

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.10.002

不同生物脱氮路径下氧气、碳源等需求理论分析

付昆明, 傅思博, 仇付国

(北京建筑大学城市雨水系统与水环境教育部重点实验室 中-荷污水处理技术研发中心, 北京 100044)

摘 要: 生物脱氮是一种节约资源能源、环保安全的脱氮途径,但其反应复杂、路径众多,在不同的条件下找到合适的途径进行高效生物脱氮就成了必须要解决的问题。借助生物脱氮方程式进行理论分析,全面介绍了全程硝化+全程反硝化、短程硝化+短程反硝化、短程硝化+厌氧氨氧化和全程硝化+部分反硝化+厌氧氨氧化等四种常用的生物脱氮路径的特点,并计算了不同脱氮路径中理论的氧气、碳源、碱度的消耗量和活性污泥的产生量。研究分析发现,以 CANON 工艺为代表的短程硝化+厌氧氨氧化路径相比全程硝化+全程反硝化路径,可节约 56% 的氧气、100% 的 BOD_5 、44% 的碱度,少产生 81% 的污泥;全程硝化+部分反硝化+厌氧氨氧化路径相比全程硝化+全程反硝化路径,可节约 42% 的氧气、77% 的 BOD_5 ,少产生 63% 的污泥。

关键词: 生物脱氮; 硝化反应; 短程硝化反应; 反硝化反应; 厌氧氨氧化反应

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)10-0008-08

Theoretical Analysis of Oxygen and Carbon Source Demand under Different Biological Nitrogen Removal Pathways

FU Kun-ming, FU Si-bo, QIU Fu-guo

(Sino-Dutch R & D Centre for Future Wastewater Treatment Technologies, Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Biological nitrogen removal is an energy-efficient, resource-saving, and eco-friendly process for nitrogen removal. However, pathways involved in biological nitrogen removal are numerous and complex, which means that finding the right pathway to fulfill biological nitrogen removal under different conditions has become a key issue. In this paper, a theoretical analysis regarding the specific feature of each pathway is conducted based on chemical/biochemical equation, including complete nitrification + complete denitrification, short-cut nitrification + short-cut denitrification, short-cut nitrification + anaerobic ammonium oxidation, and complete nitrification + partial denitrification + anaerobic ammonium oxidation. The theoretical consumption of oxygen demand, carbon source, and alkalinity as well as sludge production of each pathway were calculated and evaluated. Compared with the complete nitrification + complete denitrification pathway, the short-cut nitrification + anaerobic ammonium oxidation pathway (CANON) can save 56% O_2 , 100% BOD_5 , and 44% alkalinity, and

reduce 81% excess sludge production; 42% O_2 , 77% BOD_5 were saved and 63% excess sludge production was reduced by the complete nitrification + partial denitrification + anaerobic oxidation pathway.

Key words: biological nitrogen removal; nitrification; short-cut nitrification; denitrification; anaerobic ammonium oxidation

与物理化学脱氮相比,生物脱氮具有经济、高效、无二次污染等特点,被公认为具有发展前途而得到了广泛的重视与应用。生物脱氮是指通过不同微生物的联合作用,污水中的有机氮及氨氮转化为氮气的过程。传统的生物脱氮方法为硝化反硝化工艺,但近些年来,在污水脱氮领域涌现出不同类型的脱氮工艺,包括同步硝化反硝化工艺、SHARON (Single reactor High activity Ammonia Removal Over Nitrite)工艺、全程自养脱氮工艺等,这些新工艺超出了人们之前对传统生物脱氮工艺的认知。不同的脱氮工艺沿着不同的脱氮路径进行,对氧气、碳源、碱度需求等各不相同,污泥产量也不一样。由于很少有论文将这一过程详细阐述,导致对其机理认识不清。为进一步明晰不同脱氮路径过程对氧气、碳源、碱度的需求和污泥产量,通过整理不同阶段的反应方程,分别得到不同脱氮路径的分解代谢方程,以及包含合成代谢总的反应方程,以期对相关研究提供理论基础。

1 研究背景

一般而言,脱氮是以 $NH_4^+ - N$ 为对象,通过生物反应,使之最终变成无害氮气的过程。脱氮路径主要包括4种形式:①全程硝化+全程反硝化;②短程硝化+短程反硝化;③短程硝化+厌氧氨氧化;④全程硝化+部分反硝化+厌氧氨氧化,这4种路径反应机理如图1所示。

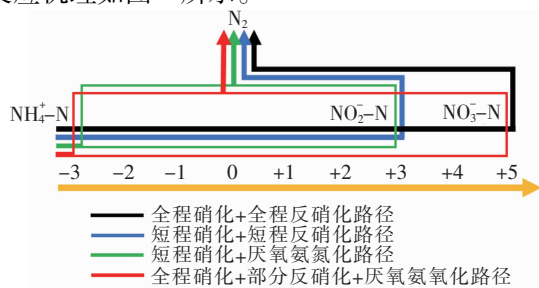


图1 4种脱氮途径的氮转化路径

Fig. 1 Schematic diagram of nitrogen conversion pathway in four nitrogen removal pathways

主要围绕这4种路径进行分析对比。在涉及综合反应方程式,需要用到微生物的分子式,除厌氧氨氧化细菌采用其特殊的分子式外,其余均采用 Mc Carty 于1970年根据 Lawrence - Mc Carty 模型得到的细菌原生质分子式 ($C_5H_7O_2N$);另外,甲醇是反硝化阶段常用电子供体,具有易降解、无副产物等优点,因此统一采用甲醇代表有机碳源。

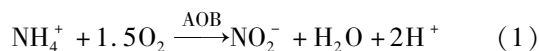
2 涉及的微生物

整个脱氮过程由硝化菌、反硝化菌和厌氧氨氧化 (ANAMMOX) 细菌共同完成。

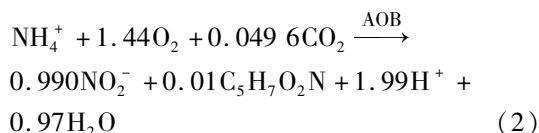
2.1 硝化菌

硝化菌包括氨氧化细菌 (AOB)、亚硝酸盐氧化细菌 (NOB)、氨氧化古菌 (AOA) 和完全氨氧化 (Comammox) 菌^[1]等,AOB 和 NOB 一般被认为是一类化能自养型的微生物,广泛存在于土壤、湖泊及其底泥和海洋等环境中。最新研究发现,Comammox 菌可以直接将 $NH_4^+ - N$ 氧化成 $NO_3^- - N$ 。

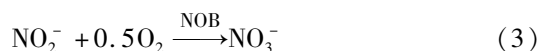
AOB 包括亚硝化单胞菌属、亚硝化螺菌属、亚硝化叶菌属、亚硝化弧菌属和亚硝化球菌属等。AOB 负责将 $NH_4^+ - N$ 氧化成 $NO_2^- - N$,该反应称为氨氧化反应,也称短程硝化反应,分解代谢方程如式 (1) 所示。最新研究发现,AOA 的作用与 AOB 类似,也可以将 $NH_4^+ - N$ 氧化成 $NO_2^- - N$ ^[2]。

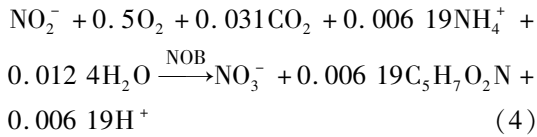


综合反应方程如下:

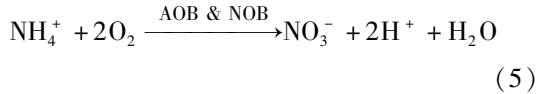


NOB 通常包括硝化杆菌属、硝化螺菌属、硝化球菌属和硝化刺菌属等^[3],其中污水处理系统中较为常见的有硝化杆菌属和硝化螺菌属^[4]。NOB 通常与 AOB 形成共生系统,负责将 $NO_2^- - N$ 氧化成 $NO_3^- - N$,该反应称为亚硝酸盐氧化反应。分解代谢方程及综合反应方程分别如下:

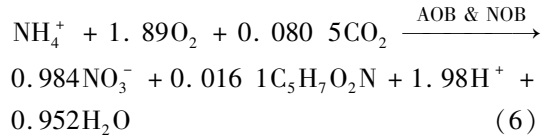




整个硝化反应可由 AOB 和 NOB 配合完成或由 Comammox 菌单独完成,分解代谢方程如下:

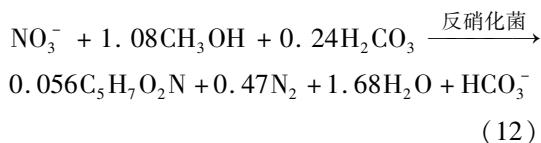
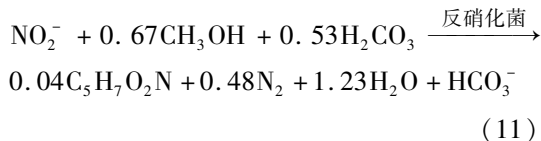
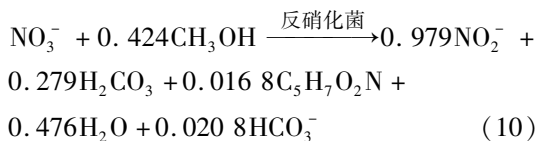
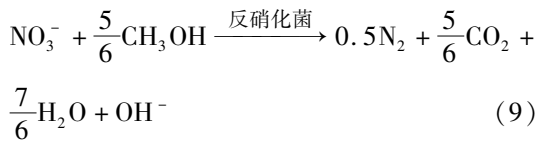
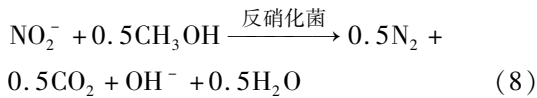
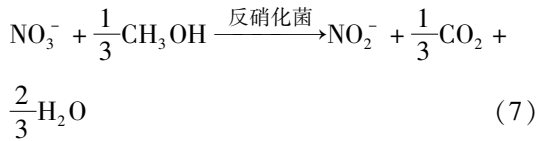


如果包括微生物的合成代谢,则综合反应方程如下:



2.2 反硝化菌

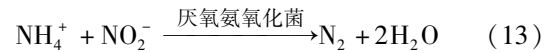
反硝化细菌是能够进行反硝化反应的一大类细菌,包括假单胞菌、芽孢杆菌、根瘤菌等,多为异养兼性厌氧细菌。反硝化菌以碳源为电子供体,以 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 为电子受体,经 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 逐步还原为 N_2 。其分解代谢方程^[5-6]和综合反应方程分别如下:



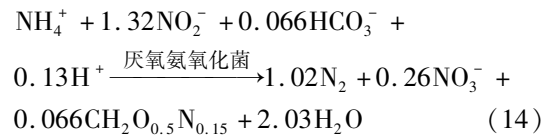
其中式(9)、(12)则是通过式(7)、(8)、(10)、(11)合并后得出。

2.3 厌氧氨氧化菌

厌氧氨氧化菌是一类自养细菌,属于浮霉菌门,红色是其显著特征^[7]。厌氧氨氧化菌包括 *Candidatus kuenenia*、*Candidatus brocadia*、*Candidatus anammoxoglobus*、*Candidatus jettenia* 和 *Candidatus scalindua* 等^[8]。厌氧氨氧化菌发生的反应称为厌氧氨氧化反应,研究已经证实了 ANAMMOX 是一个厌氧生物反应,且反应物是 NH_4^+ 和 NO_2^- ,生成物为 N_2 。ANAMMOX 是一种新型脱氮技术,具有几乎不消耗碳源的突出优点,分解代谢方程如下:



目前公认的综合反应方程如下:



值得注意的是,ANAMMOX 细菌的分子式为 $\text{CH}_2\text{O}_{0.5}\text{N}_{0.15}$,与其他微生物的分子式有所不同。

3 脱氮途径

3.1 全程硝化 + 全程反硝化路径

全程硝化 + 全程反硝化是最基础的生物脱氮路径,该路径由全程硝化和全程反硝化反应组成,全程硝化过程由 AOB 负责的氨氧化反应和由 NOB 负责的亚硝酸盐氧化反应构成;全程反硝化过程由反硝化菌负责。

① 全程硝化阶段

AOB 和 NOB 负责完成全程硝化反应,分解代谢和综合反应方程见式(5)、(6)。

根据式(5)可得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、氧气和碱度需求(以 CaCO_3 计,下同)的关系如下: $\text{NH}_4^+ - \text{N} \sim 2\text{O}_2 \sim 2\text{H}^+ \sim \text{CaCO}_3$ 。该阶段按生物分解代谢方程计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 $\frac{64}{14} \times 1\text{ mg} = 4.57\text{ mg O}_2$,消耗 $\frac{100}{14} \times 1\text{ mg} = 7.14\text{ mg 碱度}$ 。

根据式(6)可得 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、氧气和碱度需求以及污泥产量之间的关系: $\text{NH}_4^+ - \text{N} \sim 1.89\text{O}_2 \sim 1.98\text{H}^+ \sim 0.99\text{CaCO}_3 \sim 0.016\ 1\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$ 。该阶段按综合反应式计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 $\frac{60.48}{14} \times 1\text{ mg} = 4.32\text{ mg O}_2$,消耗 $\frac{99}{14} \times 1\text{ mg} = 7.07\text{ mg 碱度}$,生成 $\frac{1.82}{14} \times 1\text{ mg} = 0.13\text{ mg 污泥}$ 。

因此,一般认知中关于 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化需要 7.14 mg 碱度的说法并不完全准确,这一数值仅仅是参考分解代谢过程得出的。实际上,由于一部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 被微生物同化并转化为有机氮^[9],需要一部分碱度作为生长需求,碱度需求应为 7.07 mg。

② 全程反硝化阶段

反硝化菌负责完成全程反硝化反应,分解代谢和综合反应方程如式(9)、(12)所示。

反硝化菌为异养细菌,需要有机物作为外加碳源以维持反应。以 CH_3OH 代表外加碳源进行说明。 CH_3OH 氧化方程: $\text{CH}_3\text{OH} + 1.5\text{O}_2 [\text{BOD}_5] \longrightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$,即每消耗 1 mol 的 CH_3OH ,相当于消耗 1.5 mol 的 BOD_5 。根据式(9)可得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、外加碳源和 BOD_5 需求之间的关系: $\text{NO}_3^- - \text{N} \sim \frac{5}{6}\text{CH}_3\text{OH} \sim 1.25\text{O}_2 [\text{BOD}_5]$ 。该阶段按生物分解代谢方程计算,每反应 1 mg $\text{NO}_3^- - \text{N}$,生成 3.57 mg 碱度,消耗 2.86 mg BOD_5 。

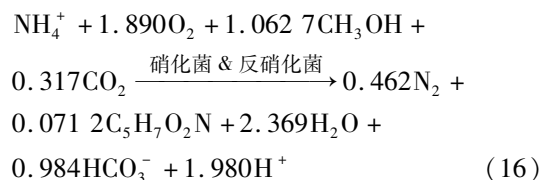
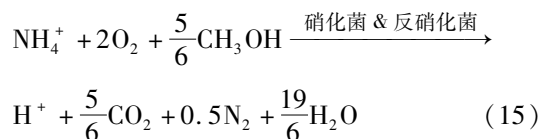
根据式(12)可得 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、外加碳源和 BOD_5 需求之间的关系: $\text{NO}_3^- - \text{N} \sim 1.08\text{CH}_3\text{OH} \sim 1.62\text{O}_2 [\text{BOD}_5]$ 。该阶段按综合反应式计算,每反应 1 mg $\text{NO}_3^- - \text{N}$,生成 3.57 mg 碱度,消耗 3.70 mg BOD_5 ,生成 0.45 mg 污泥。

污水的 BOD_5 与总凯氏氮(TKN)之比是影响脱氮效果的重要因素之一,《室外排水设计规范》(GB 50014—2006,2016 年版)规定,当 $\text{BOD}_5/\text{TKN} > 4$ 时可达到理想的脱氮效果。由于污水厂进水中几乎不含 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,因此可认为应保证 $\text{BOD}_5/\text{TN} > 4$ 。这与上述计算得出的 $\text{BOD}_5/\text{TN} = 3.70$ 基本一致。

需要特别指出的是,在 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 存在的条件下,反硝化菌将优先利用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 而不是 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 进行合成代谢,所以在实际污水处理厂,方程将更加复杂。

③ 综合方程

根据质量守恒定律,对式(5)、(6)、(9)、(12)进行合并后得出如下全程硝化 + 全程反硝化的分解代谢和综合反应方程:



理想状态下总过程按生物分解代谢方程计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 4.57 mg O_2 ,消耗 2.86 mg BOD_5 ,消耗 3.57 mg 碱度;按综合反应式计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 4.32 mg O_2 、3.64 mg BOD_5 、3.56 mg 碱度,生成 0.57 mg 污泥。

由计算可以得出,全程硝化反应阶段会消耗大量氧气及碱度,全程反硝化阶段消耗大量碳源,同时生成部分碱度。一般来说,全程硝化 + 全程反硝化路径中硝化反应和反硝化反应在不同反应器中发生,前置反硝化过程可以利用反硝化过程生成的碱度补充硝化过程损失的碱度,而后置反硝化无法实现,即每反应 1 mg 的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 7.14/7.07 mg 碱度。

3.2 短程硝化 + 短程反硝化路径

短程硝化 + 短程反硝化路径是利用硝酸菌和亚硝酸菌在动力学特性上存在的固有差异,通过控制硝化反应只进行到 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 阶段,造成大量的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积,然后立刻进行短程反硝化反应,从而达到短程硝化 + 短程反硝化的目的。短程硝化 + 短程反硝化路径与硝化 + 反硝化路径相比,减少了亚硝酸盐氧化阶段和部分反硝化阶段。

① 短程硝化阶段

AOB 负责完成短程硝化反应,反应方程如式(1)、(2)所示。

该阶段按生物分解代谢方程计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 3.43 mg O_2 和 7.14 mg 碱度,不消耗碳源;按综合反应式计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 3.29 mg O_2 和 7.11 mg 碱度,不消耗碳源,生成 0.08 mg 污泥。

② 短程反硝化阶段

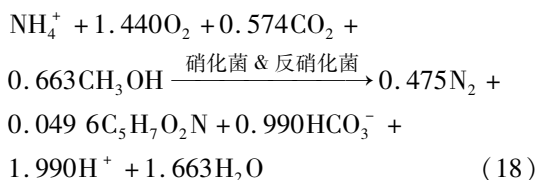
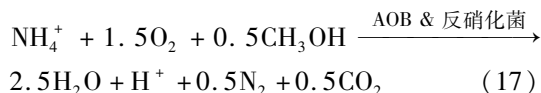
反硝化菌负责完成短程反硝化反应,分解代谢和综合反应方程如式(8)、(11)所示。其中,短程反硝化是指从 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 到 N_2 的过程^[10]。

该阶段按生物分解代谢方程计算,每反应 1 mg $\text{NO}_2^- - \text{N}$,不消耗氧气,消耗 1.71 mg BOD_5 ,生成 3.57 mg 碱度;按综合反应式计算,每反应 1 mg $\text{NO}_2^- - \text{N}$,不消耗氧气,消耗 2.30 mg BOD_5 ,分别生

成 3.57 mg 碱度和 0.32 mg 污泥。

③ 综合方程

根据质量守恒定律,对式(1)、(2)、(8)、(11)进行合并后得出短程硝化反硝化的分解代谢和综合反应方程,具体如下:



理想状态下,总过程按生物分解代谢方程计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 3.43 mg O_2 、1.71 mg BOD_5 、3.57 mg 碱度;按综合反应式计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 3.29 mg O_2 、2.27 mg BOD_5 、3.57 mg 碱度,生成 0.40 mg 污泥。

由计算可以得出,短程硝化反应阶段会消耗大量碱度及一定量的氧气,短程反硝化阶段消耗一定量的碳源,同时生成部分碱度。

传统的短程硝化+短程反硝化路径与硝化+反硝化路径相同,即每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 7.14 或 7.11 mg 碱度;而 SHARON 工艺将二者进行融合,降低了碱度的消耗量。相比硝化+反硝化路径,短程硝化+短程反硝化路径可以减少氧气和碳源的消耗。

3.3 短程硝化+厌氧氨氧化路径

以往的脱氮途径不论路径长短总要经历反硝化阶段,而反硝化阶段普遍认为通过异养菌进行,需要大量碳源以支持反应进行,而随着厌氧氨氧化反应的发现,终于可以绕开这一必须消耗有机碳源的反应。

短程硝化厌氧氨氧化途径首先是利用硝酸菌和亚硝酸菌在动力学特性上存在的固有差异,通过控制硝化反应,使部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化到 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 阶段,造成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 的累积;再利用厌氧氨氧化菌将累积的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与剩余 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 结合反应生成 N_2 和少量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

① 厌氧氨氧化阶段

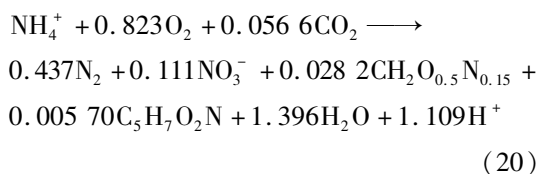
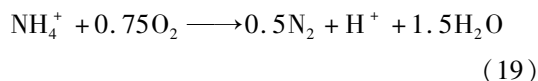
厌氧氨氧化菌负责厌氧氨氧化反应,分解代谢和综合反应方程如式(13)、(14)所示。

该阶段按生物代谢反应计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,

不消耗氧气,不消耗碳源,不消耗生成碱度;按综合反应计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,不消耗氧气和碳源,分别生成 0.23 mg 碱度和 0.11 mg 污泥。

② 综合方程

根据质量守恒定律,对式(1)、(2)、(13)、(14)进行合并后得出短程硝化+厌氧氨氧化过程的分解代谢和综合反应方程,具体如下:



理想状态下总过程按生物代谢反应计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 1.71 mg O_2 和 3.57 mg 碱度,不消耗碳源;按综合反应计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 1.88 mg O_2 和 3.96 mg 碱度,不消耗碳源,生成 0.11 mg 污泥。

由计算可得出,短程硝化反应阶段会消耗大量碱度及一定量的氧气,厌氧氨氧化阶段生成少量碱度。目前基于短程硝化-厌氧氨氧化原理的反应器主要有 SHARON-ANAMMOX 工艺和 CANON 工艺^[11-13]。SHARON-ANAMMOX 工艺,即短程硝化反应和厌氧氨氧化反应在不同反应器内进行,无法补充硝化过程损失的碱度,即分解代谢或综合反应条件下,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 7.14 或 7.11 mg 碱度;而 CANON 工艺两个反应在同一反应器内进行,厌氧氨氧化过程生成的碱度可以补充少量硝化过程损失的碱度。相比全程硝化反硝化和短程硝化反硝化,短程硝化厌氧氨氧化可以减少氧气消耗并且不需要添加碳源,代表了未来污水处理的发展趋势。

3.4 全程硝化+部分反硝化+厌氧氨氧化路径

因为短程硝化阶段难以控制,并且一旦破坏就难以修复,因此人们尝试在反硝化阶段控制生成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 再发生厌氧氨氧化反应^[14]。全程硝化+部分反硝化+厌氧氨氧化路径首先是利用硝化菌将部分 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化为 $\text{NO}_3^- - \text{N}$;再通过控制反硝化反应,使 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,造成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 累积;最后利用厌氧氨氧化菌将累积的 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 与剩余 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 反应生成 N_2 和少量 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 。

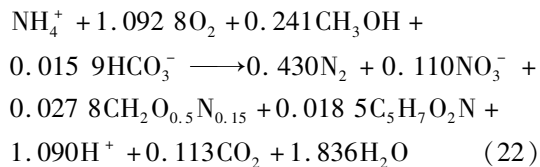
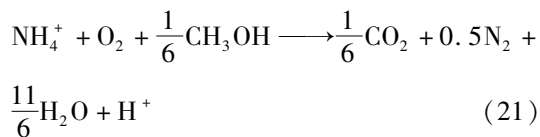
① 部分反硝化阶段

反硝化菌负责完成部分反硝化反应,分解代谢和综合反应方程如式(7)、(10)所示。

该阶段按生物代谢反应计算,每反应 1 mg $\text{NO}_3^- - \text{N}$,不消耗氧气,消耗 1.14 mg BOD_5 ,不消耗碱度;按综合反应计算,每反应 1 mg $\text{NO}_3^- - \text{N}$,不消耗氧气,消耗 1.45 mg BOD_5 ,分别生成 0.074 mg 碱度和 0.14 mg 污泥。

② 综合方程

根据质量守恒定律,对式(5)、(6)、(7)、(10)、(13)、(14)进行合并后得出全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨氧化过程的分解代谢和综合反应方程,具体如下:



理想状态下总过程按生物代谢反应计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 2.28 mg O_2 、0.57 mg BOD_5 和 3.57 mg 碱度;按综合反应计算,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,分别消耗 2.50 mg O_2 、0.83 mg BOD_5 和 3.95 mg 碱度,生成 0.21 mg 污泥。

由计算可以得出,全程硝化反应阶段会消耗大量碱度及氧气,部分反硝化阶段会消耗一定碳源,同时生成少量碱度。此外,厌氧氨氧化阶段也会生成少量碱度。

目前,在基于全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨

氧化原理的反应器中,反硝化和厌氧氨氧化反应池合并设计,但与硝化反应池分开设计^[15-16]。因此反硝化和厌氧氨氧化过程中生成的碱度无法补充硝化过程损失的碱度,即分解代谢或综合反应条件下,每反应 1 mg $\text{NH}_4^+ - \text{N}$,消耗 7.14 或 7.07 mg 碱度。与全程硝化反硝化和短程硝化反硝化相比,全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨氧化过程会消耗更少的氧气和碳源。其与短程硝化 + 厌氧氨氧化相比,虽然会消耗稍多的氧气和有机碳源,但是因为利用反应梯度差来控制部分反硝化反应能够生成 $\text{NO}_2^- - \text{N}$,因此全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨氧化仍有一定用武之地。

3.5 同步硝化 + 同步反硝化路径

同步硝化反硝化(SND)是将全程硝化 + 全程反硝化和短程硝化 + 短程反硝化相结合的一种技术,其利用氧浓度差,在反应池内好氧区发生硝化作用,将 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$,缺氧区进行反硝化作用将 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 和 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 还原为 N_2 。同步硝化反硝化途径将硝化反应和反硝化反应结合于一个反应器内^[6],无法明确给出准确数字,但同步硝化 + 同步反硝化过程介于式(1)、(7)与(2)、(9)之间。

硝化过程会消耗大量碱度而反硝化过程可以生成部分碱度,但由于反应器彼此孤立而无法达到节约的效果,而同步硝化反硝化将硝化反应和反硝化反应结合于一个反应器内,从而达到了节约碱度的效果。

分解代谢条件下,不同生物脱氮途径中氧气、碳源、碱度的消耗量如表1所示。包含合成代谢的综合反应条件下,不同生物脱氮途径中氧气、碳源、碱度的消耗量和活性污泥的产生量如表2所示。

表1 不同脱氮路径对氧气、碳源、碱度和污泥量的影响(分解代谢方程式)

Tab.1 Effect of different nitrogen removal pathways on oxygen, carbon source, alkalinity and sludge volume (catabolic equation)

脱氮路径	BOD_5 消耗量/ ($\text{mgCH}_3\text{OH} \cdot$ $\text{mg}^{-1}\text{NH}_4^+ - \text{N}$)	O_2 消耗量/ ($\text{mgO}_2 \cdot$ $\text{mg}^{-1}\text{NH}_4^+ - \text{N}$)	碱度消耗量/ ($\text{mgCaCO}_3 \cdot$ $\text{mg}^{-1}\text{NH}_4^+ - \text{N}$)
全程硝化 + 全程反硝化	2.86	4.57	7.14
短程硝化 + 短程反硝化(传统工艺)	1.71	3.43	7.14
短程硝化 + 短程反硝化(SHARON 工艺)	1.71	3.43	3.57
短程硝化 + 厌氧氨氧化(SHA-AMX 工艺)	0	1.71	7.14
短程硝化 + 厌氧氨氧化(CANON 工艺)	0	1.71	3.57
全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨氧化	0.57	2.28	7.14
同步硝化 + 同步反硝化	1.71 ~ 2.86	3.43 ~ 4.57	3.57 ~ 7.14

表 2 不同脱氮路径对氧气、碳源、碱度和污泥量的影响(综合方程式)

Tab. 2 Effect of different nitrogen removal pathways on oxygen, carbon source, alkalinity and sludge volume (comprehensive equation)

脱氮路径	BOD ₅ 消耗量/ (mgCH ₃ OH · mg ⁻¹ NH ₄ ⁺ - N)	O ₂ 消耗量/ (mgO ₂ · mg ⁻¹ NH ₄ ⁺ - N)	碱度消耗量/ (mgCaCO ₃ · mg ⁻¹ NH ₄ ⁺ - N)	污泥产量/ (mgMLSS · mg ⁻¹ NH ₄ ⁺ - N)
全程硝化 + 全程反硝化	3.64	4.32	7.07	0.57
短程硝化 + 短程反硝化(传统工艺)	2.27	3.29	7.11	0.40
短程硝化 + 短程反硝化(SHARON 工艺)	2.27	3.29	3.57	0.40
短程硝化 + 厌氧氨氧化(SHA-AMX 工艺)	0	1.88	7.11	0.11
短程硝化 + 厌氧氨氧化(CANON 工艺)	0	1.88	3.96	0.11
全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨氧化	0.83	2.50	7.07	0.21
同步硝化 + 同步反硝化	2.27 ~ 3.64	3.29 ~ 4.32	3.57 ~ 7.07	0.40 ~ 0.58

综上所述,短程硝化 + 短程反硝化路径相比全程硝化 + 全程反硝化路径,从分解代谢方程式看,可节约 25% 的 O₂、40% 的 BOD₅、50% 的碱度(SHARON 工艺);从综合代谢方程式看,可节约 24% 的 O₂、38% 的 BOD₅、50% 的碱度(SHARON 工艺),少产生 30% 的污泥。短程硝化 + 厌氧氨氧化路径相比全程硝化 + 全程反硝化路径,从分解代谢方程式看,可节约 62% 的 O₂、100% 的 BOD₅、50% 的碱度(CANON 工艺);从综合代谢方程式看,可节约 56% 的 O₂、100% 的 BOD₅、44% 的碱度(CANON 工艺),少产生 81% 的污泥。全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨氧化路径相比全程硝化 + 全程反硝化路径,从分解代谢方程式看,可节约 50% 的 O₂、80% 的 BOD₅;从综合代谢方程式看,可节约 42% 的 O₂、77% 的 BOD₅,少产生 63% 的污泥;相比短程硝化 + 短程反硝化路径,从分解代谢方程式看,可节约 34% 的 O₂、67% 的 BOD₅;从综合代谢方程式看,可节约 24% 的 O₂、63% 的 BOD₅,少产生 48% 的污泥。

4 结论

① 以 SHARON 工艺为代表的短程硝化 + 短程反硝化路径相比全程硝化 + 全程反硝化路径,可节约 24% 的 O₂、38% 的 BOD₅、50% 的碱度,少产生 30% 的污泥。

② 以 CANON 工艺为代表的短程硝化 + 厌氧氨氧化路径相比全程硝化 + 全程反硝化路径,可节约 56% 的 O₂、100% 的 BOD₅、44% 的碱度,少产生 81% 的污泥。

③ 全程硝化 + 部分反硝化 + 厌氧氨氧化路径相比全程硝化 + 全程反硝化路径,可节约 42% 的 O₂、77% 的 BOD₅,少产生 63% 的污泥;相比短程硝

化 + 短程反硝化路径,可节约 24% 的 O₂、63% 的 BOD₅,少产生 48% 的污泥。其在总体效果上虽不如短程硝化 + 厌氧氨氧化路径,但以氧气、碳源消耗量和污泥产生量衡量,则优于全程硝化 + 全程反硝化和传统短程硝化 + 短程反硝化路径。

参考文献:

- [1] 史国帅,白莉,周立光. 完全氨氧化菌及其硝化作用的研究进展[J]. 吉林建筑大学学报,2018,35(5): 57-63.
SHI Guoshuai, BAI Li, ZHOU Liguang. Research advances of complete ammonia oxidizers and its nitrification [J]. Journal of Jilin Jianzhu University, 2018,35(5):57-63 (in Chinese).
- [2] 刘晶静,吴伟祥,丁颖,等. 氨氧化古菌及其在氮循环中的重要作用[J]. 应用生态学报,2010,21(8): 2154-2160.
LIU Jingjing, WU Weixiang, DING Ying, et al. Ammonia-oxidizing archaea and their important roles in nitrogen biogeochemical cycling: a review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010,21(8):2154-2160 (in Chinese).
- [3] ISHII K, FUJITANI H, SOH K, et al. Enrichment and physiological characterization of a cold-adapted nitrite-oxidizing *Nitrotoga* sp. from an eelgrass sediment [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2017, 83(14):1-14.
- [4] 杨宗玥,付昆明,廖敏辉,等. 短程硝化过程 2 种亚硝酸盐氧化菌抑制策略探讨[J]. 环境工程学报,2019,13(1):222-231.
YANG Zongyue, FU Kunming, LIAO Minhui, et al. Discussion on inhibition strategies of two nitrite oxidizing bacteria in nitritation [J]. Chinese Journal of

- Environmental Engineering, 2019, 13(1): 222 – 231 (in Chinese).
- [5] 曹相生, 付昆明, 钱栋, 等. 甲醇为碳源时 C/N 对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响[J]. 化工学报, 2010, 61(11): 2938 – 2943.
- CAO Xiangsheng, FU Kunming, QIAN Dong, *et al.* Effect of C/N ratio on nitrite accumulation in denitrifying process with methanol as carbon source [J]. CIESC Journal, 2010, 61(11): 2938 – 2943 (in Chinese).
- [6] 贾文林. 同步硝化反硝化过程中 N_2O 释放特征及其机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
- JIA Wenlin. N_2O Emission Characteristics and Mechanisms during Simultaneous Nitrification and Denitrification Process [D]. Jinan: Shandong University, 2013 (in Chinese).
- [7] 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.
- FU Kunming. Start-up and Performance of Nitrogen Removal of CANON Reactor [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010 (in Chinese).
- [8] VAN NIFTRIKA L, JETTENA M M. Anaerobic ammonium-oxidizing bacteria: unique microorganisms with exceptional properties [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2012, 76(3): 585 – 596.
- [9] 吴传栋. 基于碳源调控的污泥堆肥氮素转化及氨同化作用机制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- WU Chuandong. Study on Nitrogen Transformation and Ammonia Assimilation during Sludge Composting Based on Carbon Source Control [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018 (in Chinese).
- [10] 王燕, 王淑莹, 孙洪伟, 等. pH 和 MLSS 对短程反硝化过程 NO_2^- 还原速率的影响[J]. 中国给水排水, 2010, 26(13): 25 – 28.
- WANG Yan, WANG Shuying, SUN Hongwei, *et al.* Effects of pH and MLSS on nitrite reduction rate in shortcut denitrification [J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(13): 25 – 28 (in Chinese).
- [11] 张自杰. 排水工程(下册)[M]. 5 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.
- ZHANG Zijie. Drainage Engineering (Volume 2) [M]. 5th ed. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015 (in Chinese).
- [12] 左早荣, 付昆明, 仇付国, 等. CANON 工艺的研究现状及面临困难分析[J]. 水处理技术, 2013, 39(9): 15 – 19.
- ZUO Zaorong, FU Kunming, QIU Fuguo, *et al.* Analysis of the research status and difficulties of CANON process [J]. Technology of Water Treatment, 2013, 39(9): 15 – 19 (in Chinese).
- [13] 付昆明, 仇付国, 左早荣. 厌氧氨氧化技术应用于市政污水处理的前景分析[J]. 中国给水排水, 2015, 31(4): 8 – 13.
- FU Kunming, QIU Fuguo, ZUO Zaorong. Prospective analysis of application of anaerobic ammonia oxidation technology to municipal wastewater treatment [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(4): 8 – 13 (in Chinese).
- [14] 付昆明, 曹相生, 孟雪征, 等. 污水反硝化过程中亚硝酸盐的积累规律[J]. 环境科学, 2011, 32(6): 1660 – 1664.
- FU Kunming, CAO Xiangsheng, MENG Xuezheng, *et al.* Characteristics of nitrite accumulation during wastewater denitrification [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2011, 32(6): 1660 – 1664 (in Chinese).
- [15] 王维奇, 王秀杰, 李军, 等. 部分反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮性能研究[J]. 中国环境科学, 2019, 39(2): 641 – 647.
- WANG Weiqi, WANG Xiujie, LI Jun, *et al.* Study on the performance of partial denitrification coupled with anaerobic ammonia oxidation for nitrogen removal [J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 641 – 647 (in Chinese).
- [16] 陈国燕, 彭党聪, 李惠娟, 等. 厌氧氨氧化耦合部分反硝化处理低浓度氨氮废水[J]. 环境工程学报, 2018, 12(7): 1888 – 1895.
- CHEN Guoyan, PENG Dangcong, LI Huijuan, *et al.* Treating low-nitrogenous wastewater by coupling anammox with partial denitrification [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2018, 12(7): 1888 – 1895 (in Chinese).

作者简介: 付昆明(1981 –), 男, 山东莒南人, 博士, 副教授, 研究方向为水处理技术。

E-mail: fukunming@163.com

收稿日期: 2019 – 09 – 13

修回日期: 2019 – 11 – 14

(编辑: 丁彩娟)