

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第11期

Vol.36 No.11

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



水力停留时间和溶解氧对陶粒 CANON 反应器的影响

王会芳, 付昆明*, 左早荣, 仇付国

(北京建筑大学环境与能源工程学院, 城市雨水系统与水环境省部共建教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要: 以人工配制无机高氨氮废水为进水, 通过接种 CANON 污泥, 以陶粒作为填料, 研究了 HRT 和 DO 对生物膜 CANON 反应器的影响. 试验过程中, 控制进水氨氮浓度基本不变, 依次控制反应器的 HRT 为 9、7、5 h, 同时控制 DO 的范围为 1.16 ~ 3.20 mg·L⁻¹. 研究发现: ① 当 DO 为 1.20 ~ 1.75 mg·L⁻¹ 时, 尽管提高 DO 有利于提高 AOB 的活性和系统内基质的传质效果, 但是 CANON 反应器的 NH₄⁺-N、TN 去除效果依然随着 HRT 的缩短而下降, 尤其当 DO 超过 2.50 mg·L⁻¹ 时, TN 去除效果大幅度下降; ② 当 DO 为 1.20 ~ 1.75 mg·L⁻¹ 时, 随着 HRT 的缩短, CANON 反应器的短程硝化性能趋于稳定, 而当 DO 超过 1.75 mg·L⁻¹ 时, 即使缩短 HRT, 其短程硝化性能依然遭到严重破坏; ③ CANON 反应器中短程硝化稳定性能和去除效果较佳的条件是 HRT 为 7 h, 且 DO 控制在 1.20 ~ 1.75 mg·L⁻¹ 之间. HRT 和 DO 是废水生物处理的重要运行参数, 直接影响到生物处理的效果和出水水质, 协调控制两者的变化范围, 对提高 CANON 工艺对高氨氮废水的处理效果非常重要.

关键词: CANON; 生物膜; 短程硝化; 厌氧氨氧化; 水力停留时间; 溶解氧; 陶粒

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)11-4161-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.11.029

Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier

WANG Hui-fang, FU Kun-ming*, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo

(Key Laboratory of Urban Storm Water System and Water Environment, Ministry of Education, School of Environment and Energy Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: One Completely Autotrophic Nitrogen Removal Over Nitrite (CANON) reactor with haydite as carrier was investigated to study the effects of different hydraulic retention time (HRT) and dissolved oxygen (DO) on CANON reactors by seeding sludge from another mature CANON reactor and using synthetic inorganic ammonia-rich waste water as influent. During the experiment, the concentration of influent ammonia nitrogen was basically unchanged, the HRT of the reactor were 9, 7, 5 h in turn and the range of DO was 1.16-3.20 mg·L⁻¹. The results showed that: ① When DO was 1.20-1.75 mg·L⁻¹, despite the increase of DO can improve AOB's activity and matrix mass transfer in the system, NH₄⁺-N and TN removal efficiency were still fell with the shortening of HRT for the CANON reactor, especially when DO was higher than 2.50 mg·L⁻¹, TN removal efficiency dropped sharply; ② Under the condition that DO was 1.20-1.75 mg·L⁻¹, with the shortening of HRT, partial nitritation tended to be stable in the CANON process, and when DO was higher than 1.75 mg·L⁻¹, even if HRT was shorter, partial nitritation was still severely damaged; ③ Under the condition that DO was 1.20-1.75 mg·L⁻¹ and HRT was 7 h, for the CANON reactor, partial nitritation and total nitrogen removal efficiency kept well. Hydraulic retention time and dissolved oxygen both are important operational parameters for biological wastewater treatment process, which could directly affect the effect of biological treatment and effluent quality, so to choose appropriate hydraulic retention time and dissolved oxygen coordinately is very important to improve the effect of treatment of ammonium-rich wastewater by CANON process.

Key words: CANON; biofilm; nitritation; ANAMMOX; hydraulic retention time; dissolved oxygen; haydite

厌氧氨氧化(anaerobic ammonium oxidation, ANAMMOX)工艺是一种自养脱氮工艺, 由于其不需有机碳源^[1], 并作为一种适合高氨氮、低碳源污水(如垃圾渗滤液^[2]、污泥消化液^[3])的脱氮工艺, 在近些年得以迅速发展^[4]. 在 ANAMMOX 工艺中, ANAMMOX 细菌以 NO₂⁻-N 为电子受体, 将 NH₄⁺-N 氧化成氮气, 并生成少量的 NO₃⁻-N^[5], 如式(1)所示. 在此基础上, 一些新的自养脱氮工艺得以产生, 其中包括全程自养脱氮(completely autotrophic nitrogen removal over nitrite, CANON)工艺^[6]. 在 CANON 工艺中,

ANAMMOX 细菌与氨氧化细菌(ammonia-oxidizing bacteria, AOB)存在于同一个反应器中, AOB 位于生物膜或絮体的外层, 以氧气为电子受体, 将 NH₄⁺-N 氧化为 NO₂⁻-N, 并结合 ANAMMOX 反应, 完成脱氮过程. 由于 AOB 也是自养菌^[7], 因此 CANON 工艺几乎不需外加碳源、节省曝气量^[8]、污泥产量低, 是近些

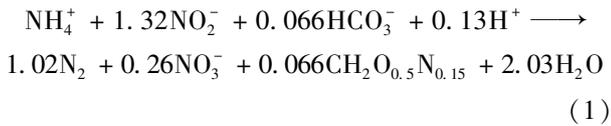
收稿日期: 2015-04-02; 修订日期: 2015-06-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51308025); 北京高等学校青年英才计划项目(YETP1649)

作者简介: 王会芳(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水处理技术, E-mail: wanghui-fang0635@163.com

* 通讯联系人, E-mail: fukunming@163.com

年发展最快的生物脱氮工艺之一^[4],然而要使其脱氮效果好就必须保证短程硝化的稳定性.



对于生物膜反应器而言,填料的选择是生物膜处理技术的关键. 作为生物膜载体,陶粒填料是水处理行业中广泛应用的填料,具有比表面积大、机械强度高的物理特性和亲微生物的性能. 它能够为微生物提供稳定的栖息环境,对水流有强制性的紊动剪切力,有利于处理水的再分布,并截留处理水中的部分悬浮固体(suspended solids, SS),减少出水的SS^[9]. 作者之前已经成功将其应用于 CANON 工艺的启动,总氮(total nitrogen, TN)去除负荷达到 $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$ ^[10]. 而且,陶粒填料 CANON 反应器自成功启动以来,一直稳定运行.

水力停留时间(hydraulic retention time, HRT)是废水生物处理的重要运行参数,直接影响到生物处理的效果和出水水质^[11]. 在活性污泥系统中,例如, SHARON (single reactor high activity ammonia removal over nitrite) 工艺中,在控制温度的基础上,可通过控制污泥龄来淘汰亚硝酸盐氧化细菌(nitrite-oxidizing bacteria, NOB)而持留 AOB^[12];但是在生物膜反应器中,污泥龄理论上无限长,使得生物膜工艺中短程硝化的控制并不像活性污泥工艺那样简单. 事实上,由于出水中所携带的 SS, HRT 的长短会影响排出反应器的生物量. 有学者认为,氮去除速率与 HRT 等运行参数有关,通过适当延长 HRT 有利于氮去除速率的提高^[13, 14];而又有学者认为,较低的 HRT 在一定程度上可以洗出悬浮状微生物,以利于生物膜表面微生物的生长,进而提高脱氮效果^[15];另有学者认为^[16],与悬浮性生物膜反应器相反, HRT 对固定化生物膜反应器的生物停留功能影响甚微. 由此可见,目前有关 HRT 与生物膜反应器运行稳定性的关系,观点并不完全一致,而且,大多数学者集中于 HRT 对反应器氮去除速率的影响,而其对短程硝化所产生的影响却研究甚少.

短程硝化是应用厌氧氨氧化技术的基础,必须实现稳定的短程硝化才能为 ANAMMOX 菌实现稳定的总氮去除. 而溶解氧(dissolved oxygen, DO)是影响短程硝化的重要参数之一. 由于 AOB 对 DO 的亲中性比 NOB 较强,可以通过控制反应器中 DO 来实现短程硝化. 对于不同的反应器方式,其 AOB、NOB 对氧的亲性和常数不一样,例如,生物膜法中

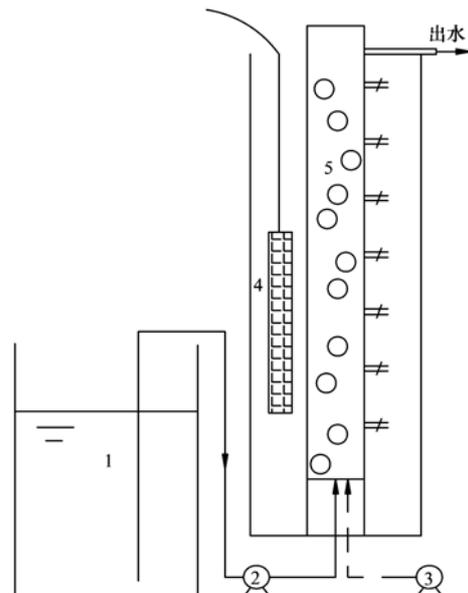
AOB 和 NOB 对氧的亲性和常数分别为 $0.25 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.34 \sim 2.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[17]. 武小鹰等^[18]认为,在 MBR 反应器中,DO 调控在 $0.5 \sim 1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,有利于实现稳定的短程硝化. 其他一些研究分别控制各自反应器中 DO 为 $0.3 \sim 0.5$ ^[19]、 $0.5 \sim 1.0$ ^[20]、 $(1.24 \pm 7.1) \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ^[21],使出水亚硝氮与氨氮浓度比值接近于 1,实现了与 ANAMMOX 的对接. 由此可见,针对调控 DO 来实现稳定的短程硝化,各项研究所得出的结论有所不同,并且大多针对于单一的硝化反应器,而少有学者专门针对一体式陶粒填料生物膜 CANON 反应器进行相关研究.

因此,研究 HRT 和 DO 对于生物膜 CANON 反应器中的短程硝化,对于提升此工艺的运行效果,确定工艺的最优运行参数有重要影响. 作者在前期已成功启动陶粒填料 CANON 反应器^[10]的基础上,主要研究了控制 HRT 和 DO 来实现 CANON 反应器中稳定的短程硝化,以期为实现稳定的短程硝化提供理论依据,为未来应用 CANON 工艺提供技术参考.

1 材料与方法

1.1 试验装置

反应器以陶粒为填料,陶粒的规格是 Φ 为 $2 \sim 4 \text{ mm}$,湿密度是 $1.0 \sim 1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,孔隙率是 40%,填充率是 85%. 反应器由有机玻璃制成,总体积为 5.90 L,废水由反应器底部进入,由上部出水口排出,试验装置如图 1 所示. 曝气量通过转子流量计



1. 原水水箱; 2. 进水泵; 3. 空气泵; 4. 恒温加热棒; 5. 填料

图 1 反应器试验装置及工艺流程

Fig. 1 Experimental apparatus and process scheme chart of reactor

控制. 反应器内的温度通过水浴调节,使反应器内的温度控制在 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$, pH 控制在 7.80 ~ 8.10 之间.

1.2 试验用水

试验用水采用人工配水,即向自来水中添加适量的 NH_4Cl 、 NaHCO_3 和 Na_2HPO_4 等. 自来水中无 COD,即试验用水为无机高氨氮废水. 另外,自来水

中存在近乎饱和的 DO,在试验过程中没有对 DO 进行吹脱,原水水箱也没有加盖,因此大气中氧气会不断溶解到原水中,造成原水中的部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被氧化成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$. 自来水本身含有的 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 是原水中 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的主要来源. 考虑到自来水中含有大量微量元素,因此不再添加微量元素^[22].

原水水质的主要指标如表 1 所示.

表 1 CANON 反应器的原水水质/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Table 1 Water quality of influent for CANON reactor/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	碱度	Ca^{2+}	Mg^{2+}	DO	pH(无量纲)
400 ~ 450	0 ~ 5	4 ~ 10	2	1500	185 ~ 220	140 ~ 160	3 ~ 6	7.80 ~ 8.10

1.3 分析项目及检测方法

$\text{NH}_4^+ - \text{N}$: 纳氏试剂比色法^[23]; $\text{NO}_2^- - \text{N}$: *N*-(1-萘基)-乙二胺光度法^[23]; $\text{NO}_3^- - \text{N}$: 紫外分光光度法^[23]; pH 值: HI 931700 型 pH 计; 溶解氧: HI 2400 型溶解氧仪; TN 通过紫外分光光度法^[23],或按下式计算: $\text{TN} = \text{NH}_4^+ - \text{N} + \text{NO}_2^- - \text{N} + \text{NO}_3^- - \text{N}$; 温度: 水银温度计.

1.4 试验方法

生物膜 CANON 反应器接种污泥采用作者首次启动 CANON 反应器的污泥^[24],在温度为 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ 下,直接在好氧条件下启动,反应器历时约 60 d 即成功启动 CANON 工艺^[10],TN 去除率达到 75%,TN 去除负荷达到 $0.79 \text{ kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$.

CANON 反应器稳定运行到 226 d,控制反应器中 DO 在 $1.16 \sim 3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,温度控制在 $30^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$,维持进水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度为 $400 \sim 450 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,通过控制进水的蠕动泵来控制进水量,使反应器的 HRT 依次为 9、7、5 h. 具体试验运行参数如表 2.

表 2 CANON 反应器的运行工况

Table 2 Operational conditions for CANON reactor

项目	运行时间/d		
	226 ~ 272	273 ~ 303	303 ~ 328
DO/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	1.25 ~ 1.74	1.16 ~ 1.60	2.50 ~ 3.20
HRT/h	9	7	5

2 结果与分析

2.1 HRT 和 DO 对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 与 TN 去除率的影响

HRT 对氨氮的去除是一个重要的影响因素. 一方面自养细菌生长繁殖缓慢,另一方面较短的 HRT 会导致污水中的氨氮没有充分的时间与生物膜中的细菌接触,同时进水流量过大容易引起陶粒上细菌的流失,甚至有可能将填料表面上的生物膜冲刷下

来,以上原因可能导致脱氮效果不佳^[25]. 而一定程度上提高 DO 又可以提高系统内基质的传质效果,有利于总氮去除^[26].

HRT 和 DO 对反应器的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率的影响分别如图 2 所示.

从图 2 可以看出,随着 HRT 缩短,出水中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的浓度逐渐增大, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除率也随之下降. 当 HRT 为 9 h, DO 为 $1.25 \sim 1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度均低于 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,出水中 TN 浓度均在 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的去除率达到 90% 以上,TN 的去除率达到 75% 以上, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的平均去除率分别为 94.20%、79.16%; 当 HRT 为 7 h, DO 为 $1.16 \sim 1.56 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除率均有所下降,但其去除率分别在 80%、65% 以上, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的平均去除率分别为 84.15%、71.68%; 当 HRT 为 5 h, DO 为 $2.50 \sim 3.20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,出水中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 浓度在 $90 \sim 175 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,出水中 TN 浓度甚至高于 $200 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除率均持续下降, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的平均去除率分别为 73.61%、55.46%,表明 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除率随着 HRT 缩短而降低,即使 DO 提高到原来的 2 倍, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和 TN 的去除率依旧不佳.

第 274 d 时,DO 从 $1.29 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 下降到 $1.16 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,导致 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除率分别下降到 71.97%、60.54%,之后 DO 恢复到 $1.39 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除率迅速恢复至 89.93%、77.21%; 303 d 后,DO 从 $1.25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 提高到 $2.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,反应器中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 的去除率没有上升,反而下降,下降的原因猜测可能是 HRT 缩短或者是 DO 提高. 但付昆明等^[26]研究发现

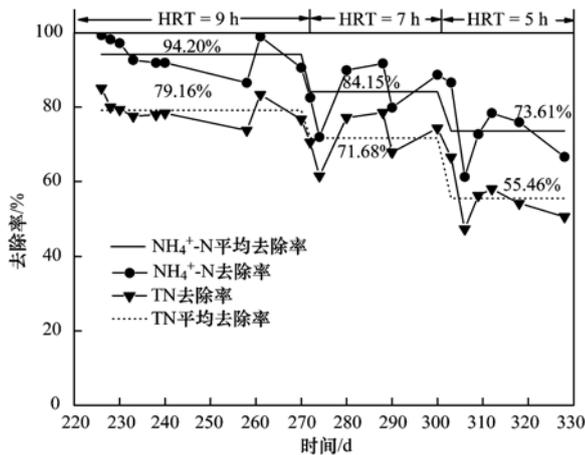


图2 不同 HRT 和 DO 的反应器中 NH_4^+ -N、TN 变化

Fig. 2 Variation of NH_4^+ -N, TN in different HRT and DO of reactor

CANON 工艺在适当的 DO 情况下, NH_4^+ -N、TN 的去除率随着 DO 的增大而提高, 而超过这个值(极限值)后, CANON 反应器中的 NH_4^+ -N、TN 的去除率不再随着 DO 的增大而提高, 反而有下降的趋势或者趋于平衡. 本课题组通过试验证明, 当 DO 维持在 $1.20 \sim 1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 陶粒填料 CANON 反应器的 TN 去除效果最佳, 微生物的活性最强; 当 DO 维持在 $1.75 \sim 2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 其 TN 去除效果趋于平衡; 而若 DO 超过 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 一方面, AOB 和 ANAMMOX 菌的活性受到 DO 抑制, 另一方面, HRT 的缩短也使得 AOB 和 ANAMMOX 菌的氧化能力未能完全发挥, CANON 工艺开始遭到破坏^[27]. 因此, 在上述陶粒 CANON 反应器可承受的 DO 范围内, 其去除效果变差主要是 HRT 的缩短导致, 而当继续提高 DO 时, TN 去除效果变差是 DO 和 HRT 共同导致的结果.

综上所述, 在适当的 DO 范围内, 即 DO 为 $1.20 \sim 1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 尽管提高 DO 有利于提高 AOB 的活性和系统内基质的传质效果, 但是 CANON 反应器的 NH_4^+ -N、TN 去除效果依然随着 HRT 的缩短而下降, 尤其当 DO 超过 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, TN 去除效果大幅度下降. 这说明, HRT 和 DO 均为陶粒填料 CANON 反应器稳定运行的重要参数, 直接影响到生物处理的效果和出水水质, 只有协调控制两者的变化范围, 才能获得最佳的脱氮效果.

2.2 HRT 和 DO 对于出水 NO_2^- -N 与 NO_3^- -N 浓度的影响

HRT 和 DO 对反应器的出水 NO_2^- -N、 NO_3^- -N 浓度的影响如图 3 所示.

如图 3 所示, 进水中 NO_2^- -N 浓度维持在 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下, 进水中 NO_3^- -N 浓度维持在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下. 226 ~ 303 d 时, DO 维持在 $1.20 \sim 1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 随着 HRT 的缩短, 出水中 NO_2^- -N 浓度略微增加, NO_3^- -N 浓度缓慢下降, 这说明在陶粒 CANON 反应器可承受的 DO 范围内, HRT 的缩短抑制了 AOB 和 ANAMMOX 菌的氧化能力, 从而导致出水 NO_2^- -N 浓度增加和 NO_3^- -N 浓度下降. 而 303 d 之后, DO 大于 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 且 HRT 继续缩短为 5 h, 出水中 NO_3^- -N 浓度逐渐升高, 并达到最高值 $22.86 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, NO_2^- -N 浓度则迅速升高, 最高达到 $76.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 这说明, 此时不仅 AOB 和 ANAMMOX 菌的氧化能力受到抑制, NOB 的活性还因为 DO 的增加而得以提高, 将出水中部分 NO_2^- -N 氧化成 NO_3^- -N, 以上两个原因导致陶粒 CANON 反应器出现硝化作用, 进而使得出水水质变差.

综上所述, 当 DO 维持在 $1.20 \sim 1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, HRT 是导致陶粒 CANON 反应器出水水质变差的主要原因; 但当 DO 超过极限值 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, HRT 继续缩短为 5 h 时, HRT 和 DO 均是陶粒 CANON 反应器出水水质变差的原因.

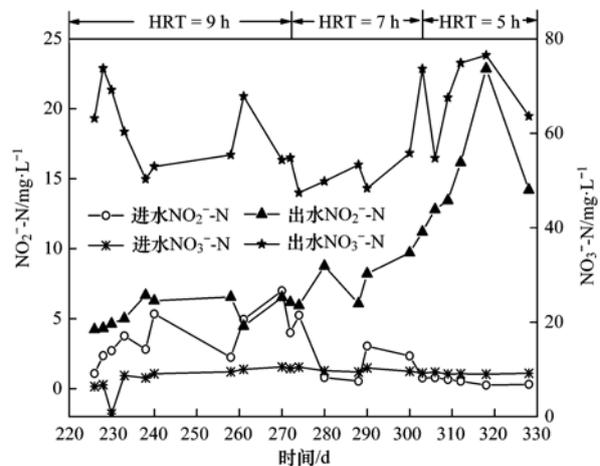


图3 不同 HRT 和 DO 的反应器中 NO_2^- -N与 NO_3^- -N变化

Fig. 3 Variation of NO_2^- -N and NO_3^- -N in different HRT and DO of reactor

2.3 对反应器短程硝化的影响

通过厌氧氨氧化的反应方程[式(1)], 发现 NO_3^- -N 与 N_2 的比例为 $0.26:1.02$, 即理论变化的比值 δNO_3^- -N/ $\delta\text{TN} = 0.26/(1.02 \times 2) = 0.127$ ^[28]. 其中:

$$\delta\text{NO}_3^-$$
-N = [{ NO_3^- -N }_{\text{出水}}] - [{ NO_3^- -N }_{\text{进水}}]

$$\delta\text{TN} = [{ \text{TN} }_{\text{进水}}] - [{ \text{TN} }_{\text{出水}}]$$

由于采用无机高氨氮废水为原水, TN 损失可认

为全部由 ANAMMOX 反应[式(1)]导致,若 NOB 不存在或是 NOB 作用效果不显著, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 也几乎全部源于 ANAMMOX 反应[式(1)],即 ANAMMOX 会维持稳定,因此 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 也会维持稳定.此时,NOB 与 AOB 相比不占优势,比值 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 与 0.127 接近;如果短程硝化遭到了破坏,即 NOB 开始发挥作用,不仅 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}$ 增加,同时 δTN 也会受到 NOB 与 ANAMMOX 细菌竞争底物 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 而减少,因此比值 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 增大,甚至远远偏离理论值 0.127.所以可以采用 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 与 0.127 的差值来判断 CANON 工艺中短程硝化的稳定性.

HRT 对反应器中 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 变化的影响如图 4 所示.

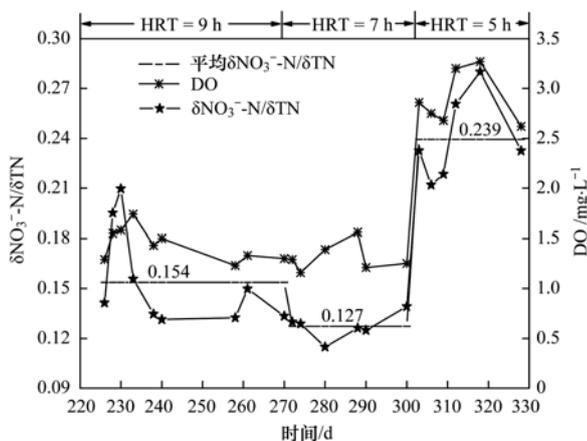


图 4 不同 HRT 的反应器中 DO 与 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 变化

Fig. 4 Variation of DO and $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ in different HRT of reactor

Liang 等^[29]认为,在控制进水 $\text{HCO}_3^- / \text{NH}_4^+ - \text{N} = 1:1$ 的前提条件下,HRT = 12 h 时,生物膜反应器中 50% 的短程硝化保持稳定.而作者在试验运行时,控制进水 $\text{HCO}_3^- / \text{NH}_4^+ - \text{N} > 1:1$ (过量的 HCO_3^- 对反应器脱氮效能稳定性无影响^[30]),维持 DO 为 1.20

$\sim 1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可维持短程硝化稳定. Zekker 等^[31]认为,在 MBBR 反应器中,缩短 HRT,并结合间歇曝气、降低 DO,运行 37 d 后,可成功抑制 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 转化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$.甚至,还有一些学者通过试验验证缩短 HRT 对稳定的短程硝化影响甚微,其对 ANAMMOX 细菌的活性的不利影响可通过降低 DO 以抵消^[16].而作者在降低 HRT 的同时,为了提高系统内基质的混合效果,适当提高 DO,这在一定程度上有利于提高 TN 去除效果.

从图 4 可以看出, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 的变化受 HRT 和 DO 的共同影响, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值随着 HRT 缩短越接近 0.127,即反应器中短程硝化稳定性能越好.在 HRT 为 9 h 时,DO 控制在 $1.20 \sim 1.74 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值在 $0.130 \sim 0.201$ 之间波动,平均值为 0.154,即反应器中短程硝化的稳定性能不佳,与此同时, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 随着 DO 值的增大而增大;在 HRT 为 7 h 时,DO 控制在 $1.16 \sim 1.60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值在 $0.115 \sim 0.139$ 之间波动,平均值为 0.127,即反应器中短程硝化稳定性能最佳;而在 HRT 为 5 h 时,由于 DO 超过陶粒 CANON 反应器所能承受的极限值,即 $2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值远远偏离理论值 0.127,在 $0.212 \sim 0.280$ 之间波动,平均值为 0.239.本课题组通过试验验证当 DO 维持在 $1.20 \sim 1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内,陶粒填料 CANON 反应器的 TN 去除效果最佳,但是当 DO 为 $1.75 \sim 2.50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,尽管其 TN 去除效果可以维持稳定,但是短程硝化性能易遭到破坏^[27].所以,303 ~ 328 d 时,反应器中的 ANAMMOX 细菌的活性受到 DO 抑制,同时 NOB 得以生长繁殖,使得 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值严重偏离理论值,表明 CANON 反应器的短程硝化性能受到破坏.

综上所述,HRT 和 DO 对整个 CANON 反应器影响结果如表 3 所示.

表 3 HRT 和 DO 对反应器的影响

Table 3 Effects of HRT and DO on the CANON reactor

HRT	TN 平均去除负荷 $/\text{kg} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{d})^{-1}$	TN 平均去除率 /%	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均去除率 /%	$\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$
5 h	1.189	55.46	73.61	0.239
7 h	1.122	71.68	84.15	0.127
9 h	0.922	79.16	94.2	0.154

从表 3 可以看出,CANON 反应器中短程硝化的稳定性能随着 HRT 缩短而增强,但 CANON 中短程硝化的稳定性能也受到 DO 的影响.有研究认为^[16],相较于缩短 HRT,DO 对 NOB 和 ANAMMOX

细菌的竞争更能产生不利影响.本课题组研究证明,DO 为 $1.20 \sim 1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,陶粒 CANON 反应器中短程硝化稳定性能和脱氮效果较好,而当 DO 大于 $1.75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,陶粒 CANON 反应器的脱氮效

果维持不变,但短程硝化稳定性遭到破坏^[27]。如 HRT = 5 h 时,按理论上说 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值接近理论值 0.127,实际上 CANON 反应器中 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值为 0.239,远远偏离理论值,其原因是反应器中的 DO 提高,使得反应器中短程硝化稳定性能较差,对应 TN 的去除率、去除负荷分别为 55.46%、1.189 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 在 HRT = 7 h 时,DO 维持在 1.16 ~ 1.60 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,此时 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值为 0.127,即反应器中短程硝化稳定性能最佳,对应 TN 的去除率、去除负荷分别为 71.68%、1.122 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$; 在 HRT = 9 h 时,DO 控制在 1.20 ~ 1.74 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,此时 $\delta\text{NO}_3^- - \text{N}/\delta\text{TN}$ 值为 0.154,也偏离理论值,即反应器中短程硝化稳定性能不佳,对应 TN 的去除率、去除负荷分别为 79.16%、0.922 $\text{kg}\cdot(\text{m}^3\cdot\text{d})^{-1}$ 。

因此,陶粒填料 CANON 反应器中短程硝化稳定性能和去除效果较佳的条件是 HRT 为 7 h,且 DO 控制在 1.20 ~ 1.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。

3 结论

(1) 当 DO 为 1.20 ~ 1.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,尽管提高 DO 有利于提高 AOB 的活性和系统内基质的传质效果,但是陶粒填料 CANON 反应器的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN 去除效果依然随着 HRT 的缩短而下降,尤其当 DO 超过 2.50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TN 去除效果大幅度下降。

(2) 当 DO 为 1.20 ~ 1.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,随着 HRT 的缩短,陶粒填料 CANON 反应器的短程硝化性能趋于稳定,而当 DO 超过 1.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,即使缩短 HRT,其短程硝化性能依然遭到严重破坏。

(3) 陶粒填料 CANON 反应器中短程硝化稳定性能和去除效果较佳的条件是 HRT 为 7h,且 DO 控制在 1.20 ~ 1.75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间。

参考文献:

- [1] Liang Y H, Li D, Zhang X J, *et al.* Stability and nitrite-oxidizing bacteria community structure in different high-rate CANON reactors[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **175**: 189-194.
- [2] Sun H W, Peng Y Z, Shi X N. Advanced treatment of landfill leachate using anaerobic-aerobic process: Organic removal by simultaneous denitrification and methanogenesis and nitrogen removal via nitrite[J]. *Bioresource Technology*, 2015, **177**: 337-345.
- [3] Joss A, Salzgeber D, Eugster J, *et al.* Full-scale nitrogen removal from digester liquid with partial nitrification and anammox in one SBR[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, **43** (14): 5301-5306.
- [4] Lackner S, Gilbert E M, Vlaeminck S E, *et al.* Full-scale partial nitrification/anammox experiences-An application survey [J]. *Water Research*, 2014, **55**: 292-303.
- [5] Strous M, Heijnen J J, Kuenen J G, *et al.* The sequencing batch reactor as a powerful tool for the study of slowly growing anaerobic ammonium-oxidizing microorganisms [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 1998, **50**(5): 589-596.
- [6] Strous M, Kuenen J G, Jetten M S M. Key physiology of anaerobic ammonium oxidation [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(7): 3248-3250.
- [7] Ge S J, Wang S Y, Yang X, *et al.* Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review [J]. *Chemosphere*, 2015, **140**: 85-98.
- [8] Zhang X J, Li D, Liang Y H, *et al.* Application of membrane bioreactor for completely autotrophic nitrogen removal over nitrite (CANON) process [J]. *Chemosphere*, 2013, **93** (11): 2832-2838.
- [9] 孙霞, 王清杰, 吴晓波. 陶粒填料的研究进展 [J]. *中小企业管理与科技* (下旬刊), 2010, (4): 252-253.
- [10] 付昆明, 左早荣, 仇付国. 陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(3): 995-1001.
- [11] 黄光团, 杨艳琼, 张留臻, 等. 好氧完全混合式反应器中水力停留时间对溶解性微生物产物的影响 [J]. *华东理工大学学报* (自然科学版), 2009, **35**(1): 66-70.
- [12] Shalini S S, Joseph K. Start-up of the SHARON and ANAMMOX process in landfill bioreactors using aerobic and anaerobic ammonium oxidising biomass [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **149**: 474-485.
- [13] Lv Y T, Wang L, Sun T, *et al.* Autotrophic nitrogen removal discovered in suspended nitrification system [J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(2): 180-185.
- [14] Persson F, Sultana R, Suarez M, *et al.* Structure and composition of biofilm communities in a moving bed biofilm reactor for nitrification-anammox at low temperatures [J]. *Bioresource Technology*, 2014, **154**: 267-273.
- [15] Gaul T, Märker S, Kunst S. Start-up of moving bed biofilm reactors for deammonification: the role of hydraulic retention time, alkalinity and oxygen supply [J]. *Water Science & Technology*, 2005, **52**(7): 127-133.
- [16] De Clippeleir H, Yan X G, Verstraete W, *et al.* OLAND is feasible to treat sewage-like nitrogen concentrations at low hydraulic residence times [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2011, **90**(4): 1537-1545.
- [17] Münch E V, Lant P, Keller J. Simultaneous nitrification and denitrification in bench-scale sequencing batch reactors [J]. *Water Research*, 1996, **30**(2): 277-284.
- [18] 武小鹰, 郑平. 氧对膜生物反应器短程硝化的影响 [J]. *生物工程学报*, 2014, **30**(12): 1828-1834.
- [19] Xue Y, Yang F L, Liu S T, *et al.* The influence of controlling factors on the start-up and operation for partial nitrification in membrane bioreactor [J]. *Bioresource Technology*, 2009, **100** (3): 1055-1060.

- [20] Tian W D, An K J, Ma C, *et al.* Partial nitrification for subsequent Anammox to treat high-ammonium leachate [J]. *Environmental Technology*, 2013, **34**(8): 1063-1068.
- [21] Xing B S, Ji Y X, Yang G F, *et al.* Start-up and stable operation of partial nitrification prior to ANAMMOX in an internal-loop airlift reactor[J]. *Separation and Purification Technology*, 2013, **120**: 458-466.
- [22] 刘涛. 基于亚硝化的全程自养脱氮工艺(CANON)效能及微生物特征研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [23] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 258-415.
- [24] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 好氧条件下 CANON 工艺的启动研究[J]. *环境科学*, 2009, **30**(6): 1689-1694.
- [25] 管运涛, 宁涛, 张丽丽. HRT 和载体对一体化生物膜反应器脱氮除磷效果的影响[J]. *清华大学学报(自然科学版)*, 2009, **49**(3): 360-364.
- [26] 付昆明, 张杰, 曹相生, 等. 曝气量对不同填料 CANON 反应器运行效率的影响[J]. *化工学报*, 2010, **61**(2): 496-503.
- [27] 左早荣. 全程自养脱氮工艺性能优化研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2014.
- [28] 付昆明. 全程自养脱氮(CANON)反应器的启动及其脱氮性能[D]. 北京: 北京工业大学, 2010.
- [29] Liang Z W, Han Z Y, Yang S Y, *et al.* A control strategy of partial nitrification in a fixed bed biofilm reactor[J]. *Bioresource Technology*, 2011, **102**(2): 710-715.
- [30] 李祥, 黄勇, 袁怡. HCO_3^- 浓度对厌氧氨氧化反应器脱氮效能的影响[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(2): 292-298.
- [31] Zekker I, Rikmann E, Tenno T, *et al.* Modification of nitrifying biofilm into nitritating one by combination of increased free ammonia concentrations, lowered HRT and dissolved oxygen concentration[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, **23**(7): 1113-1121.

CONTENTS

Composition and Source Apportionments of Saccharides in Atmospheric Particulate Matter in Beijing	LIANG Lin-lin, Guenter Engling, DUAN Feng-kui, <i>et al.</i>	(3935)
Comparing Cell Toxicity of <i>Schizosaccharomyces pombe</i> Exposure to Airborne PM _{2.5} from Beijing and Inert Particle SiO ₂	LIU Meng-jiao, HUANG Yi, WEN Hang, <i>et al.</i>	(3943)
Analysis on Regional Characteristics of Air Quality Index and Weather Situation in Beijing and Its Surrounding Cities During the APEC	GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, WANG Ning, <i>et al.</i>	(3952)
Analysis About Spatial and Temporal Distribution of SO ₂ and An Ambient SO ₂ Pollution Process in Beijing During 2000-2014	CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i>	(3961)
Characteristics and Formation Mechanism of a Multi-Day Haze in the Winter of Shijiazhuang Using a Single Particle Aerosol Mass Spectrometer (SPAMS)		
.....	ZHOU Jing-bo, REN Yi-bin, HONG Gang, <i>et al.</i>	(3972)
Modeling Study of A Typical Summer Ozone Pollution Event over Yangtze River Delta	ZHANG Liang, ZHU Bin, GAO Jin-hui, <i>et al.</i>	(3981)
Distribution of Regional Pollution and the Characteristics of Vertical Wind Field in the Pearl River Delta	LIU Jian, WU Dui, FAN Shao-jia	(3989)
Distribution Characteristics of Urea and Constitution of Dissolved Nitrogen in the Bohai Sea and the Huanghai Sea in Spring	LI Zhi-lin, SHI Xiao-yong, ZHANG Chuang-song	(3999)
Relationship Between Agricultural Land and Water Quality of Inflow River in Erhai Lake Basin	PANG Yan, XIANG Song, CHU Zhao-sheng, <i>et al.</i>	(4005)
Input Characteristics and Pollution Assessment of Nutrients Pollution in the Primary Pollution Source of the Daliao River	MA Ying-qun, ZHANG Lei, ZHAO Yan-min, <i>et al.</i>	(4013)
Temporal and Spatial Distribution of Nutrients in Daning River Sediments and Their Correlations with Chlorophyll in the Three Gorges Reservoir Area		
.....	ZHANG Yong-sheng, LI Hai-ying, REN Jia-ying, <i>et al.</i>	(4021)
Summer Greenhouse Gases Exchange Flux across Water-air Interface in Three Water Reservoirs Located in Different Geologic Setting in Guangxi, China		
.....	LI Jian-hong, PU Jun-bing, SUN Ping-an, <i>et al.</i>	(4032)
Distribution of Redox Zone at Different Water Layers in the Presence of Periphyton and the Responsible Microorganisms	WANG Feng-wu, LIU Wei, WAN Juan-juan, <i>et al.</i>	(4043)
Distribution Characteristics and Source of Fluoride in Groundwater in Lower Plain Area of North China Plain: A Case Study in Nanpi County		
.....	KONG Xiao-le, WANG Shi-qin, ZHAO Huan, <i>et al.</i>	(4051)
Distribution Characteristics of Fluoroquinolones Antibiotics in Surface Water and Groundwater from Typical Areas in A City	CUI Ya-feng, HE Jiang-tao, SU Si-hui, <i>et al.</i>	(4060)
Distribution of Aerobic Ammonia-Oxidizing Microorganisms in Sediments from Adjacent Waters of Rushan Bay	HE Hui, ZHEN Yu, MI Tie-zhu, <i>et al.</i>	(4068)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Sterols in Qingmuguan Underground River	LIANG Zuo-bing, SHEN Li-cheng, SUN Yu-chuan, <i>et al.</i>	(4074)
Water-Sediment Partition of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Underground River	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, XIAO Shi-zhen	(4081)
Variation Characteristics and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Karst Subterranean River During Rainfall Events	JIANG Ze-li, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i>	(4088)
Distribution and Transportation Characteristics of Heavy Metals in Nanshan Laolongdong Subterranean River System and Its Capacity of Self-Purification in Chongqing		
.....	REN Kun, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i>	(4095)
Distribution of Mercury in Plants at Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	LIANG Li, WANG Yong-min, LI Xian-yuan, <i>et al.</i>	(4103)
Development of Sediment Micro-Interface Under Physical and <i>Chironomus plumosus</i> Combination Disturbance	WANG Ren, LI Da-peng, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4112)
Norfloxacin Solution Degradation Under Ultrasound, Potassium Persulfate Collaborative System	WEI Hong, SHI Jing-zhuan, LI Jia-lin, <i>et al.</i>	(4121)
Degradation of Acid Orange 7 with Persulfate Activated by Silver Loaded Granular Activated Carbon	WANG Zhong-ming, HUANG Tian-yin, CHEN Jia-bin, <i>et al.</i>	(4127)
Kinetics and Reactive Species Analysis of Dimetridazole Degradation by TiO ₂	CHEN Dong-mei, YU Ze-bin, SUN Lei, <i>et al.</i>	(4135)
Performance and Mechanism of Ferric Tannate in the Removal of Inorganic Nitrogen from Wastewater	ZHANG Rui-na, LI Lin, LIU Jun-xin	(4141)
Performance of an Intermittent Aeration Membrane Bioreactor for Removal of Veterinary Antibiotics from Piggery Wastewater	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i>	(4148)
Advanced Treatment of Incineration Leachate with O ₃ -BAC and Double O ₃ -BAC	DU An-jing, FAN Ju-hong, LIU Rui, <i>et al.</i>	(4154)
Effects of Hydraulic Retention Time and Dissolved Oxygen on a CANON Reactor with Haydite as Carrier	WANG Hui-fang, FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, <i>et al.</i>	(4161)
Inhibiting Form of Ammonium to AOB and Inhibiting Rule	CUI Jian-hong, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4168)
Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Denitrification for Treatment of Municipal Sewage	ZHANG Shi-ying, WU Peng, SONG Yin-ling, <i>et al.</i>	(4174)
Rapid Start-up of Simultaneous Nitrification and Denitrification Coupled Phosphorus Removal Process and Its Performing Characteristics	LENG Lu, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i>	(4180)
Effect of HCO ₃ ⁻ on Nitrogen Removal Efficiency in Partial Nitrification-ANAMMOX Process	LI Xiang, CHENG Zong-heng, HUANG Yong, <i>et al.</i>	(4189)
Research on Cultivation and Stability of Nitrification Granular Sludge in Integrated ABR-CSTR Reactor	WU Kai-cheng, WU Peng, SHEN Yao-liang, <i>et al.</i>	(4195)
Influence of the Application of Activated Persulfate on Municipal Sludge Conditioning	XU Xin, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i>	(4202)
Influence of Temperature on the Anaerobic Packed Bed Reactor Performance and Methanogenic Community	XIE Hai-ying, WANG Xin, LI Mu-yuan, <i>et al.</i>	(4208)
Research on the Screening Method of Soil Remediation Technology at Contaminated Sites and Its Application	BAI Li-ping, LUO Yun, LIU Li, <i>et al.</i>	(4218)
Comprehensive Risk Assessment of Soil Heavy Metals Based on Monte Carlo Simulation and Case Study	YANG Yang, DAI Dan, CAI Yi-min, <i>et al.</i>	(4225)
Heavy Metals Pollution in Topsoil from Dagang Industry Area and Its Ecological Risk Assessment	ZHANG Qian, CHEN Zong-juan, PENG Chang-sheng, <i>et al.</i>	(4232)
Effects of Land Use Type on Soil Microbial Biomass Carbon and Nitrogen in Water-Stable Aggregates in Jinyun Mountain	LI Zeng-quan, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju	(4241)
Influence of Different Straws Returning with Landfill on Soil Microbial Community Structure Under Dry and Water Farming		
.....	LAN Mu-ling, GAO Ming	(4252)
Carbon Source Utilization Characteristics of Soil Microbial Community for Apple Orchard with Interplanting Herbage	DU Yi-fei, FANG Kai-kai, WANG Zhi-kang, <i>et al.</i>	(4260)
Effects of Different Kinds of Organic Materials on Soil Heavy Metal Phytoremediation Efficiency by <i>Sedum alfredii</i> Hance	YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, <i>et al.</i>	(4268)
<i>In-situ</i> Study on Effects of Combined Amendment on Translocation Control of Pb and Cd in Soil-Vegetable System	ZHU Wei, LIU Li, WU Yan-ming, <i>et al.</i>	(4277)
Effects of Rice Cultivar and Typical Soil Improvement Measures on the Uptake of Cd in Rice Grains	WANG Mei-e, PENG Chi, CHEN Wei-ping	(4283)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of PAHs in Water and Fishes from Daqing Lakes	WANG Xiao-di, ZANG Shu-ying, ZHANG Yu-hong, <i>et al.</i>	(4291)
Depth Profiles of Methane Oxidation Kinetics and the Related Methanotrophic Community in a Simulated Landfill Cover	XING Zhi-lin, ZHAO Tian-tao, GAO Yan-hui, <i>et al.</i>	(4302)
Enhanced Performance of Rolled Membrane Electrode Assembly by Adding Cation Exchange Resin to Anode in Microbial Fuel Cells	MEI Zhuo, ZHANG Zhe, WANG Xin	(4311)
Development of a Monoclonal Antibody-Based Sensor for Environmental Pyrene and Benzo(a)pyrene Detection	LI Xin, QIAO Yan, ZHONG Guo-zhen	(4319)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年11月15日 第36卷 第11期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 11 Nov. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人