

流量分配对分段进水 A/O 工艺脱氮性能的影响

王伟, 王淑莹, 孙亚男, 殷芳芳, 彭永臻*

(北京工业大学环境与能源工程学院, 北京市水质科学与水环境恢复重点实验室, 北京 100124)

摘要:采用分段进水 A/O 中试脱氮系统处理实际生活污水, 为充分利用原水碳源, 采用流量分配系数法对进水流量进行分配. 在高、低负荷, 进水 COD/TKN 分别为 3、5、7、9、11、13 下, 研究流量分配比对分段进水 A/O 工艺脱氮性能的影响. 结果表明, 在高负荷、低 C/N(COD/TKN < 5) 下, 按流量分配系数分配流量, 会造成系统硝化容量浪费, 导致氨氮去除效果下降. 而在高负荷、高 C/N(COD/TKN > 9), 由于首端氨氮负荷过高, 氨氮不能完全氧化, 导致后段反硝化电子受体不足, 造成系统碳源浪费, 结果随 C/N 提高, 总氮(TN)去除率却逐渐降低. 而低负荷下, 由于不存在硝化限制, 系统 TN 去除率随进水 C/N 升高而升高, 当 C/N 为 13 时, 出水 TN < 2 mg/L, 最高 TN 去除率可达 97.6%. 高、低负荷, 不同 C/N 下的试验结果证明, 高 C/N 污水(C/N > α), 采用流量分配系数分配流量, 可充分利用原水碳源, 提高 TN 去除效率, 但需保证各段硝化完全. 而低 C/N 污水(C/N < α), C/N 是决定 TN 去除率的关键因素, 从保证硝化效果、利于硝化菌生长的角度考虑, 不宜采用流量分配系数法分配流量, 各段等负荷分配流量是一个可能的选择.

关键词:生活污水; 脱氮; 分段进水; A/O; 流量分配

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0096-06

Effects of Influent Flow Distribution Ratio on Nitrogen Removal in Step-Feed A/O Process

WANG Wei, WANG Shu-ying, SUN Ya-nan, YIN Fang-fang, PENG Yong-zhen

(Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: In order to optimize the utilization of influent carbon source, a feeding pattern so-called “coefficient of influent flow rate” was adopted in a pilot-scale step-feed A/O process treating domestic wastewater. The effects of influent flow distribution ratio on nitrogen removal efficiency were investigated when the reactor was operated at different loading rates and COD/TKN ratio of 3, 5, 7, 9, 11, 13, respectively. The experiment results indicated that the wasting of nitrification capacity occurred when high loading rate and low C/N ratio (COD/TKN < 5) were applied, while ammonia removal efficiency was decreased obviously at the same time. When the system was operated at high loading rate and high C/N ratios, the insufficient nitrification occurred in first stage, which resulted in the absence of electron acceptor in the downstream anoxic zone. Consequently, the total nitrogen (TN) removal efficiency was decreased even though the COD/TKN was higher than 9. However, due to the unlimited nitrification, the increased C/N ratio led to an enhancement of TN removal efficiency when the system was operated at low influent loading rate. When the influent COD/TKN was kept at 13 around, relatively low effluent TN concentration less than 2 mg/L, and a highest TN removal efficiency of 97.6% were achieved, respectively. For the feeding pattern selected for the study, the conclusions obtained from the experiment results showed that the influent flow coefficient method could use carbon source sufficiently and decrease the influent flow rate of last stage when the wastewater with higher C/N(C/N > α) was fed. However, a completely nitrification should be promised in each stage during this period. When the wastewater with low C/N ratio (C/N < α), due to the limited carbon source, C/N is the key parameter for TN removal efficiency. From the point view to favor the growth of nitrifiers and satisfy the ammonia effluent standard, the balanced loading of nitrifiers in each stage strategy maybe substitute the feeding pattern proposed in this study as an optimal choice.

Key words: domestic wastewater; nitrogen removal; step-feed; A/O; influent flow distribution

连续流分段进水 A/O 作为一种高效的污水生物脱氮工艺, 是新建、改扩建及要求深度脱氮的污水处理厂较好的选择^[1,2]. 同前置反硝化工艺相比, 该工艺所需反应体积相对较小^[3], 且无需设置硝化液内回流设施, 可节省内循环所需能量; 原水分散从缺氧区进入反应系统, 可充分利用原水有机碳源进行反硝化, 提高总氮去除效率^[4~7]. 此外, 原水分散进入反应器, 可有效避免或降低洪峰流量时污泥被冲刷的危险^[8]. 多点进水带来诸多好处的同时, 也使得

该工艺的运行变得相对复杂, 其中, 进水流量分配比是重要且难于优化的控制参数^[2,9,10].

分段进水 A/O 工艺中, 污水进入某一段缺氧区可为该缺氧区反硝化提供电子供体, 同时, 其携带的

收稿日期: 2008-01-23; 修订日期: 2008-04-04

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z319); 北京市教委科研基地、科技创新平台项目; 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20060005002)

作者简介: 王伟(1979~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为污水生物处理, E-mail: wang_wei2005@emails.bjtu.edu.cn

* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjtu.edu.cn

有机氮和氨氮在好氧区硝化后, 决定下一段缺氧区反硝化负荷及所需的电子供体的数量. 因此, 每一个缺氧区必须接受充足的污水以便提供足够的电子供体^[11], 但由于最后一段缺氧区进入的有机氮和氨氮在好氧区硝化后将以硝酸盐氮和亚硝酸盐氮形式出现在二沉池出水中, 因此最后一段进水量应最少. 此外, 原水分散进入反应器, 由于稀释作用, 各段悬浮固体浓度 (MLSS) 呈梯度分布, 且各段 MLSS 值随流量分配比的不同而不同, 因此, 流量分配比对系统各段硝化容量亦有重要影响. Olsson 等^[9] 从过程控制及保证硝化的角度提出名义流量分配比分配方法, 该方法保证各段硝化菌负荷相同, 利于硝化菌的生长, 但不能保证最后一段进水最少、出水 TN 浓度最低. 另有研究者提出流量分配系数的方法分配流量^[12-14], 并采用试验对其进行验证. 这种分配方法可充分利用原水碳源, 并保证最后一段进水量最少. 但其对不同水质污水脱氮性能的影响, 尚需更全面的研究, 其适用范围也需进一步界定. 为此, 本研究采用 4 段进水 A/O 中试试验系统处理实际生活污水, 在高、低 2 种负荷下, 对不同 C/N 比 (C/N 为 3、5、7、9、11、13) 生活污水应用流量分配系数法, 考察其在不同水质、水量下对系统脱氮性能的影响, 以期更加全面、深入评价该方法的适用性及适用范围, 为分段进水 A/O 工艺的实际运行提供参考.

1 流量分配系数与流量分配方法

首先假设系统各段硝化、反硝化容量充足, 且原水无硝酸盐和亚硝酸盐. 由图 1, 任意第 i 段缺氧区的 COD 和 NO_3^- -N 浓度 (S_i 和 N_i) 可以用原水 S_0 和

A_0 表示, 如式 (1), 式 (2):

$$S_i = \frac{r_i}{r_1 + r_2 + \cdots + r_i + r} S_0 \quad (1)$$

$$N_i = \frac{r_{i-1}}{r_1 + r_2 + \cdots + r_i + r} A_0 \quad (2)$$

这里 S_i 为第 i 段缺氧区 COD 浓度, N_i 为第 i 段缺氧区硝酸盐氮浓度. 第 i 段恰好完全反硝化所需的最小进水比可由式 (3) 表示:

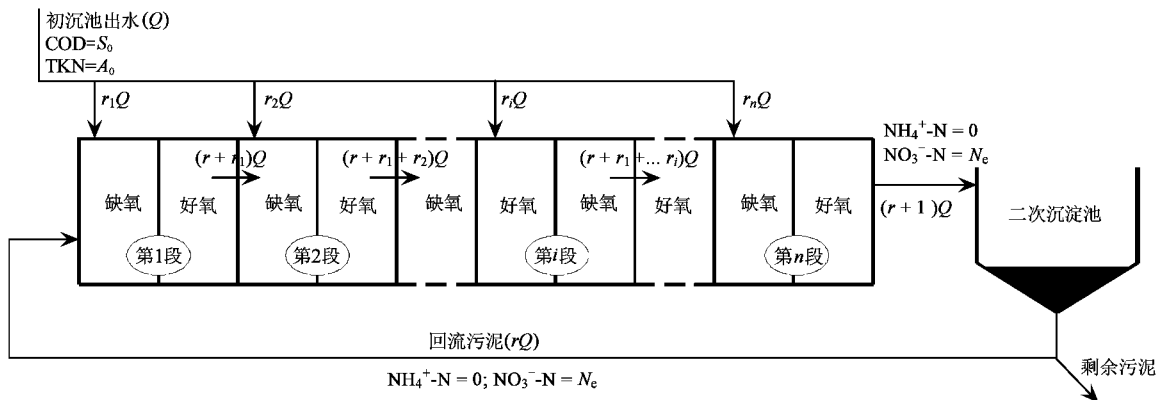
$$r_i = \alpha \frac{A_0}{S_0} r_{i-1} \quad (i = 2, 3, \cdots, n) \quad (3)$$

式中 α 是常数 (COD/NO_3^- -N), 它表示单位 NO_3^- -N 转化成氮气需要消耗的有机物质量, 可用 COD 表示. α 由试验来确定, 本研究所采用污水的 α 值为 7.0. 利用上式, 可以满足各段进入的原水恰好可以提供足够的电子供体将上一段产生的硝酸盐氮反硝化, 并使得最后一段进水最少, 出水硝酸盐氮浓度最低. 对于同一进水水质, $\alpha \cdot \frac{A_0}{S_0}$ 为定值, $\frac{r_i}{r_{i-1}}$ 则为定值, 此处定义 $\frac{r_i}{r_{i-1}} = \alpha \cdot \frac{A_0}{S_0} = \delta_{\text{opt}}$, 并称 δ_{opt} 为最优流量分配系数. 当进水 $\text{COD}/\text{TKN} \geq \alpha$, $\delta_{\text{opt}} \leq 1$, 流量沿系统流程呈递减分布; 当 $\text{COD}/\text{TKN} < \alpha$ 时, $\delta_{\text{opt}} > 1$, 流量沿系统流程方向呈递增分布.

2 材料与方法

2.1 中试试验装置

试验用中试反应器由有机玻璃制成, 结构如图 2 所示. 反应器工作容积为 320 L, 共分为 4 个段, 每段包括 1 个缺氧格室和 3 个好氧格室. 各段缺氧区



Q 为系统总进水量; r_i 为第 i 段进水与总进水量的比值; r 为污泥回流比; S_0 为原水 COD 浓度 (mg/L); A_0 为原水 TKN (总凯氏氮) 浓度 (mg/L); N_e 为出水硝酸盐氮浓度 (mg/L)

图 1 分段进水 A/O 工艺质量平衡示意

Fig. 1 Mass balance diagram of step-feed A/O process

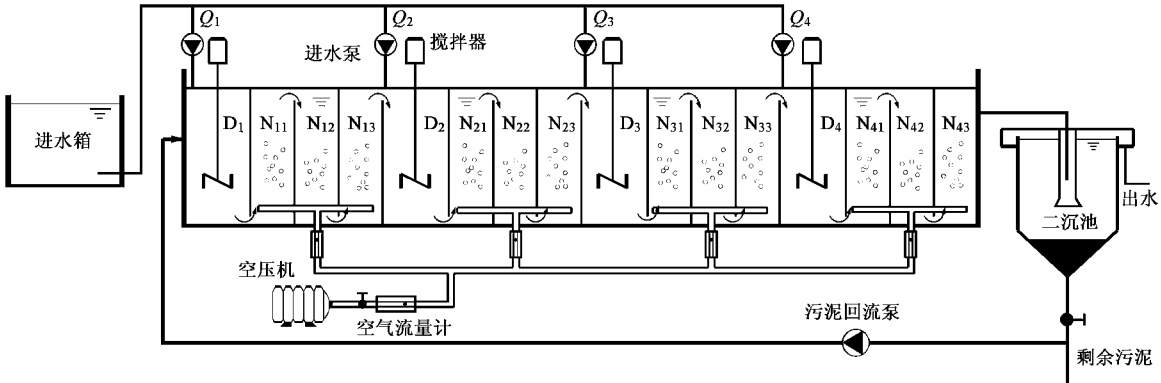


图 2 试验用分段进水 A/O 中试工艺系统

Fig.2 Schematic diagram of pilot-scale step-feed A/O process

与好氧区体积比均为 2:3.二沉池采用竖流式,体积 90 L.试验采用 5 台蠕动泵分别控制进水及污泥回流,采用空压机为系统好氧格室曝气,鼓风机出口安装空气流量计控制曝气量.采用 4 台电动搅拌机为缺氧区提供搅拌.

2.2 试验用水水质

试验用水为北京某住宅小区的生活污水(原水):COD 235~280 mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 44~55 mg/L, BOD_5 110~150 mg/L, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 0.05~1.42 mg/L, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 0.08~0.19 mg/L.整个试验期间,通过给原水投加少量乙醇和氯化铵的形式,控制进水 TKN(总凯氏氮)浓度为 48~52 mg/L, COD/TKN 分别为 3、5、7、9、11 和 13.

2.3 分析方法

COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、MLSS 等测定均采用国家标准方法^[15], TKN 采用德国 Behr 总凯氏氮定氮仪, DO、pH 和温度均采用 WTW340i 在线测定仪测定.

2.4 试验方法

试验温度控制在 $20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$.通过调整进水量来控制系统分别在高、低 2 个负荷下运行.高负荷时,进水量为 960 L/d, 相应总水力停留时间(HRT)为 8 h; 低负荷时进水量为 480 L/d, 相应总 HRT 为 16 h, 系统固体停留时间(SRT)为 15 d. 整个试验过程中维持总曝气量为 $2.25 \sim 3.5 \text{ m}^3/\text{h}$, 好氧区 DO 浓度为 $1.5 \sim 2.5 \text{ mg/L}$. 批量小试试验表明,所采用的生活污水 α 值为 7. 试验过程中控制进水 COD/TKN 分别为 3、5、7、9、11 和 13. 因此,可以确定各 COD/TKN 下的 δ_{opt} 及系统流量分配比(见表 1).

表 1 试验过程的运行条件							
Table 1 Operation conditions in the whole experiment							
序号	进水	COD/ TKN	δ_{opt}	各段进水流量分配比(Q)/%			
				第 1 段	第 2 段	第 3 段	第 4 段
1	144~168	3	2.33	4.8	11.0	26.0	59.0
2	242~266	5	1.40	14.0	20.0	27.0	38.0
3	338~355	7	1.00	25.0	25.0	25.0	25.0
4	425~462	9	0.78	35.0	27.0	21.0	16.0
5	548~572	11	0.64	43.0	28.0	18.0	12.0
6	629~648	13	0.54	50.0	27.0	15.0	8.0

3 结果与讨论

3.1 高、低负荷下系统硝化、反硝化

3.1.1 高负荷下,系统各段硝化、反硝化性能

图 3(a)和图 3(b)是高负荷,低 C/N(C/N 为 3 和 5), $\delta_{\text{opt}} > 1$ 时各段硝化、反硝化情况.理论分析时,假设各段硝化、反硝化完全,各段进水恰好可以将上一段产生的硝酸盐氮反硝化去除.但由图 3(a)和图 3(b),当 $\delta_{\text{opt}} > 1$ 时,两 C/N 下,系统各段氨氮均不能完全降解.当 C/N 为 3 时,系统除第 2 段外,各段氨氮均不能完全被氧化,出水氨氮浓度高达 18.72 mg/L. C/N 为 5 时,系统出水氨氮浓度为 10.95 mg/L. 分析 $\delta_{\text{opt}} > 1$ 时氨氮去除效率较低原因是由于 $\delta_{\text{opt}} > 1$ 时,各段进水沿流程呈递增趋势, C/N 越低,递增越明显.而分段进水系统各段悬浮固体浓度(MLSS)呈递减分布,各段硝化容量必然呈递减趋势分布.此外,系统平均氨氮负荷 [$\text{NH}_4^+\text{-N}/(\text{MLSS} \cdot t)$] 为 $0.040 \sim 0.044 \text{ g} \cdot (\text{g} \cdot \text{d})^{-1}$, 相对较高,必然导致系统最后两段氨氮负荷过高,从而不能硝化完全.从 C/N 比为 3 和 5 时的硝酸盐氮曲线可以看出,各缺氧区硝酸盐氮均不能完全去除.分析认为是系统出水氨氮浓度较高,使得随回流污泥回流到首段的氨氮浓度升高,

虽然一定程度上可充分利用第 1、2 段硝化容量,但硝化后产生的硝酸盐氮进入下一段缺氧区会远大于其反硝化容量,从而导致反硝化不完全. 图 3(c)是 C/N 为 7,即 $\delta_{\text{opt}} = 1$ 时各段硝化、反硝化效果图.从中可以看出,系统各段硝化、反硝化均进行得比较完全,但 3、4 段硝化、反硝化效果略有下降,这主要是污泥浓度成梯度分布,且在流量分配时未考虑污泥同化作用而造成的微小差别. 图 3(d)~(f)为高 C/N (C/N 为 9、11、13), $\delta_{\text{opt}} < 1$ 的情况.随进水 C/N 增大, δ_{opt} 逐渐增大,各段进水沿流程由高到低分配,可保证最后一段进水量最少.当各段缺氧区进水可以

将上一段产生的硝酸盐氮反硝化去除时,系统出水 TN 浓度由最后一段好氧区产生的硝酸盐氮浓度决定.由图 3 可知,C/N 从 9 增加到 13,系统第 1、2 段出水氨氮浓度逐渐升高,当 C/N 为 11 和 13 时,第 1 段进水氨氮负荷已明显超出处理容量,不能硝化完全.但 3 种情况下,系统出水氨氮浓度均小于 2 mg/L,这说明系统总硝化容量尚充足.但首段硝化效率降低,不能为下一段反硝化反应提供充足的电子受体,必然造成缺氧区碳源的浪费,图中缺氧区 D_2 硝酸盐氮为 0,也说明存在反硝化电子受体不足的情况.

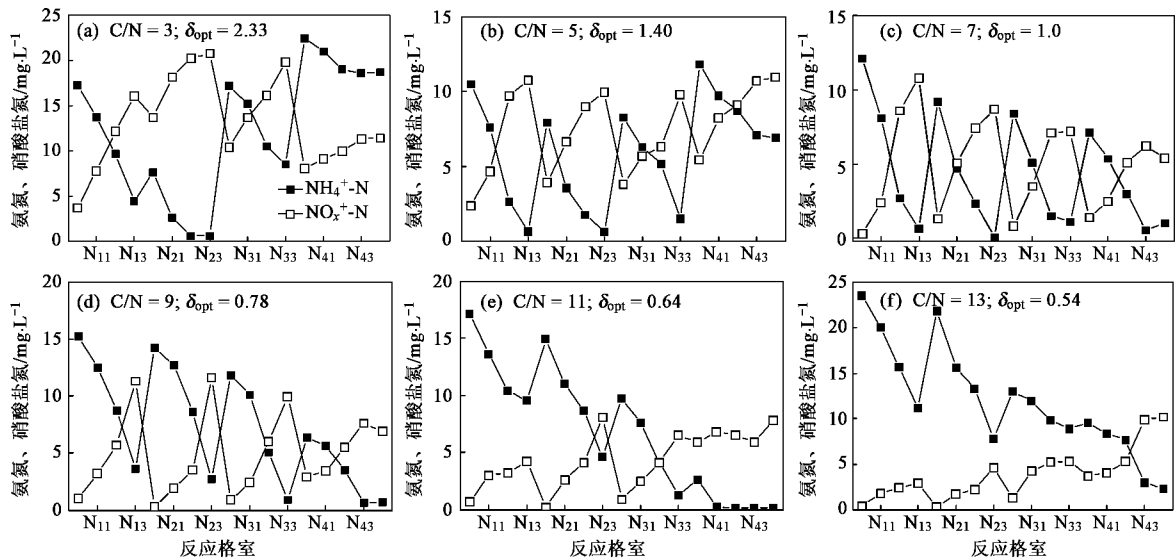


图 3 高负荷时,不同 C/N 下系统硝化、反硝化性能

Fig.3 Nitrification and denitrification performance at high load and different C/N ratios

3.1.2 低负荷时系统各段硝化、反硝化性能

低负荷、不同 C/N 时,系统各段硝化、反硝化性能见图 4. 可以看出,低负荷系统已不存在硝化限制,无论流量分配系数大小,系统出水氨氮浓度均较低,氨氮去除率均高于 98%,且各段好氧区氨氮均能完全硝化.排除硝化限制,不同 C/N、不同流量分配系数下,系统对氮的去除能力主要体现在反硝化上.在低负荷,低 C/N(C/N 为 3、5)时,由于原水碳源不足,回流污泥含有大量的硝酸盐氮,首端进水较小,无法将回流污泥中携带的硝酸盐氮完全反硝化,此时硝酸盐氮从首段开始不断向末段累积,出水硝酸盐氮较高,可达 30 mg/L;在低负荷、高 C/N(C/N 为 9、11、13)时,各缺氧区虽均有少量硝酸盐氮剩余,但其值较低,一般低于 2 mg/L,且随 C/N 升高,出水硝酸盐氮逐渐降低,当 C/N 升高到 13 时,出水硝酸

盐氮已达 1 mg/L 左右.此外,从图 4 还可以看出,高 C/N 时出水的硝酸盐氮主要来源于最后一段的进水,这和理论分析有很好的 consistency.

3.2 不同负荷时,流量分配对 TN 去除效果的影响

图 5 为不同负荷下,流量分配比对系统氨氮和 TN 去除率的影响.从中可知,在高负荷、低 C/N 时,由于进水沿流程呈递增趋势,而硝化容量呈递减分布,末端硝化菌的 F/M 过高,导致出水氨氮超标.而在低负荷、低 C/N 比时,则不存在硝化问题.尽管高、低负荷下,硝化效率存在较大差别,但低 C/N 下,由于碳源的限制,系统 TN 去除效率无较大变化.在 C/N 为 3 左右时,TN 去除率为 40% 左右,当 C/N 为 5 时,TN 去除率为 60% 左右.在中等 C/N 比时,低负荷系统的氨氮去除效果要好于高负荷情况,由于碳源不是限制因素,较好的硝化效果可以为反

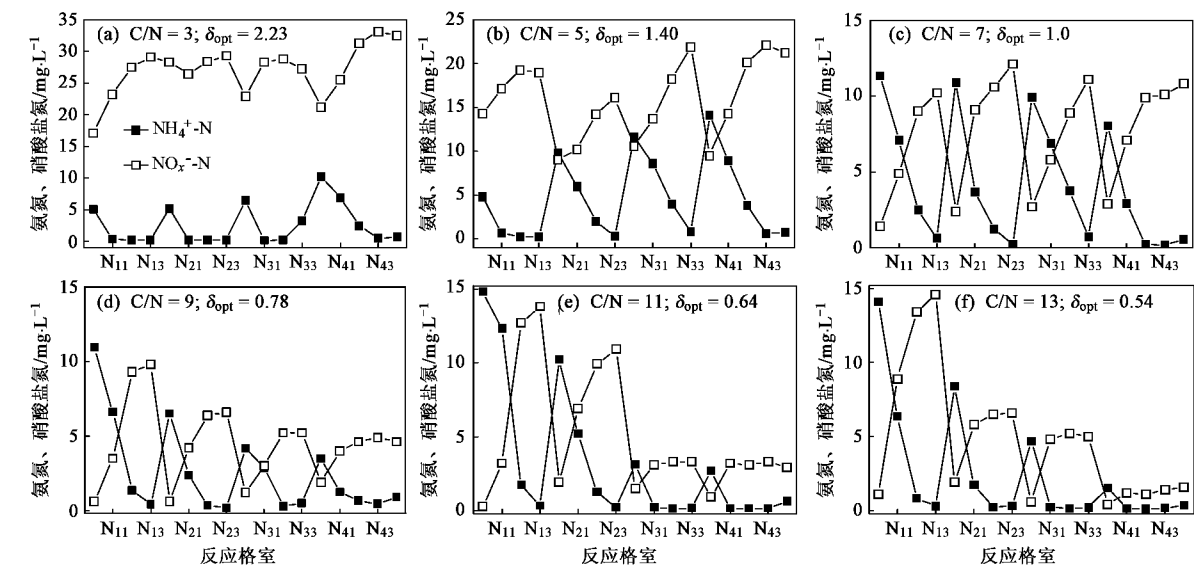


图 4 低负荷,不同 C/N 下系统硝化、反硝化性能

Fig.4 Nitritification and denitrification performance at low load and different C/N ratios

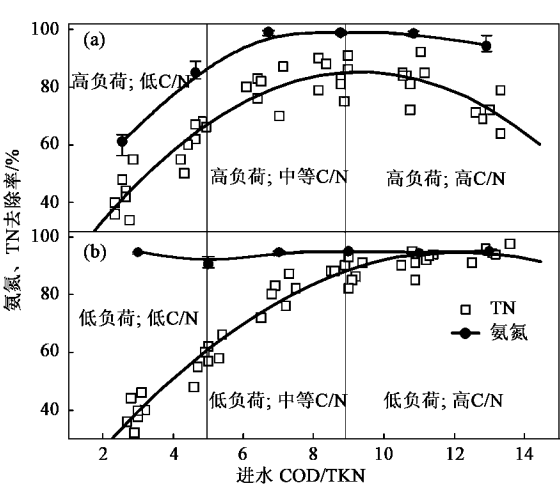


图 5 不同负荷下流量分配比对系统 TN 去除效果的影响

Fig.5 Influence of influent flow distribution on the TN nitrogen removal efficiency of system under different loads

硝化提供更为充足的电子受体,因此,可以强化硝酸盐氮的去除,提高 TN 去除效果.而高负荷、高 C/N 情况下,由于首段不能硝化完全,导致系统内一定碳源的浪费,故出水 TN 随 C/N 提高反而下降.而低负荷,高 C/N 情况下,TN 去除率随 C/N 提高而提高,最高去除率可达 97.6%,出水 TN < 2 mg/L,达到了深度脱氮.低负荷、高 C/N 试验结果和预期理论值有很好的-一致性,这也说明流量分配系数对低负荷、高 C/N 较为适用,此外,也说明应用流量分配系数时,保证各段及系统硝化效果至关重要.高、低负荷及不同的进水 C/N 下,系统的 TN 去除率见表 2.

表 2 不同 C/N 下系统 TN 去除率

Table 2 Total nitrogen removal efficiency under different C/N ratios

C/N	δ_{opt}	高负荷 TN 去除率/%			低负荷 TN 去除率/%		
		最大	最小	平均	最大	最小	平均
3	2.33	55.2	34.1	42.71	46.0	32.1	39.33
5	1.40	68.7	50.9	61.14	66.2	48.1	59.21
7	1.00	87.2	70.6	79.57	87.4	72.0	80.14
9	0.78	91.4	75.1	84.86	93.2	82.6	87.8
11	0.64	92.0	72.7	83.29	95.4	85.1	91.54
13	0.54	79.5	64.2	71.0	97.6	91.0	94.62

系统在高、低负荷下,进水 C/N、 δ_{opt} 和 TN 去除率三者之间的关系见图 6.从图 6(a)可以看出,随进水 C/N 升高, $1/\delta_{opt}$ 呈线性增高;但高负荷下,系统 TN 去除率并非不断升高,在较高 C/N 下,系统 TN 去除率却出现下降.而在低负荷时,由于系统不存在硝化问题,TN 去除率随 C/N 升高而不断升高.这也说明,在应用进水流量分配系数进行流量分配时,硝化作用和进水 C/N 同样重要,较好的硝化效果可以保证为反硝化提供充足的电子受体,不会浪费碳源,而较高的 C/N 可保证反硝化电子供体充足,但需要以硝化完全作为基础.在保证各段硝化完成的情况下,C/N 对 TN 去除率的决定因素才能体现出来.

4 结论

(1)采用流量分配系数分配流量,在高负荷、低 C/N 时,会造成首段硝化容量浪费,系统氨氮去除效果大幅降低;高负荷、高 C/N 时,首端氨氮负荷易超

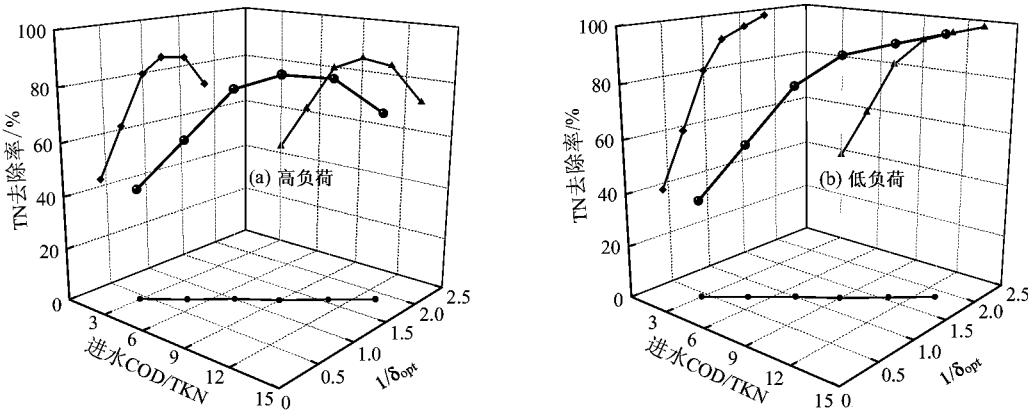


图 6 进水 C/N、进水流量分配系数和 TN 去除率三者之间的关系

Fig.6 Relationship of influent C/N ratios, influent flow distribution rate and TN removal efficiency

出硝化容量,硝化不完全不能为后续缺氧区提供充足反硝化电子受体,导致碳源浪费,TN 去除率降低;低负荷、低 C/N 时,硝化一般不受限制,C/N 高低是 TN 去除率的决定因素;低负荷、高 C/N 时,碳源充足,TN 去除率随 C/N 提高而提高.高、低负荷,中等 C/N 下,TN 去除率变化趋势一致,由于硝化上的微小改进,低负荷时 TN 去除率较高.

(2)应用流量分配系数时,硝化对系统脱氮性能的影响和原水 C/N 同样重要.较好的硝化效果可以保证为反硝化提供充足的电子受体,避免碳源浪费.较高的 C/N 可保证反硝化电子供体充足,但需要以完全硝化作为基础.高 C/N 污水适宜应用流量分配系数,但高负荷时需加强对硝化反应的控制,以避免造成碳源浪费的情况,保证处理效率.而低 C/N 污水,碳源是 TN 去除的限制因素,从利于硝化菌生长,满足氨氮排放标准的角度考虑,不建议采用流量分配系数进行分配,可根据系统各段硝化菌负荷相等原则,对低 C/N 污水进行流量分配.

参考文献:

[1] Metcalf & Eddy, Inc. Wastewater engineering: treatment and reuse [M]. 北京:清华大学出版社,2003.765-775.

[2] Fujii S. Theoretical analysis on nitrogen removal of the step-feed anoxic-oxic activated sludge process and its application for the optimal operation[J]. Wat Sci Technol, 1996, **34**(1-2): 459-466.

[3] Johnson B R, Goodwin S, Daigger G T, *et al.* A comparison between the theory and reality of full-scale step-feed nutrient removal systems[J]. Wat Sci Technol, 2005, **52**(10-11): 587-596.

[4] Crawford G, Black S, Stafford D. The step feed biological nutrient removal process at Lethbridge-over one full year of operation[R]. In:

Proceedings of 73rd Annual Conference and Exposition [C]. Anaheim, California, USA: 2000.

[5] 邱慎初,丁堂堂. 分段进水生物除磷脱氮工艺[J]. 中国给水排水,2003, **19**(4): 32-36.

[6] Göğün E, Artan N, Orhon D, *et al.* Evaluation of nitrogen removal by step feeding in large treatment plants [J]. Wat Sci Technol, 1996, **34**(1/2): 253-260.

[7] Larrea L, Larrea A, Ayesa E, *et al.* Development and verification of design and operation criteria for the step feed process with nitrogen removal[J]. Wat Sci Technol, 2001, **43**(1): 261-268.

[8] DeBaddilo C, Carrio L, Mahoney K, *et al.* Practical considerations for design of a step-feed biological nutrient removal system[J]. Florida Water Resources Journal, 2002, (1): 18-20.

[9] Olsson G, Nielsen M, Yuan Z, *et al.* Instrumentation, control and automation in wastewater systems[M]. London: IWA Publishing, 2005. 100-105.

[10] 王伟,王淑莹,王海东,等. 连续流分段进水生物脱氮工艺控制要点及优化[J]. 环境污染治理技术与设备,2006, **7**(10): 83-87.

[11] Chang H Y, Ouyang C F. Improvement of nitrogen and phosphorus removal in the anaerobic-oxic-anoxic-oxic (AOA) process by stepwise feeding[J]. Wat Sci Technol, 2000, **42**(3-4): 89-94.

[12] Tang C C, Kuo J, Weiss J S. Maximum nitrogen removal in the step-feed activated sludge process[J]. Wat Envir Res, 2007, **79**(4): 367-374.

[13] Zhu G B, Peng Y Z, Wang S Y, *et al.* Effect of influent flow rate distribution on the performance of step-feed biological nitrogen removal process[J]. Chemical Engineering Journal, 2007, **131**(1-3): 319-328.

[14] 祝贵兵. 缺氧好氧分段进水工艺深度脱氮性能及优化[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006. 61-89.

[15] 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,2006.