

论述与研究

分段进水生物脱氮工艺的优化控制运行研究

祝贵兵¹, 彭永臻^{1,2}, 吴淑云¹, 马 斌¹, 王亚宜^{2,3}

(1 哈尔滨工业大学 市政环境工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2 北京工业大学
北京市水质科学与水环境恢复工程重点实验室, 北京 100022; 3 浙江工业大学 建筑
工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘 要: 分段进水生物脱氮工艺在脱氮方面具有较强的优势。针对目前国内外对分段进水工艺的研究只是停留在过程仿真与表观处理效果的研究现状,采用模拟生活污水对该工艺的运行特性与优化控制进行了较详尽的基础研究。通过对 9 组不同 C/N 值条件下工艺的优化控制运行,补充完善流量的合理分配与各段容积的确定方法,得出了进水 C/N 值与工艺所能达到的最大流量分配系数间的数学关系表达式,以及在给定负荷条件下对总氮的去除率与流量分配系数之间的关系,为提高工艺脱氮效率的优化控制运行提供了理论基础。此外,还对分段进水工艺各段的硝化速率进行了探讨,并根据得到的运行控制规则进行了分段进水工艺的非稳态试验验证。

关键词: 活性污泥工艺; 生物脱氮; 流量分配; 分段进水; 硝化速率; 优化控制运行
中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2006)21-0001-05

Study on Optimal Operation of Step Feed Biological Nitrogen Removal Process

ZHU Gui-bing¹, PENG Yong-zhen^{1,2}, WU Shu-yun¹, MA Bin¹, WANG Ya-yi^{2,3}

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Beijing Key Laboratory of Water Quality Science and Water Environment Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3. School of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: The step feed biological nitrogen removal process (SFBNP) has distinct advantages in nitrogen removal. Currently, the researches all over the world on the step feed biological nitrogen removal process are limited only on the process emulation and the apparent removal efficiency. By using synthesized wastewater to simulate with the SFBNP process, the operational characteristics and the optimal controlled operation were more comprehensively investigated. The theory and method of the technique for the influent flow distribution and the volume of each phase are renewed when the operation is optimal controlled of this process under 9 groups each with different C/N ratios. The coefficient of the linear relation-

基金项目: 国家自然科学基金国际重大合作项目 (50521140075); 国家自然科学基金资助项目 (50478040)

ship between the maximum influent flow rate distribution ratio that the process can achieve and the influent C/N ratio is expressed In the relationship between the TP influenced by the load conditions and the coefficient of the maximum ratio of the influent flow rate distribution, and through the help of increasing the optimal controlled operation of the nitrogen removal efficiency, the theoretical basics are provided Furthermore, the nitrification rate in each phase of the 9 groups of the step feed technology was also investigated According to the operational controlled regulations deduced, the non-steady experiment of the SFBNP was verified

Key words: activated sludge process; biological nitrogen removal; flow rate distribution; step feed; nitrification rate; optimal operation

分段进水生物脱氮工艺具有如下优点:脱氮效率较高、无需内循环、污泥浓度高、污泥龄较长等。在过去的 20 年间,许多学者对其做了大量研究并得出了许多有意义的结论^[1~4]。例如,Lesouef 等通过仿真研究发现,相比于传统的前置硝化反硝化工艺,三段进水工艺能够节省 20% 的水力停留时间。美国的 Oregon 州于 2001 年 6 月建成了容积为 6 435 m³ 的三段式进水池,与原有相同尺寸的推流式前置反硝化曝气池相比,在泥龄、终沉池固体负荷和出水水质相同的条件下,其处理能力较大;在进水流量、池容和终沉池固体负荷相同的情况下,采用分段进水工艺则出水水质较好^[5]。Kitaya 等曾报道在生产性的分段进水工艺中,当第二段的进水量占总流量的比例为 35% 时,可获得 66% 的总氮去除率^[6]。Adam ski 等曾报道纽约市的 New town creek 污水处理厂由原有的二级处理升级为具有脱氮功能的深度处理厂时,将其中的一个廊道改建为分段进水形式运行^[7],在长达一年半的试验性运行中,分段进水工艺的出水 BOD₅ 和 SS 浓度分别为 21 mg/L 和 24 mg/L,相应的去除率为 82%~86.1% 和 84.5%~89.5%。

综合以往的研究结果可知,关于分段进水工艺的研究尚处于不成熟阶段,得到的一些成果仅仅是通过试验和仿真进行的分析和比较,而关于工艺本身的运行特性以及优化控制运行等方面的研究几乎还是空白。笔者的前期研究表明,采用统一的流量分配系数能够达到较高的总氮去除率。但在试验过程中也发现,如果仅仅调整流量分配而不调整各段的容积以及每段中缺氧区与好氧区的容积比,会带来两个不利影响:①各段的完全硝化反应得不到保

证;②如要达到较高的总氮去除率,则工艺需在较高的流量分配系数下运行,这就造成某些段的负荷过高,会导致严重的污泥膨胀^[8]。针对以上两个问题,笔者除了确定每一段的流量外,还对各段的容积分配及每一段中缺氧区与好氧区的容积比进行了研究,并考察了流量分配系数与进水 C/N 值以及总氮去除率之间的关系,以便达到优化控制系统运行的目的。

1 材料与方法

1.1 试验装置

试验采用 4 段进水形式,反应装置见图 1。

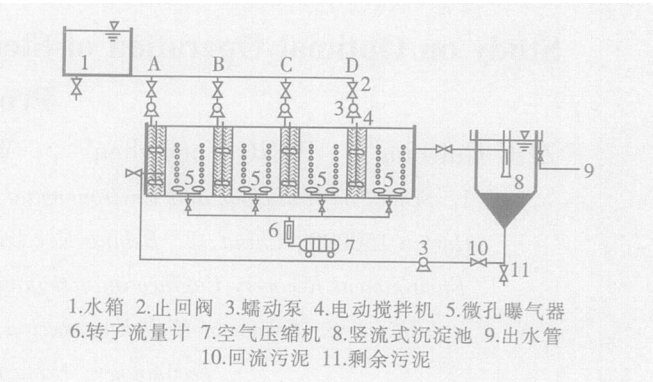


图 1 分段进水生物脱氮系统

Fig 1 Schematic diagram of step-feed biological nitrogen removal process

反应器总容积为 80 L。沿池长方向设置若干对竖向插槽,配以相应大小的插板来调整各段的容积以及每一段中缺氧区与好氧区的容积比。根据缺氧区所占比例,选择安放若干搅拌器以保证泥水混合均匀。在距池底 20 cm 的高度处设置若干取样口。采用鼓风曝气,由转子流量计控制曝气量。由温控仪控制温度为 (20 ±1) °C。竖流式沉淀池的沉

淀区呈圆柱形,直径为 35 cm;污泥斗为截头倒锥体,倾角为 60°;采用中心管进水、周边三角堰出水方式,进水和污泥回流分别由 5 台恒流泵调节,污泥回流比恒定为 50%。维持最后一段好氧池的污泥浓度为 2 500 mg/L。

1.2 试验水质

采用啤酒废水、NH₄Cl、MgSO₄、CaCl₂、KH₂PO₄和 NaHCO₃与自来水配制模拟生活污水。在试验中维持进水凯氏氮浓度为 42 mg/L,以比较出水总氮浓度及对总氮的去除率。

1.3 分析项目及方法

COD:重铬酸钾法;NH₄⁺-N:纳氏试剂分光光度法;NO₂⁻-N:N-(1-萘基)-乙二胺光度法;NO₃⁻-N:麝香草酚分光光度法;TN:过硫酸钾氧化-紫外分光光度法;TKN:加热消解回流法;MLSS:滤纸称重法;DO、温度:WTW DO测定仪;pH:WTW inolab pH level 2和 NTC30 电极;碱度:酸碱指示剂滴定法。

2 试验结果与讨论

2.1 流量与容积分配的确定

在分段进水生物脱氮工艺中,若使出水总氮浓度最低则应该满足:①上一段好氧区完全硝化产生的硝态氮在下一段的缺氧区被完全反硝化掉,即不产生硝态氮的积累;②最后一段的进水流量最小。

在一定的污泥浓度下,每一段完全硝化产生的硝态氮进行反硝化所需要的碳源由下一段的进水提供。因此在某一 C/N 值下,相邻两段必然存在一个

能满足此要求的流量比值。假设在最后两段间存在一个最大流量比值 λ_{max},那么第 1 段与第 2 段间以及第 2 段与第 3 段间亦必然存在一个流量比值 (λ₁、λ₂),在该值下可使上一段好氧区产生的硝态氮在下一段的缺氧区中被完全反硝化掉。由于每一段中的污泥浓度均随进水流量的变化而变化,所以每段中污泥的同化作用效果不同,即每两段间的流量比值亦不相同,但此值应在 λ_{max} 左右 (比 λ_{max} 值稍大)。对于四段或五段工艺,将存在 3~4 个流量比值,而分别得到这些流量比值无疑是一项非常繁琐且不切实际的工作。因此从系统优化运行、操作管理方便和控制流量分配的角度考虑,可用 λ_{max} 来代替 λ₁、λ₂,即存在统一的流量分配系数 λ_{max}。

在分段进水工艺中,所能达到的最大进水流量分配系数由进水 C/N 值所决定。在某一 C/N 值下此系数值惟一,且只能通过反复试验来求得。在确定了 λ_{max} 后即可通过公式 (1) 来分配各段的进水流量。

$$Q_{\text{Total}} = \lambda_{\text{max}}^{n-1} X + \lambda_{\text{max}}^{n-2} X + \cdots + \lambda_{\text{max}} X + X$$

(1)

式中 n——工艺的段数

X——最后一段的进水流量

在调节流量分配的同时,对各段的容积和各段中缺氧区与好氧区的容积比也进行了调整,主旨是保证各段的硝化反应均进行完全。经试验得到了在不同进水 C/N 值下工艺所能达到的最大进水流量分配系数及相应的容积分配,结果见表 1。

表 1 稳态下各段容积、流量及每段中缺氧区与好氧区的容积比

Tab 1 The volume and influent flow rate of each stage and the volume ratio of anoxic and aerobic zone in each stage

λ	进水 COD/ (mg· L ⁻¹)	第一段			第二段			第三段			第四段		
		流量 / %	总容积 %	缺氧容 积 / %	流量 / %	总容积 %	缺氧容 积 / %	流量 / %	总容积 %	缺氧容 积 / %	流量 / %	总容积 %	缺氧容 积 / %
0.5	203	6.67	13.75	54.54	13.33	20.00	25.00	26.67	25.00	25.00	53.33	42.50	22.06
0.75	232	15.42	17.50	28.57	20.57	23.75	21.05	27.42	26.25	21.43	36.57	32.50	21.15
1	256	25.00	29.38	10.64	25.00	25.00	25.00	25.00	23.75	26.32	25.00	21.88	28.57
1.5	335	41.53	33.75	12.96	27.69	25.00	25.00	18.46	21.25	29.41	12.30	20.00	31.25
2	385	53.20	41.25	9.09	26.60	26.25	23.80	13.30	16.87	37.03	6.67	15.00	37.50
2.5	460	61.57	45.62	6.84	24.63	25.00	25.00	9.85	17.50	32.14	3.94	11.87	42.10
3	530	67.50	51.25	4.88	22.50	23.75	31.58	7.50	15.63	34.00	2.50	9.38	46.67
3.5	597	71.90	57.50	4.07	20.54	21.25	38.23	5.87	13.75	36.36	1.67	8.75	42.85
4	656	75.29	60.62	3.60	18.82	19.37	45.16	4.70	12.50	37.50	1.17	8.12	38.46

注:流量是以每段流量占总流量(240 L/d)的百分比来表示;各段的容积是占反应器总容积(80 L)的百分比来表示;各段的缺氧区容积是占其某段容积的百分比来表示。

在所确定的进水流量分配系数下进行试验时,均获得了很高的总氮去除率,各段的硝化反应均进行得十分完全,缺氧区均无硝态氮富集,出水总氮浓度仅由出水硝态氮浓度所决定,见图 2 (以 $\lambda = 2$ 时为例,其他 λ 值下的变化规律与之相近)。

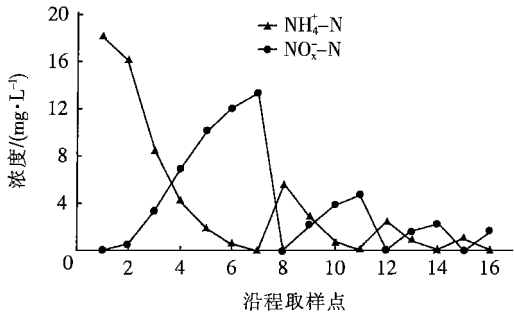


图 2 λ 为 2 时氨氮和硝态氮的沿程变化

Fig 2 Variation of $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ and $\text{NO}_3^- - \text{N}$ along the reactor ($\lambda = 2$)

在调节每段容积时,可借鉴每段流量占总流量的比值。由于每段的硝化能力不同,所以不存在严格的比例对应关系。而每一段中缺氧区与好氧区的容积比主要由进水水质,特别是溶解性可快速生物降解 COD、颗粒性可慢速生物降解 COD 占进水总 COD 的比例所决定。

2.2 脱氮效能分析

在分段进水工艺中所能达到的最大进水流量分配系数由进水的 C/N 值所决定。经测试,分段进水工艺的最大进水流量分配系数分别为 0.5、0.75、1、1.5、2、2.5、3、3.5 和 4 时,所需要的进水 C/N 值分别为 4.83、5.52、6.09、7.97、9.16、10.95、12.61、14.21 和 15.61。对这 9 组数据进行绘图,可得进水 C/N 值与工艺所能达到的最大流量分配系数的关系。经拟合发现,二者存在着很好的线性关系,线性回归系数 $R = 0.99987$ 。由此即可通过公式 (2),在得知进水 C/N 值的条件下计算工艺所能达到的最大流量分配系数,从而优化工艺的运行以获得较高的总氮去除率。

$$Y = 0.31536X - 0.89805 \quad (2)$$

式中 X ——进水 C/N

Y ——最大进水流量分配系数

在优化运行下,对进水流量分配系数与总氮去除率进行拟合,结果如图 3 所示,可知二者间存在指

数关系。

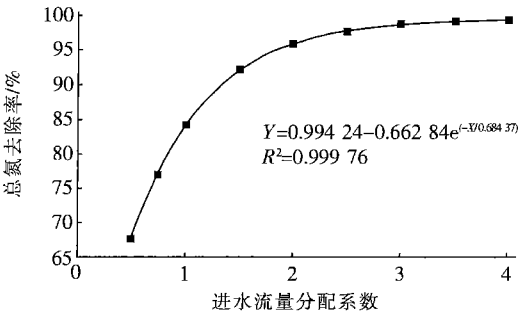


图 3 进水流量分配系数与总氮去除率的关系

Fig 3 Relationship between the influent distribution ratio and the total nitrogen removal efficiency

对不同进水流量分配系数下各段的硝化速率进行了考察,结果表明,分段进水工艺具有很高的硝化速率,均高于以往报道的传统硝化速率^[9]。在所进行的 9 组试验中,硝化速率沿反应器呈增加趋势,且保持良好的线性相关性。最高的硝化速率均出现在最后一段,能够保证对进水氨氮的最大氧化和降低出水总氮浓度。试验得出的硝化速率也证实了对流量和容积进行调整的正确性。图 4 给出了 λ 为 2 时各段的硝化速率 (其他 λ 值下的变化趋势与之相近)。

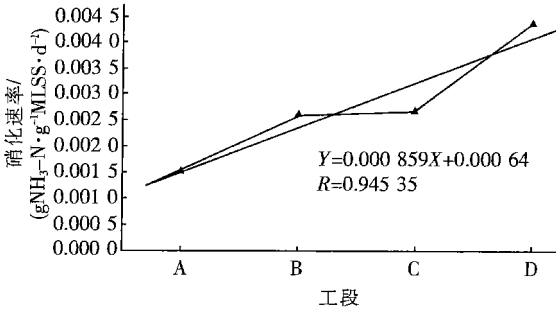


图 4 $\lambda = 2$ 时各段的硝化速率

Fig 4 Variations of nitrification rate in each stage along the reactor ($\lambda = 2$)

2.3 非稳态试验

根据上述试验得到的结论和规则,进行了为期 5 个月的非稳态运行试验。试验过程中保持进水量不变,而使进水水质随时间呈一定的变化。进水水质与试验结果分别见表 2 和图 5。

试验过程中各段的硝化反应均进行得很完全,没有氨氮被检出,各段的缺氧区均不存在硝态氮的富集。从图 5 可知,在非稳态试验过程中分段进水

工艺对总氮的去除率 > 90%,系统出水总氮 < 5 mg/L。而污泥体积指数为 82~97 mL /g(平均为 91 mL /g),体现了较好的稳定性。

表 2 进水水质

Tab 2 Wastewater characteristics $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

项目	最大值	最小值	平均值
COD	420	200	356
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	50	23	38
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	0.8	0	0.05
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	0.9	0	0.1
TKN	55	28	42

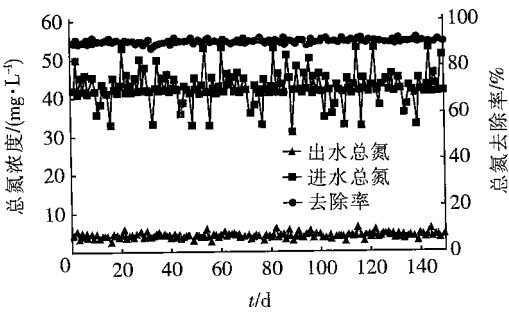


图 5 非稳态运行试验结果

Fig 5 The non-steady state experimental results of step-feed process in five months

3 结论

① 提出了进水流量分配系数的概念以优化流量分配。在进水 C/N 值分别为 4.83、5.52、6.09、7.97、9.16、10.95、12.61、14.21和 15.61的条件下,系统所能达到的最大流量分配系数分别为 0.5、0.75、1.15、2.25、3.35和 4。在确定各段的容积分配时可借鉴各段进水流量占总进水流量的百分比,但不存在严格的比例对应关系。

② 进水 C/N 值与工艺所能达到的最大进水流量分配系数间的关系为: $Y = 0.31536X - 0.89805$; 对总氮的去除率与进水流量分配系数间的关系为: $Y = 0.99424 - 0.66284e^{(-X/0.68437)}$ 。

③ 根据得到的运行规则,进行了为期 5 个月的非稳态运行试验,对总氮的去除率 > 90%,出水总氮 < 5 mg/L,污泥的沉降性能良好,污泥体积指数平均为 91 mL /g。

参考文献:

[1] Ayesa E, Oyarbide G, Larrea L, *et al* Observability of reduced-order models—Application to a model for control of Alpha process[J]. Water Sci Technol, 1995, 31 (2): 161 - 170

[2] Ayesa E, Goya B, Larrea A, *et al* Selection of operational strategies in activated sludge processes based on optimization algorithms[J]. Water Sci Technol, 1998, 37 (12): 327 - 334

[3] Lesouef A, Payraudeau M, Rogalla F, *et al* Optimizing nitrogen removal reactor configurations by on-site calibration of the WAPRC activated sludge model[J]. Water Sci Technol, 1992, 25 (6): 115 - 123

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

[5] Carrio L, Streett F, Mahoney K Practical consideration for design of a step feed biological nutrient removal system [A]. Proceedings of 73rd Annual Conference and Exposition[C]. USA: Anaheim, California, 2000

[6] Kitaya M, Hasuno T, Kitayama M. Operation conditions for step denitrification method and its effect[A]. Proc of Japan Sewerage Work Association [C]. Japan: Tokyo, 1994

[7] Adam ski R E, DeSantis V, Spangela, *et al* Step-feed operation at short detention times—a cost effective method for improving wastewater treatment[J]. Water Sci Technol, 2000, 41 (9): 15 - 20

[8] 祝贵兵,彭永臻,吴淑云,等. C/N 比对分段进水生物脱氮的影响 [J]. 中国环境科学, 2005, 25 (6): 641 - 645

[9] Zhang B R. Floc size distribution and bacterial activities in membrane separation activated sludge process for small-scale wastewater treatment/reclamation[J]. Water Sci Technol, 1997, 35 (6): 37 - 44

作者简介:祝贵兵 (1979 -), 男, 吉林安图人, 博士研究生, 研究方向为污水生物处理。
E - mail: guibingzhu@163.com
责任作者:彭永臻
收稿日期:2006 - 05 - 24