

低溶解氧污泥微膨胀节能方法在A/O中的试验验证

郭建华¹, 王淑莹², 彭永臻^{1, 2*}, 郑雅楠², 黄惠珩², 葛士建², 孙治荣²

(1. 哈尔滨工业大学市政与环境工程学院, 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)

摘要: 采用实际的生活污水, 在A/O系统中验证了低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法. 结果表明, A/O系统在微膨胀运行期间SVI值能稳定维持在150~230 mL/g之间, 单纯低溶解氧不会造成污泥沉降性能的严重恶化. 相对于高溶解氧、污泥沉降性能良好时的运行情况, 微膨胀期间COD和总氮去除率略有升高, 分别为86%和63%, 氨氮去除率略有下降, 平均为70%, 且约有10%~25%的氮可通过同步硝化反硝化去除. 丝状菌的网捕作用使出水的SS浓度明显减低, 出水浊度低于3 NTU. 维持DO=0.5 mg/L所需的理论供气量相对DO=2.0 mg/L时可节约17%, 对实际的小试结果比较发现可节约57%的曝气量.

关键词: 低溶解氧; 污泥微膨胀; 曝气能耗; 丝状菌; A/O工艺

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2008)12-3348-05

Energy Saving Achieved by Limited Filamentous Bulking Under Low Dissolved Oxygen: Experimental Validation in A/O Process

GUO Jian-hua¹, WANG Shu-ying², PENG Yong-zhen^{1, 2}, ZHENG Ya-nan², HUANG Hui-jun², GE Shi-jian², SUN Zhi-Rong²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; 2. Key Laboratory of Beijing for Water Quality Science and Water Environmental Recovery Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China)

Abstract: Preliminary studies had been conducted to determine the correctness of the theory and technique of energy saving achieved by limited filamentous bulking under low DO using a lab-scale A/O reactor with real domestic wastewater as the influent. The results showed that SVI could be maintained 150-230 mL/g and sludge settleability would not become very poor under the condition of low DO. During the period of limited filamentous bulking, COD and total nitrogen removal efficiencies were improved, and distinct simultaneous nitrification and denitrification (SND) was achieved, while ammonia removal efficiency would slightly decline with decreasing of DO, compared with the period of good settleability sludge under high DO. COD, ammonia and total nitrogen removal efficiencies were 86%, 70% and 63%, respectively. It was found that about 10%-25% nitrogen would be removed by SND based on the mass balance of nitrogen. Besides, SS in the effluent was almost negligible and the effluent turbidity was lower than 3 NTU. Significantly, aeration consumptions would be decreased by 17% under the condition with DO of 0.5 mg/L compared with 2.0 mg/L according to theoretical calculation of air requirements to keep different DO levels, which was about 57% in lab-scale reactor correspondingly.

Key words: low dissolved oxygen; limited filamentous bulking; aeration consumption; filamentous bacteria; predenitrification process (A/O process)

迄今为止, 国内外对污泥膨胀的机制、控制与预防进行了大量深入的研究, 但是还尚未出现利用丝状菌特性, 针对利用丝状菌污泥膨胀的节能理论与方法的研究. “低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法”是本课题组根据实际的污水处理厂运行情况, 首次在国内外提出的一种既节能又能改善污水处理效果(或不影响出水水质)的污水处理新方法. 文献[1]对污泥微膨胀节能方法的发现和提出, 以及理论基础进行了阐述和分析. 鉴于该方法来源于实际的生产实践, 需要进行大量的试验来验证该新方法. 本研究拟通过在A/O系统中采用实际的生活污水为处理对象, 来验证低溶解氧污泥微膨胀节能方法的正确性和合理性, 旨在为该方法的应用提供试验基础.

1 材料与方法

1.1 试验装置

采用A/O工艺, 试验装置如图1所示. 反应器最大工作体积为66 L, 试验期间分6个格室运行, 缺氧区和好氧区体积比为1:5. 二沉池有效体积为20.5 L, 采用中心管进水, 周边溢流水. 好氧区DO浓

收稿日期: 2007-12-13; 修订日期: 2008-01-25

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(2006AA06Z319); 国家自然科学基金项目(50778005); 北京市自然科学基金项目(8062006); 新加坡环境与水工业协会创新发展项目(EDB S07/I-53974092)

作者简介: 郭建华(1981~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污水的生物处理和污泥膨胀的预防与控制.

* 通讯联系人, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

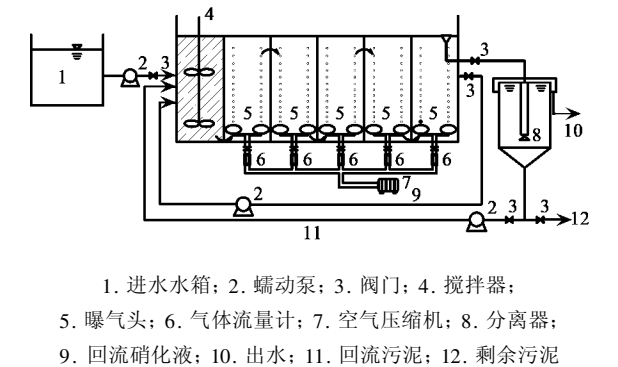


图1 A/O工艺试验装置

Fig.1 Schematic diagram of the A/O process

表1 试验水质特性							
Table 1 Wastewater characteristics							
项目	pH	COD /mg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₂ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ ⁻ -N /mg·L ⁻¹	TN /mg·L ⁻¹	碱度 /mg·L ⁻¹
范围	7.0~7.8	160~320	40~80	0.04~0.26	0.12~1.08	50~100	280~400

离子色谱仪(761 型)测定, NO₂⁻-N、NO₃⁻-N 采用 Metrohm 阴离子色谱仪(861 型)测定, 总氮(TN)采用 multi N/C 3000 分析仪 (Analytik Jena AG) 测定, 浊度采用 WTW Turb 55 测定, DO 采用 WTW 溶解氧测定仪(Multi 340i 型)测定, 并采用 OLYMPUS-BX52 显微镜对各运行阶段的污泥进行了镜检观察.

2 结果与讨论

2.1 低 DO 下污泥的沉降性能和丝状菌生长情况

采用实际的生活污水, 在 A/O 系统中验证了低溶解氧污泥微膨胀节能方法, 试验表明污泥微膨胀状态能够稳定维持. 当 DO 浓度从 2.0 mg/L 突然降低至 0.5 mg/L 时系统内活性污泥的 SVI 逐渐升高, 但并没有一直升高(图 2). 在 1 个月内 SVI 稳定维持在 150~230 mL/g 之间. 虽然有报道称当 SVI 维持在 80~120 mL/g^[2], 污泥的沉降性最佳, 但是微膨胀期间的 SVI 值并没有导致二沉池内出现污泥流失的现象, A/O 系统在此污泥沉降性下能稳定运行. 并对 A/O 系统在高低溶解氧运行下活性污泥进行了镜检分析, 发现高 DO 下很少有丝状菌繁殖, 污泥絮体结构紧密、形状规则, 并且出现了累枝虫和纤毛虫等原生动物(图 3). 对应的, 低 DO 下絮体结构也比较紧密, 与此同时出现了丝状菌的繁殖, 丝状菌从污泥絮体内延伸出来, 长度在 20~500 μm 之间(图 4), 但丝状菌指数大多在 3 以下. 低溶解氧引起了丝状菌的繁殖, 一定程度上削弱了污泥的沉降性, 但繁殖的丝状菌并没有导致严重的污泥膨胀. 根据骨架理论^[3],

度通过气体流量计控制, 曝气池内混合液悬浮固体浓度 (MLSS) 维持在 2 500~3 500 mg/L 之间, 反应器平均温度为 25℃, 硝化液回流比 150%, 污泥回流比 100%.

1.2 原水水质与污泥

本试验采用实际的生活污水, 每天从某学校生活小区化粪池抽取生活污水到贮水箱, 进水水质指标如表 1 所示.

1.3 分析项目及方法

水样经滤纸过滤后测定. COD、SV、MLSS 采用国家规定的标准方法测定, NH₄⁺-N 采用 Metrohm 阳

活性污泥絮体是由丝状菌形成絮体的骨架, 菌胶团菌等微生物产生多聚糖附着在其上面. 菌胶团细菌和丝状菌之间有一个合适的比例关系, 活性污泥中适当数量的丝状菌对于维持污泥的絮体结构是非常重要的. 因此, 如何调节溶解氧和其他运行参数引发适度的丝状菌繁殖, 而防止过度的丝状菌繁殖导致的严重污泥膨胀, 对于稳定维持污泥微膨胀十分重要.

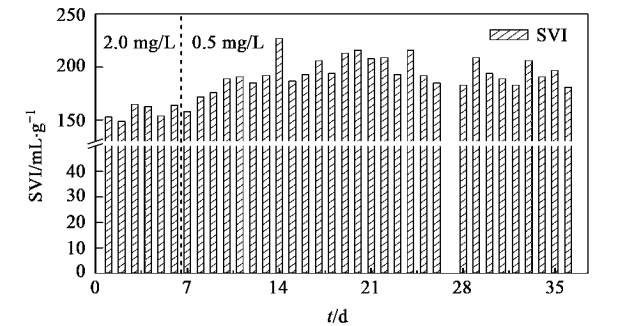


图2 突然降低 DO 对 SVI 的影响

Fig.2 Effect of reducing DO sharply on SVI

在城市污水处理过程中, 引发污泥膨胀的主要因素有污泥负荷、DO 浓度、低温和低 pH 值等. 而污泥微膨胀的维持主要是通过控制污水处理系统在合适的污泥负荷范围内运行, 选择合适的低溶解氧浓度来引发污泥微膨胀, 并调节其余的运行参数处于合适的范围, 来尽可能长地维持污泥微膨胀. 本研究中, 当调节 COD 污泥负荷在 0.2~0.35 kg/(kg·d), 溶解氧维持在 0.5~0.8 mg/L 之间, SVI 值能在长时

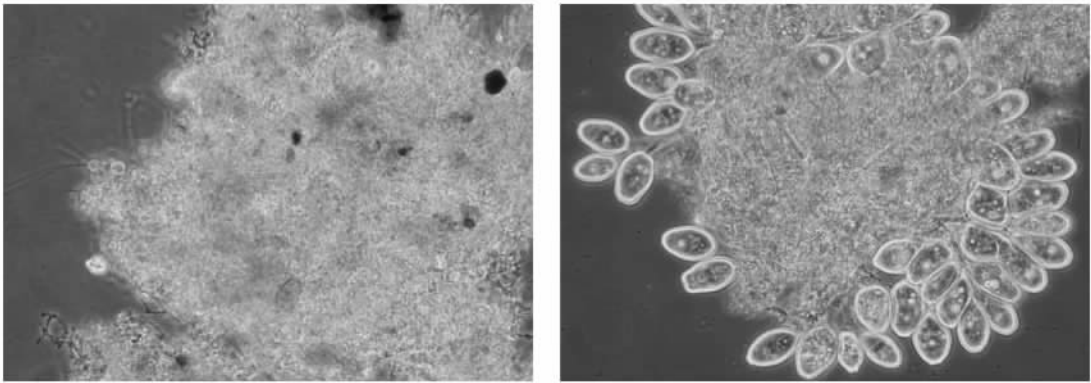


图 3 高溶解氧下絮体的形态结构(物镜:40 倍, ph2 相差)
Fig.3 Morphological characteristics of sludge floc under high DO (400 times, ph2)

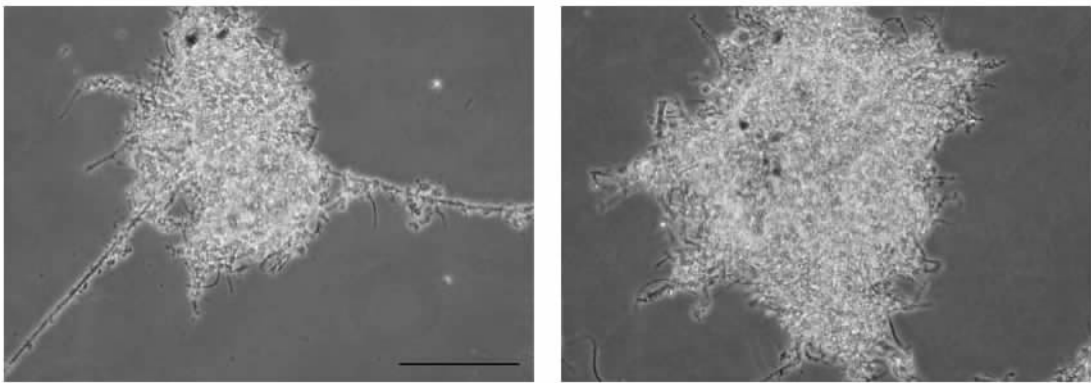


图 4 低溶解氧下絮体的形态结构(物镜:40 倍, ph2 相差)
Fig.4 Morphological characteristics of sludge floc under low DO (400 times, ph2)

间内稳定维持在 250 mL/g 以下, 不会引发二沉池内污泥的流失. 而过低 (< 0.20) 或过高 (> 0.38) 的污泥负荷都不适宜污泥微膨胀的维持, 尤其低负荷协同低溶解氧会引发较为严重的污泥膨胀. 本质上, 污泥微膨胀的维持关键在于对工艺参数的合理调节来实现丝状菌和菌胶团菌之间的种群优化, 使其二者平衡生长, 从而保持 SVI 值在一定范围内.

2.2 微膨胀状态下污染物的去除特性

图 5 给出了不同 DO 下 COD、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、TN 和 SS 的变化情况. DO 对于 COD 的去除率影响不大, 反而在低 DO 下 COD 的去除率略微升高, 这主要是由于系统内繁殖的丝状菌具有较强的降解低浓度底物能力, 并且丝状菌网状结构能网捕出水中的细小悬浮物. 随着 DO 的降低, 氨氮去除率有所下降, DO 为 2.5 和 0.5 mg/L 分别对应的氨氮去除率为 96% 和 70%. 然而, 总氮的去除率在 DO 为 0.5 mg/L 时较高, DO 为 2.5 和 0.5 mg/L 对应的总氮去除率分别为 57% 和 63%. 这一方面是由于低 DO 下回流的硝化液中的硝态氮基本被反硝化完全. 除此, 对于不同溶解氧条件下进行了氮平衡分析, 发现低 DO (平均为

方面低 DO 下易发生同步硝化反硝化.

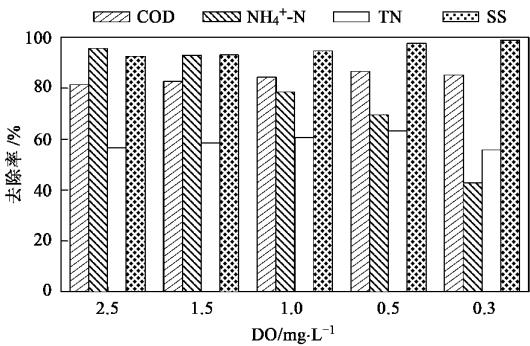
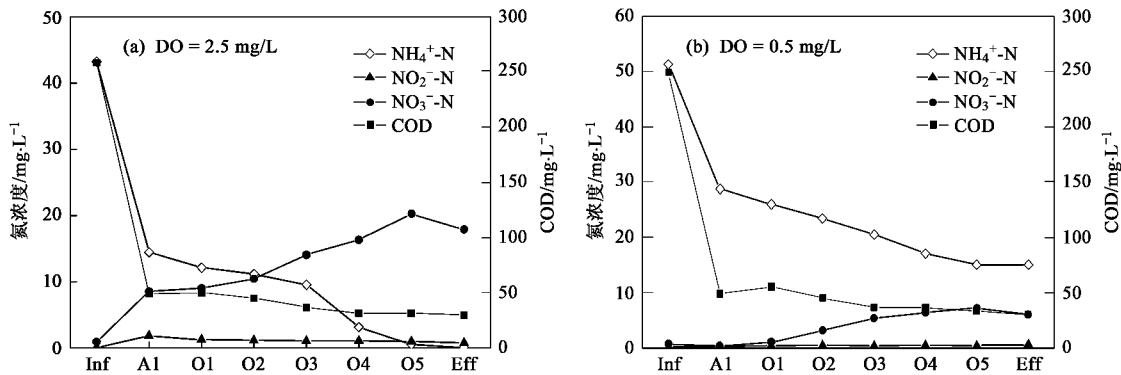


图 5 不同 DO 下各污染指标的去 除效果
Fig.5 Pollutants removal efficiencies under different DO levels

图 6 是高低 DO 下各污染指标沿反应器流程的典型变化曲线, DO 为 2.5 mg/L 时硝化基本能完全进行, 但反硝化不彻底, 出水中以硝酸盐氮为主, DO 为 0.5 mg/L 出水中以氨氮为主, 回流到缺氧区的硝化液中的硝态氮基本被反硝化完全. 除此, 对于不同溶解氧条件下进行了氮平衡分析, 发现低 DO (平均为

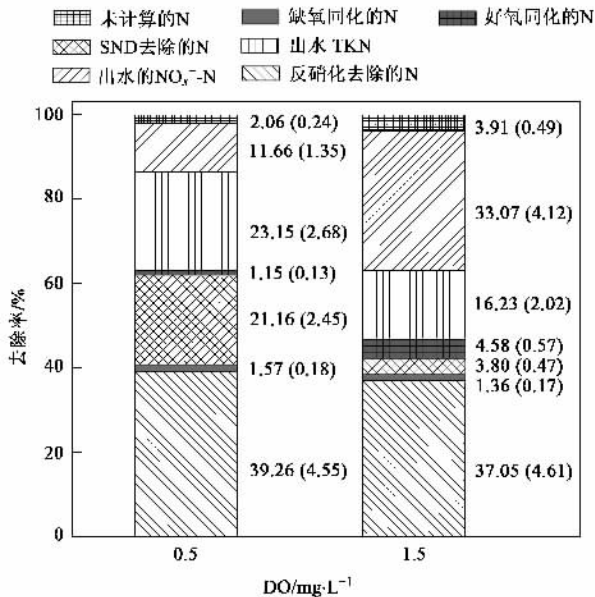


图中 Inf、A1、O1…O5 和 Eff 依次代表进水、缺氧 1、好氧 1 至好氧 5 和出水

图 6 高低 DO 下各污染指标沿反应器流程的典型变化曲线

Fig.6 Typical variations of COD, ammonia, nitrite and nitrate in every zone under high and low DO concentrations

0.5 mg/L)运行下系统存在明显的同步硝化反硝化现象, 占总氮大约 21.6% 的氮是通过同步硝化反硝化(SND)现象去除的, 而在 DO = 1.5 mg/L 时, DO 浓度破坏了污泥絮体内部的微缺氧环境, 系统中很少发现或基本上不存在 SND 现象(图 7). 对于在微膨胀运行期间的系统中氮平衡计算中发现, 大约有 10% ~ 25% 的氮可通过同步硝化反硝化去除.



图中括号外的数值是各部分每天去除氮所占总氮的百分数, 括号内数值是各部分每天去除氮的质量数, 单位为 g/d

图 7 高低 DO 下 A/O 系统内的氮平衡

Fig.7 Nitrogen mass balance under both high DO and low DO

低溶解氧丝状菌污泥微膨胀期间, 出水非常清澈. 试验期间进水的 SS 在 150 ~ 350 mg/L 之间变化, 当 DO 浓度高、污泥沉降性能良好时, 出水 SS 在 10 mg/L 左右, 可以看到很多的絮状悬浮物随出水排走.

而在丝状菌污泥微膨胀期间, 出水明显变得清澈, 沉淀池中几乎没有肉眼可见的悬浮物. 实测得出水 SS 在 5 mg/L 以下, 大多检测不出. 此外, 对 A/O 系统在高 DO (DO > 1.5 mg/L) 污泥沉降性良好时和在低 DO 下 (DO = 0.5 mg/L) 处于微膨胀期间进出水浊度的变化情况进行了考察. 进水浊度在 35 ~ 80 NTU 范围内波动, 微膨胀期间出水的浊度很低, 大多在 2 NTU 以下, 变化率平均值达 96% 以上, 而高 DO 下出水的浊度在 15 NTU 以上. 可见污泥处于微膨胀状态下出水澄清, 丝状菌对悬浮物网捕效果较好.

2.3 微膨胀运行下的节能效果

为考察微膨胀运行下的节能效果, 对一给定的污水处理厂维持不同 DO 所需要的供气量进行了理论计算. 设某城镇污水处理厂污水处理量 $Q = 10\,000\text{ m}^3/\text{d}$, 原污水经初次沉淀池处理后 BOD_5 值 $S_a = 150\text{ mg/L}$, 要求处理水的 BOD_5 值 $S_e = 15\text{ mg/L}$, 去除率 90%, MLVSS 为 2 000 mg/L, 曝气池有效容积为 3 000 m^3 , 空气扩散装置安设在水下 4.5 m 处. 现求定维持曝气池溶解氧浓度分别为 5.0、4.0、3.0、2.5、2.0、1.5、1.0、0.5、0.3 mg/L 时采用鼓风曝气的供气量. 计算过程中有关的各项系数为: 微生物对有机物氧化分解过程的需氧率 $a' = 0.5$, 微生物通过内源代谢的自身氧化过程的需氧率 $b' = 0.1$, 修正系数 $\alpha = 0.85$, 修正系数 $\beta = 0.95$, 压力修正系数 $\rho = 1$, 氧转移效率 $\text{EA} = 10\%$. 通过氧在液体中的传质公式^[4], 可算得不同溶解氧浓度下所需的供气量.

图 8 给出在不同溶解氧条件下, 该污水处理厂所需要的理论空气量, 以及对于 DO 在各个水平时相对于 DO = 2.0 mg/L 时理论供气量的节约百分含量或浪费百分含量. 从图 8 可看出, 随着 DO 浓度从

5.0 mg/L降低到 3.0 mg/L时,供气量降低的幅度较大;之后随 DO 浓度从 2.5 mg/L降低到 0.5 mg/L时,供气量降低的幅度略有减小,但对于实际的污水处理厂来说,将可节省大量的曝气能耗.维持曝气池中的溶解氧为 2.0 mg/L时,对于该污水处理厂所需要的供气量为55 135 m³/d;而维持曝气池中的溶解氧为 0.5 mg/L时,对于该污水处理厂所需要的供气量为45 828m³/d,相对节省了 17%,这对于实际的污水处理厂来说,节省的运行费用相当可观.

在A/O工艺中,采用气体流量计控制曝气量.不同溶解氧条件下对应的曝气量如表 2 所示.温度 25℃,控制 DO 在 0.5 mg/L时,曝气量平均为 0.3 m³/h,与 DO = 2.0 mg/L曝气量为 0.8 m³/h相比,节省了 57%.该结果在小试的反应器中获得,低 DO 相对于高 DO 节省的曝气量相对较多.在实际中,不同的

表 2 不同 DO 浓度条件下的曝气量

Table 2 Variation of airflow rate under different DO (25℃)						
DO/mg·L ⁻¹	2.5	2.0	1.5	1.0	0.5	0.3
曝气量/m ³ ·h ⁻¹	0.8±0.05	0.7±0.05	0.6±0.05	0.5±0.05	0.3±0.05	0.2±0.05

3 结论

(1) A/O系统中单纯靠低溶解氧不会造成污泥沉降性能的严重恶化,SVI 值能稳定维持在 150 ~ 230 mL/g之间.

(2) 相对于高溶解氧、污泥沉降性能良好时的运行情况,微膨胀期间 COD 和总氮去除率略有升高,分别为 86%和 63%,氨氮去除率略有下降,平均为 70%,且约有 10%~25%的氮可在好氧区通过同步硝化反硝化去除.丝状菌的网捕作用使出水的 SS 浓度明显减低,出水浊度低于 3 NTU.

(3) 对污水处理厂维持不同 DO 浓度所需的理论供气量的计算表明,维持 DO = 0.5 mg/L所需的理论供气量相对 DO = 2.0 mg/L时可节约 17%;实际的小试结果比较发现 DO = 0.5 mg/L所需的供气量相对 DO = 2.0 mg/L时可节约 57%.

(4) 污泥微膨胀的维持关键在于对工艺参数的

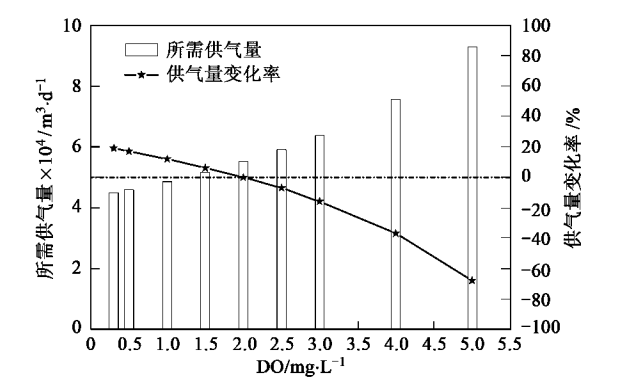


图 8 不同 DO 所需的理论供气量

Fig.8 Theoretical supply air amounts under different DO

溶解氧条件下对应的曝气量值的大小受很多因素的影响,比如温度、曝气设备、污水的性质、曝气池的构造和池深等^[5].

合理调节来实现丝状菌和菌胶团菌之间的种群优化,使其二者平衡生长,从而保持 SVI 值在一定范围内.

参考文献:

[1] 彭永臻,郭建华,王淑莹,等.低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法的发现、提出及理论基础[J].环境科学,2008,29(12):3342-3347.

[2] Jenkins D, Richard M G, Daigger G T. Manual on the causes and control of activated sludge bulking and other solids separation problems [M]. (3rd edition). London, UK: IWA Publishing, 2004. 1-7.

[3] Sezgin M, Jenkins D, Parker D S. A unified theory of filamentous activated sludge bulking [J]. J Water Pollut Control Fed, 1978, 50(2):362-381.

[4] 张自杰,林荣忱,金儒霖.排水工程[M].(第四版).北京:中国建筑工业出版社,2006. 148-150.

[5] Tchobanoglous G, Burton F L, Stensel H D. Wastewater Engineering: Treatment and Reuse [M]. (4th edition). New York: McGraw-Hill, 2003.425-430.