

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.012

# 两级同步硝化反硝化工艺处理低碳氮比壤中流

茹凌宇, 刘恒毅, 李 蕾, 叶文杰, 胡雅迪, 袁荣焕, 彭绪亚  
(重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘 要:** 针对山地丘陵地区简易填埋场壤中流总氮(TN)浓度高且碳氮比(C/N)低、给周边环境带来持续污染的问题,采用两级同步硝化反硝化(SND)反应器处理模拟壤中流,并探索了不同C/N(2.3、2.0、1.7、1.5和1.3)下反应器的脱氮性能。结果表明,反应器能在25 d内迅速启动,并在1.5~4.0的C/N下稳定运行,其间反应器外环的总氮容积负荷(NLR)为0.17~0.56 kg/(m<sup>3</sup>·d),内、外环可通过功能互补应对冲击负荷。C/N在1.5及以上时,反应器的总氮去除率稳定在(85.69±2.22)%。C/N为2.0和1.7时,反应器的同步硝化反硝化率(RSND)分别为71.83%和51.75%,表明同步硝化反硝化在壤中流脱氮中具有重要贡献。此外,好氧反硝化和全程反硝化可能也在脱氮过程中占重要地位。

**关键词:** 同步硝化反硝化; 低碳氮比; 壤中流; 山地丘陵地区

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0084-09

## Two-stage Simultaneous Nitrification and Denitrification Process for Treatment of Low Carbon to Nitrogen Ratio Interflow

RU Ling-yu, LIU Heng-yi, LI Lei, YE Wen-jie, HU Ya-di, YUAN Rong-huan,  
PENG Xu-ya

(Key Laboratory of the Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment <Ministry of Education>,  
Chongqing University, Chongqing 400045, China)

**Abstract:** Simple landfill interflow with high total nitrogen (TN) and low carbon to nitrogen (C/N) ratio in mountainous and hilly areas can cause continuous pollution to the surrounding environment. To solve the problem, a two-stage simultaneous nitrification and denitrification (SND) reactor was employed to treat simulated interflow, and the nitrogen removal performance of the reactor under different C/N ratios (2.3, 2.0, 1.7, 1.5 and 1.3) was investigated. The reactor was rapidly started within 25 days and remained stable at C/N ratio of 1.5–4.0. During this period, the nitrogen loading rate (NLR) of the reactor was 0.17–0.56 kg/(m<sup>3</sup>·d), and the inner and outer rings were capable to withstand the shock load through functional complementation. When C/N ratios were greater than or equal to 1.5, the removal rates of total nitrogen stabilized at (85.69±2.22)%. When C/N ratios were 2.0 and 1.7, the simultaneous nitrification and denitrification rates (RSND) of the reactor were 71.83% and 51.75%, respectively, indicating that simultaneous nitrification and denitrification had an important contribution to nitrogen removal from the interflow. In addition, aerobic denitrification and complete denitrification might also play important roles in the process of nitrogen removal.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100503)

通信作者: 彭绪亚 E-mail: xuyapengcq@126.com

**Key words:** simultaneous nitrification and denitrification; low carbon to nitrogen ratio; interflow; mountainous and hilly areas

随着我国“乡村振兴”战略的实施,加强推进农村污水治理受到国家重视。在山地丘陵地区,除常见的农村生活污水外,还存在一类典型的低碳氮比(C/N)污水,即简易填埋场壤中流<sup>[1]</sup>。山地丘陵地区表土较薄(平均厚度约为0.6 m),表土下方为渗透系数急剧下降的母岩,因此极易形成壤中流<sup>[2]</sup>。在简易填埋场附近,由于缺少防渗、防洪等措施,渗入堆体的雨水会被垃圾污染<sup>[1]</sup>,持续下渗形成壤中流后又会沿着土壤坡度将填埋场点源污染输送至周边地表、地下水中,威胁村镇居民饮水安全、加重水体富营养化风险<sup>[1]</sup>。鉴于此,开展简易填埋场壤中流修复研究具有必要性。

氮是填埋场壤中流中最主要的污染物之一。目前在污水脱氮处理中,同步硝化反硝化(SND)技术相对成熟,反应器占地面积小,适宜处理低C/N废水,且反硝化过程产生的碱度可补偿硝化过程消耗的碱度<sup>[3-4]</sup>。因此,基于此技术的工艺对处理村镇简易填埋场壤中流的适用性较强。氧化沟<sup>[5]</sup>、序批式活性污泥法反应器(SBR)<sup>[6]</sup>等活性污泥工艺及序批式生物膜反应器(SBBR)<sup>[7]</sup>、移动床生物膜反应器(MBBR)<sup>[8]</sup>、膜曝气生物反应器(MABR)<sup>[3]</sup>等生物膜工艺都可通过对曝气量的精准控制,在反应器内创造不同的溶解氧(DO)浓度梯度,从而实现SND。但相比之下,氧化沟和MABR具备占地省、能耗低、投资少及运维管理简单等优势,在村镇地区更具适用性<sup>[9-10]</sup>。而对于壤中流这类C/N低、水质季节波动极大的废水,组合处理将会成为最优解,但目前将二者结合构建两级同步硝化反硝化脱氮工艺的研究尚未见报道。

在此背景下,笔者向自制的氧化沟和MABR结合的两级同步硝化反硝化反应器中引入模拟壤中流,研究不同进水C/N下反应器的脱氮性能,旨在探索两级同步硝化反硝化工艺用于村镇简易填埋场壤中流修复的可行性,以期为壤中流修复小型设备的开发奠定基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验装置与运行

试验在自主设计两级同步硝化反硝化反应

器内进行,反应器如图1所示。

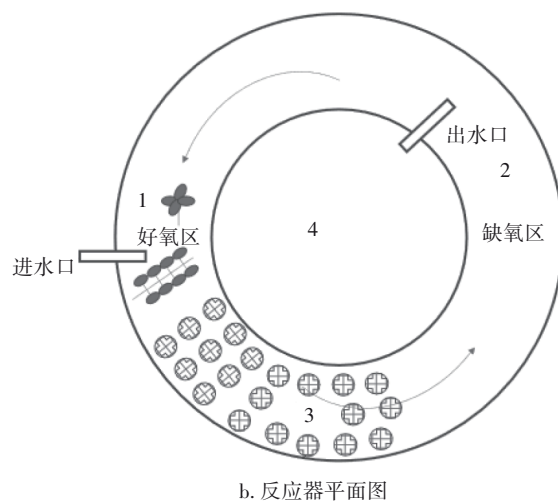
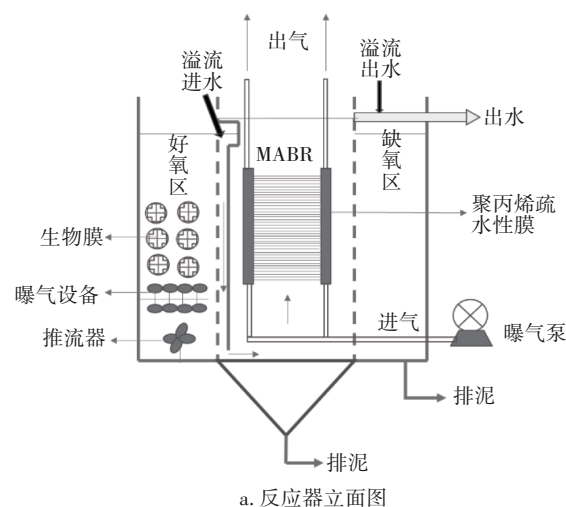


图1 两级同步硝化反硝化反应器示意

Fig.1 Schematic diagram of two-stage simultaneous nitrification and denitrification reactor

装置由内环反应单元和外环反应单元两个部分组成,内、外环直径分别为30和50 cm,反应器高度为50 cm,有效容积为60 L(内、外环各30 L)。如图1(b)所示,反应器自左侧进水,进水口下方设有定点曝气和推流装置,以使污水在外环做环流运动并出现氧浓度梯度。此外,为便于硝化菌附着生长,在曝气区还放置了孔径为60 mm的聚丙烯纤维球体作为填料。填料充填面积约占好氧区域的1/3,两侧隔以带孔铁网使其位置固定。内环设置MABR膜,膜组件材质为聚丙烯复合材料,微孔直径为

0.02~0.2  $\mu\text{m}$ ,在反应器中由圆形控制架支撑并予以固定,采用曝气泵对膜组件进行曝气。水由蠕动泵进入外环,环流后经外环出水口处溢流并送至内环底端,在内环自下而上漫流,最终产水由反应器上端的溢流口排出。

本试验共分为两个阶段运行,第一阶段是反应器的启动阶段(包括外环挂膜、内环挂膜和运行参数的调整)。其中,第1~17天是外环挂膜阶段,向外环加入6 L活性污泥以及24 L模拟废水,采用间歇式进水的方式,对外环的泥水混合物进行闷曝,且每日换两次水。第18~25天是内环挂膜阶段,内、外环连续进出水,运行至内环MABR膜上生物膜初步成型。第26~45天将进水C/N降至污水一般生化处理效果良好的下限值4.0,经过短期优化试验,发现在水力停留时间(HRT)为24 h(内、外环各12 h)、曝气速率为0.8 L/min时,反应器去除污染物的效果最佳。随后在此条件下开展第二阶段的正式试验,研究不同C/N(2.3、2.0、1.7、1.5和1.3)下反应器性能的

变化。

## 1.2 接种污泥

本试验接种的活性污泥取自重庆市沙坪坝区某污水处理厂,污泥呈黄褐色,沉降性能较好,混合液悬浮固体(MLSS)为8 747.33 mg/L。污泥经沉淀浓缩后当日取回,闷曝48 h,用作接种污泥。

## 1.3 进水水质

本试验研究对象为山地丘陵地区简易填埋场壤中流,根据Liu等<sup>[1]</sup>的调研,四川某简易填埋场总氮(TN)和化学需氧量(COD)都呈季节性变化,其浓度分别为20.61~290.25 mg/L和144.23~360.57 mg/L。其他水质指标(如难降解有机物等)与填埋场老龄渗滤液较为接近,故本研究采用老龄垃圾渗滤液(COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN分别为958.4~2 144.7、518.3~1 446.9、1 203.6~1 830.6 mg/L,C/N为0.6~1.9)掺混人工废水作为进水,探索不同C/N(2.3、2.0、1.7、1.5和1.3)下反应器的脱氮性能。不同运行时期的进水配制方法及水质指标见表1。

表1 不同运行阶段的操作条件

Tab.1 Operation conditions at different stages

运行阶段		进水配制方法	t/d	COD/(mg/L)	TN/(mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N/(mg/L)	C/N
启动阶段	外环挂膜	1% 渗滤液+99%(570 mg/L 葡萄糖+333 mg/L 硝酸钾)	1~17	363.4	64.0	14.5	5.9
	内环挂膜	1% 渗滤液+99%(570 mg/L 葡萄糖+169 mg/L 硝酸钾)	18~25	363.4	41.5	14.5	9.1
	参数调整	2% 渗滤液+98%(550 mg/L 葡萄糖+406 mg/L 硝酸钾)	26~45	366.3	91.6	28.9	4.0
运行阶段	阶段Ⅰ	2% 渗滤液+98%(550 mg/L 葡萄糖+908 mg/L 硝酸钾)	46~53	366.3	159.3	28.9	2.3
	阶段Ⅱ <sup>a</sup>	2% 渗滤液+98%(550 mg/L 葡萄糖+908 mg/L 硝酸钾)	54~72	366.3	159.3	28.9	2.3
	阶段Ⅲ	3% 渗滤液+97%(500 mg/L 葡萄糖+919 mg/L 硝酸钾)	73~89	364.2	182.1	43.4	2.0
	阶段Ⅳ	5% 渗滤液+95%(450 mg/L 葡萄糖+931 mg/L 硝酸钾)	90~101	363.7	214.0	72.3	1.7
	阶段Ⅴ	10% 渗滤液+90%(280 mg/L 葡萄糖+487 mg/L 硝酸钾)	102~131	365.6	243.7	144.7	1.5
	阶段Ⅵ	10% 渗滤液+90%(280 mg/L 葡萄糖+788 mg/L 硝酸钾)	132~162	365.6	281.2	144.7	1.3

注： ①由于运行时间较长,渗滤液分多批采集,每批次水质有一定差异,且在实验室使用的过程中,同一批次采集的渗滤液水质也有一定变化。配水时仅以采回时的渗滤液水质为依据进行配比计算,得出上述每个阶段的理论运行条件。考虑到渗滤液水质变化的情况,每天对实际进水指标进行检测。②a表示自此阶段开始,向内环补充碳源以保证其进水C/N为2.0。

为保证本研究开发的工艺及反应器能够处理最不利条件下的壤中流,首先将试验用水的COD确定为壤中流最高浓度360 mg/L。TN方面,挂膜阶段的主要任务是让微生物良好生长,因此C/N未进行严格的控制;但参数调整阶段则采用了一般生化处理效果良好的下限值4.0,此时对应的TN为91.6 mg/L。正式运行后,鉴于赵远哲等<sup>[11]</sup>曾在处理C/N为2.3的农村污水时获得了良好的效果,故阶段Ⅰ将C/N降至2.3运行,此时对应的TN为159.3 mg/L。

随后在进一步探索反应器能够承受的氮负荷的过程中,考虑到李龙翔等<sup>[12]</sup>的研究,为了让微生物更好地适应污染物浓度变化,TN负荷的增加梯度不宜过高。因此自阶段Ⅲ开始,每阶段以20~35 mg/L的幅度逐步提高TN浓度,对应的TN分别为182.1、214.0、243.7和281.2 mg/L,相应的C/N则为2.0、1.7、1.5和1.3。

## 1.4 水质指标分析与计算方法

每日取内环及外环进出水进行水质分析。COD

采用重铬酸钾法测定;总氮、氨氮、硝态氮和亚硝态氮分别采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法、纳氏试剂分光光度法、紫外分光光度法和N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定;有机氮采用差减法(总氮浓度减去其余各类氮的浓度)测定;DO采用便携式溶解氧仪实时测定。总氮容积负荷[NLR,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ]、总氮去除负荷[NRR,  $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ]、总氮去除率(NRE, %)和同步硝化反硝化率(RSND, %)参照文献[13]计算得到。

$$\text{NLR} = \frac{\text{TN}_{\text{inf}}}{1000 \times \text{HRT}} \quad (1)$$

$$\text{NRR} = \frac{\text{TN}_{\text{inf}} - \text{TN}_{\text{eff}}}{1000 \times \text{HRT}} \quad (2)$$

$$\text{NRE} = \frac{100 \times (\text{TN}_{\text{inf}} - \text{TN}_{\text{eff}})}{\text{TN}_{\text{inf}}} \quad (3)$$

$$\text{RSND} = \left( 1 - \frac{c_{\text{m,eff}} + c_{\text{n,eff}}}{c_{\text{x,inf}} - c_{\text{x,eff}}} \right) \times 100\% \quad (4)$$

式中:  $\text{TN}_{\text{inf}}$  和  $\text{TN}_{\text{eff}}$  分别为总氮的进、出水浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $c_{\text{m,eff}}$  和  $c_{\text{n,eff}}$  分别为  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的出水浓度,  $\text{mg/L}$ ;  $c_{\text{x,inf}}$  和  $c_{\text{x,eff}}$  分别为  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的进、出水浓度,  $\text{mg/L}$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 反应器的运行性能分析

挂膜阶段反应器间歇运行,而挂膜成功后,反应器自第26天起开始连续进出水,C/N调整至一般生化处理效果良好的下限值4.0,经过20 d的参数摸索和连续运行后,反应器的COD、氨氮和总氮去除率逐步上升至 $(79.92 \pm 2.47)\%$ 、 $(93.79 \pm 3.16)\%$ 和 $(71.87 \pm 2.12)\%$ 。

反应器中外环单元和内环单元的COD去除效果如图2所示。

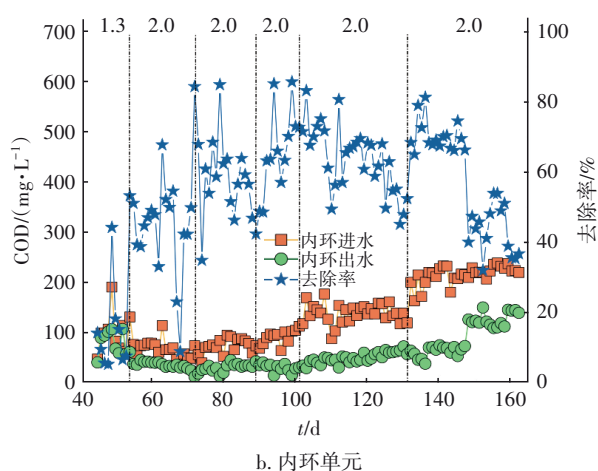
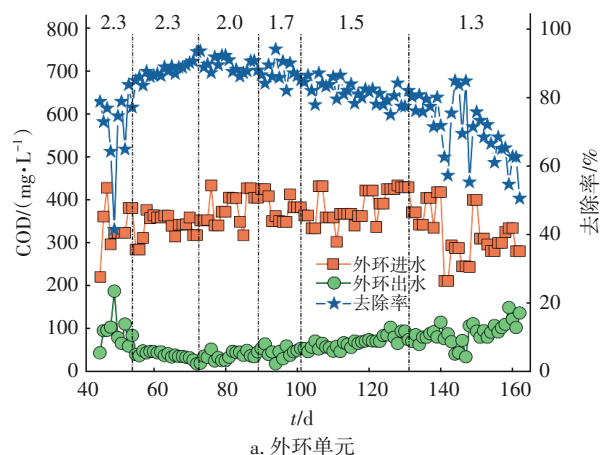


图2 反应器对COD的去除效果

Fig.2 COD removal effects of the reactor

反应器中外环单元和内环单元的TN去除效果如图3所示。

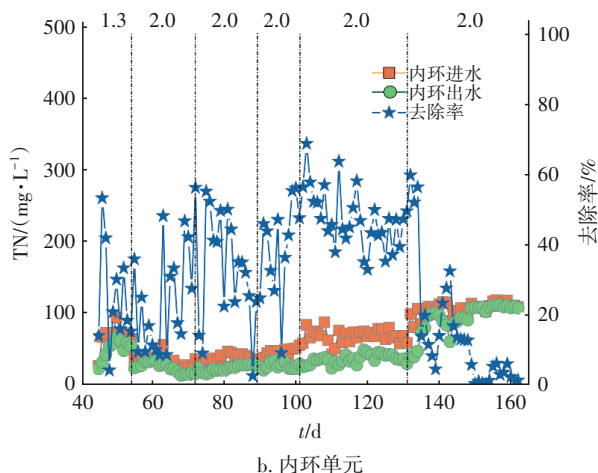
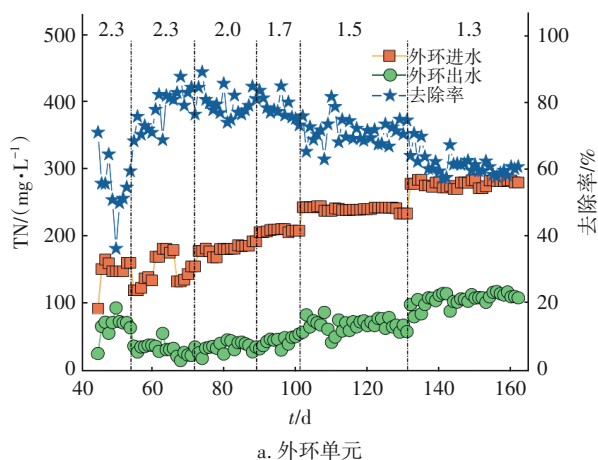
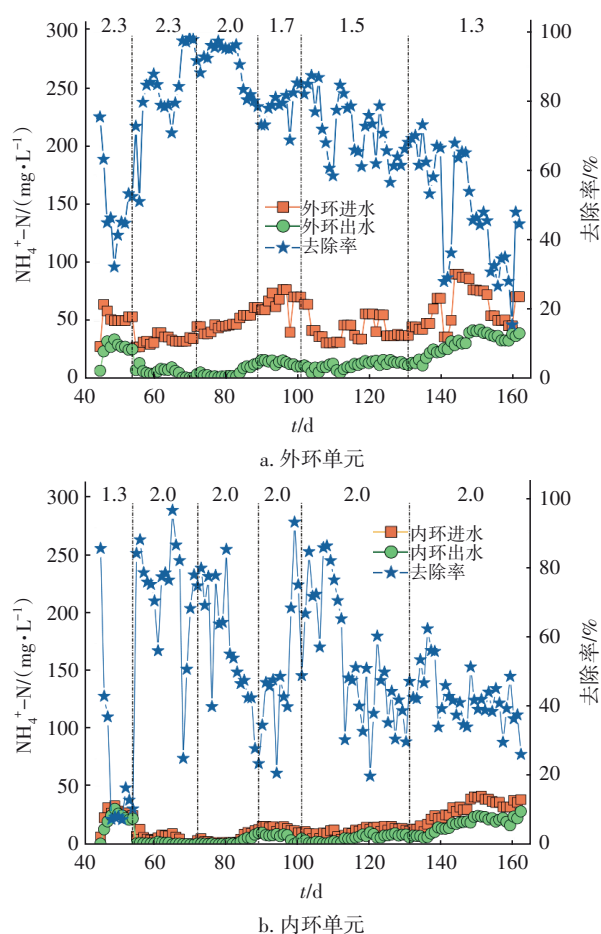


图3 反应器对TN的去除效果

Fig.3 TN removal effects of the reactor

反应器中外环单元和内环单元的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 去除效果如图4所示。



图4 反应器对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果Fig.4  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  removal effects of the reactor

吕玮等<sup>[14]</sup>以人工配制的低氨氮废水为进水,考察厌氧序批式反应器(ASBR)与生物滤池两种反应器在常温、低基质浓度条件下的启动特性,发现两个反应器分别需要135 d和114 d的启动时间。相比之下,本反应器启动快速,表明其运维管理方便。

由图2~图4可知,进入正式试验阶段后,反应器内C/N在阶段Ⅰ降低至2.3,初期外环各类污染物去除率出现不同程度的下降,但随着运行时间的延长,反应器性能得以自我恢复,表明此反应单元具有耐冲击负荷的性能。吉芳英等<sup>[15]</sup>构建环流式活性污泥/生物膜组合工艺处理城市污水,也指出反应器采用的环流方式可以缓解脱氮过程对进水水质的依赖,大大提高反应器的抗冲击负荷能力;刘玮<sup>[16]</sup>构建了氧化沟膜生物反应器,在进水水质差距较大的情况下,反应器的COD和TN去除率分别保持在95%和90%以上。本反应器的外环与上述环流式活性污泥/生物膜组合工艺及氧化沟工艺具有

类似的水流特性,这可能是其具有良好的抗冲击负荷能力的原因。相比之下,即使经过长达10 d的运行,内环COD、氨氮和总氮的去除性能依然没能恢复,推测这是由于内环进水的C/N较低(1.3),使微生物的活性受到抑制。

鉴于此,为保证反应器的脱氮效果,在阶段Ⅱ开始向内环补充少量碳源以维持其进水C/N为2.0。由图2(b)、3(b)和4(b)可知,内环的COD去除率随即显著提高,氨氮和总氮去除率也在一段时间后明显上升。反硝化菌大多为异养微生物<sup>[17]</sup>,在补充了碳源后,内环微生物具有充足的碳源,脱氮性能得以改善是意料之中的。此时,整个反应器的COD、总氮和氨氮去除率分别达到了 $(91.62 \pm 2.01)\%$ 、 $(88.34 \pm 1.37)\%$ 和 $(98.37 \pm 0.85)\%$ ,且出水水质保持稳定。赵远哲等<sup>[11]</sup>采用芦竹、活性炭混合的新型填料缺氧/好氧生物滤池(A/O-BF)处理C/N为2.3的农村污水,TN去除率最高可达80%以上。相比而言,本装置在C/N相同的条件下,脱氮性能更优。

阶段Ⅲ进水C/N进一步降至2.0,外环的COD和总氮去除率与前两个阶段相当,分别为 $(88.51 \pm 1.71)\%$ 和 $(79.42 \pm 2.84)\%$ 。内环COD去除率与阶段Ⅱ一致,维持在50%左右的水平;内环的总氮去除率从阶段Ⅱ的 $(25.29 \pm 10.99)\%$ 增至 $(38.43 \pm 12.89)\%$ ;而内环的氨氮去除率从 $(78.05 \pm 9.02)\%$ 降至 $(48.32 \pm 4.67)\%$ ,这可能是因为外环的氨氮去除率有所提高,压缩了内环单元的氨氮去除能力。上述数据表明在水质波动较大的情况下,内环反应单元中的微生物依然能逐步适应进水条件,同样获得了较好的脱氮效果。张燕伟等<sup>[3]</sup>采用MABR反应器处理市政污水,在进水C/N为6.3~8.0、HRT为12 h时,经过45 d的连续运行后反应器运行稳定,脱氮率稳定在90%以上。相比之下,本研究内环反应器的脱氮效果较差,一方面可能是由于C/N低且驯化时间较短;另一方面MABR膜填充量少也可能是原因之一。董卓俊<sup>[18]</sup>采用MABR处理氨氮废水时,MABR膜的填充量达 $0.15 \text{ m}^2/\text{L}$ ,而本反应器的膜填充量仅为 $0.0067 \text{ m}^2/\text{L}$ ,膜填充量少会造成微生物浓度低,影响污水处理效果。再者,康晓峰等<sup>[19]</sup>在综述MABR反应器的研究进展时指出,该反应器最早用于高浓度废水处理,在进水氨氮浓度较低时,难以实现稳定的短程硝化。本研究经过外环处理后,内环进水氨氮和总氮浓度仅分别为 $(10.02 \pm 2.65)$

和 $(38.85 \pm 4.87)$  mg/L,已处在较低浓度,这也可能是限制内环总氮去除率的原因之一。无论如何,此阶段整个反应器的总氮去除率达 $(84.83 \pm 0.38)\%$ ,COD和氨氮的去除率也分别达到了 $(90.94 \pm 1.21)\%$ 和 $(88.93 \pm 3.72)\%$ ,反应器性能良好。凌宇等<sup>[20]</sup>利用A/O-BF处理低C/N(约2.1)农村生活污水,在好氧段和缺氧段的HRT分别为9和6 h时,反应器对TN的平均去除率最高可达78%。在相似的C/N条件下,本反应器的停留时间虽然相对较长,但是总氮去除率较高。

阶段Ⅳ将C/N降至1.7,外环和内环的COD去除率都保持稳定,但是外环的总氮去除率由82.26%降至75.21%,这可能是由于外环的微生物在进水总氮增加的情况下,活性受到了一定程度的抑制。相比之下,内环的总氮去除率却由24.43%缓慢升高至38.43%,这可能是因为进水氮浓度的提高促进了内环微生物菌群的生长。最终整个反应器的污染物去除效果稳定,这表明反应器的内、外环反应单元具有协调互补的作用,对进水水质变化较大的情况具有良好的适应能力和抗冲击负荷能力。在该条件下稳定运行时,整个反应器的COD和总氮的去除率分别为 $(92.34 \pm 2.08)\%$ 和 $(87.02 \pm 1.90)\%$ 。庞维海等<sup>[21]</sup>采用周期循环式活性污泥法对C/N为1.8的废水进行处理,当排水比为50%时总氮的平均去除率可达85.6%,这与本试验反应器的脱氮效果较为接近。

阶段Ⅴ反应器的进水C/N下降至1.5,此时外环的COD仍有接近80%的稳定去除率,但总氮和氨氮的去除效果进一步下降,分别由 $(78.43 \pm 3.34)\%$ 和 $(78.79 \pm 4.78)\%$ 降至 $(70.23 \pm 2.42)\%$ 和 $(68.04 \pm 7.32)\%$ ,说明过低的C/N不利于外环脱氮,这可能是此C/N下微生物无法得到充足的碳源导致的。相比之下,C/N修正至2.0的内环反应器的总氮去除率由 $(38.43 \pm 12.89)\%$ 提高至 $(40.85 \pm 5.44)\%$ ,表明其脱氮性能得到进一步强化。但整体来看,反应器对COD、总氮和氨氮的去除率较上个阶段均降低,分别从 $(92.34 \pm 2.08)\%$ 、 $(87.02 \pm 1.90)\%$ 和 $(89.51 \pm 4.39)\%$ 降至 $(86.31 \pm 2.02)\%$ 、 $(82.46 \pm 1.41)\%$ 和 $(81.26 \pm 5.00)\%$ 。此阶段渗滤液配比高达10%,而渗滤液中存在较多污染物质,可能对敏感的硝化菌产生了抑制作用。但无论如何,此时反应器的出水COD、氨氮和总氮浓度分别在 $(55.42 \pm 6.94)$ 、

$(8.42 \pm 1.56)$ 和 $(36.73 \pm 1.99)$  mg/L,依然满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的出水浓度限值要求。

阶段Ⅵ的进水C/N下降至1.3,已相当于壤中流的极限C/N,此时外环COD、总氮和氨氮的去除效果大幅下降,分别由 $(79.62 \pm 2.30)\%$ 、 $(70.23 \pm 2.42)\%$ 和 $(68.04 \pm 7.32)\%$ 降至 $(65.74 \pm 6.74)\%$ 、 $(60.02 \pm 1.26)\%$ 和 $(37.57 \pm 9.54)\%$ ,表明硝化菌的生长代谢进一步被抑制。与此同时,内环各类污染物的去除率也显著下降,内环出水COD甚至高于外环,说明内环膜上的微生物已经死亡,微生物残体增加了出水COD。内环氨氮的去除率仍有 $(39.17 \pm 5.61)\%$ ,但由于亚硝酸盐的大量积累 $(0.93 \sim 1.32)$  mg/L对微生物产生了毒害作用,使得内环总氮的去除率仅维持在 $(2.77 \pm 2.13)\%$ 的水平,内环反应单元已经基本失去作用。鉴于反应器COD、总氮和氨氮去除率均降至60%左右,出水水质无法满足《生活垃圾填埋场污染控制标准》(GB 16889—2008)的要求,因此认定在此C/N下,反应器无法有效地去除污染物。

## 2.2 反应器脱氮性能及机理分析

图5为不同运行阶段下内、外环的平均NLR、NRR和NRE。可知对于 $C/N \geq 1.5$ 的废水,反应器具有 $(85.69 \pm 2.22)\%$ 的总氮去除率。反应器在运行过程中外环的NLR范围为 $0.17 \sim 0.56$  kg/(m<sup>3</sup>·d),而Liu等<sup>[22]</sup>利用一体化三级A/O生物膜反应器强化低C/N实际废水的脱氮处理,反应器的NLR仅 $0.08 \sim 0.11$  kg/(m<sup>3</sup>·d)。这表明本反应器具有较高的氮容负荷,因此在相同的处理需求下,本反应器能用更少的占地实现高效脱氮。NRR能表征反应器的脱氮效率,随着反应器负荷的提升,在 $C/N=1.5$ 的条件下,外环NRR达到了 $0.34$  kg/(m<sup>3</sup>·d)。管锡珺等<sup>[23]</sup>设计研发了具有不同污泥龄菌种生长环境的双曝气双泥层过滤反应器,实现了 $0.34$  kg/(m<sup>3</sup>·d)的脱氮能力,但该反应器有效容积为212 L,比本反应器大2.53倍,进一步证实本反应器能在更有限的占地下实现高效脱氮。稳定运行阶段,反应器外环NLR和NRR分别由 $0.30$  kg/(m<sup>3</sup>·d)和 $0.25$  kg/(m<sup>3</sup>·d)提高到 $0.48$  kg/(m<sup>3</sup>·d)和 $0.34$  kg/(m<sup>3</sup>·d);内环的NLR和NRR分别由 $0.06$  kg/(m<sup>3</sup>·d)和 $0.02$  kg/(m<sup>3</sup>·d)提高到 $0.14$  kg/(m<sup>3</sup>·d)和 $0.06$  kg/(m<sup>3</sup>·d)。相比之下,内环对污染物的去除效果较外环差,这可能是由于MABR工艺大多适用于高浓度废水,但本装置将其

置于第二级反应单元,进水污染物浓度较低,因此去除率不高;另外内环采用溢流的方式进水,且未设置搅拌措施,传质效果较差,不利于MABR膜和污染物充分接触,这也可能是内环去除污染物效果不理想的原因<sup>[24]</sup>,增强内环扰动有望进一步提升其处理效果。但总体而言,在反应器运行过程中,当外环去除污染物效果变差时,内环效果会随之增加,由此两级反应器的串联能够协调互补,对于变化较大的水质具有较强的适应能力,系统抗冲击负荷能力较强。

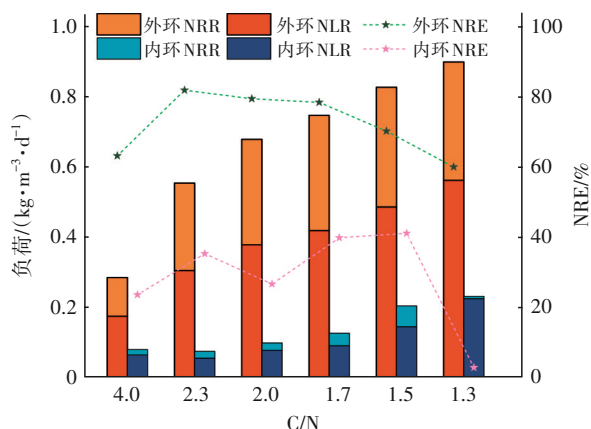


图5 内、外环总氮容积负荷、总氮去除负荷和总氮去除率的变化

Fig.5 Variation of NRR, NLR and NRE in inner and outer rings

图6为反应器内不同位置DO的变化情况,其中DO测定点位见图1(b)。可知无论在哪个C/N下,DO在各个点位的分布与预期较为一致,1、3位置浓度普遍高于2、4,而后者DO浓度处于缺氧区范围(0.2~0.5 mg/L)是外环和内环SND能够发生的关键。当C/N为2.3、2.0、1.7时,多次在点2监测到此范围的数据,这为外环的同步硝化反硝化脱氮创造了良好的条件。而由计算得知当C/N为2.0和1.7时,外环RSND分别达到了71.83%和51.75%,证实了此时SND效果良好。但当C/N为1.5时,未检测到明显的SND现象。进水C/N降低,可代谢碳源浓度下降,好氧微生物的耗氧量减少,造成反应器内部DO增加,进而抑制了同步硝化反硝化菌的活性可能是主要原因。从图6(d)也可发现,此时点2的平均DO高达2.17 mg/L,确实背离了SND发生的最佳范围。但此时外环仍有良好的脱氮效率,可能是好氧反硝化作用的结果。内环氧浓度梯度比外环

更明显,理论上会具有更好的同步硝化反硝化生态位,但计算未发现内环存在SND作用,推测其脱氮可能是通过传统的全程反硝化途径完成的。但无论如何,从DO浓度可知,随着进水C/N的改变,最佳曝气量需要不断优化,以维持内、外环适宜的氧浓度梯度和较高的RSND,这有助于在节能降耗的同时实现高效脱氮。

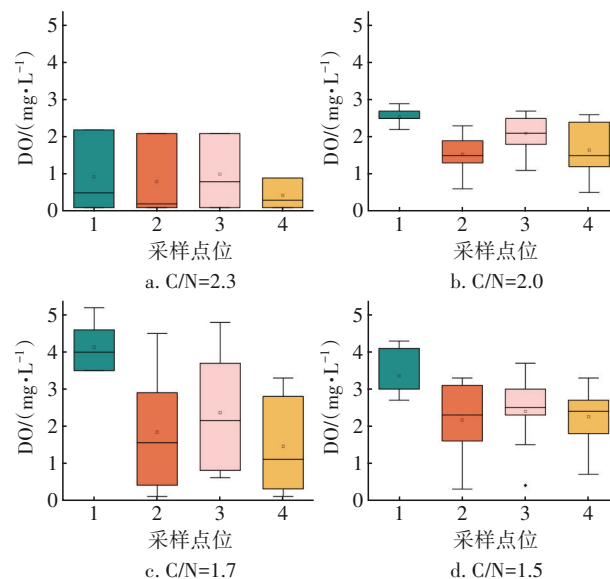


图6 反应器内不同位置DO的变化

Fig.6 Variation of DO at different sampling positions

### 3 结论

① 在自制的两级同步硝化反硝化反应器内进行简易填埋场壤中流处理,在COD约为360 mg/L、TN为159.3~243.7 mg/L(C/N为2.3~1.5)的条件下,总氮去除率稳定在(85.69±2.22)%,C/N小于1.5时,系统性能恶化。

② 稳定运行阶段,反应器外环NLR和NRR分别由0.30 kg/(m³·d)和0.25 kg/(m³·d)提高到0.48 kg/(m³·d)和0.34 kg/(m³·d);内环的NLR和NRR分别由0.06 kg/(m³·d)和0.02 kg/(m³·d)提高到0.14 kg/(m³·d)和0.06 kg/(m³·d)。外环是主要的功能单元,内环性能有待通过调整参数进一步优化。但通过两级反应器的串联可以实现功能互补以维持高污染物去除性能,提高系统的抗冲击负荷能力。

③ 当C/N为2.0和1.7时,外环的RSND分别达71.83%和51.75%,表明同步硝化反硝化在外环脱氮过程中具有重要作用,而对其他C/N下的外环反应器及全部C/N下的内环反应器单元而言,好氧反硝化和全程反硝化分别可能对脱氮具有重要



贡献。

④ 本研究开发的两级同步硝化反硝化反应器启动快、NLR高、占地面积小、抗冲击负荷能力强且运行管理方便,适用于村镇地区壤中流等低C/N废水的处理,对该反应器进一步开展参数优化后,应用于村镇污水修复将有助于提升我国村镇地区环境修复技术水平,助力“乡村振兴”等战略目标的实现。

#### 参考文献:

- [1] LIU H Y, YANG P J, PENG Y, *et al.* Pollution in the interflow from a simple landfill in a mountainous and hilly area in Southwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 793: 148656.
- [2] ZHANG B W, ZHOU M H, ZHU B, *et al.* Soil type affects not only magnitude but also thermal sensitivity of N<sub>2</sub>O emissions in subtropical mountain area[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 149127.
- [3] 张燕伟,程方,李奕辉,等. 低碳氮比下MABR同步硝化反硝化过程的构建[J]. *工业水处理*, 2020, 40(5): 70-76.
- ZHANG Yanwei, CHENG Fang, LI Yihui, *et al.* Construction of simultaneous nitrification and denitrification process in membrane-aerated biofilm reactor under low C/N ratio [J]. *Industrial Water Treatment*, 2020, 40(5): 70-76(in Chinese).
- [4] DESIREDDY S, SABUMON P C, MANASA R L, *et al.* Development of an up-flow anoxic nano-biotechnological reactor for simultaneous removal of ammonia and COD from low C/N secondary treated wastewater[J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 36: 101344.
- [5] XU Q, WAN Y L, WU Q X, *et al.* An efficient hydrodynamic-biokinetic model for the optimization of operational strategy applied in a full-scale oxidation ditch by CFD integrated with ASM2 [J]. *Water Research*, 2021, 193(18): 116888.
- [6] LI C, LIU S F, MA T, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification and phosphorus removal in a sequencing batch reactor (SBR) under low temperature [J]. *Chemosphere*, 2019, 229(8): 132-141.
- [7] MA W W, HAN Y X, MA W C, *et al.* Enhanced nitrogen removal from coal gasification wastewater by simultaneous nitrification and denitrification (SND) in an oxygen-limited aeration sequencing batch biofilm reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 244: 84-91.
- [8] LAI C M, GUO Y, CAI Q, *et al.* Enhanced nitrogen removal by simultaneous nitrification-denitrification and further denitrification (SND-DN) in a moving bed and constructed wetland (MBCW) integrated bioreactor[J]. *Chemosphere*, 2020, 261: 127744.
- [9] AGBEWORKU K C D, ADVEL T M, ZHAI J. Optimizing nitrogen removal in a hybrid oxidation ditch [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105443.
- [10] MEI X, CHEN Y, FANG C H, *et al.* Acetonitrile wastewater treatment enhanced by a hybrid membrane-aerated bioreactor containing aerated and non-aerated zones [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 289: 121754.
- [11] 赵远哲,杨永哲,王海燕,等. 新型填料A/O生物滤池处理低碳氮比农村污水脱氮[J]. *环境科学*, 2020, 41(5): 2329-2338.
- ZHAO Yuanzhe, YANG Yongzhe, WANG Haiyan, *et al.* Nitrogen removal in low-C/N rural sewage treatment by anoxic/oxic biofilter packed with new types of fillers [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(5): 2329-2338 (in Chinese).
- [12] 李龙翔,孟凡刚,王新华. 进水负荷对厌氧氨氧化膜生物反应器的影响[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(13): 71-74,126.
- LI Longxiang, MENG Fangang, WANG Xinhua. Effect of influent loading on anammox membrane bioreactor [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(13): 71-74, 126 (in Chinese).
- [13] KARASUTA C, WANG X J, ZHENG X W, *et al.* Effect of hydraulic retention time on effluent pH in anammox bioreactors: characteristics of effluent pH and pH as an indicator of reactor performance [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 280:111716.
- [14] 吕玮,张立秋,黄奕亮,等. 常温低基质下两种厌氧氨氧化反应器启动特性比较[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(3): 31-37.
- LÜ Wei, ZHANG Liliu, HUANG Yiliang, *et al.* Comparison of start-up characteristics of anaerobic ammonium oxidation between ASBR and biofilter at room temperature and low substrate concentration [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(3): 31-37 (in Chinese).
- [15] 吉芳英,赵易,熊黎,等. 环流式活性污泥/生物膜组合工艺的脱氮除磷性能[J]. *中国给水排水*, 2011, 27



- (15): 25-28.
- JI Fangying, ZHAO Yi, XIONG Li, *et al.* Phosphorus and nitrogen removal in combined process of cyclic activated sludge and biofilm [J]. *China Water & Wastewater*, 2011, 27(15): 25-28 (in Chinese).
- [16] 刘玮. 氧化沟膜生物反应器的长期运行特征及膜污染的研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2020.
- LIU Wei. Long-term Operation Characteristics of Oxidation Ditch Membrane Bioreactor and Study on Membrane Fouling [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2020 (in Chinese).
- [17] SUN Y, ALI A, ZHENG Z J, *et al.* Denitrifying bacteria immobilized magnetic mycelium pellets bioreactor: a new technology for efficient removal of nitrate at a low carbon-to-nitrogen ratio[J]. *Bioresource Technology*, 2022, 347: 126369.
- [18] 董卓俊. 膜曝气生物反应器(MABR)处理氨氮废水的研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2020.
- DONG Zhuojun. Study on Treatment of Ammonia Nitrogen Wastewater by Membrane Aerated Biofilm Reactor (MABR) [D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020 (in Chinese).
- [19] 康晓峰, 王黎声, 刘春, 等. 膜曝气生物膜反应器生物脱氮研究进展[J]. *环境工程*, 2021, 39(7): 38-45.
- KANG Xiaofeng, WANG Lisheng, LIU Chun, *et al.* Research progress of nitrogen removal in membrane aerated biofilm reactor[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(7): 38-45(in Chinese).
- [20] 凌宇, 赵远哲, 王海燕, 等. HRT对A/O-BF处理低碳氮比农村生活污水脱氮的影响[J]. *环境科学研究*, 2021, 34(4): 927-935.
- LING Yu, ZHAO Yuanzhe, WANG Haiyan, *et al.* Effects of HRT on A/O-BF nitrogen removal of low C/N rural domestic sewage [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(4): 927-935(in Chinese).
- [21] 庞维海, 李惠平, 张琨, 等. 周期循环式活性污泥法工艺优化提升低碳氮比城镇污水脱氮效能研究[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2021, 49(9): 1257-1264.
- PANG Weihai, LI Huiping, ZHANG Kun, *et al.* Cyclic activated sludge system-based process optimization to improve denitrification efficiency of low C/N municipal wastewater [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2021, 49(9): 1257-1264 (in Chinese).
- [22] LIU W L, HAO S F, MA B, *et al.* In-situ fermentation coupling with partial-denitrification/anammox process for enhanced nitrogen removal in an integrated three-stage anoxic/oxic (A/O) biofilm reactor treating low COD/N real wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2022, 334: 126267.
- [23] 管锡珺, 徐阳钰, 张艳秋, 等. 高浓度污泥的双曝气双泥层过滤反应器处理生活污水[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(11): 144-147.
- GUAN Xijun, XU Yangyu, ZHANG Yanqiu, *et al.* Treatment of domestic sewage by high-efficiency reactor with double aeration and double sludge blanket filtration [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(11): 144-147 (in Chinese).
- [24] URI-CARRENO N, NIELSEN P H, GERNAEY K V, *et al.* Long-term operation assessment of a full-scale membrane-aerated biofilm reactor under Nordic conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 779: 146366.

作者简介: 茹凌宇(1997- ), 男, 江苏无锡人, 硕士, 工程师, 研究方向为低碳氮比废水脱氮。

E-mail: rulingyu@163.com

收稿日期: 2022-02-15

修回日期: 2022-04-18

(编辑: 沈靖怡)