

基于溶解氧控制的 A^2/O 工艺节能降耗研究

史彦伟^{1,2}, 刘 壮^{1,2}, 赵有生^{1,2}, 李传举^{1,2}, 李 睿^{1,2}, 刘思沂^{1,2},
阎宝帅^{1,2}, 曹效鑫^{1,2}

(1. 北京北华清创环境科技有限公司, 北京 100124; 2. 北控水务<中国>投资有限公司, 北京 100124)

摘 要: 针对北京市某污水处理厂的进水水质特征以及实际运行情况, 基于中试 A^2/O 装置, 开展以降低能耗为目标的单元优化运行技术和生产性试验研究。中试结果表明: COD 的去除效果基本不受影响; 当溶解氧(DO)降低到 0.5 mg/L 时, 在运行初期对 $NH_4^+ - N$ 和 TN 的去除率均稍有下降, 但由于微生物的适应性, 去除效果逐渐恢复; 与之相对应的最大比耗氧速率、比内源呼吸速率、氨氧化速率和亚硝酸盐氧化速率均有所降低, 但同样能够逐渐恢复到正常范围。基于中试研究成果, 优化调控该污水处理厂的 DO 浓度, 在保证出水水质的前提下, 曝气电耗下降了 14.6%。

关键词: 城市污水处理厂; 溶解氧; A^2/O 工艺; 节能降耗

中图分类号: X703 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)01-0033-06

Energy-saving and Consumption-reducing for A^2/O Process Based on Control of DO

SHI Yan-wei^{1,2}, LIU Mu^{1,2}, ZHAO You-sheng^{1,2}, LI Chuan-ju^{1,2}, LI Rui^{1,2},
LIU Si-yi^{1,2}, YAN Bao-shuai^{1,2}, CAO Xiao-xin^{1,2}

(1. Beijing Beihuaqingchuang Environmental Science and Technology Co. Ltd., Beijing 100124, China; 2. Beijing Enterprises Water Group <China> Investment Limited, Beijing 100124, China)

Abstract: Through the pilot-scale A^2/O device, the unit operation optimization technologies and productive tests which aimed at reducing energy consumption were studied in a sewage treatment plant located in Beijing on the basis of its influent quality characteristics and the actual operation condition. The results indicated that the removal efficiency of COD was almost not affected. When DO decreased to 0.5 mg/L, the removal rates of $NH_4^+ - N$ and TN declined slightly in the initial operation period but gradually recovered over time due to the adaptability of microbes. Similarly, the maximum oxygen consumption rate, endogenous respiration rate, ammonia oxidation rate and nitrite oxidation rate of activated sludge gradually recovered to the normal values after a certain decrease. According to the pilot test results, the aeration power consumption decreased by 14.6% under the optimal regulation of DO in sewage treatment plant with the assurance of the effluent quality.

Key words: municipal wastewater treatment plant; DO; A^2/O process; energy-saving and consumption-reducing

A²/O 工艺由于其结构相对简单、设计工程经验丰富、运行控制较容易和污泥不易膨胀等优势而成为目前我国城市污水厂中应用最广泛的同步脱氮除磷工艺之一。曝气能耗约占包括 A²/O 工艺在内的传统城市污水处理厂总电耗的 50% 以上^[1],而曝气量的大小取决于生化系统所需的 DO 浓度,DO 通过影响微生物优势菌群及其活性而影响着系统的脱氮除磷效果。在 A²/O 工艺中,DO 不足通常会导致氨氮硝化不完全、总氮去除率低、出水总磷含量高的现象,而在曝气过度、好氧池 DO 值过高的条件下,则会因为内回流而影响缺氧池对 TN 的去除^[2]。DO 的需求量还与温度、污泥浓度、处理负荷等因素有关,有效调控 DO 浓度和供氧方式可以达到节约碳源、提高脱氮效率和节能降耗的效果^[3]。

目前,国内外针对实验室规模的 A²/O 工艺脱氮除磷已有较深入的研究,但基于 DO 对实际污水处理厂 A²/O 工艺节能降耗影响的系统研究却鲜有报道。为此,基于某污水处理厂的水质特征,针对稳定达标基础上对节能降耗的迫切需求,通过中试研究不同 DO 条件下污染物的降解规律,提出满足处理要求前提下提高曝气效率的运行优化策略,并在实际污水厂对中试建立的策略方法进行了验证。

1 试验材料与方法

1.1 中试概况

中试在北京市某污水处理厂进行,以停留时间等作为设计依据,进而确定各单元尺寸及水量等参数。进水采用该污水厂曝气沉砂池出水,接种污泥采用二沉池回流污泥。装置由合建式厌氧/缺氧/好氧反应器和二沉池组成,合建式反应器的有效容积为 10 m³,二沉池有效容积为 1 m³,反应器分为 5 个格室,第 1 格为厌氧段,第 2 格为缺氧段,剩下的 3 格为好氧段,厌氧区、缺氧区和好氧区的体积比为 1:2:5。厌氧区和缺氧区采用搅拌桨进行搅拌,好氧区通过底端的曝气头供氧同时促进泥水混合。进水、污泥和硝化液回流均采用恒流泵控制。试验过程中维持进水量为 0.5 m³/h,内回流比和外回流比分别为 200% 和 70%。系统分四个阶段进行研究,在阶段 I~IV 系统好氧区的平均 DO 浓度从高向低变化(3.5、2.5、1.5 和 0.5 mg/L),每种 DO 条件稳定运行一个污泥龄以上,考察其整体性能变化规律。预试验结果表明,DO 值过低时二沉池出现浮泥,因此将 DO 浓度的下限设置为 0.5 mg/L。沿程变化分

析中 IN、A1、A2、O1、O2、O3 和 EFF 分别代表进水、厌氧区、缺氧区、好氧第 1 格、好氧第 2 格、好氧第 3 格和出水。

1.2 生产性验证

根据中试结果,以该污水处理厂为优化对象,进行生产性验证及推广应用。该厂工艺为改良 A²/O,服务总流域面积为 33 km²,一期设计水量为 3 × 10⁴ m³/d,生化池共分为两组,单组处理水量为 1.5 × 10⁴ m³/d。结合水厂实际情况以及风险控制因素的考量,将该厂的 DO 浓度调整为 1 mg/L 左右。考虑到水质波动情况等,为进行同期比较,研究中针对该污水处理厂的验证对比时间为:2014 年 4 月 1 日—6 月 30 日(DO 调整前)和 2015 年 4 月 1 日—6 月 30 日(DO 调整后)。

1.3 分析和测定方法

COD、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、TN、TP、MLVSS、MLSS 等均按照国家标准方法测定^[4]。pH 值、DO 采用 DO 仪测定。活性污泥的最大比耗氧速率(SOUR)、比内源呼吸速率(SOUR_e)、氨氧化速率(AOR)、亚硝酸盐氧化速率(NOR)分别采用 Wang^[5]、Friedrich^[6]、Lo^[7]和 Liu^[8]提出的方法测定。

2 结果与讨论

2.1 中试结果分析

2.1.1 不同 DO 浓度下对 COD 的去除特性

不同 DO 浓度下,系统的进、出水 COD 浓度及其去除率如图 1 所示。

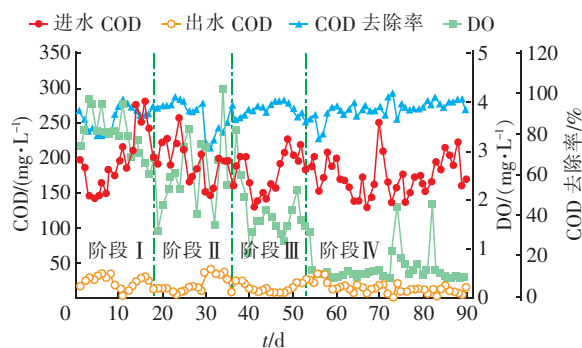


图1 不同 DO 浓度下对 COD 的去除效果

Fig. 1 Removal effect of COD under different DO concentrations

在进水浓度相差不大的情况下,不同的 DO 浓度下系统保持了较高且稳定的 COD 去除能力,对 COD 的去除效果基本不受影响。在阶段 I,出水 COD 平均为 22 mg/L,平均去除率为 88.2%;而在

阶段Ⅳ,系统出水 COD 平均为 9.8 mg/L,平均去除率达到了 94.3%。图 2 为各污染物指标在系统中的沿程变化规律。

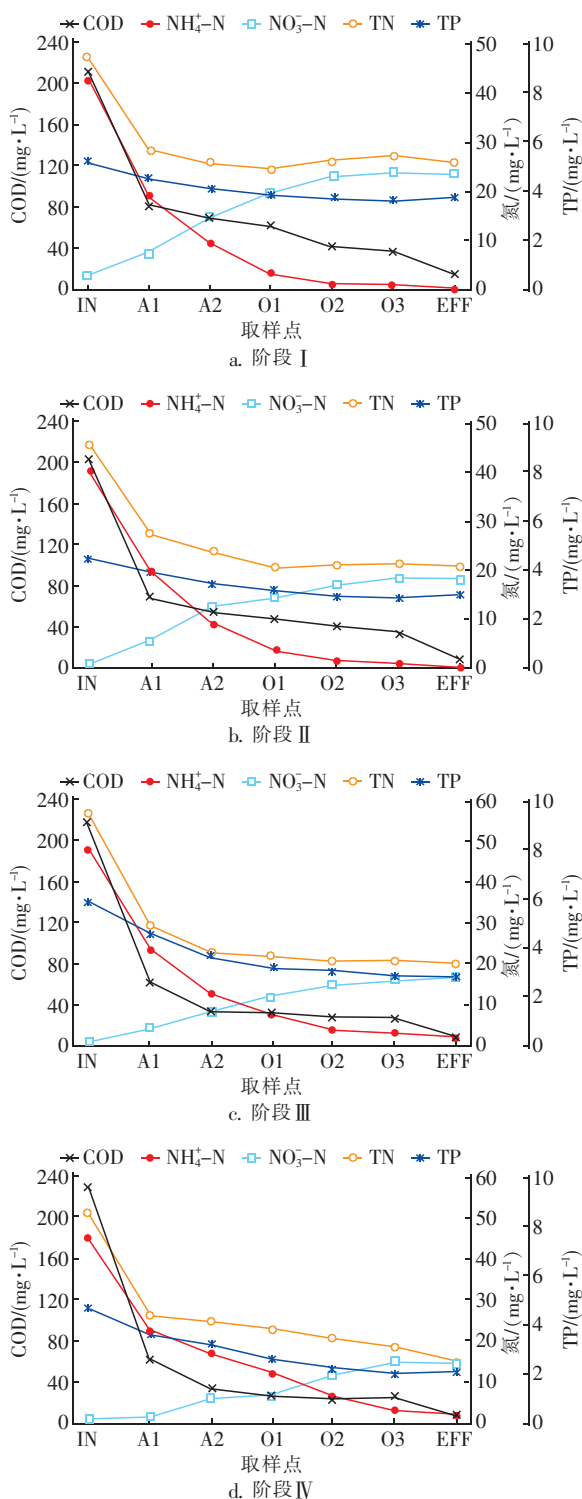


图 2 不同 DO 浓度下各污染物的典型沿程变化规律

Fig. 2 Typical change law of pollutants along process under different DO concentrations

以阶段Ⅰ为例,当进水与回流污泥同时进入厌氧池后,可溶性 COD 浓度迅速降低,这可能由以下四个方面的因素所致:活性污泥对部分大分子有机物的吸附作用;回流液的稀释作用;聚磷菌吸收易生物降解有机物并转化为胞内贮存物^[9];从二沉池回流至厌氧池的少量硝酸盐会消耗部分有机物进行反硝化。随后在缺氧段由于反硝化作用 COD 浓度进一步下降,而在好氧段 COD 的降幅并不明显。虽然在不同阶段系统的 COD 总去除率变化很小,但 COD 在不同区域的去除率发生了改变。就整体而言,厌氧段和缺氧段去除的 COD 所占比重随着 DO 浓度的降低而提高,而由好氧区去除的 COD 比重随着 DO 浓度的降低而降低。

2.1.2 不同 DO 浓度下对 NH₄⁺-N 的去除特性

在阶段Ⅰ,出水 NH₄⁺-N 平均为 0.3 mg/L,平均去除率为 99.4%。在阶段Ⅱ和Ⅲ,出水 NH₄⁺-N 浓度及其去除率变化不大,而在阶段Ⅳ的初期,出水 NH₄⁺-N 浓度有所升高,最高达到了 27.9 mg/L,去除率降至 47.8%。但随着培养时间的增长,微生物逐渐适应,系统趋于稳定,对 NH₄⁺-N 的去除效果逐渐加强。稳定运行 15 d 后,出水 NH₄⁺-N 平均为 0.7 mg/L,平均去除率恢复到 98.4%。因此,当 DO 降低到 0.5 mg/L 左右时,仍可以满足去除 NH₄⁺-N 的要求。

从图 2 可知,进水中的 NH₄⁺-N 经过厌氧区和缺氧区后浓度有所下降,这主要是由于回流稀释作用引起的,绝大部分的 NH₄⁺-N 在好氧池通过硝化作用去除。这与 Chen 等^[10]的结论一致,其采用的 A²/O 系统在污泥回流比为 100% 和内循环回流比分别为 200%、250%、300% 的情况下,原水中的 NH₄⁺-N 均只有很小一部分用于微生物的同化作用。虽然最终出水 NH₄⁺-N 浓度差别不大,但是在不同阶段 NH₄⁺-N 降解完成的区域有所变化:对于阶段Ⅰ,在好氧区第 1 格室 NH₄⁺-N 即降到 5 mg/L 以下;在阶段Ⅱ,NH₄⁺-N 在好氧第 2 格室基本降解完全;而在阶段Ⅲ和Ⅳ,NH₄⁺-N 在好氧第 3 格室完成降解。

2.1.3 不同 DO 浓度下对 TN 的去除特性

不同 DO 浓度下,系统的进出水 TN 浓度及其去除率如图 3 所示。在阶段Ⅰ,出水 TN 平均为 25.9 mg/L,平均去除率为 46.1%;在阶段Ⅱ,出水 TN 浓

度随着 DO 浓度的降低而减小,平均去除率增加到 55.0%;在阶段Ⅲ,出水 TN 浓度及其去除率没有明显变化;而在阶段Ⅳ,由于初期硝化效果出现短暂下降,出水 TN 浓度随之稍有增加,去除率则略有下降,但是随着污泥的逐渐适应则硝化效果得以恢复,出水 TN 平均为 17.7 mg/L,平均去除率恢复为 64.9%。

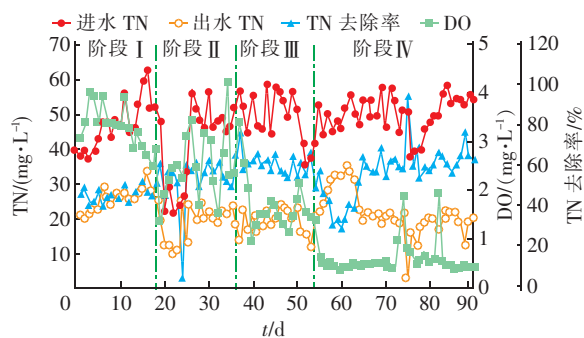


图3 不同 DO 浓度下对 TN 的去除效果

Fig. 3 Removal effect of TN under different DO concentrations

在阶段Ⅰ,由于污泥回流的稀释作用以及厌氧池中发生的部分反硝化作用,TN 浓度明显下降,随后在缺氧池通过反硝化作用 TN 得到进一步去除。在阶段Ⅱ,当 DO 浓度降低时,通过缺氧段去除的 TN 量有所增加,说明在阶段Ⅰ含高浓度 DO 的硝化液回流进入缺氧区后,在一定程度上破坏了缺氧环境,影响了对 TN 的去除。在反硝化过程中,反硝化菌利用硝酸盐或亚硝酸盐作为电子受体,以无氧呼吸的方式将有机物氧化,而溶液中的氧也可作为电子受体,过多的氧会与硝酸盐竞争电子供体。Jobbágy 等^[11]发现,当污水中易生物降解的碳源较少时,缺氧池中氧的存在会严重影响反硝化过程;同时,DO 的存在会抑制硝酸盐还原酶的合成和活性。而部分反硝化细菌则必须在厌氧环境下才能诱导合成硝酸盐还原酶。一般认为,缺氧池的 DO 应当控制在 0.5 mg/L 以下。在阶段Ⅲ,各部分对 TN 的去除情况无明显变化。而在阶段Ⅳ降低 DO 至 0.5 mg/L 后,由于发生了同步硝化反硝化,在好氧段也去除了部分 TN。

2.1.4 不同 DO 浓度下对 TP 的去除特性

不同 DO 浓度下,系统的进出水 TP 浓度及其去除率如图 4 所示。在阶段Ⅰ,出水 TP 平均在 4.0 mg/L 左右,平均去除率为 29.8%;在阶段Ⅱ去除率变化不大;而在阶段Ⅲ和Ⅳ对 TP 的平均去除率分

别增加为 37.8% 和 47.5%。

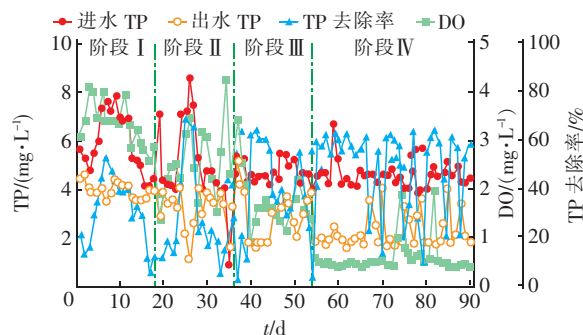


图4 不同 DO 浓度下对 TP 的去除效果

Fig. 4 Removal effect of TP under different DO concentrations

如图 2 所示,在阶段Ⅰ综合考虑回流污泥的稀释作用,厌氧区有一定的释磷效果,而在缺氧区磷酸盐浓度略有下降,这可能是反硝化吸磷或混合液回流稀释的结果,在好氧区磷酸盐浓度逐渐降低。在阶段Ⅱ,TP 在各流程点的去除没有发生明显的变化。在阶段Ⅲ,结合污泥回流的稀释作用分析,厌氧段释放的 TP 总量有所增加,这说明过高的 DO 会影响除磷效果,而 DO 浓度的降低能够强化厌氧段的释磷作用。王晓莲等^[12]认为,过曝气会导致系统除磷效率的降低,聚磷菌只有在严格的厌氧环境下,才能处于饥饿的状态从而释放体内的磷,进而为好氧吸磷打下基础。此外,硝酸盐进入厌氧区后,反硝化细菌将夺取污水中本应供聚磷菌利用的易生物降解有机质进行反硝化反应,使聚磷菌无法利用易降解有机质大量释放磷酸盐,从而影响好氧吸磷的效果。硝酸盐也会使得 ORP 值升高,对于 A²/O 系统,要保证良好的除磷效果,厌氧段混合液的 ORP 应小于 -250 mV^[13]。因此,由于 DO 值偏高导致的硝酸盐氮去除率较低也会通过回流的形式间接影响到阶段Ⅰ对 TP 的去除。而在阶段Ⅳ,由于曝气强度的降低,好氧吸磷稍有下降,但下降并不明显。

2.1.5 不同 DO 浓度下污泥的生化活性分析

在不同 DO 浓度下污泥浓度有所波动,但均在正常范围内(见图 5)。此外,根据 Kargi 等的研究结论^[14],良好的活性污泥 SVI 常在 50 ~ 150 mL/g 之间,SVI 值过低说明水体中可能缺乏营养元素,而 SVI 值过高则说明污泥有膨胀的可能性。不同 DO 条件下,污泥的 SVI 值基本在正常范围内,表明泥水分离性能较好。硝化反应过程中消耗的重碳酸盐碱度和产生的 H⁺ 浓度由被硝化的 NH₄⁺ - N 浓度决

定, 一般情况, 1 g 氨氮完全硝化需 7.14 g 碱度(以 CaCO₃ 计), 在不同 DO 条件下系统的出水 pH 值均在正常范围内, 表明硝化过程没有受到 pH 值的影响。

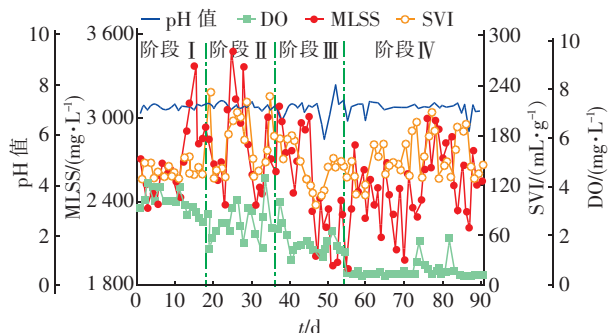


图 5 不同 DO 浓度下出水 pH 值、MLSS 和 SVI 的变化规律
Fig. 5 Change law of effluent pH, MLSS and SVI under different DO concentrations

微生物的呼吸速率包括外源呼吸速率和内源呼吸速率。外源呼吸与污水中的污染物有关, 是活性污泥运行管理的重要参数; 内源呼吸则与维持基本生命活动有关^[15]。在阶段 I、II、III, SOUR 和 SOUR_e 在小范围内波动, 而在阶段 IV 的初期, SOUR 和 SOUR_e 均有所降低, 最低值分别为 10.2 和 1.3 mgO₂/(gSS · h), 但随着时间的延长, 由于微生物自身的适应性, 污泥活性逐渐恢复, 经过 18 d 其值分别恢复到 25.3 和 7.6 mgO₂/(gSS · h), 如图 6 所示。由于不同的 DO 环境改变了硝化菌的活性, 在阶段 I、II、III, AOR 和 NOR 在一定范围内波动, 而在阶段 IV, 两者的变化趋势与 SOUR 和 SOUR_e 的变化趋势类似, 初期最低分别降至 2.6 和 2.5 mg/(gSS · h), 随后分别恢复到 5.8 和 5.5 mg/(gSS · h)。

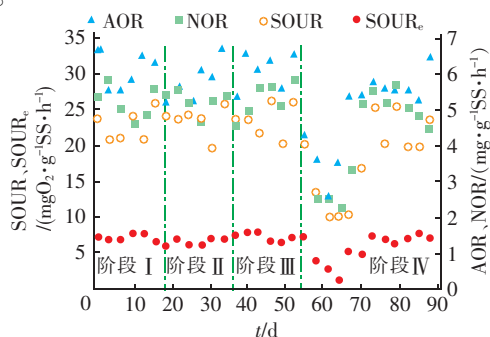


图 6 不同 DO 浓度下 AOR、NOR、SOUR 和 SOUR_e 的变化规律
Fig. 6 Change of AOR, NOR, SOUR and SOUR_e under different DO concentrations

2.2 生产性验证

验证阶段对主要水质指标的监测结果如图 7 所示。根据白天与晚上的水量差异, 选择性地间歇关闭离心鼓风机, 进行 DO 调整后, 除极个别天数外, 出水 COD、NH₄⁺-N 稳定达到 GB 18918—2002 中一级 A 标准, 出水 TN 稳定达到一级 B 标准。离心鼓风机平均功率为 110 kW, 通过核算由于减少了鼓风机用时, 调节 DO 后每月平均节约电量约 23 100 kW · h, 在保证出水水质的前提下, 节省生化池曝气电耗约 14.6%。

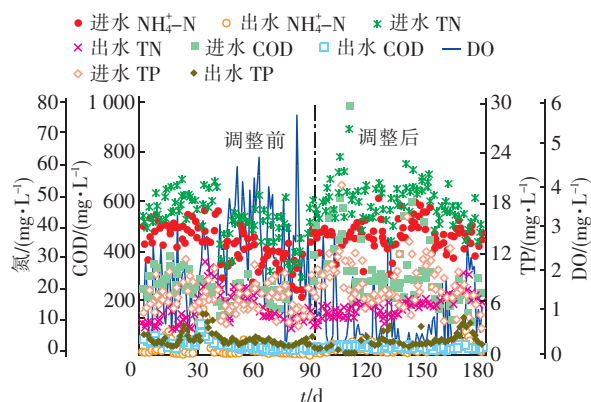


图 7 对主要水质指标的监测结果

Fig. 7 Running monitoring results of main water quality indicators in sewage treatment plant

3 结论

在不同的 DO 浓度下中试系统保持了较高且稳定的去除 COD 能力, 对 COD 的去除效果基本不受影响。但是 COD 在不同区域的去除率发生了改变。当 DO 降到 0.5 mg/L 时, 运行初期的出水 NH₄⁺-N 浓度有所升高, 去除率降低为 47.8%, 但最终能恢复到 98.4%。在此条件下, 由于初期硝化效果出现短暂下降, 对 TN 的去除率也稍有下降, 但 TN 去除率最终恢复为 64.9%。整体而言, 在较低 DO 浓度下的 TP 去除率要高于较高 DO 浓度下的。不同 DO 浓度下, 污泥的 SVI 值均在正常范围内, 表明其泥水分离性能较好, 而在低 DO 浓度下, SOUR、SOUR_e、AOR 和 NOR 均有所降低, 但由于微生物自身的适应性, 污泥活性逐渐恢复。根据中试研究成果, 开展基于实际污水厂的生产性试验研究, 在保证处理效果的前提下, 可节省 14.6% 的曝气用电量。

参考文献:

- [1] Borgohain D, Dash R K, Mamidipudi G K. Effect of con-

- ductive and non-conductive substrates on the formation of anodic aluminum oxide (AAO) template for mask-less nanofabrication[J]. *Microelectronic Engineering*, 2016, 157:1-6.
- [2] Vanrolleghem P A, Jeppsson U, Carstensen J, *et al.* Integration of wastewater treatment plant design and operation—A systematic approach using cost functions[J]. *Water Sci Technol*, 1996, 34(3/4):159-171.
- [3] 胡学斌, 杨柳, 吉芳英, 等. 低碳源城市污水的低氧同步脱氮除磷研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(13):16-19.
- [4] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法(第4版)[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [5] Wang Y, Ji M, Zhao Y, *et al.* Recovery of nitrification in cadmium-inhibited activated sludge system by bio-accelerators[J]. *Bioresour Technol*, 2016, 200:812-819.
- [6] Friedrich M, Takács I. A new interpretation of endogenous respiration profiles for the evaluation of the endogenous decay rate of heterotrophic biomass in activated sludge[J]. *Water Res*, 2013, 47(15):5639-5646.
- [7] Lo I W, Lo K V, Mavinic D S, *et al.* Contributions of biofilm and suspended sludge to nitrogen transformation and nitrous oxide emission in hybrid sequencing batch system[J]. *J Environ Sci*, 2010, 22(7):953-960.
- [8] Liu G, Wang J. Modeling effects of DO and SRT on activated sludge decay and production[J]. *Water Res*, 2015, 80:169-178.
- [9] Zhang H, Sheng G, Fang W, *et al.* Calcium effect on the metabolic pathway of phosphorus accumulating organisms in enhanced biological phosphorus removal systems[J]. *Water Res*, 2015, 84:171-180.
- [10] Chen Y, Peng C, Wang J, *et al.* Effect of nitrate recycling ratio on simultaneous biological nutrient removal in a novel anaerobic/anoxic/oxic (A^2/O) - biological aerated filter (BAF) system[J]. *Bioresour Technol*, 2011, 102(10):5722-5727.
- [11] Jobbágy A, Simon J, Plósz B. The impact of oxygen penetration on the estimation of denitrification rates in anoxic processes[J]. *Water Res*, 2000, 34(9):2606-2609.
- [12] 王晓莲, 王淑莹, 马勇, 等. A^2/O 工艺中反硝化除磷及过量曝气对生物除磷的影响[J]. *化工学报*, 2005, 56(8):1565-1570.
- [13] Martín de La Vega P T, Martínez de Salazar E, Jaramillo M A, *et al.* New contributions to the ORP & DO time profile characterization to improve biological nutrient removal[J]. *Bioresour Technol*, 2012, 114:160-167.
- [14] Kargi F, Konya I. Para-chlorophenol containing synthetic wastewater treatment in an activated sludge unit: Effects of hydraulic residence time[J]. *J Environ Manage*, 2007, 84(1):20-26.
- [15] Nikaeen M, Nafez A H, Bina B, *et al.* Respiration and enzymatic activities as indicators of stabilization of sewage sludge composting[J]. *Waste Manage*, 2015, 39:104-110.



作者简介: 史彦伟(1981-), 男, 河南郑州人, 博士, 高级工程师, 从事污水及再生回用、水环境综合整治、污泥固废处理及给水深度处理等技术的研发及工程应用工作。

E-mail: shiyanwei@bewg.net.cn

收稿日期: 2016-05-23