{bc}/h_l 均为 10%.上升区底部安装微孔曝气盘,在曝气动能和密度差的推动下,混合液在上升区与下降区之间循环流动.ATIR 在连续流模式下运行,进水流量为 80L/d, HRT 为 9h,温度为(20±1) °C;污泥停留时间为 20d.具体运行条件如表 1 所示.

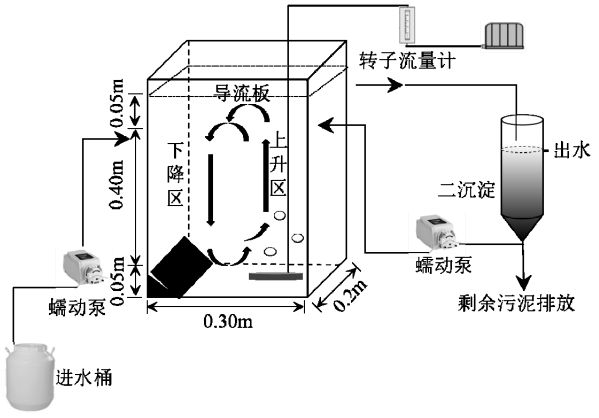


图 1 ATIR 反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of ATIR

反应器进水采用人工配制的模拟城市污水,COD 浓度为(313.67±12.81) mg/L(可溶性淀粉:无水乙酸钠=7:3,以 COD 计),NH_4^+-N 浓度为(40.33±0.53) mg/L(NH_4Cl),其他水质组分如下:35mg/L KH_2PO_4、5mg/L $FeSO_4·7H_2O$、600mg/L $NaHCO_3$ 以及 0.2mg/L 微量元素,微量元素具体成分见文献[9].

表 1 ATIR 的运行参数

Table 1 Operational procedures of the ATIR

阶段	混合液循环模式	时间(d)	稳定运行期(d)	A_d/A_r	污泥回流比(%)
Ⅰ	常规内循环	1~24	3~24	1:1	200
Ⅱ	横向内循环	25~83	45~83	1:1	100
Ⅲ		84~107	87~107	1:2	100
Ⅳ		108~133	112~133	2:1	100
Ⅴ		134~239	140~239	1:1.5	100

注:运行模式转化为横向内循环时,不需要维持常规内循环.

1.2 试验分析与计算

1.2.1 常规指标分析 NH_4^+-N、NO_2^--N、NO_3^--N、TN、COD、MLSS 和 MLVSS 根据标准方法检测[10].溶解氧(DO)采用哈希便捷式溶解氧仪(HQ30d, HACH)测定,pH 值采用 pH 计(FE-20, Mettler-Toledo)测定.

1.2.2 功能菌活性和关键酶活性 氨氧化活性(SAUR)、亚硝酸盐氧化活性(SNUR)、硝酸盐还原活性(NARR)和亚硝酸盐还原活性(NIRR)测定方法参照文献[11].活性实验均在 20℃下进行.

采用超声破碎法提取粗酶溶液[12],离心后的上清液用于氨单加氧酶(Amo)、亚硝酸盐氧化还原酶(Nxr)、硝酸盐还原酶(Nar)和亚硝酸盐还原酶(Nir)活性测定,具体测定方法参照文献[13-14].酶活性实验均在 30℃下进行.

采用 Pearson 相关系数计算功能菌活性和关键酶活性之间的相关性,当 P 值小于 0.05 时,认为具有显著相关性.

1.2.3 SND 率测定 阶段Ⅰ~Ⅴ稳定运行期间(第 10, 50,90,120 和 200d),从 ATIR 中取出活性污泥,以 4000r/min 转速离心 5min,弃去上清液,用纯水清洗 3 次后均分放入 5 个 250mL 锥形密封瓶中,加入 200mL 配水,配水中 COD(100mg/L)、NH_4^+-N (20mg/L)和 NO_3^--N (20mg/L), pH 值调至 7.4,最后通过气体流量计分别控制各密封瓶 DO 浓度为 0.1,0.5,1.0,1.5,2.0mg/L.将密封瓶放入恒温振荡器

(20℃,120r/min),反应时间 60min,期间每隔 10min 取一次样并测定 NH_4^+−N、NO_2^-−N 和 NO_3^-−N 的浓度.SND 率(R)和上升区平均 SND 率($\overline{R}$)分别根据式(1)和式(2)计算[15]:

$$R=(1-\frac{\Delta C(NO_3^-\text{-}N)+\Delta C(NO_2^-\text{-}N)}{\Delta C(NH_4^+\text{-}N)})\times 100 \quad (1)$$

$$\overline{R}=\frac{\sum R(\mathrm{DO})\cdot V_O(\mathrm{DO})}{V_O} \quad (2)$$

式中:$\Delta C(NO_2^-\text{−}N)$为反应前后 NO_2^-−N 浓度的增加量,mg/L;$\Delta C(NO_3^-\text{−}N)$为反应前后 NO_3^-−N 浓度的增加量,mg/L;$\Delta C(NH_4^+\text{−}N)$为反应前后 NH_4^+−N 浓度的减少量,mg/L; V_o 为上升区总体积,L; R(DO)为相应 DO 浓度下的 SND 率,%; V_o(DO)为对应 DO 在上升区所占体积,L.

1.2.4　微生物高通量测序　活性污泥样品取自第 10,50,90,120 和 200d,并于−20℃储存.Illumina Miseq 高通量测序由上海凌恩生物科技有限公司提供技术支持.采用正向引物 515F(5'−GTGCCAGCMGC−CGCGGTAA−3')和反向引物 806R(5'−GGACTAC−HVGGTWTCTAAT−3')扩增样品菌 16S rRNA 基因的 V4 区域,具体测序方法见文献[15].

1.2.5　相关计算　(1)内循环比计算

A_d/A_r是影响 ATIR 内循环速率和内循环比的关键参数.其中,反应器内循环比定义为上升区与下降区之间的内循环流量与进水流量的比值[16],根据公式(3)进行计算:

$$R_I=\frac{U_{lr}A_r r}{Q_O} \quad (3)$$

式中:R_I 为内循环比;U_{lr} 为上升区表观液速,m/s;A_r 为上升区横截面积,m^2;r 为曝气动能用于内循环的比例,%;Q_O 为反应器的进水流量,3.33L/h.

U_{lr}采用迭代法求解[17],根据式(4)~(8)进行计算:

$$U_{lr}=\sqrt{\frac{2gh_D(\varepsilon_r-\varepsilon_d)}{K_B(\frac{A_r}{A_d})^2\frac{1}{(1-\varepsilon_d)^2}}} \quad (4)$$

$$K_B=11.402(\frac{A_d}{A_b})^{0.789} \quad (5)$$

$$\varepsilon_r=\frac{U_{gr}}{0.24+1.35(U_{lr}+U_{gr})^{0.93}} \quad (6)$$

$$\varepsilon_d=0.89\varepsilon_r \quad (7)$$

$$U_{gr}=\frac{Q_a}{A_r} \quad (8)$$

式中:式中:g 为重力加速度,m/s²;h_D 为气液分散高度,m;ε_r 为上升区含气率;ε_d 为下降区含气率;K_B 为底部连接段的摩擦损失系数; A_d 为下降区横截面积,m^2;A_b 为下降区流向上升区的自由面积,m^2;U_{gr} 是上升区的表观气速,m/s;Q_a 是曝气量,m^3/s

(2)单级 A/O 混合液的平均水力停留时间(T_l)

T_l 根据公式(9)进行计算:

$$T_l=\frac{\mathrm{HRT}}{1+R_I} \quad (9)$$

式中:HRT 是反应器的水力停留时间,9h;R_I 是内循环比.

(3)氮平衡计算

ATIR 的氮转化主要考虑:氨氧化、亚硝酸盐氧化、硝酸盐还原、亚硝酸盐还原以及同化等.根据反应器进、出水氮浓度、COD 浓度以及活性污泥排放量等进行质量平衡分析[18].

2　结果与讨论

2.1　ATIR 反应器启动与运行特性

2.1.1　反应器进出水水质　反应器长期运行性能如图 2 所示,运行过程分为 5 个阶段,阶段Ⅰ为常规内循环模式,阶段 II~V 为横向内循环模式.由图 2(a)可知,反应器运行期间 COD 去除率保持稳定,COD 出水浓度为(11.78±5.86) mg/L, COD 去除率为(96.28±1.79)%.说明混合液循环模式对 COD 的去除无显著影响.

由图 2(b)和图 2(c)可知,在阶段 I 中,反应器在曝气量为(0.8±0.02) L/min 的条件下运行,出水 NH_4^+−N 浓度为(1.31±0.50) mg/L,出水 TN 为(11.83±1.31) mg/L,TN 去除率为(70.97±3.27)%.在转变为横向内循环模式后,由于原有曝气强度过大,破坏了下降区的缺氧环境,出水 NO_3^-−N 浓度由第 21d 的 10.87mg/L 迅速上升到第 22d 的 21.40mg/L.之后降低曝气至满足硝化的最低曝气量(出水 NH_4^+−N 浓度<5mg/L).值得注意的是,在各阶段稳定运行期间,阶段 V 脱氮性能最佳,其出水 NH_4^+−N 浓度为(1.89±1.31) mg/L,出水 TN 为(7.98±1.71) mg/L,TN 去除率为(80.22±4.18)%,曝气量节约了 27.5%(同阶段 I 相比),ATIR 系统出水水质满足《城镇污水处理厂污染

物排放标准》(GB18918−2002)[19]中一级 A 标准.这说明 ATIR 在 A_d/A_r 为 1:1.5 时,可以在节约曝气能耗同时取得优异的脱氮效果.

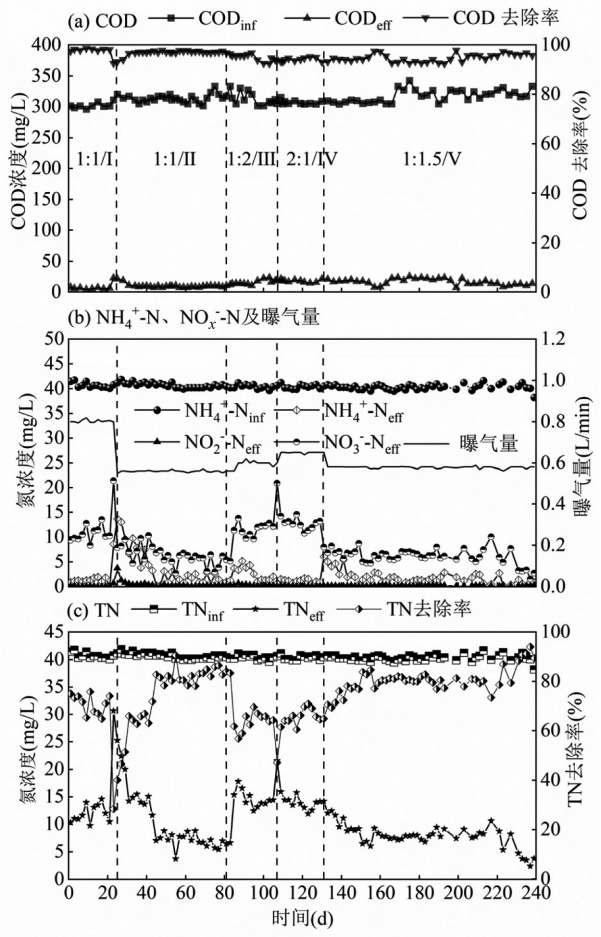


图 2 ATIR 反应器运行性能

Fig.2 The operational performance of the ATIR

2.1.2 内循环比 图 3 为曝气量和 A_d/A_r 对内循环比(R_I)的影响.根据式(3)可知,通过各阶段不同曝气条件下曝气动能用于内循环比率计算出相应的 R_I 值.结果表明:在相同的 A_d/A_r 条件下,R_I 随曝气量的增加而升高;当曝气量保持不变时,R_I 随 A_d/A_r 的减少而降低. ATIR 运行期间各阶段的流场特征如表 2 所示,R_I 在 A_d/A_r 为 1:2~2:1 时达到 52~176,远高于《室外排水设计标准》(GB50014−2021)[20]对传统 A/O 或 A^2/O 工艺 100%~400%的推荐回流比.

较高的 R_I 可以提高混合液内循环速度,促进混合液从上升区(好氧环境)向下降区(缺氧环境)快速转移[21-22],在 ATIR 中形成多级 A/O 系统[3].根据式(9)计算可知,单级 A/O 混合液的平均水力停留时间从阶段 I 的 3h 缩短到阶段 II~V 的 0.06~0.16h.这种快速 A/O 切换可以及时将 NO_2^-−N 从好氧环境转移到缺氧环境,阻碍 NO_2^-−N 的进一步氧化,而促进 NO_2^-−N 在下降区的反硝化还原,提高脱氮效率.但如果单级 A/O 混合液的水力停留时间低于完成反硝化所需的最短时间[16],将不利于反硝化过程的进行.此外,过高的内循环速度也会降低含气率和传质效率,降低脱氮效率[7].

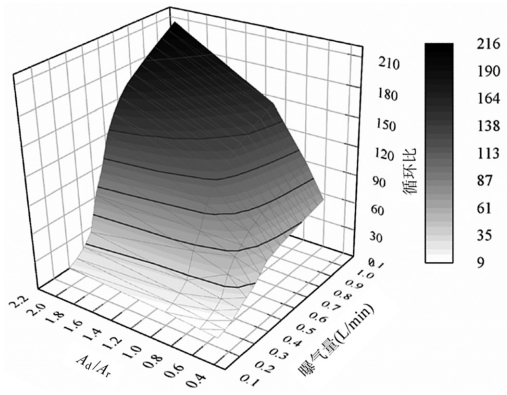


图 3 A_d/A_r 和曝气量对 R_I 的影响

Fig.3 Effect of A_d/A_r and aeration rate on the R_I

表 2 ATIR 流场特征

Table 2 Flow field characteristics of ATIR

A_d/A_r	U_{gr} (10^{-3}m/s)	U_{lr} (10^{-3}m/s)	Q_l (L/h)	r (%)	R_I
2:1	0.54	15.92	1146.50	51.15	176
1:1	0.31	6.87	742.46	49.11	109
1:1.5	0.27	4.68	606.87	41.07	75
1:2	0.25	3.71	534.39	32.31	52

2.1.3 功能菌活性及酶活性分析 (1)硝化活性和硝化酶活性 由图 4 可知,当反应器从常规内循环(阶段 I)转变为横向内循环(阶段 II)后,SAUR 保持相对稳定,SNUR 从(13.26±0.17) mg N/(g VSS·h)降至(11.41±0.35) mg N/(g VSS·h), SNUR/SAUR 从(1.31± 0.05)降至(1.05±0.07).在阶段 II~V 中. A_d/A_r 的增加会减少硝化细菌的生存空间,降低硝化活性.其中, SAUR 与 A_d/A_r 呈显著负相关(r=−0.987,P<0.05), SNUR 与 A_d/A_r 之间未发现显著相关(r=0.819,P>0.05).值得注意的是,SNUR/SAUR 在阶段 V 取得最小值(0.95±0.04),在一定程度上削弱了硝化过程中 NO_2^-−N 到 NO_3^-−N 的转化.经计算,此时 ATIR 中短程硝化反硝化脱氮贡献率达 16.71%.

Amo 和 Nxr 是硝化过程的关键硝化酶,其中 Amo 催化氨转化为羟铵,Nxr 催化亚硝酸盐转化为硝酸盐[23].Amo 活性与 SAUR 呈显著正相关(r=0.963, P<0.05),Nxr 活性与 SNUR 呈显著正相关(r=0.941, P<0.05), Nxr/Amo 与 SNUR/SAUR 呈显著正相关(r=0.966, P<0.05).在阶段 II~V 中,Amo 活性与 A_d/A_r 呈显著负相关(r =−0.955,P<0.05),而 Nxr 活性与 A_d/A_r 的相关性不强 (r=0.034,P>0.05), 并且 Nxr/Amo 在阶段 V 取得了最小值(16.86±0.94).

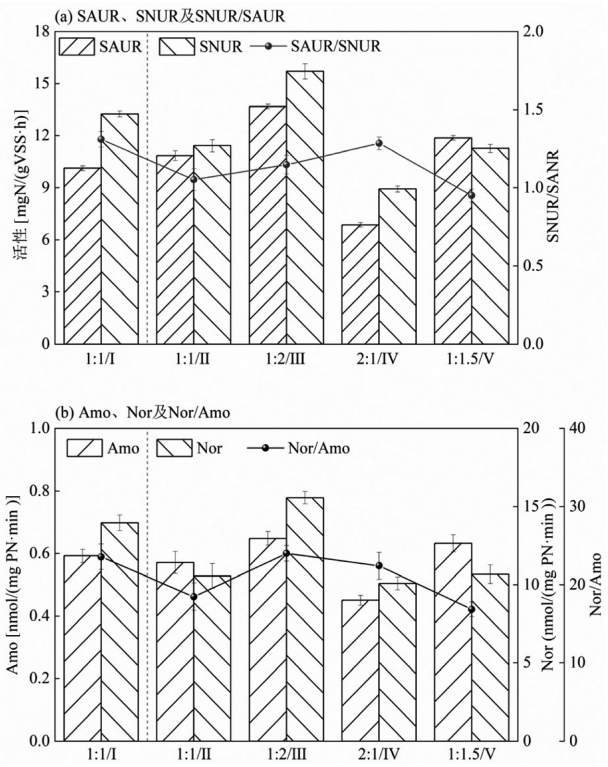


图 4　不同阶段硝化活性和酶活性的变化

Fig.4　Variation of nitrifying activity and key enzymatic activity at different phases

(2)反硝化活性和反硝化酶活性　由图 5(a)可知,反应器从常规内循环(阶段 I)转换到横向内循环(阶段 II)后,NARR 无显著差异, NIRR 从(4.19±0.14) mg N/(gVSS · h) 增加到 (4.68±0.21) mg N/(g VSS · h),NIRR/NARR 从(0.61±0.04)增加到(0.68±0.03).在阶段 II~V 中,A_d/A_r 的升高会导致下降区的水力停留时间增加,从而有利于提升反硝化活性.NARR 与 A_d/A_r 呈显著正相关(r=0.993, P<0.01), NIRR 与 A_d/A_r 未发现显著相关性(r=0.459, P>0.05).值得注意的是,NIRR/NARR 在阶段 V 达到最大值(0.72±0.04).这表明 ATIR 在 A_d/A_r 为 1:1.5 时,可以在一定程度上削弱反硝化过程中 NO_3^-−N 到 NO_2^-−N 的转化.

Nar 和 Nir 是反硝化过程的关键反硝化酶,其中 Nar 催化硝酸盐还原为亚硝酸盐,Nir 催化亚硝酸盐还原为一氧化氮[24].Nar 和 Nir 活性变化趋势(图 5(b))与 NARR 和 NIRR 变化趋势(图 5(a))相似.其中 Nar 活性与 NARR 呈显著正相关(r=0.980, P<0.05),Nir 活性与 NIRR 呈显著正相关(r=0.941,P<0.05), Nar/Nir 与 NARR/NIRR 呈显著正相关(r=0.964, P< 0.05).在阶段 II~V 中,Nar 活性与 A_d/A_r 呈显著正相关(r=0.985,P<0.05),而 Nir 活性与 A_d/A_r 未发现显著相关性(r=0.623,P>0.05),并且 Nir/Nar 在阶段 V 达到最大值(27.96±1.25).

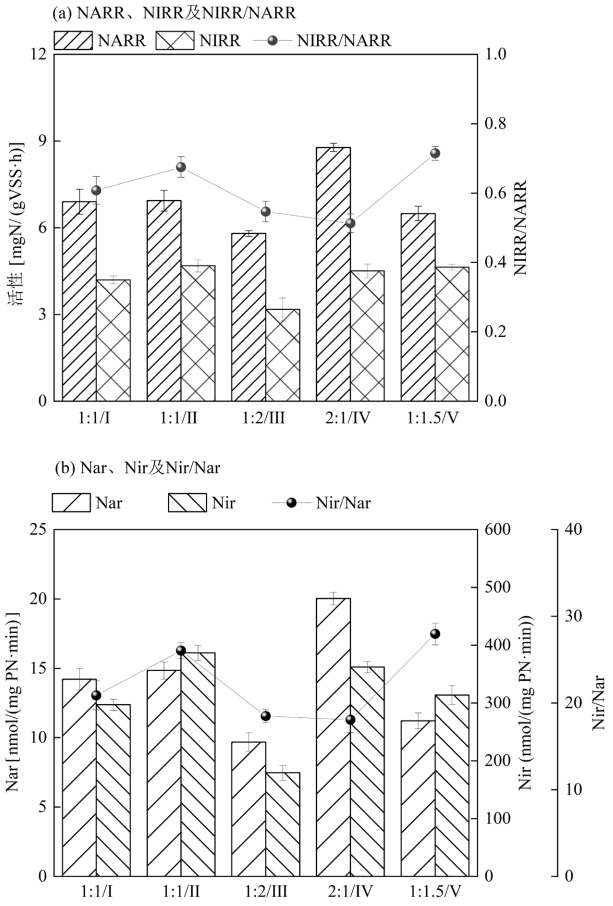


图 5　不同阶段反硝化活性和酶活性的变化

Fig.5　Variation of nitrifying activity and key enzymatic activity at different phases

2.1.4　DO 分布及 SND 率　(1) ATIR 中 DO 浓度分布:为研究不同 A_d/A_r 条件下的 DO 浓度分布规律.在反应器不同阶段稳定运行期间,在水平方向上以 2cm、垂直方向上以 5cm 的间距测量反应器纵截面上多个点位的 DO 浓度,再通过插值法预测反应器

整体的 DO 浓度分布,DO 浓度分布规律如图 6 所示.由图 6(a)和 6(b)可知,当反应器从阶段 I 转变到阶段 II 时,在 ATIR 横截面上呈现出明显的 DO 浓度梯度分布特征.上升区的 DO 浓度范围为 0.10~1.79mg/L,平均浓度为(0.69±0.32)mg/L;下降区的 DO 浓度范围为 0.09~0.30mg/L,平均浓度为(0.13±0.04)mg/L.同阶段 I 相比,阶段 II 由于 R_I 的升高,下降区与上升区之间出现显著的空间置换现象,具体为上升区底部形成局部缺氧区,同时在下降区顶部出现了局部好氧区.如图 6(b)~(e)所示, A_d/A_r 从 2:1 降至 1:2 时,下降区顶部的 DO 浓度从(0.20±0.06)增加至(0.29±0.08) mg/L.同时,上升区底部缺氧区的高度从 8cm 上升至 10cm.DO 浓度是影响 SND 率的关键参数[21],高 R_I 在 ATIR 中形成了多个低 DO 区域(0.3~0.8mg/L),这有利于 SND 的发生.其中,阶段 II~V 上升区低 DO 区域的占比分别为 54.12%,39.51%,13.68%和 54.47%.

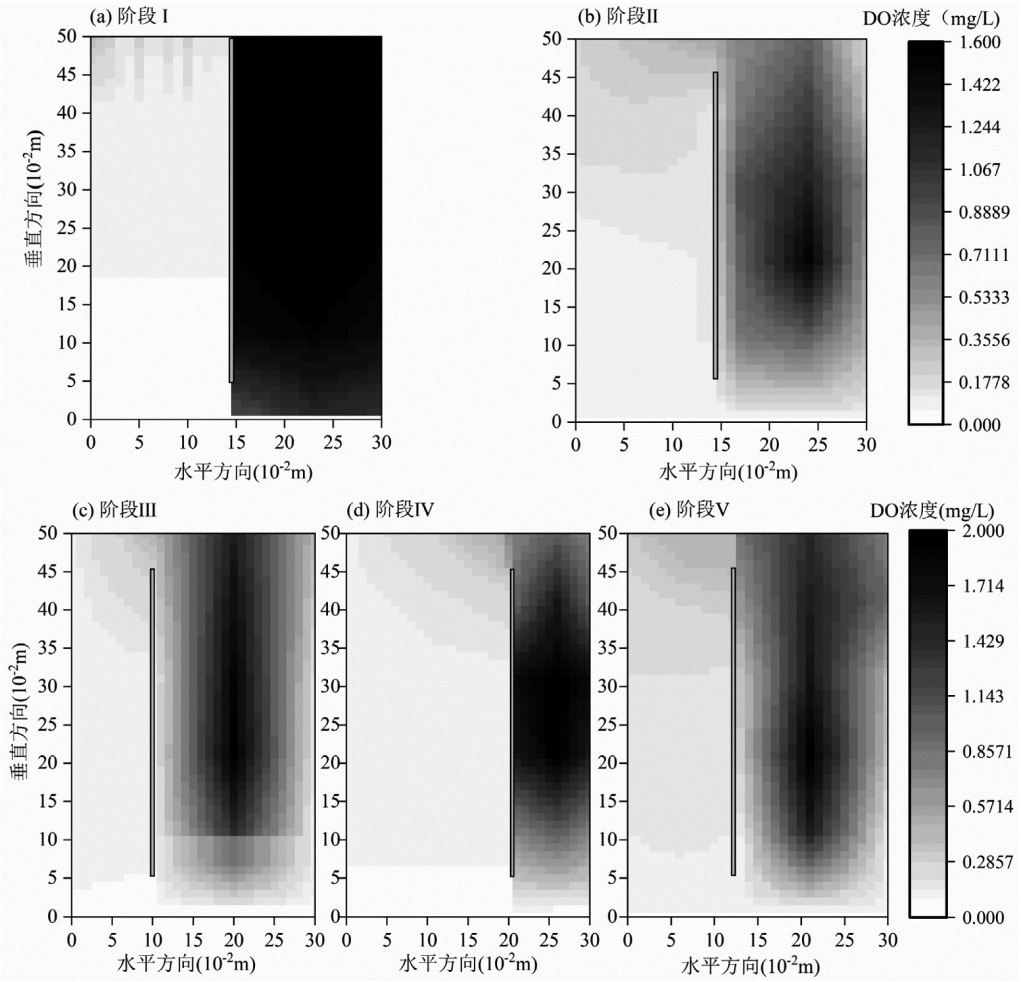


图 6 ATIR 不同阶段 DO 浓度分布

Fig.6 The distribution of DO concentration of the ATIRat different phases

(2) SND 率:下降区和上升区的 DO 浓度梯度可产生不同的氧化还原条件,为硝化细菌和反硝化细菌协同作用提供环境条件,有利于 SND 的发生[25].根据 DO 浓度梯度的范围,将不同阶段从 ATIR 中取出的活性污泥在 DO 浓度为 0.1,0.5,1.0,1.5 和 2.0mg/L 下进行试验.如图 7(a)所示,当 DO 浓度为 0.5mg/L 时,阶段 II~V 的 SND 率均取得最大值.

结合 DO 浓度分布(图 6)和不同 DO 浓度下的 SND 率(图 7(a)),通过公式(2)计算出阶段 II~V 上升区的平均 SND 率,分别为(28.48±1.23)%、(19.64±1.97)% 、 (16.01±1.63)% 和 (26.77±2.36)%. 同阶段 I((3.84±0.47)%)相比,横向内循环模式的 SND 率显著提升.相关性分析发现阶段 II~V 中平均 SND 率与低 DO 区域的比例呈显著正相关(r=0.959,P<0.01).值得注意的是,在 A_d/A_r 为 1:1.5 时,SND 率增加的同时还伴随着 SNUR 显著降低,SNUR/SAUR<1,这一

现象说明 ATIR 脱氮途径在 A_d/A_r 为 1:1.5 时趋向于同步部分硝化反硝化(SPND)[26-27].此外,以往气升式反应器多采用高径比[21],适用于小型工业废水处理.而 ATIR 以现有大型城市污水处理厂廊道式结构改造为出发点,利用原有曝气系统的条件下,取消内回流系统.并且利用进水动能与曝气动能在生物池中形成一种绕隔墙螺旋推进式流态,改变生物池流场,将脱氮途径趋向于SPND,进一步减少脱氮系统曝气需求,在城市污水处理提质增效上极具潜力.

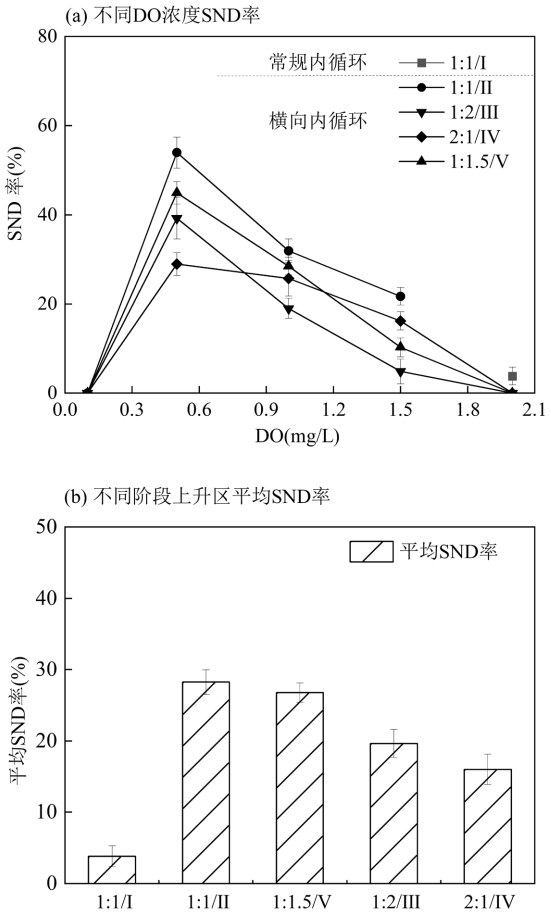


图 7　不同阶段不同 DO 浓度下的 SND 效率以及不同阶段好氧区的平均 SND 效率

Fig.7　The changes in SND efficiencies under different DO concentrations in various phasesandaverage SND efficiencies in the aerobic zone in different phases

2.2　微生物群落结构

图 8 为 ATIR 各阶段活性污泥微生物群落结构的变化情况.由图 8(a)可知,活性污泥微生物群落在常规内循环(阶段 I)的优势门为 Proteobacteria (43.88%), 次优势门为 Bacteroidota(20.53%) 和 Planctomycetot(10.10%),这与大多数污水处理厂的研究结果一致[28].而在横向内循环(阶段 II~V),微生物群落在门水平上主要由 Bacteroidota(27.43%~40.87%) 、 Proteobacteria(24.85%~31.93%) 和 Chloroflexi (13.65%~21.40%)组成.

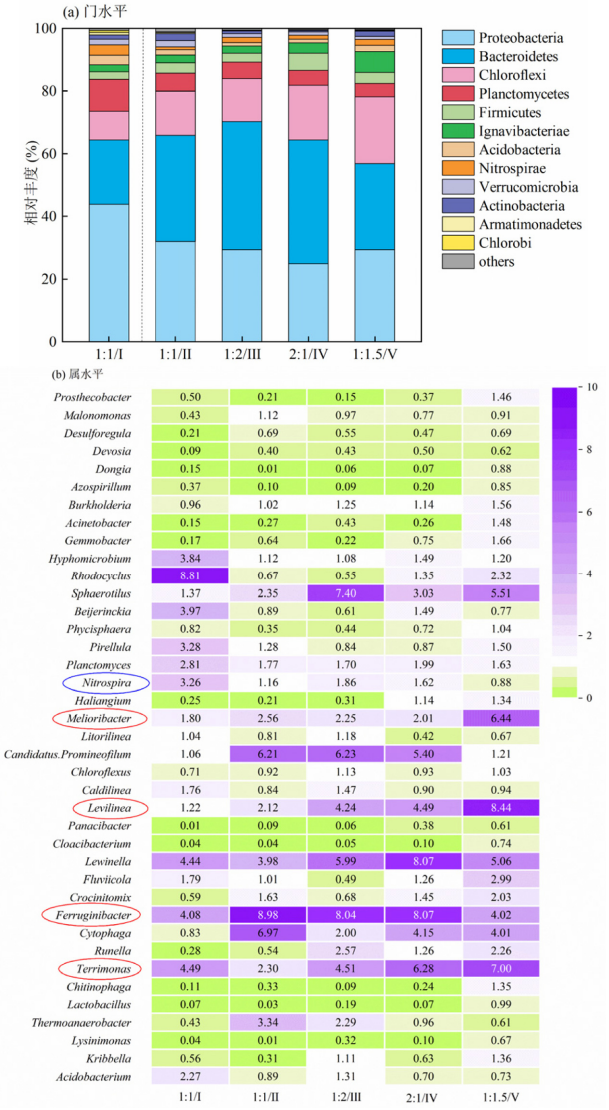


图 8　微生物菌落相对丰度

Fig.8　Relative abundance of microbial community

由图 8(b)可知,具有反硝化功能的属在阶段 II 和 V 的丰度分别达到 32.38%和 29.80%,明显高于阶段 I(17.69%),好氧反硝化菌(如 *Simplicispira* 和 *Denitratisoma*)在阶段 II~V 的占比为 1.12%~3.31%,明显高于阶段 I (0.45%).与传统的 A/O 工艺相比,ATIR 的高 R_I 在反应器内形成了显著的 DO 梯度并产生微 DO 区域,同时促进了混合液从上升区向下降区的快速转移,这种环境条件的变化显著改变了微生物群落结构:具有还原亚硝酸盐能力的

Melioribacter(1.80%→6.44%)和 *Levilinea*(1.22%→8.44%)呈现显著增殖,并且这两种菌在阶段Ⅴ均取得了最大丰度 6.44%和 8.44%,均表现出对 NO_2^--N 的强竞争优势.值得注意的是,这种微环境和快速转移可以有效的抑制 NOB,其中 *Nitrospira* (NOB)在阶段 II~V 的丰度(0.88%~1.86%)显著低于阶段Ⅰ(3.26%),并在阶段Ⅴ达到最低值 0.88%.微生物群落结构的这些变化促使 ATIR 脱氮途径在 A_d/A_r 为 1.5 向同步短程硝化-反硝化方向转变,提升了系统的脱氮性能(70.97 ± 3.27)%→(80.22 ± 4.18)%.

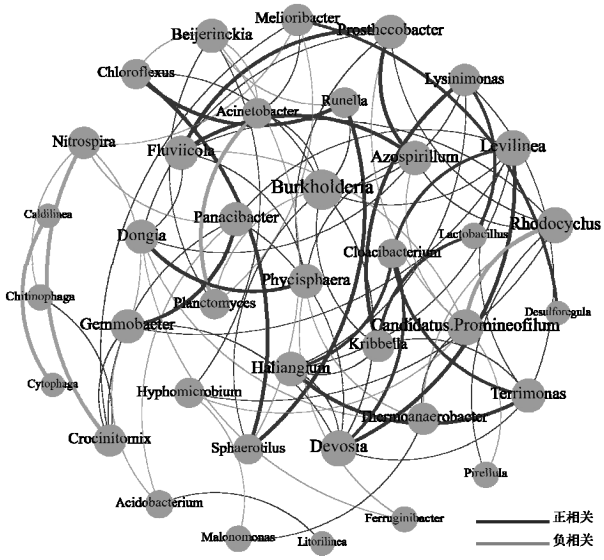


图 9 微生物属水平前 40 的共生网络

Fig.9 Co-occurrence networkbased on the top 40bacterial genera

为进一步揭示 ATIR 中微生物菌落的相互关系,构建了优势菌属(相对丰度前 40)的共生网络.在共生网络中,不同节点的颜色和大小分布表示不同的门类和功能的强弱,用节点之间的连线表示菌属之间的相关性,其连线的粗细表示相关性的强弱.如图 9 所示,在共生网络中一共得到 39 个节点和 113 个连线,其中正相关占比 67.26%,负相关占比 32.74%,这表明具有不同功能的细菌在 ATIR 群落代谢中存在显著的协同作用.其中,好氧反硝化细菌 *Burkholderia* 分别与亚硝酸盐还原菌 *Levilinea* 呈显著正相关(r=0.979,P<0.05),具有协同关系.同样,*Panacibacter* 分别与 *Levilinea*(r=0.904,P<0.05)和亚硝酸盐还原菌 *Gemmobacter*(r=0.940,P<0.05)呈显著正相关.相反,亚硝酸盐氧化菌 *Nitrospira* 与 *Gemmobacter*(r=−0.900,P<0.05)呈显著负相关,具有拮抗作用.虽然 *Burkholderia* 与 *Nitrospira* 之间不存在直接的显著负相关(r=−0.634,P=0.25),但可以推断可能存在间接的负相关.这说明在 ATIR 系统中,NOB 增殖会因为其他微生物的拮抗作用而受到影响.特别是在 A_d/A_r 为 1.5 时,SNUR/SAUR<1,脱氮途径趋向于 SPND.

3 结论

3.1 横向内循环模式比常规内循环模式表现出更优的脱氮效果.当 A_d/A_r 为 1.5 时反应器的运行效果最佳,出水 TN 浓度为(8.12 ± 1.21) mg/L ,TN 去除率为(80.22 ± 4.18)%.

3.2 在横向内循环模式下,ATIR 利用曝气动能实现高内循环比(52~176),促进了 NO_2^--N 和 NO_3^--N 快速从上升区(好氧环境)转移到下降区(缺氧环境),在一定程度上削弱了 NO_2^--N 的氧化.特别是在 A_d/A_r 为 1.5 时,SNUR/SAUR 取得了最小值 0.95.

3.3 ATIR 在 A_d/A_r 为 1.5 时, SND 率增加到(26.77 ± 2.36)%,远高于常规内循环下的(3.84 ± 0.47)%.并且在此 A_d/A_r 条件下 NOB(3.26%→0.88%)丰度显著降低.可推断出,A_d/A_r 为 1.5 时的脱氮途径趋向于 SPND.

参考文献:

[1] Baeza J A, Gabriel D, Lafuente J. Effect of internal recycle on the nitrogen removal efficiency of an anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O) wastewater treatment plant (WWTP) [J]. Process Biochemistry, 2004, 39(11):1615-1624.

[2] Foladori P, Vaccari M, Vitali F. Energy audit in small wastewater treatment plants: methodology, energy consumption indicators, and lessons learned [J]. Water Science and Technology, 2015,72(6): 1007-1015.

[3] Drandev S, Penev K I, Karamanev D. Study of the hydrodynamics and mass transfer in a rectangular air-lift bioreactor [J]. Chemical Engineering Science, 2016,146:180-188.

[4] Šimčík M, Mota A, Ruzicka M, et al.CFD simulation and experimental measurement of gas holdup and liquid interstitial velocity in internal loop airlift reactor [J]. Chemical Engineering Science, 2011,66(14): 3268-3279.

[5] Wadaugsorn K, Limtrakul S, Vatanatham T, et al. Hydrodynamic behaviors and mixing characteristics in an internal loop airlift reactor based on CFD simulation [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016,113:125-139.

[6] Yu L, Liu R, Dai B, et al. Enhancing simultaneous nitrification and denitrification (SND) and repulsing nitrite-loop in an energy-efficient

bioreactor with airlift transverse internal-loop along cross section [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024,68:106496-106496.

[7] Li L, Xu X, Wang W, et al. Hydrodynamics and mass transfer of concentric-tube internal loop airlift reactors: A review [J]. Bioresource technology, 2022,359:127451-12751.

[8] Chen L, Bai Z. CFD simulation of the hydrodynamics in an industrial scale cyclohexane oxidation airlift loop reactor [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2017,119:33-46.

[9] Duan H, Wang Q, Erler D V, et al. Effects of free nitrous acid treatment conditions on the nitrite pathway performance in mainstream wastewater treatment [J]. Science of Total Environment, 2018,644: 360-370.

[10] 国家环境保护总局.水和废水监测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:252-354.
State Environmental Protection Administration. Monitoring and analysis methods of water and wastewater [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:252-354.

[11] Zhang W, Hu Y, Liang D, et al. Nitrogen removal performance and mechanism of low-carbon sewage by airlift internal loop sequencing batch bio-microcapsule reactor [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023,53.

[12] Yu Z, Tang J, Liao H, et al. The distinctive microbial community improves composting efficiency in a full-scale hyperthermophilic composting plant [J]. Bioresource Technology, 2018,265:146-154.

[13] Yu L, Li R, Mo P, et al. Stable partial nitrification at low temperature via selective inactivation of enzymes by intermittent thermal treatment of thickened sludge [J]. Chemical Engineering Journal, 2021,418: 129471.

[14] Yu L, Zhang Q, Li R, et al. Extracellular polymeric substances trigger microbial immigration from partial denitrification (PD) to anammox biofilms in a long-term operated PD/anammox process in low-strength wastewater [J]. Water Research, 2023,229:119382.

[15] 刘烨星,于莉芳,陈倩伊,等.曝气动力双侧横向内循环反应器数值模拟和脱氮机理 [J]. 中国环境科学, 2024,44(10):5490-5498.
Liu Y X, Yu L F, Chen Q Y, et al. Numerical simulation and nitrogen removal mechanism of a novel airlift dual transverse internal loop reactor [J]. China Environmental Science, 2024,44(10):5490-5498.

[16] Benthum W A J, Hoogen J H A, Lans R G J M, et al. The biofilm airlift suspension extension reactor. Part I: Design and two-phase hydrodynamics [J]. Chemical Engineering Science, 1999,54(12): 1909-1924.

[17] Chisti M Y, Halard B, Moo-Young M. Liquid circulation in airlift reactors [J]. Chemical Engineering Science, 1988,43(3):451-457.

[18] Xu X, Ma B, Lu W, et al. Effective nitrogen removal in a granule-based partial-denitrification/anammox reactor treating low C/N sewage [J]. Bioresource Technology, 2020,297:122467.

[19] GB 18918-2002 城镇污水处理厂污染物排放标准 [S].
GB 18918-2002 Discharge standard of pollutants for municipal wastewater treatment plant [S].

[20] GB 50014-2021 室外排水设计标准 [S].
GB 50014-2021 Standard for design of outdoor wastewater engineering [S].

[21] Han Y, Lu X, Liu Y, et al. Achieving superior nitrogen removal in an air-lifting internal circulating reactor for municipal wastewater treatment: Performance, kinetic analysis, and microbial pathways [J]. Bioresource Technology, 2023,371:128599.

[22] Tan C, Ma F, Li A, et al. Evaluating the effect of dissolved oxygen on simultaneous nitrification and denitrification in polyurethane foam contact oxidation reactors [J]. Water Environment Research, 2013, 85(3):195-202.

[23] 张 凯,李 军,梁东博,等.IFAS 工艺短程硝化过程中功能菌的动力学特性 [J]. 中国环境科学, 2020,40(4):1507-14.
Zhang K, Li J, Liang D B, et al. Kinetic characteristics of functional bacteria in IFAS process for partial nitrification [J]. China Environmental Science, 2020,40(4):1507-1514.

[24] Pan J, Yuan F, Zhang Y, et al. Nitrogen removal in subsurface wastewater infiltration systems with and without intermittent aeration [J]. Ecological Engineering, 2016,94:471-477.

[25] Collivignarelli C, Bertanza G. Simultaneous nitrification-denitrification processes in activated sludge plants: Performance and applicability [J]. Water Science and Technology, 1999,40(4/5):187-194.

[26] Huang W, She Z, Gao M, et al. Effect of anaerobic/aerobic duration on nitrogen removal and microbial community in a simultaneous partial nitrification and denitrification system under low salinity [J]. Science of the Total Environment, 2019,651(Pt 1):859-870.

[27] Iannacone F, Di Capua F, Granata F, et al. Shortcut nitrification-denitrification and biological phosphorus removal in acetate- and ethanol-fed moving bed biofilm reactors under microaerobic/aerobic conditions [J]. Bioresource Technology, 2021,330:124958.

[28] Gao P, Xu W, Sontag P, et al. Correlating microbial community compositions with environmental factors in activated sludge from four full-scale municipal wastewater treatment plants in Shanghai, China [J]. Applied microbiology and biotechnology, 2016,100(10):4663-4673.

作者简介：廖　驰(1999-),男,四川德阳人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要从事污/废水生物处理研究.发表论文 1 篇.cxliaochi@163.com.