

## 移动床生物膜反应器内典型水质因素对氧转移能力的影响

康伟昌<sup>1</sup>, 吴涛<sup>2</sup>, 谢东<sup>2</sup>, 毕学军<sup>1,\*</sup>, 樊星<sup>1</sup>

(1. 青岛理工大学 城镇污水处理与资源化国家地方联合工程中心, 青岛 266525; 2. 青岛首创瑞海水务有限公司, 青岛 266031)

**摘要:**在污水处理节能降耗与“双碳”战略背景下,为进一步实现污水处理环节的提质增效与节能降碳,从提高氧转移能力的角度出发,在移动床生物膜反应器内,开展了水质因素对氧转移能力的影响研究,并从气泡 Sauter 平均直径、气泡平均上升速度和气含率等方面,定量分析了氧转移能力影响机制。结果表明:当十二烷基硫酸钠(SDS)浓度由 0 增大至 10 mg/L 时,不同载体填充率条件下的氧转移能力均降低;但当 SDS 浓度由 12 增大为 20 mg/L 时,氧转移能力逐渐提高;生物膜载体的存在削弱了 SDS 对氧转移能力的影响。当总溶解性固体(TDS)值由 2000 增大至 12 000 mg/L 时,提高了氧转移能力;当 TDS 值大于 12 000 mg/L 后,氧转移能力趋于不变。随着 pH 值增大,提高了氧转移能力。在实际污水处理过程中,根据不同水质条件下的氧转移能力变化,通过调节曝气强度等方式,可降低污水处理环节的能耗与成本。

**关键词:**移动床生物膜反应器;氧转移能力;水质;表面活性剂;总溶解性固体;酸碱度

**中图分类号:**X703.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-4602(2024)02-0103-07

## Effect of typical water quality factors on oxygen transfer capacity in moving bed biofilm reactor

KANG Weichang<sup>1</sup>, WU Tao<sup>2</sup>, XIE Dong<sup>2</sup>, BI Xuejun<sup>1,\*</sup>, FAN Xing<sup>1</sup>

(1. National and Local Joint Engineering Center of Urban Sewage Treatment and Resource Recovery, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China; 2. Qingdao Shouchuang Ruihai Water Co. Ltd., Qingdao 266031, China)

**Abstract:** Against the background of saving energy and reducing consumption in sewage treatment and the strategic background of “double carbon”, aiming to increase the efficiency, enhance energy saving and carbon reduction, and to improve oxygen transfer capacity in sewage treatment, this study investigated the influence of water quality factors on oxygen transfer capacity in the moving bed biofilm reactor, and quantitatively analyzed the influencing mechanism of oxygen transfer capacity in terms of Sauter mean diameter of bubbles, the average velocity of bubbles rise and gas holdup. The results showed that when the concentration of sodium dodecyl sulfate (SDS) increased from 0 mg/L to 10 mg/L, the oxygen transfer capacity decreased under different carrier filling rates. However, when the SDS concentration increased from 12 mg/L to 20 mg/L, the oxygen transfer capacity increased gradually. The presence of biofilm carrier weakens the effect of SDS on oxygen transfer capacity.

**收稿日期:**2022-06-07

**基金项目:**山东省重大科技创新工程(2020CXGC011202);欧盟 ERASMUS+ 计划项目(619456-EPP-1-2020-1-NO-EPPKA2-CBHE-JP)

**作者简介:**康伟昌(1996-),男,山东济宁人。硕士,研究方向为城镇水污染控制与资源化。E-mail:kkk17863936303@126.com。

\* **通信作者:**毕学军(1963-),男,山东青岛人。博士,教授,主要从事城镇水污染控制与资源化方面的研究。E-mail:xuejunb@126.com。

When the total dissolved solids (TDS) value increased from 2000 mg/L to 12 000 mg/L, the oxygen transfer capacity was improved. When TDS value is greater than 12 000 mg/L, the oxygen transfer capacity tends to be constant. With the increase of pH value, the oxygen transfer capacity is improved. In the actual sewage treatment process, the energy consumption and cost of sewage treatment can be reduced by adjusting the aeration intensity according to the change of oxygen transfer capacity under different water quality conditions.

**Key words:** moving bed biofilm reactor (MBBR); oxygen transfer capacity; water quality; surfactant; total dissolved solid (TDS); pH

移动床生物膜反应器 (MBBR) 技术凭借其独特优点, 广泛应用于旧污水处理设施的提标改造或新建的污水处理设施中<sup>[1]</sup>。曝气系统作为 MBBR 技术的重要功能单元与主要能耗单元, 其氧转移性能的优劣对污水处理环节的提质增效、节能降碳有着重要的作用, 而在实际污水条件下, 水质因素对曝气系统氧转移能力的影响较大<sup>[2-4]</sup>。

表面活性剂类型众多且被广泛使用于日常生活和工业生产中, 以十二烷基硫酸钠 (SDS) 为代表的阴离子表面活性剂应用最为广泛<sup>[5]</sup>, 但表面活性剂对氧转移能力的影响有待进一步研究: MATEUS 等<sup>[6]</sup>、JAMNONGWONG 等<sup>[7]</sup> 研究发现, 微孔曝气条件下, SDS 浓度的增加会导致氧转移能力的降低; LIU 等<sup>[8]</sup> 研究表明, 随着表面活性剂浓度的提高, 氧转移能力明显提高。MBBR 工艺对高总溶解性固体 (TDS) 值的污水水质有较好的处理效果<sup>[9]</sup>, 然而高 TDS 值条件下的氧转移能力变化规律尚不明确。MBBR 内的 pH 值随进水水质变化而产生一定的波动, 同时 pH 值的变化可通过影响微生物而对污水处理产生较大影响, 但 pH 值对氧转移能力的影响亦缺乏研究。因此, 选取 SDS、TDS 和 pH 值变化对氧转移能力的影响开展研究。上述研究对氧转移能力影响机制仅进行了定性描述, 未开展定量分析。水质对氧转移能力影响的研究主要集中于微孔曝气条件下, 且未考虑生物膜载体的影响, 而 MBBR 技术主要采用穿孔管曝气, 且生物膜载体会对氧传质效率产生较大影响<sup>[10-11]</sup>。通过研究不同水质条件下氧转移能力的变化规律, 结合氧转移能力随曝气强度增大而提高的特点<sup>[12]</sup>, 可通过调节曝气强度降低污水处理的运行成本与能耗。

因此, 本实验以标准氧总转移系数 ( $K_{L,a_{20}}$ ) 和比标准氧转移效率 (SSOTE) 为氧转移能力评价指标, 研究了穿孔管曝气条件下, 水质因素 (SDS、TDS、pH) 对氧转移能力的影响; 通过测定不同水质因素条件下的气泡 Sauter 平均直径、气泡平均上升速度和气含率值, 定量分析了水质因素对氧转移能力的影响机制。研究结果可以为优化 MBBR 曝气系统的设计与运行提供技术支持, 推进 MBBR 技术在我国推广与应用。

## 1 实验装置与方法

### 1.1 实验装置

本研究设计的 MBBR 装置如图 1 所示, 其主体为 0.8 m × 2.0 m (直径 × 高度) 的有机玻璃材质反应器, 有效水深为 1.4 m, 反应器内的载体采用 K3 型塑料载体; 本研究采用单侧穿孔管曝气, 穿孔管开口直径为 2.0 mm; 采用气泵向反应器内曝气, 反应器内的曝气强度通过气体流量计和调节阀控制; 在反应器内, 分别于水面下 0.5 和 1.0 m 处设置溶解氧传感器, 溶解氧传感器连接至变送器并进行数据采集。

### 1.2 主要仪器与药剂

仪器: 溶解氧传感器 Endress + Hauser COS51D、变送器 Endress + Hauser CM442、气泵 ALITA-200、佳能相机 EOS-50D。

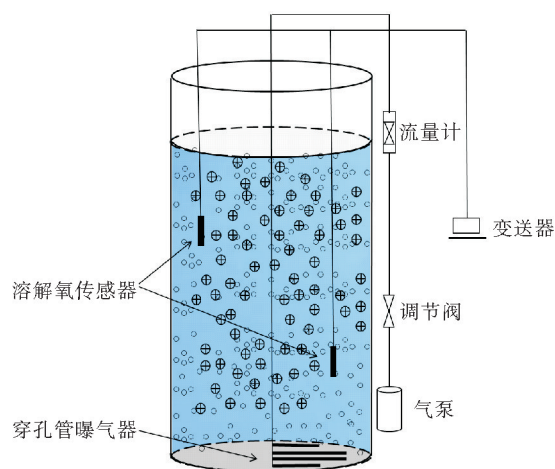


图 1 实验装置示意

药剂:消氧剂为无水亚硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ,优级纯)、催化剂为六水合氯化钴( $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ,优级纯)、十二烷基硫酸钠(SDS,分析纯)、氯化钠( $\text{NaCl}$ ,分析纯)、硫酸钠( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,分析纯)。

### 1.3 理论基础与测试方法

#### 1.3.1 理论基础

国内外研究人员针对氧传质过程提出了不同的理论,其中被广泛应用的氧传质基本理论为菲克(Fick)定律与双膜理论。氧传质基本理论认为,在靠近气相的相界面处存在气膜,在靠近液相的相界面处存在液膜,氧分子通过气膜和液膜后进入液相中,气液传质阻力主要存在于液膜。

#### 1.3.2 氧转移能力测试方法

本实验在配水条件下进行,氧转移能力测试方法采用化学消氧法,实验测试过程参照美国清水氧转移能力测试方法<sup>[13]</sup>进行。实验开始前将溶解氧数据采集频率设置为 5 s/次。氧总传质系数采用非线性回归法计算,并根据美国清水氧转移能力测试方法中的公式计算  $K_L a_{20}$  和 SSOTE。

#### 1.3.3 气泡 Sauter 平均直径测量方法

气泡 Sauter 平均直径指的是将不规则球体气泡折算为规则球体气泡后,规则球体所对应的气泡平均直径。本研究中,采用图像分析法<sup>[14]</sup>测定气泡 Sauter 平均直径。根据测定所得的气泡短轴( $a$ )和长轴( $b$ ),利用式(1)和式(2)将二维图像的结果推导为三维气泡的当量直径<sup>[15]</sup>。

$$d_{\text{eq}} = (a^2 b)^{1/3} \quad (1)$$

式中: $d_{\text{eq}}$  为单个气泡直径,mm; $a$  为气泡的短轴,mm; $b$  为气泡的长轴,mm。

$$d = \frac{\sum_{i=1}^N d_{\text{eq}}^3}{\sum_{i=1}^N d_{\text{eq}}^2} \quad (2)$$

式中: $d$  为气泡 Sauter 平均直径,mm。

## 2 结果与讨论

### 2.1 SDS 浓度变化对氧转移能力的影响研究

SDS 浓度变化对 MBBR 内氧转移能力的影响如图 2 所示。由图 2 可知,空载(未投加载体即载体填充率为 0)条件下,当 SDS 浓度由 0 增加至 10 mg/L 时, $K_L a_{20}$  值由  $9.06 \text{ h}^{-1}$  减小为  $5.09 \text{ h}^{-1}$ ,减小幅度为 43.8%,SSOTE 值由  $2.65\%/m$  减小为  $1.47\%/m$ ,减小幅度为 44.5%;当 SDS 从 12 mg/L 增加到 20 mg/L 时, $K_L a_{20}$  值由  $5.08 \text{ h}^{-1}$  提高至  $6.91 \text{ h}^{-1}$ ,增大幅度为 36.0%,SSOTE 值由  $1.48\%/m$  增大至  $2.04\%/m$ ,增大幅度为 37.8%。在载体填充率为 45%条件下,当 SDS 浓度从 0 mg/L 时增加到 10 mg/L 时, $K_L a_{20}$  值由  $12.13 \text{ h}^{-1}$  减小为  $7.59 \text{ h}^{-1}$ ,减小幅度为 37.4%,SSOTE 值由  $3.48\%/m$  减小为  $2.20\%/m$ ,减小幅度为 36.8%;当 SDS 由 12mg/L 增加到 20 mg/L 时, $K_L a_{20}$  值由  $7.58 \text{ h}^{-1}$  增大至  $7.91 \text{ h}^{-1}$ ,增大

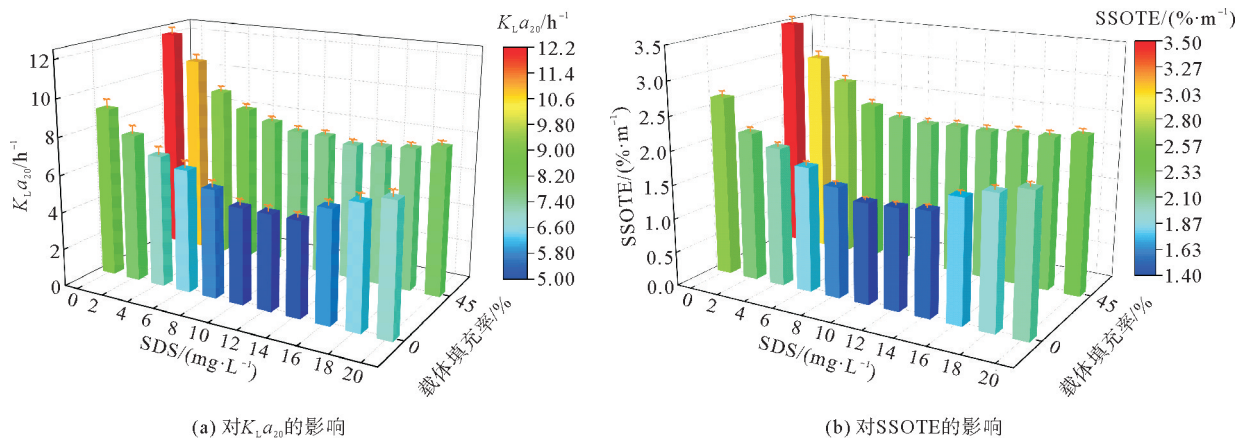


图 2 不同载体填充率条件下 SDS 浓度变化对氧转移能力的影响



幅度为4.4%，SSOTE值由2.22%/m增大至2.33%/m，增大幅度为5.0%。实验数据表明，不同载体填充率条件下，当SDS浓度由0增大至10 mg/L时，氧转移能力逐渐减小；当SDS浓度由12 mg/L增大至20 mg/L时，氧转移能力呈增大趋势；MBBR内生物膜载体的存在削弱了SDS对氧转移能力的影响。

分析原因，如图3(a)–(c)所示，在载体填充率为45%条件下，随着SDS浓度由0增加至10 mg/L，气泡Sauter平均直径由4.17 mm增大为4.72 mm，表明SDS可通过在气液界面处的快速富集，使气泡的表面张力下降<sup>[4]</sup>，从而使气泡Sauter平均直径增大，气泡相对比表面积减小，导致氧传质效率降低；气泡平均上升速度由0.38 m/s增大至0.47 m/s，使反应器内的气泡停留时间缩短；气含率由1.16%减小为0.91%，使气液接触面积减小，不利于氧转移过程的进行。当SDS浓度由12 mg/L增加至20 mg/L时，气泡Sauter平均直径由4.64 mm减小为4.32 mm，这是因为SDS浓度较大时会增大剪切力，使气泡破碎减小，且降低液膜处的氧传质阻力，从而促进氧转移过程<sup>[4]</sup>；气泡平均上升速度由0.43 m/s减小为0.31 m/s，气泡平均上升速度降低使气液接触时间延长，有助于氧传质过程的进行；气含率由0.94%增大为1.11%，较高的气含率使气液接触面积增大，导致氧转移能力提高。对不同载体填充率条件下的氧转移能力影响机制进行分析可得，表面活性剂通过富集于气泡表面而对氧转移能力产生影响，而根据图3(d)可知，在MBBR内，生物膜载体与气泡之间的碰撞作用，可以破坏附着于气泡表面的SDS单层分子结构，减小SDS对气泡的影响，从而降低SDS对氧转移能力的影响，因此，投加生物膜载体削弱了SDS对氧转移能力的影响。

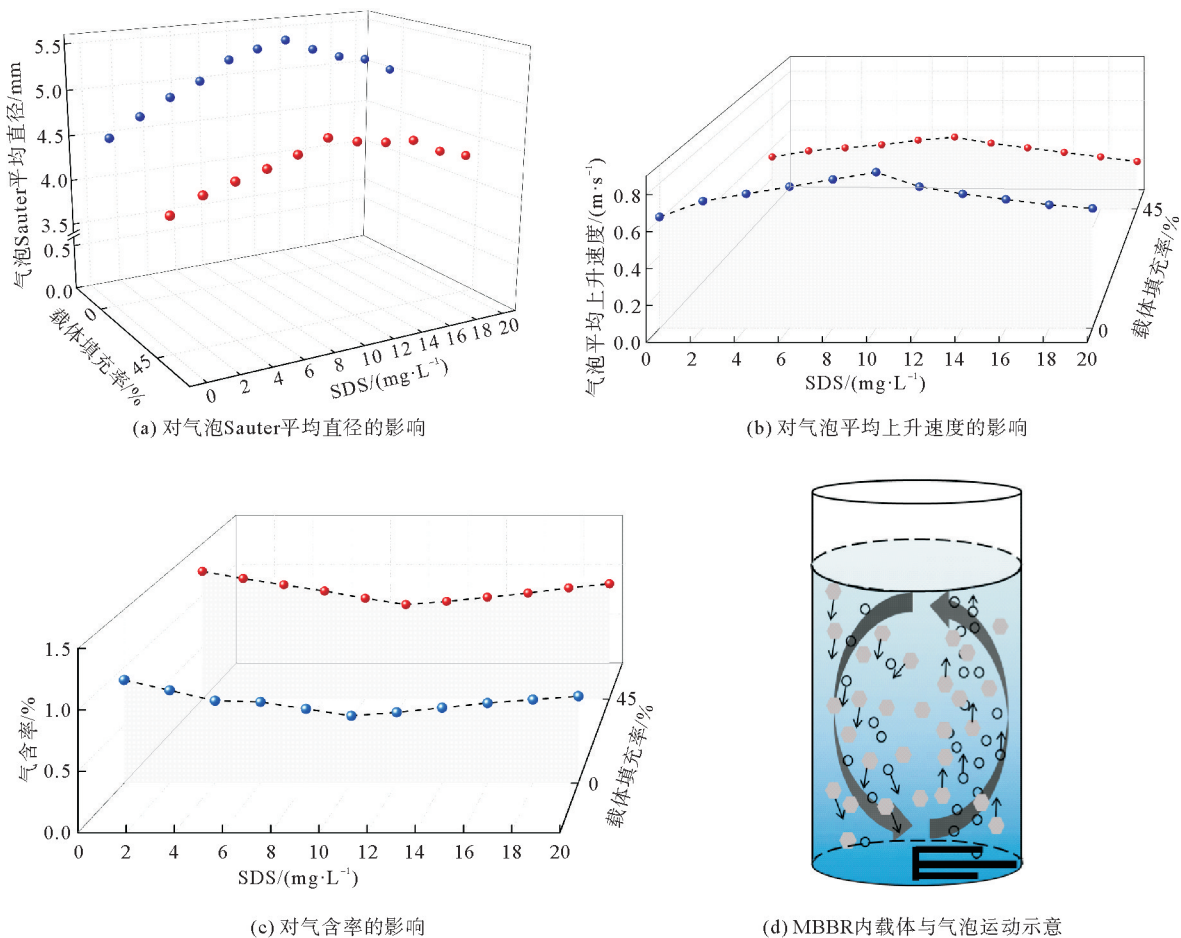


图3 不同载体填充率条件下SDS浓度变化对氧转移能力的影响机制分析

## 2.2 TDS值变化对氧转移能力的影响研究

TDS值变化对MBBR内氧转移能力的影响如图4所示。由图4可知，TDS值由2 000 mg/L增大至12 000 mg/L时，NaCl作为MBBR内容质的条件下， $K_{L}a_{20}$ 值由17.10  $\text{h}^{-1}$ 增大为20.59  $\text{h}^{-1}$ ，增大幅度

为 20.4%,SSOTE 值由 3.06%/m 增大为 3.58%/m,增大幅度为 17.0%; $\text{Na}_2\text{SO}_4$  作为 MBBR 内溶质的条件下, $K_{\text{L}}a_{20}$  值由 17.16  $\text{h}^{-1}$  增大为 21.73  $\text{h}^{-1}$ ,增大幅度为 26.6%,SSOTE 值由 2.97%/m 增大为 3.72%/m,增大幅度为 25.2%。当 TDS 由 12 000 mg/L 增大至 16 000 mg/L 时, $\text{NaCl}$  作为 MBBR 内溶质的条件下, $K_{\text{L}}a_{20}$  值由 20.59  $\text{h}^{-1}$  增大为 20.69  $\text{h}^{-1}$ ,增大幅度为 0.5%,SSOTE 值由 3.58%/m 增大为 3.60%/m,增大幅度为 0.6%; $\text{Na}_2\text{SO}_4$  作为 MBBR 内溶质的条件下, $K_{\text{L}}a_{20}$  值由 21.73  $\text{h}^{-1}$  增大为 21.86  $\text{h}^{-1}$ ,增大幅度为 0.6%,SSOTE 值由 3.72%/m 增大为 3.74%/m,增大幅度为 0.5%。实验数据表明,分别以  $\text{NaCl}$  和  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  作为 MBBR 内溶质的条件下,当 TDS 值由 2 000 mg/L 增大至 12 000 mg/L 时, $K_{\text{L}}a_{20}$  值和 SSOTE 值均增大;在 TDS 值高于 12 000 mg/L 时,氧转移能力基本不再随 TDS 值的增大而增大。

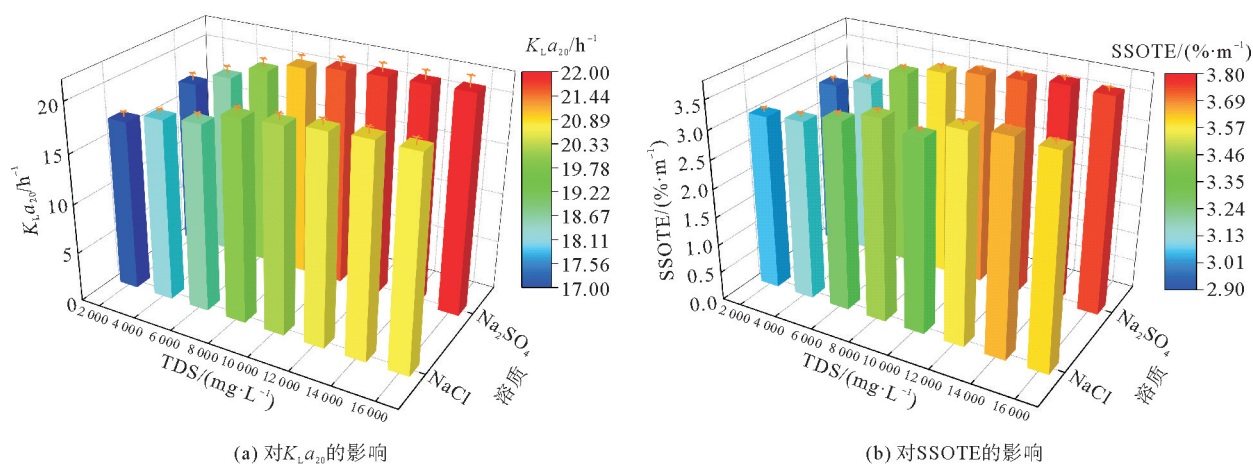


图 4 TDS 值变化对氧转移能力的影响

分析原因,由图 5 可知,当 TDS 值由 2000 mg/L 增大为 12 000 mg/L 时, $\text{NaCl}$  作为 MBBR 内溶质的条件下,气泡 Sauter 平均直径由 3.94 mm 减小为 3.29 mm,气泡平均上升速度由 0.487 m/s 减小为 0.440 m/s; $\text{Na}_2\text{SO}_4$  作为 MBBR 内溶质的条件下,气泡 Sauter 平均直径由 3.87 mm 减小为 3.15 mm,气泡平均上升速度由 0.486 m/s 减小为 0.435 m/s。实验数据表明,随着 TDS 值由 2000 mg/L 增大为 12 000 mg/L,气泡 Sauter 平均直径减小,使气泡相对比表面积增大,从而提高了氧传质效率;气泡平均上升速度降低,增大了气液接触时间,亦有助于氧转移过程的进行;同时有研究表明,随着 TDS 值的增大,气泡与液相之间的表面张力梯度增大,气液界面处产生了 Marangoni 效应,从而提高了氧气从气泡向液相主体传递的效率<sup>[16]</sup>。因此,当 TDS 值小于 12 000 mg/L 时, $K_{\text{L}}a_{20}$  和 SSOTE 随着 TDS 值的增大而增大。但当 TDS 值大于 12 000 mg/L 时,由于气泡表面对溶质离子的吸附达到了饱和状态,过高的 TDS 值已无法改变气泡的表面性质<sup>[17]</sup>,气泡 Sauter 平均直径变化和气泡平均上升速度趋于不变,导致氧转移能力趋于不变。

### 2.3 pH 值变化对氧转移能力的影响研究

pH 值变化对  $K_{\text{L}}a_{20}$  和 SSOTE 的影响如图 6(a) 所示。由图 6(a) 可知,当 pH 值由 4 增大至 6 时, $K_{\text{L}}a_{20}$  值由 9.50  $\text{h}^{-1}$  增大至 9.76  $\text{h}^{-1}$ ,SSOTE 值由 2.70%/m 增大至 2.74%/m,增大幅度分别仅为 2.7% 和 1.5%;但当 pH 值由 6 增大至 8 时, $K_{\text{L}}a_{20}$  值由 9.76  $\text{h}^{-1}$  增大为 11.28  $\text{h}^{-1}$ ,SSOTE 值由 2.74%/m 增大为 3.30%/m,增大幅度分别为 15.6% 和 20.4%;当 pH 值由 8 增大至 10 时, $K_{\text{L}}a_{20}$  和 SSOTE 仅分别增大了 1.9% 和 1.8%。由实验数据可知,当 pH 值由 4 增大为 10 时, $K_{\text{L}}a_{20}$  值和 SSOTE 值均随着 pH 值的增大而逐渐增大;在酸碱度较高时,pH 值变化对  $K_{\text{L}}a_{20}$  值和 SSOTE 值的影响较小。研究表明,水分子解离产生的  $\text{OH}^-$  倾向于停留在气液界面, $\text{H}^+$  倾向于停留在液相中,这种现象被称为“负吸附”或“质子排斥”<sup>[18]</sup>。

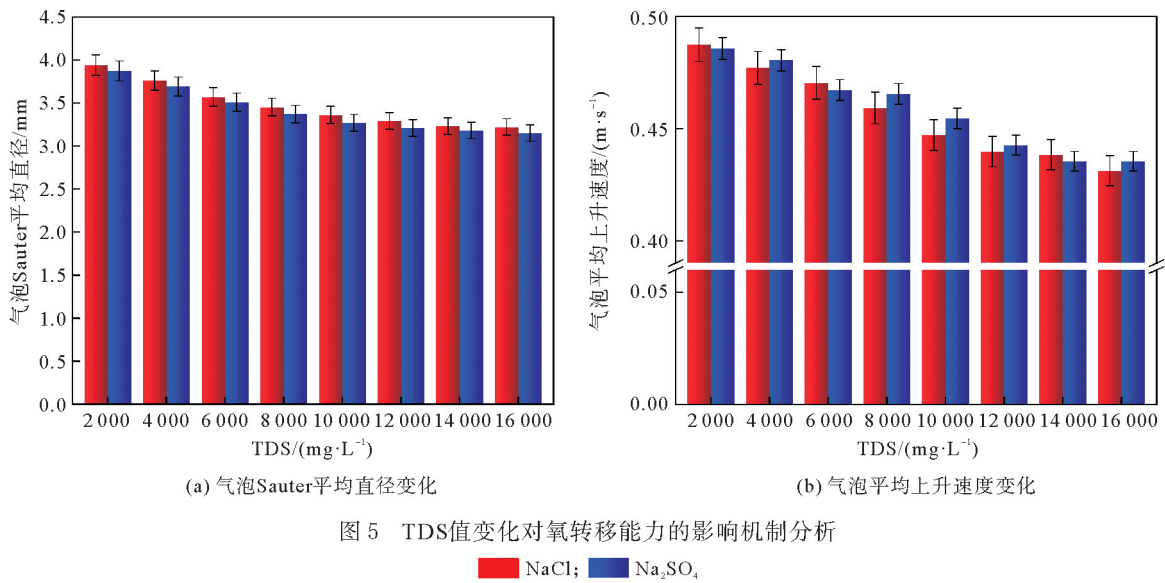


图5 TDS值变化对氧转移能力的影响机制分析

由图4(b)可知,在酸性范围内, $H^+$ 浓度的增加使气液界面处的负电荷( $OH^-$ )被中和,使气泡不稳定,气泡并聚的几率增大,导致pH值由7降低至4时气泡Sauter平均直径由4.17 mm增大至4.49 mm,气含率由1.5%降低至1.0%,从而使MBBR内的气泡相对比表面积和气液接触面积减小,造成氧转移能力降低。而在碱性范围内,气液界面处的负电荷随着 $OH^-$ 浓度的增大而增加,气泡更稳定,同时,由于随着pH值的增大液相的黏度增大,使气泡不易发生并聚,因此在载体对气泡的碰撞、破碎作用下,气泡Sauter平均直径由4.17 mm减小至3.68 mm,气泡的相对比表面积减小,提高了氧传质效率;且气含率由1.50%增大至1.86%,气液传质面积增大,亦提高了氧转移能力。

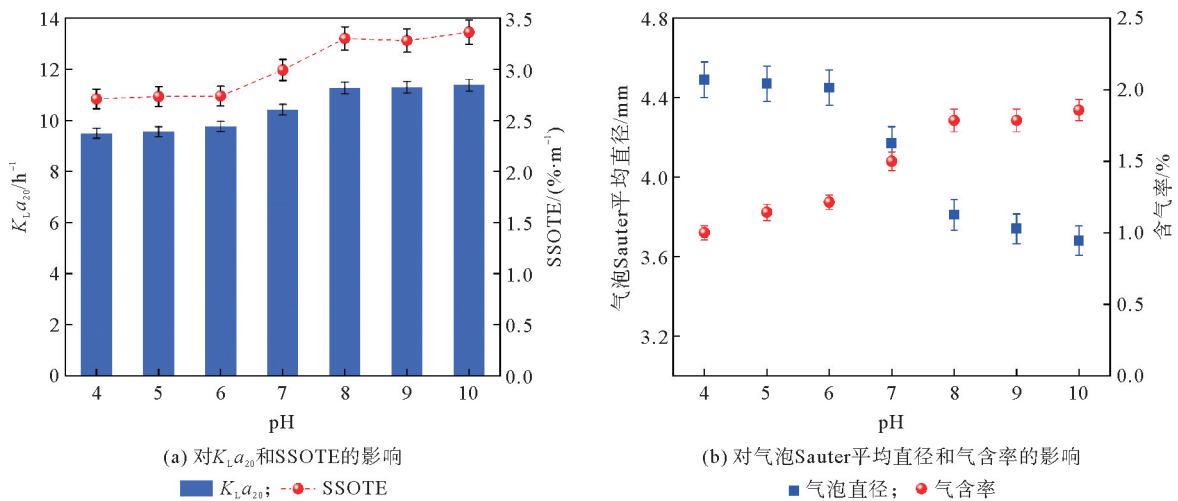


图6 pH值变化对氧转移能力的影响

### 3 结论

1) 当十二烷基硫酸钠(SDS)浓度由0增大至10 mg/L时,不同载体填充率条件下,标准氧总转移系数( $K_L a_{20}$ )值和比标准氧转移效率(SSOTE)值均逐渐减小;但当SDS浓度由12 mg/L增大为20 mg/L时, $K_L a_{20}$ 值和SSOTE值逐渐增大;MBBR内生物膜载体的存在削弱了SDS对氧转移能力的影响。TDS值由2000 mg/L增大为12000 mg/L时, $K_L a_{20}$ 值和SSOTE值均逐渐增大;当总溶解性固体(TDS)值大于12000 mg/L时,随着TDS值的增大, $K_L a_{20}$ 值和SSOTE值趋于不变。当pH值由4增大至10时, $K_L a_{20}$ 值和SSOTE值逐渐增大;酸碱度较高时,pH值变化对氧转移能力影响较小。



2) 针对 MBBR 技术,在污水处理过程中,可根据水质变化,并通过调节曝气强度等方式满足污水处理需求的同时,降低污水处理过程中的能耗与成本;当 SDS 值在 0~10 mg/L 时,可适当提高曝气强度,而当 SDS 值高于 12 mg/L 时,可适当降低曝气强度;当污水中的 TDS 值较高时可适当降低曝气强度;当酸碱度较高时,可适当降低曝气强度。

### 参考文献(References):

- [1] BARWAL A,CHAUDHARY R. To study the performance of biocarriers in moving bed biofilm reactor (MBBR) technology and kinetics of biofilm for retrofitting the existing aerobic treatment systems;A review[J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*,2014,13(3):285-299.
- [2] CAMPBELL K,WANG J,LIU G,et al. Activated sludge morphology significantly impacts oxygen transfer at the air-liquid boundary[J]. *Water Environment Research*,2019,91(6):500-509.
- [3] 孙剑辉,高健磊,石岩,等. 污水 COD 对氧总转移系数影响的研究[J]. *工业水处理*,2011,31(11):31-33.  
SUN Jianhui,GAO Jianlei,SHI Yan,et al. Study on the effect of sewage COD on total oxygen transfer coefficient[J]. *Industrial Water Treatment*,2011,31(11):31-33.
- [4] CHEN X,LIU G,FAN H,et al. Effects of surfactant contamination on oxygen mass transfer in fine bubble aeration process[J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*,2013,30(9):1741-1746.
- [5] 郝晓地,杨振理,李季. 疫情背景下污水中的表面活性剂对污水处理效果的影响与机理[J]. *环境工程学报*,2021,15(6):1831-1839.  
HAO Xiaodi,YANG Zhenli,LI Ji. Effects and associated mechanisms of surfactants on wastewater treatment in the context of Covid-19[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*,2021,15(6):1831-1839.
- [6] MATEUS M V,ARAÚJO L S,LEOPOLDINO A B,et al. Molecular interactions and modeling of anionic surfactant effect on oxygen transfer in a cylindrical reactor[J]. *Environmental Engineering Science*,2019,36(2):180-185.
- [7] JAMNONGWONG M,LOUBIERE K,DIETRICH N,et al. Experimental study of oxygen diffusion coefficients in clean water containing salt,glucose or surfactant;Consequences on the liquid-side mass transfer coefficients[J]. *Chemical Engineering Journal*,2010,165(3):758-768.
- [8] LIU C,ZHANG L,YANG J L,et al. Effects of surfactants on oxygen transfer in microbubble aeration[J]. *International Conference on Energy and Environment Technology(IEEE)*,2009(2):531-534.
- [9] 吴迪,刘曙,肖永辉. MBBR 处理高盐废水中试研究[J]. *给水排水*,2018,54(8):74-78.  
WU Di,LIU Shu,XIAO Yonghui. Pilot study on high salt wastewater treatment by MBBR[J]. *Water & Wastewater Engineering*,2018,54(8):74-78.
- [10] DREWNOWSKI J,REMISZEWSKA-SKWAREK A,DUDA S,et al. Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant:Review of solutions and methods of process optimization[J]. *Processes*,2019,7(5):311.
- [11] SANDER S,BEHNISCH J,WAGNER M. Energy,cost and design aspects of coarse-and fine-bubble aeration systems in the MBBR IFAS process[J]. *Water Science and Technology*,2017,75(4):890-897.
- [12] 李小冬,齐鲁,刘国华,等. 通气量对微孔曝气器充氧性能影响的中试研究[J]. *中国给水排水*,2014,30(5):81-84.  
LI Xiaodong,QI Lu,LIU Guohua,et al. Impact of airflow rate on oxygen mass transfer in a pilot-scale fine bubble aeration system[J]. *China Water & Wastewater*,2014,30(5):81-84.
- [13] ASCE/EWRI 2-06,Measurement of oxygen transfer in clean water[S].
- [14] BEHNISCH J,GANZAUGE A,SANDER S,et al. Improving aeration systems in saline water;Measurement of local bubble size and volumetric mass transfer coefficient of conventional membrane diffusers[J]. *Water Science and Technology*,2018,78(4):860-867.
- [15] BUSCIGLIO A,VELLA G,MICALE G,et al. Analysis of the bubbling behaviour of 2D gas solid fluidized beds;Part I Digital image analysis technique[J]. *Chemical Engineering Journal*,2008,140(1/2/3):398-413.
- [16] 葛勇,常传利,杨文萃,等. 常用无机盐对溶液表面张力及混凝土性能的影响[J]. *混凝土*,2007(6):7-9.  
GE Yong,CHANG Chuanli,YANG Wencui,et al. Effect of common inorganic salts on surface tension of solutions and properties of concrete[J]. *Concrete*,2007(6):7-9.
- [17] 刘鹏,郑祥,王博,等. 曝气系统中水质条件对氧传质影响的研究进展[J]. *工业水处理*,2014,34(9):10-14.  
LIU Peng,ZHENG Xiang,WANG Bo,et al. Progress in the research on the effects of water quality in aeration systems on oxygen mass transfer[J]. *Industrial Water Treatment*,2014,34(9):10-14.
- [18] MAZUMDER M,BHUSHAN B. Propensity and geometrical distribution of surface nanobubbles;Effect of electrolyte,roughness,pH,and substrate bias[J]. *Soft Matter*,2011,7(19):9184-9196.

(责任编辑 赵金环;英文校审 程文华)