

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

彭永臻^{1,2}, 郭建华¹, 王淑莹², 陈滢^{2,3}

(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; 3. 四川大学建筑与环境学院, 成都 610065)

摘要: 预防和控制污泥膨胀一直是国内外研究的热点和难点, 但目前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。实际的污水处理厂运行结果表明, 供氧不足引起了污泥膨胀, 但并没有导致污泥流失, 相反出水水质有所改善, 出水 COD、SS 和 TP 的去除率得到了提高, 基于此提出了低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法。在阐述低溶解氧污泥微膨胀节能方法的发现和提出的基础上, 对低溶解氧引发丝状菌适度生长、丝状菌和微膨胀在提高出水水质的重要作用, 及利用低溶解氧微膨胀来节能的机制进行了理论分析。并对低溶解氧污泥微膨胀节能理论和方法的应用和研究方向进行了展望。

关键词: 低溶解氧; 污泥微膨胀; 曝气能耗; 丝状菌; 脱氮除磷

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2008)12-3342-06

Energy Saving Achieved by Limited Filamentous Bulking Under Low Dissolved Oxygen: Derivation, Originality and Theoretical Basis

PENG Yong-zhen^{1,2}, GUO Jian-hua¹, WANG Shu-ying², CHEN Ying^{2,3}

(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; 3. College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: How to prevent and control filamentous bulking sludge has being a research focus and attracted much attention. To date despite the extensive research that has been done on bulking sludge, filamentous bulking still occurs world-wide and a comprehensive solution does not seem to be available. Particularly, there are few studies about making use of the characteristics of filamentous bacteria and achieving energy saving by filamentous bulking. Limited filamentous bulking, a novel method for energy saving while equal or better treatment performance by allowing slight and controlled filamentous bulking sludge at low dissolved oxygen (DO), was proposed based on full-scale field observations. The practical operation showed that limited filamentous bulking resulted from a decline in DO concentration. COD, SS and TP removal could be enhanced and energy saving could be achieved by limited filamentous bulking at low DO. The derivation of limited filamentous bulking is introduced firstly, and then the theoretical fundamentals of the technique of limited filamentous bulking are presented and analyzed, including the occurrence of limited filamentous bulking caused by low DO, the enhanced effect of filamentous bacteria on pollutants removal and the energy saving mechanism by using limited filamentous bulking. Besides, the paper provides some new perspectives about the application and research direction of limited filamentous bulking in future.

Key words: low dissolved oxygen; limited filamentous bulking; aeration consumption; filamentous bacteria; biological nutrient removal

国内外 95 % 以上的城市污水和 50 % 左右的工业废水采用活性污泥法处理。污泥膨胀是活性污泥法问世以来在运行管理中一直困扰人们的难题之一, 不仅发生率高, 而且普遍存在。如何控制和预防污泥膨胀成了国内外研究的热点和难点。迄今为止, 国外对污泥膨胀的机制、控制与预防进行了大量深入的研究^[1], 这些研究主要集中在丝状菌的分离与鉴定上, 目前已经鉴别出了存在于不同条件下的各种优势丝状菌^[2,3], 并对各种丝状菌形态和生理特性进行了大量研究, 认识到了丝状菌在活性污泥絮体的组成、结构和形态上发挥了重要作用, 提出了低

溶解氧导致丝状菌增殖的理论解释^[4,5], 以及大量的关于污泥膨胀的控制与预防和数学模型的研究^[6~8]。由于活性污泥膨胀长期困扰污水处理厂的稳定运行, 国内对此也投入了大量的研究, 研究方向和国外的大致相同, 多集中污泥膨胀的预防与控制等方面^[9,10]。但是到目前为止国内外还尚未出现利

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 S07/1-53974092); 北京市重点实验室开放基金项目

作者简介: 彭永臻(1949~), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为污水的生物处理与过程控制, E-mail: pyz@bjut.edu.cn

用丝状菌生理生态特性、针对利用丝状菌污泥膨胀的节能理论与方法的报道。

本课题组在长期研究污泥膨胀控制与防治的过程中,发现很多污水处理厂由于供氧不足引起了污泥膨胀,但并没有导致污泥流失,相反出水水质有所改善。并基于对污水处理厂运行情况的实际考察,提出了低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法^[11]。本研究在介绍低溶解氧污泥微膨胀节能方法的发现和提出的基础上,对低溶解氧引发丝状菌适度生长、丝状菌和微膨胀在提高出水水质的重要作用,及利用低溶解氧微膨胀来节能的机制进行了理论分析,并对该方法的进一步研究和应用进行了展望。

1 低溶解氧污泥微膨胀节能方法的发现

北京市某污水处理厂承担着北京市总计 86 km² 流域范围内的污水治理,服务人口 48 万,占地 24 hm²,设计水量为 20 万 m³/d。该厂采用氧化沟工艺,污水经格栅、沉砂池预处理,先后进入厌氧选择池和氧化沟进行二级处理,氧化沟处理后的混合液经二沉池沉淀后上清液排放。该污水厂主要工艺参数为:污泥龄控制在 16 d 左右;回流比为 100 % ~ 120 %;污泥浓度在 4 000 ~ 6 000 mg/L;BOD 污泥负荷 0.03 ~ 0.12 kg/(kg·d);水力停留时间 17 h 左右。自 2000 年运行以来,处理效果稳定,出水水质很好,活性污泥沉降性能较好。但是在 2002 年冬天,曾因曝气设备发生故障,致使曝气池内溶解氧浓度降低,发生了丝状菌污泥膨胀,并持续了半年。对发生污泥膨胀前后的运行数据和污水处理效率进行分析,在低溶解氧条件下发生丝状菌污泥膨胀后,处理出水水质良好,对污染物的处理能力并没有下降。膨胀前后污水处理厂的运行情况对比具体可见表 1。污泥膨胀前后的处理出水水质变化不大,出水仍可达标排放。膨胀期间 TP 的去除率大大提高,由原来的 48.9 % 提高到 76.6 %。氨氮去除率降低主要是为了提高曝气池内的 DO 浓度,人为加大排泥量,降低了曝气池内的 MLSS 浓度所致。此外,需强调的是丝状菌污泥膨胀期间,二沉池出水非常清澈。

发生污泥膨胀后,除了考察出水水质外,另一个关键问题在于是否会出现污泥流失的问题,其关系到曝气池内能否维持原有污泥浓度,能否保证处理系统稳定运行。实际的运行情况表明,污泥膨胀本身只是使污泥的沉降性能变差,并没有发生污泥流失的现象,曝气池内污泥浓度维持在 4 000 ~ 6 000 mg/L,SVI 大多在 200 mL/g 左右。膨胀期间的 SV、SVI、MLSS

变化情况如图 1 所示。

表 1 污泥膨胀期间和污泥沉降性能良好时污染物的去除效率

项目	去除率		
	污泥沉降性能良好期间平均值/%	整个污泥膨胀期间平均值(6 个月)/%	污泥膨胀较严重期间平均值(1 个月)/%
COD	90.4	90.7	90.7
BOD ₅	94.8	94.6	95.1
SS	93.0	94.4	95.1
TN	75.0	68.8	75.7
TP	48.9	76.6	85.4
NH ₄ ⁺ -N	96.3	90.6	91.2

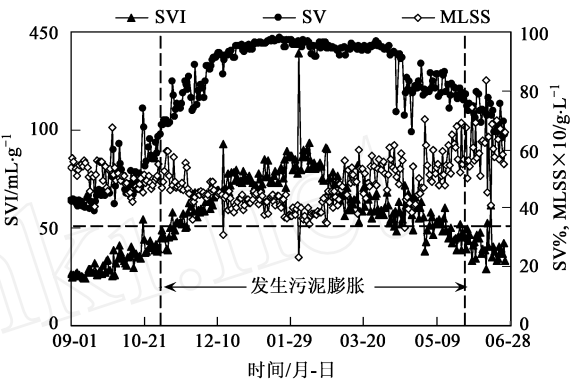


图 1 北京某污水处理厂发生污泥膨胀期间 SVI、SV 和 MLSS 的变化

Fig. 1 Variations of SVI, SV and MLSS during bulking in a WWTP

除此,该方法在重庆市忠县州屏污水处理厂实际运行中得到了进一步的验证。该污水处理厂采用改良 A/O(anoxic/aerobic, 缺氧/好氧)氧化沟工艺,为降低曝气能耗,特意将 3 台表面曝气机曝气减少为 2 台表面曝气机曝气,曝气池内 DO 浓度由原来的 2.0 mg/L 降低到 0.5 ~ 0.8 mg/L 之间,发生了丝状菌污泥微膨胀。但是对比发现,日耗电量节省了 20 %,总氮去除率从 45 % 增加到 75 %,总磷、COD、BOD 去除率仍然维持原来水平。

基于对上述实际污水处理厂的生产实践,发现低溶解氧引起了污泥膨胀,污泥膨胀程度轻微,没有导致二沉池内污泥流失,而且出水水质得到了一定改善,并达到了节能效果。在此基础上提出了低溶解氧污泥微膨胀节能理论与方法。

2 低溶解氧污泥微膨胀节能方法的提出

活性污泥法污水处理系统在低溶解氧运行下,会导致丝状菌污泥膨胀的发生。若能保证其它运行和环境条件正常,单纯由低溶解氧引发的污泥膨胀,

发生速度很慢,膨胀的程度也有限.低溶解氧活性污泥微膨胀节能方法是调整系统在低氧条件下运行,人为地促使丝状菌适量生长,调节其余参数在正常的范围内,并控制丝状菌增殖程度不影响沉淀池中的泥水分离.由于丝状菌延长的菌丝和较大的比表面积,具有较强的降解低浓度底物的能力,且能够形成网状污泥,更好地网捕水中细小的悬浮物.与正常溶解氧控制条件下的出水相比,不仅提高了对悬浮物的去除能力、得到更清澈的出水,同时由于大大节约了供氧量,从而也达到节能的目的.

低溶解氧污泥微膨胀从膨胀程度、引发因素、SVI范围、是否节能等几方面有别于经常发生的较为严重的污泥膨胀(表2),其主要区别在于污泥微膨胀是由单一的低DO引发的,膨胀程度轻微,SVI能维持在一定范围内(150~250 mL/g).二者最大的区别在于由低溶解氧引起的污泥微膨胀意味着污水的节能处理.

表2 污泥微膨胀与较严重污泥膨胀的区别
Table 2 Differences between limited filamentous bulking and serious filamentous bulking

项目	污泥微膨胀	较严重的污泥膨胀
膨胀程度	轻微	严重
SVI/mL·g ⁻¹	150~250	>250
是否引起污泥流失	不会	经常
引发因素	主要是低DO	众多因素:过高或过低负荷、低DO、低pH、低温度、冲击负荷、水质等
出水情况	COD和SS去除率提高,其余指标去除率可保持不变	污泥流失导致出水水质恶化
是否节能	节能	不节能

3 低溶解氧污泥微膨胀节能方法的理论基础

3.1 低溶解氧下丝状菌适度生长的理论解释

根据 Chudoba 等^[4,5]提出的动力选择性理论,活性污泥中存在菌胶团细菌和丝状菌两类不同的微生物.无论是丝状菌,还是菌胶团细菌的生长都需要氧,溶解氧是它们代谢活动过程中的基质,当曝气池内溶解氧不足时(即低溶解氧),溶解氧就成为微生物生长的限制性基质.由于丝状菌具有较低的氧饱和常数 K_s 和最大比生长速率 $\mu_{\max}$ 值^[6],在低溶解氧浓度条件下,具有相对较高的生长速率,从而具有竞争优势.另外,丝状菌还具有比表面积大的特点,结合扩散选择理论^[12,13],在低溶解氧条件下,丝状菌

将充分利用其生理和生态特性快速繁殖.综上,低溶解氧条件容易引发丝状菌污泥膨胀.

但是,对于低溶解氧是否会引起严重的污泥膨胀目前没有从理论层面进行过深入的探讨.从本课题组前期进行的大量试验和其他学者的研究报道看,单纯地靠低溶解氧不会导致恶性的污泥膨胀^[8,9].目前,很多学者已建立了关于污泥膨胀的数学模型. Cenens 等^[7]建立了基于动力学选择的污泥膨胀数学模型,该模型指出,如果不考虑丝状菌的骨架作用,仅仅靠丝状菌和菌胶团菌在底物竞争中的差异不会出现二者共存的现象.

3.2 丝状菌及微膨胀在提高出水水质中的重要作用

3.2.1 较高的COD去除率

微生物的比净增长速率由下式(1)确定:

$$\mu = Y \frac{\mu_{\max} S}{K_s + S} - K_d \quad (1)$$

式中, μ 、 $\mu_{\max}$ 分别为微生物的实际和最大比生长速率(d^{-1}), K_s 为半饱和常数,即当 $\mu = \mu_{\max}/2$ 时的底物浓度(mg/L), S 为底物浓度,包括DO浓度(mg/L), K_d 为微生物的衰减系数(d^{-1}), Y 为微生物产率系数(kg/kg).

按照式(1)可得处于稳态条件下的最小基质浓度($S_{\min}$)的表达式:

$$S_{\min} = K_d \cdot K_s / (Y\mu_{\max} - K_d) \quad (2)$$

在丝状菌与菌胶团菌共生的系统中,由于丝状菌具有较低的 K_s 和 $\mu_{\max}$,则其 $S_{\min}$ 值较小,因而丝状菌的存在保证获得低浓度的出水水质,从而保证净化效率.

此外,根据动力学选择理论,丝状菌和菌胶团菌是2种不同类型的微生物,如图2所示.当底物浓度低于 S_0 时,丝状菌的比增长速率(μ_1)高于菌胶团菌比增长速率(μ_2),而微生物比增长速率与底物比降解速率成正比,如下式所示:

$$\mu_1 = Y_1 v_1 \quad (3)$$

$$\mu_2 = Y_2 v_2 \quad (4)$$

式中, v_1 和 v_2 分别为丝状菌和菌胶团菌对应的底物比降解速率, Y_1 和 Y_2 分别是丝状菌和菌胶团菌的产率系数;将式(3)和(4)做比例,可以得出 $\frac{v_1}{v_2} =$

$\frac{\mu_1 Y_2}{\mu_2 Y_1}$,由于 $Y_2 > Y_1$, $\mu_1 > \mu_2$,可推知 $v_1 > v_2$,即在低浓度底物条件下,丝状菌对应的底物比降解速率高

于菌胶团菌对应的底物比降解速率。

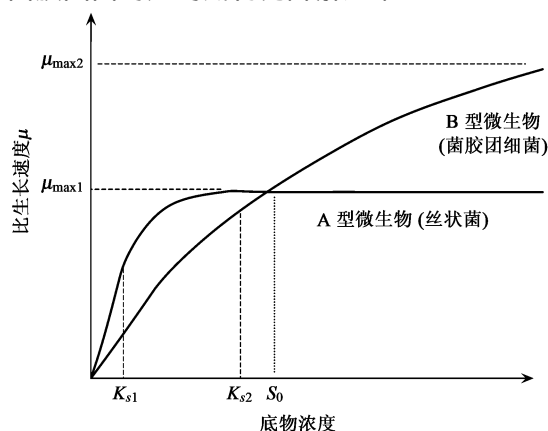


图2 2种微生物在不同底物浓度下的选择性竞争

Fig. 2 Competition of two kinds of microorganism at different substrate concentration

3.2.2 较高的SS去除率

菌胶团和丝状菌在竞争中出现严重失衡,将会对污水处理厂的正常运行带来不良影响.如果污水处理系统中菌胶团占绝对优势而丝状菌几乎不存在时,会出现由于丝状菌过少而缺少骨架作用导致的“针状污泥”(pin-point sludge),这种污泥絮体小,虽然污泥沉降性好,但是出水的SS和浊度会严重升高;如果系统中丝状菌繁殖过多,虽然出水的SS和浊度会明显降低,但污泥的沉降性会大大降低,出现严重的污泥膨胀会导致二沉池内污泥的流失,甚至整个处理系统将会崩溃.而适宜数量的丝状菌形成的污泥絮体网状结构在沉淀过程中对上升水流起到过滤作用,并吸附和截流水中细小颗粒物和游离细菌,又可保持良好的沉降性能,从而产生清澈的出水水质.

3.2.3 较高的脱氮除磷效率

采用低溶解氧污泥微膨胀方法不但不会造成系统COD和SS去除率的下降,反而会提高它们的去除率.但对于脱氮除磷系统来说,低溶解氧运行下系统的脱氮除磷效果会不会恶化更值得关注.

对于脱氮系统,溶解氧作为氨氧化菌(AOB)和亚硝酸氧化菌(NO_B)的反应底物,其值的高低严重影响硝化速率的大小.如果溶解氧过低,则硝化反应速率将会变慢,会导致一定的水力停留时间内硝化反应不能完全进行,出水氨氮浓度将会升高.系统长期地在低溶解氧下运行,可能出现亚硝酸氧化菌增长缓慢而逐渐从系统中淘洗出去.近几年许多研究表明,在较低的溶解氧条件下系统仍然能够维持较好的硝化效果,而且容易出现亚硝酸氮的积累,从而

实现短程硝化^[14~16]. Hanaki等^[17]的研究结果表明,当溶解氧浓度低于0.5 mg/L时,反应器中氨氧化菌的氨氧化速率并未受到影响.相反,反硝化过程应该在严格的缺氧条件下进行,如果缺氧区存在分子态氧气,则系统的反硝化效果将会恶化.对于A/O工艺,如果好氧区的溶解氧浓度过高,则硝化回流液中的溶解氧势必会破坏系统首端缺氧环境,从而导致反硝化效果的恶化,出水的硝态氮浓度升高.因此,要想获得较好的反硝化效果,应该控制好氧末端的溶解氧处于较低的水平.此外,实现同步硝化反硝化最重要的控制方法就是维持系统在较低的溶解氧条件下运行.大量的研究表明,维持好氧段在低溶解氧下运行能实现较好的同步硝化反硝化,这将会提高系统整体的脱氮效果^[18, 19].因此采用低溶解氧污泥微膨胀节能方法不一定会造成系统脱氮效果的下降.

对于生物强化除磷系统,控制厌氧段的厌氧条件极为重要,它直接影响到聚磷菌在此阶段的生长状况、释磷能力及有机基质合成PHA的能力,从而影响到其在好氧段的过量摄磷能力.若厌氧段存在溶解氧,一方面它将作为最终电子受体而抑制厌氧菌的发酵产酸作用,妨碍或抑制磷的释放;另一方面由于氧的存在而发生的好氧作用消耗了一定数量的有机基质,不利于聚磷菌贮存足够底物.厌氧段的DO应控制在0.2 mg/L以下.为最大限度地发挥聚磷菌的吸磷作用,必须在好氧段供给足够DO,以满足聚磷菌对其贮存的PHA降解时对最终电子受体DO的需求,实现最大限度地转化PHA而释放出足够的ATP,供其过量吸磷之需.一般应将此段的DO控制在2 mg/L左右.故较低的溶解氧对于放磷具有正面影响,而对于吸磷具有负面影响,但对于带有回流系统的除磷工艺,维持好氧段在低DO下(1 mg/L左右)运行,有利于厌氧段磷的释放,而且不会影响好氧段的吸磷.此外,陈滢等^[20]考察了低溶解氧条件下SBR系统的除磷性能,在全程低氧曝气的SBR系统内聚磷菌可得到富集,并出现了明显的放磷、过量吸磷现象.在最佳的BOD污泥负荷[0.26 kg/(kg·d)]条件下,其COD去除率为85%,除磷效率为96%,出水PO₄³⁻-P的浓度<1.0 mg/L.因此,采用低溶解氧污泥微膨胀节能方法不一定会造成系统除磷效果的下降.而且有研究报道采用厌氧-低氧的运行方式,不仅能保证好氧段磷的充分吸收,而且在好氧段实现了同步硝化反硝化,这进一步节约了曝气能耗^[21].

3.3 利用低溶解氧污泥微膨胀节能的原理

由双膜理论可知,在气膜中存在氧的分压浓度,在液膜中存在氧的浓度梯度,它们是氧转移的推动力.而氧难溶于水,因此氧转移决定性的阻力集中在液膜上,通过液膜的转移速度是氧转移过程的控制速度.而氧气在混合液中的传递速度由式(5)表示:

$$\frac{dc}{dt} = K_{La}(c_s - c) \quad (5)$$

式中, K_{La} 为氧总转移系数(1/h), c_s 和 c 分别是氧的饱和浓度和液体中氧的浓度(mg/L).

当混合液中氧的浓度维持在较低的水平时,相对于高溶解氧比,由于具有较大的推动力,氧的转移速率也比高溶解氧时高.当混合液中氧的浓度为零时,由于具有最大的推动力,对应的氧转移速率最大.因此,如果采用低溶解氧污泥微膨胀方法处理污水,将会提高氧转移速率,从而达到节能的效果.

4 应用与展望

由低溶解氧污泥微膨胀节能理论和方法的发现、提出和理论基础分析可得出,该方法是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,其更新了解决污泥膨胀的思想和观念,对污泥膨胀问题的研究提出了新的挑战,也符合当前污水处理实现节能降耗的需求.

而污泥膨胀通常是在多种因素协同作用下引发的,单纯低溶解氧浓度诱发污泥膨胀,速度很慢,程度也有限.预防与控制污泥膨胀,应当主要针对低 DO 以外的因素引起的膨胀加以预防与控制.例如,低有机物负荷(即污泥龄长)、缺少 N 和 P、酸化废水(低 pH)、SS 少而溶解性有机物多的污水及其他原因.而对于低 DO,需产生适度的污泥微膨胀,如何与其他因素配合与协调(如负荷、曝气池中的流态)控制适当的 DO 浓度,这需要研究维持低溶解氧丝状菌污泥微膨胀状态的控制条件,溶解氧浓度的降低的限度和污水处理系统可承受的膨胀程度.今后的研究应确定有关活性污泥微膨胀节能方法具体实施的有关参数和控制策略,为该方法在污水厂实施提供可行的操作办法.此外,建立可靠的能及时预防和解决污泥膨胀兼稳定维持污泥微膨胀的专家系统将会对该方法的推广和应用具有重要的意义.

5 结论

(1) 实际的污水处理厂运行结果表明,供氧不足引起了污泥膨胀,但并没有导致污泥流失,相反出水水质有所改善,出水 COD、SS 和 TP 的去除率得到

了提高.

(2) 单纯的低溶解氧会引发丝状菌适度生长和污泥微膨胀,借助丝状菌比表面积大、网捕能力及降解低浓度基质能力强的生理生态特性可提高出水水质,更重要的是维持低溶解氧污泥微膨胀可实现污水节能处理的目的.

(3) 研究活性污泥微膨胀节能方法具体实施的有关参数和稳定维持的控制策略,建立可靠的能及时预防和解决污泥膨胀兼稳定维持污泥微膨胀的专家系统将是今后研究的重点.

参考文献:

- [1] Martins A M P, Pagilla K, Heijnen J J, *et al.* Filamentous bulking sludge—a critical review [J]. *Water Res*, 2004, **38**:793-817.
- [2] Eikelboom D H. Process control of activated sludge plants by microscopic investigation [M]. London, UK: IWA Publishing, 2000.
- [3] 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.
- [4] Chudoba J, Ottová V, Madera V. Control of activated sludge filamentous bulking. Effect of the hydraulic regime or degree of mixing in an aeration tank [J]. *Water Res*, 1973, **7**:1163-1182.
- [5] Chudoba J, Grau P, Ottová V. Control of activated sludge filamentous bulking. Selection of microorganism by means of a selector [J]. *Water Res*, 1973, **7**:1389-1406.
- [6] Chieas C, Robert L. Growth and Control of Filamentous Microbes in Activated Sludge: An Integrated Hypothesis [J]. *Water Res*, 1985, **19**(4): 68-72.
- [7] Cenens C, Smets I Y, Ryckaert V, *et al.* Modeling the competition between floc-forming and filamentous bacteria in activated sludge waste water treatment systems. Evaluation of mathematical models based on kinetic selection theory [J]. *Water Res*, 2000, **34**(9): 2525-2534.
- [8] Cenens C, Smets I Y, Van Impe J F. Modeling the competition between floc-forming and filamentous bacteria in activated sludge waste water treatment systems. A prototype mathematical model based on kinetic selection and filamentous backbone theory [J]. *Water Res*, 2000, **34**(9): 2535-2541.
- [9] 白璐,王淑莹,彭永臻,等.低溶解氧条件下活性污泥沉降性的研究[J]. *工业水处理*, 2006, **26**(5): 54-56.
- [10] 周利,彭永臻.丝状菌污泥膨胀的影响因素与控制[J]. *环境科学进展*, 1999, **7**(1): 88-93.
- [11] 陈滢.生活污水的短程硝化反硝化和污泥膨胀的研究[D].北京:北京工业大学, 2004. 116-123.
- [12] Martins A M P, Heijnen J J, van Loosdrecht M C M. Effect of feeding pattern and storage on the sludge settleability under aerobic conditions [J]. *Water Res*, 2003, **37**(11): 2555-2570.
- [13] Martins A M P, Van Loosdrecht M C M, Heijnen J J. Effect of

- dissolved oxygen concentration on the sludge settleability [J]. Appl Microbiol Biotechnol, 2003, **62**(5-6):586-593.
- [14] Allferi P, Valter T, Carmela L. Influence of aeration and sludge retention time on ammonium oxidation to nitrite and nitrate [J]. Water Res, 2002, **36**: 2541-2546.
- [15] Wang J L, Yang N. Partial nitrification under limited dissolved oxygen conditions [J]. Process Biochemistry, 2004, **39**(10):1223-1229.
- [16] Peng Y Z, Chen Y, Peng C Y, *et al.* Nitrite accumulation by aeration controlled in sequencing batch reactors treating domestic wastewater [J]. Water Sci Tech, 2005, **50**(10):35-43.
- [17] Hanaki K, Wantwin C, Ohgaki S. Nitrification at low levels of dissolved oxygen with and without organic loading in suspended-growth reactor [J]. Water Sci Tech, 1990, **24**(3):297-301.
- [18] Pochana K, Keller J. Study of factors affecting simultaneous nitrification and denitrification (SND) [J]. Water Sci Tech, 1999, **39**(6):61-68.
- [19] Zhang D J, Lu P L, Long T R, *et al.* The integration of methanogenesis with simultaneous nitrification and denitrification in a membrane bioreactor [J]. Process Biochemistry, 2005, **40**(2):541-547.
- [20] 陈滢,彭永臻,杨向平,等. 低溶解氧 SBR 除磷工艺研究[J]. 中国给水排水, 2004, **20**(8):40-42.
- [21] Zeng R J, Lemaire R, Yuan Z G, *et al.* Simultaneous nitrification, denitrification, and phosphorus removal in a lab-scale sequencing batch reactor [J]. Biotechnol Bioeng, 2003, **84**(2):170-178.

欢迎订阅 2009 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如美国医学索引 MEDLINE;美国工程索引 EI;美国化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA): Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA): Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS): Life Sciences Abstracts 等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

《环境科学》2009 年为大 16 开本,70 元/册,全年 12 期。

国内统一刊号:CN11-1895/X 国际标准刊号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 0205 国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjlx@cees.ac.cn;网址:www.hjlx.ac.cn