

海带工业废水的好氧膜生物反应器处理研究

陈为裕¹, 蔡邦肖^{1,2}

(1. 浙江工商大学 食品与生物工程学院 膜科学与工程研究所, 浙江 杭州 310035; 2. 浙江司大膜工程有限公司, 浙江 杭州 310012)

摘要: 海带加工废水属高浓度有机废水 (HCOWW)。将 HCOWW 处理回用, 实施清洁生产, 对于进一步发展沿海经济, 意义重大。采用自行设计制作浸没式膜生物反应器 (MBR), 进行海带加工废水的处理实验, 重点考察 MBR 处理废水的效果及其影响因素。结果表明, MBR 对 COD_{Cr} 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、TP 和甲醛 (HCHO) 的平均去除率分别达到 95.2%、93.8%、58.8%、99.2%。优化反应器中水力停留时间、容积负荷、HCHO 浓度, 好氧 MBR 系统运行稳定。这对于处理 HCOWW 的 MBR 工程的建设与运行, 都具有重要指导意义。

关键词: 海带; 废水; 膜生物反应器; 聚偏氟乙烯膜; 甲醛

中图分类号: X703 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2011)03-0329-04

Treatment of kelp industry wastewater by aerobic membrane bioreactor

CHEN Wei-yu¹, CAI Bang-xiao^{1,2}

(1. Institute of Membrane Science and Engineering College of Food and Biological Engineering Zhejiang Gongshang University, Hangzhou 310035, China; 2. Zhejiang Star Membrane Engineering Co. Ltd Hangzhou 310012, China)

Abstract The kelp processed wastewater is a high concentration organic wastewater (HCOWW). It is of great importance to further development of coastal economy if HCOWW from the kelp industry is treated and reused. A setup pilot scale submerged membrane bioreactor (MBR) made by ourselves was used in the test. The impact factors and the treatment effect of wastewater in MBR system were emphasized. The results showed that the data of removal efficiency for COD_{Cr} , $\text{NH}_4\text{-N}$, TP and HCHO were 95.2%, 93.8%, 58.8%, 99.2%, respectively. The aerobic MBR run stably as an operation conditions of HRT, volumetric loading rate, HCHO concentration in the reactor were optimized. The work is an importance guide significance to build and operate of MBR engineering of HCOWW.

Key words kelp; wastewater; membrane bioreactor; PVDF; formaldehyde

工业废水和生活污水不管是岸边直排还是深海排放^[1], 都会对海水水质造成一定程度的影响。构筑人工湿地^[2]或采用污泥床反应器^[3]、消毒^[4]等处理后排海, 可以降低污水对海水水质的影响。膜生物反应器 (MBR) 是将活性污泥和膜过滤有机结合的新型水处理技术^[5-8]。在 MBR 设施中, 由于膜组件替代了传统活性污泥法中的二沉池, 因此, 与传统活性污泥法相比, MBR 系统由于膜的过滤截留作用, 固液分离能力显著提高, 不会发生污泥膨胀而影响出水水质, 能够维持很高的污泥浓度, 容积负荷高, 生化处理效果得到强化, 并且占地面积小, 污泥产

率低, 设备模块化, 工程升级改造容易。随着制膜技术的进步, 作为 MBR 中的主要部件, 膜成本从 10 a 前的 400 \$/m² 降到目前低于 50 \$/m², 并且由于膜的使用寿命的提高, MBR 系统投资成本和设备运行费用大大下降^[9]。

海带工业是个耗水大户。在我国, 生产 1 t 褐藻酸钠, 需消耗自来水 1 000 t, 排放废水 800 t, 仅此一种海带深加工产品, 每年至少排放的废水、废渣达 3×10^7 t^[10]。“九五”以来, 国家持续加大了对海带加工包括排水处理的立项研究和经费投资力度, 沿海省市也逐年加大对健康高效开发利用海洋藻类技术产业化的投入。但是, 海

收稿日期: 2009-11-05 修订日期: 2010-01-19

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2007BAD62B05)

作者简介: 陈为裕 (1985-), 男, 浙江省温州市人, 环境工程硕士研究生, 研究方向: 膜法废水处理与回用。

通讯作者: 蔡邦肖, 男, 工学硕士, 教授, 研究方向: 膜科学与应用工程, 化工分离, 海水淡化, 水和废水处理, 食品科学硕士生导师, 环境工程硕士生导师, E-mail: caibangxiao@163.com

带工业的资源利用率低、环境污染严重,至今仍然是个突出的问题。显然,依靠技术进步,突破排放废水的处理回用是实现海洋资源高效利用的一项共性关键技术。近 10 a 来,海洋经济高速发展和环境问题的凸现,海带工业的废水处理开始受到高度重视。采用絮凝-催化氧化法^[11]、气浮-酸化水解-生物接触氧化工艺^[12]、生物法与混凝工艺相结合^[13]以及超滤(UF)膜、纳滤(NF)膜的集成工艺^[10],都被尝试用于海带加工排放的含钙废水的处理。然而,这些处理方法存在或者由于工艺简单,运行管理及其水质稳定性较差,或者尽管工艺先进但水处理费用尤其是能耗仍然较高等问题。因此,亟需开发海带加工废水的新型处理技术。

在国家科技支撑计划的支持下,研究 MBR 处理海带加工废水,具有重要意义。本文采用圆柱状膜组件,在自行设计制造的 MBR 装置上,进行好氧 MBR 处理海带废水实验,考察对主要污染物的处理净化效果,探讨主要工艺条件对 MBR 过程的影响,为实际废水的 MBR 工程建设提供科学依据。

1 实验部分

1.1 废水特征

海带废水主要来源:海带漂洗、浸泡的水,海带消化

表 1 海带加工废水的主要特征

Tab 1 Contents in kelp process wastewater

海带废水	SS /g·L ⁻¹	c /mg·L ⁻¹			
		COD _{Cr}	NH ₄ -N	TP	HCHO
实际废水*	0.3~0.7	900~2000	-	-	<200
实验废水	-	700~1600	20~50	3~17	20~150

* 在山东某海藻深加工企业现场的检测值。

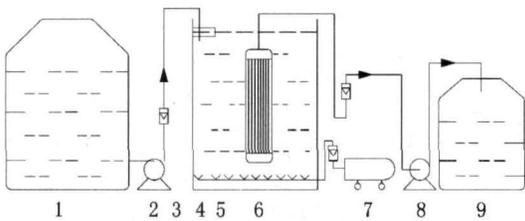


图 1 浸没式膜生物反应器工艺流程

1 原水箱, 2 进水泵, 3 流量计, 4 液位控制器, 5 MBR, 6 膜组件, 7 空压机, 8 出水泵, 9 产水箱

Fig 1 Schematic diagram of MBR system

如图 1 所示,水泵将贮于原水箱中的废水,泵入反应器,进水量通过液位控制器自动调节。在膜组件下部设置的曝气头,为微生物分解废水中的有机物提供氧气,同时扰动水,从而造成中空纤维膜的摆动,以及扰动污泥在膜表面的沉积和堵塞,减缓运行过程膜的透水量下降。活性污泥的培养采用污泥接种法,实验开始前,将取自杭州西湖啤酒厂的脱水污泥经过滤去除污泥中大颗粒固体后投入反应器。开启空压机,调节曝气量,控制反应器中的 DO 量。在 MBR 正常运行后,定时分别检测反应器内的和经膜过滤的渗透水的水样水质。

提取褐藻胶后含残渣的排放水、生产褐藻酸钠过程的钙化水和脱钙水,以及提碘过程中排放的废水。该废水中除了含有无机盐等杂质,还有大量的海带废渣以及少量褐藻酸钠、甘露醇等有机物。其中,较高浓度的甲醛(HCHO),是在海带浸泡过程中使褐藻酸更易在消解中溶出而添加的。与常规的干海带废水不同,在以鲜海带为原料的加工厂为了防止鲜海带储存腐败而添加的一定量的 HCHO。由此可见,海带工业排水中的水质污染物主要是总溶解固体、COD_{Cr}、NH₄-N、总磷(TP)、HCHO、混合液悬浮固体(MLSS)。表 1 列出了海带加工废水的典型特征值。

实验室废水的制备:将市售海带经浸泡、消解和稀释后,再经过滤去除海带残渣,然后将提胶后的废水和浸泡水混合而成。根据实验要求,废水中添加一定浓度的 HCHO。实验海带废水的主要成分测定值见表 1。

1.2 MBR 装置与工艺

实验用 MBR 组件是由圆柱状中空纤维膜构成的,日本旭化成公司提供。组件为聚偏氟乙烯(PVDF)制作的孔径为 0.3 μm 的微孔滤膜,膜有效面积为 0.38 m²。将柱状膜组件垂直安装在自制的浸没式膜生物反应器(MBR)中。反应器有效容积 15 L。MBR 试验工艺流程示于图 1。实验 MBR 工艺参数列于表 2。

表 2 浸没式膜生物反应器实验工艺参数

Tab 2 Parameters of MBR process

项目	实验值
运行温度 /℃	室温
反应液 pH	6~8
跨膜压力 /kPa	50
曝气流量 /L·h ⁻¹	50~100
DO /mg·L ⁻¹	2~4
水力学停留时间(HRT) /h	13
生物质浓度 /g·L ⁻¹	5
PVDF 膜渗透通量 /L·m ² ·h ⁻¹	初始 4.3 长期 1.1
MLVSS /g·L ⁻¹	3.8
反冲洗时间 /min	2
反冲洗周期 /h	24

1.3 水质项目检测

依照文献方法^[14],取样检测水样中主要水质指标:SS、COD_{Cr}、NH₄-N、TP、HCHO、DO、MLSS 等的质量浓度(c)。因此,只要分别测定 MBR 进、出的水样中相关组分的浓度值(c_进、c_出),则从式(1)即可计算得到该组分在 MBR 系统中的去除率(R,%)。

$$R = \frac{c_i - c_o}{c_i} \quad (1)$$

所有水质项目的取样检测都是在 MBR 实验稳定运行后的第 1 d 开始。参数值的下标分别表示实验考察长期运行过程的各项水质变化以及影响因数。

2 结果与讨论

2.1 MBR 对主要水质指标的去除效果

2.1.1 COD 的去除效果

图 2 表示 MBR 实验运行时间与 COD_{Cr} 值变化的相关性。

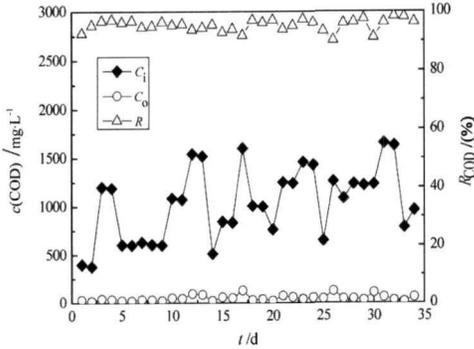


图 2 MBR 长期运行中 COD 去除效果

Fig 2 Rejection effects of COD during long-term operation

从图 2 可见, 在实验启动后约 10 d 的时段内, 尽管进水的 COD 值高低不一, 但是出水的 COD 值都处于较低且较稳定的水平。这就表明, MBR 系统稳定性较好, 反应器内的微生物在这一时段开始适应了新环境, 废水的可生化性好, 有机物降解去除效果较好。在超过 33 d 的运行期间, 进水平均的 COD 为 1 032 mg/L, 出水平均为 49 mg/L。图 2 显示, 实验过程偶有 1~2 d 的出水的 COD 远高于平均值, 原因是期间进入反应器的废水含有较高浓度的 HCHO, 微生物受到较高浓度 HCHO 的毒害作用, 导致活性污泥去除有机物的性能下降。图 2 的结果表明, 即便长期运行的 MBR 去除有机物的能力有一定的波动性, 但是, R_{COD} 的平均值高达 95.2%, 即 MBR 具有较强的耐冲击负荷能力。将对于高有机物浓度的废水显示出强烈净化处理功能的 MBR 用于海带工业生产排水, 是一个可选用的方案。

膜分离原理表明, 大孔径的微孔滤膜对有机物没有截留作用。但将微孔滤膜置于生物反应器中构成的 MBR, 正如图 2 的实验结果, 由于浸没在反应器内的膜表面沉积的活性污泥层对废水中有机物等污染物的吸附、生物降解和进一步的筛滤作用, 使得出水中的有机物以及悬浮颗粒 (SS) 的含量大幅度地下降, 在达到具有较高的 R_{COD} 同时, R_{SS} 值达 99% 以上, 获得在传统的絮凝-氧化工艺或者在微孔滤膜过滤工艺的这些单一工艺都不能达到的废水处理的良好净化效果。

2.1.2 NH_4-N 的去除效果

海带废水中的 NH_4-N 浓度是影响排放水质的一个重

要指标。实验测定 MBR 长期运行过程的处理效果显示在图 3。

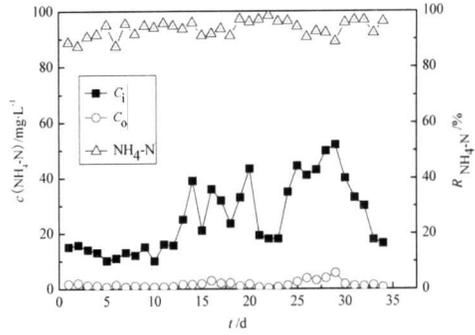


图 3 MBR 长期运行中 NH_4-N 去除效果

Fig 3 Rejection effects of NH_4-N during long-term operation

从图 3 可以看到, 随着进水 NH_4-N 含量的升高, 出水 NH_4-N 含量也随之增高。当进水中 NH_4-N 含量为 10~50 mg/L (平均值为 25.6 mg/L) 时, 出水中的 NH_4-N 含量在 7 mg/L 以下 (平均值为 1.6 mg/L), 平均的去除率达 93.8%。图 3 显示, 在运行开始的几天内出水的去除率, 略低于随后时期运行的出水, 即使是在运行十多天后的 NH_4-N 含量一直居高不下, 但是出水的 NH_4-N 含量基本上一直维持着低水平值。在 MBR 系统中, 正是微孔滤膜的物理过滤作用取代传统的二沉池的混凝沉淀, 使得反应器内对 NH_4-N 具有去除作用的细菌 (如硝化菌等) 在膜过滤透水的过程被保留下来, 并且随着运行时间的进行, 反应器中的这些细菌得到累积, 进而提高了对 NH_4-N 污染物的去除效果。

2.1.3 TP 的去除效果

MBR 去除海带废水中的 TP 效果见图 4。如图 4 所示, 在该系统中, 进水的 TP 含量为 3~17 mg/L (平均值为 9.7 mg/L) 时, 出水的 TP 含量低于 9 mg/L (平均值为 4.0 mg/L), 其去除率平均值为 58.8%。在实验运行初期, TP 去除率较高, 随着运行时间的延长 (20 d 以后), 有所下降。运行初期, 反应器内产生大量活性污泥过程会消耗废水中的 P, 因而表现出较高的去除率。然而, 随着 MBR 运行的继续, 反应器中污泥浓度达到一定程度时, 尤其是活性污泥的生成和死亡速率接近平衡状态, 即到达微生

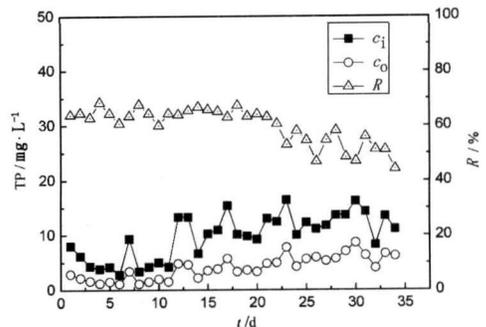


图 4 MBR 长期运行中 TP 去除效果

Fig 3 Rejection effects of TP during long-term operation

物生长必须的 P 约为 1%^[15] 时, 生物合成所能去除的 P 就非常少, 因而对废水中的 P 去除率就处于较低的水平。

2.1.4 HCHO 去除效果

海带深加工过程外排废水的一个重要特征是含有鲜海带保鲜以及海带浸泡用的 HCHO。从图 5 可知, 当进水的 HCHO 含量低于 160 mg/L 时, 出水的 HCHO 含量在 1 mg/L 以下, 去除率可达 99% 以上。当进水的 HCHO 含量变化较大 (平均值为 49.4 mg/L) 时, 出水的 HCHO 含量都比较稳定 (平均值为 0.4 mg/L), 平均的去除率为 99.2%。由此可见, 低的 HCHO 含量对活性污泥的影响小, 对污染物的去除效果影响不显著。然而, 反应器接纳到高浓度 HCHO 的废水时, 出现大量的活性污泥悬浮于水面现象, 此时, MBR 系统的去除污染物效果被严重破坏。因此, 将海带工业生产过程初始外排的含高浓度 HCHO 的废水即海带浸泡漂洗池的水收集到缓冲池, 然后将该废水逐步少量的加入到反应器, 使 MBR 系统的 HCHO 含量保持在低浓度下安全运行。

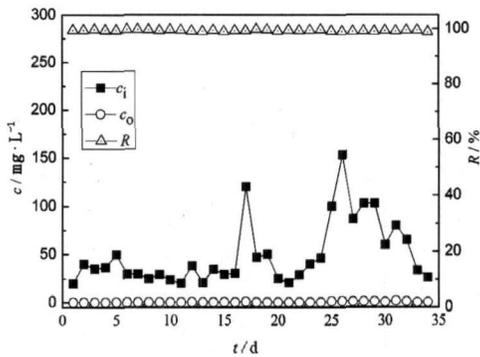


图 5 废水的 C_{iHCHO} 、 C_{oHCHO} 及 R_{HCHO} 与运行时间的关系
Fig 5 Relationship between C_{iHCHO} , C_{oHCHO} , R_{HCHO} and operation time

2.2 影响 MBR 去除效果的主要工艺参数

2.2.1 水力学停留时间的影响

适宜的水力学停留时间 (HRT) 是维持 MBR 净化效果的重要因数之一。实验测定的 MBR 系统 HRT 对 COD 去除率的影响结果表明, 随着 HRT 的减小, COD 去除率呈下降趋势。当 HRT 低于 9 h 时, 出水的 COD 去除率下降至 90% 以下, 出水的 COD 值达到 100 mg/L 以上。HRT 的增加, 可提高 MBR 系统的去除效果。根据试验结果, MBR 系统适宜的 HRT 为 12~14 h, 该值与采用气浮-酸化水解-生物接触氧化工艺处理海带加工废水时, 在酸化水解和生物接触氧化阶段的 HRT 总和为 21 h^[12] 相比较, 大大的缩短了。显然, 较短的 HRT 的 MBR 工艺, 不仅减少了废水处理设施的占地面积, 也降低了因反应器容积减小而运行消耗的能源。

2.2.2 容积负荷的影响

容积负荷不仅对 MBR 系统中反应器设备尺寸起着决定性作用, 同时影响污染物的去除效果。容积负荷对 COD 去除率的影响表明, 随着容积负荷的增加, COD 去除率下降。容积负荷低, 出水水质好, 相应的反应器容积要

大; 高的容积负荷, 反应器容积可以减小, 但出水的水质变差。实验确定的 MBR 系统最适容积负荷为 1.5~2.5 kg/(m³·d)。在此条件下, 经 MBR 处理过的海带废水水质好于传统工艺处理^[12, 13]。

2.2.3 污泥浓度的影响

反应器中的污泥含量随时间的增加而增加。实验结果表明, 在试验开始的几天时间内, 污泥量增加得较快, 随着运行时间的延长, 增加速度减缓。其原因是, 当反应器内的污泥量增加到相对稳定时, 即每日合成的微生物量与分解的微生物量大致相当。因此, 在 MBR 长期运行过程, 应定期地将部分剩余污泥排出反应器, 否则将会造成惰性物质大量积累^[15] 而严重影响 MBR 的正常运行。在污泥浓度达 5 g/L 左右、连续运行 5 d 后进行排泥, 是可取的一个操作参数。

2.2.4 溶解氧的影响

污水的好氧生物处理是在足够氧存在的条件下, 利用好氧微生物来分解污水中的污染物。其代谢按两个途径进行: 一种是有有机污染物被微生物所利用, 合成新的细胞物质, 即合成代谢; 另一种是有有机污染物被分解, 形成 CO₂ 和 H₂O 等无机物质, 并产生能量, 用于合成代谢, 即分解代谢。溶解氧 (DO) 不足时, 好氧微生物活性受到影响, 新陈代谢能力减弱, 对 DO 要求较低的微生物将会繁殖, 从而使有机物的氧化过程不能彻底进行, 出水中有机物浓度升高, 反应器处理效率下降。若 DO 严重不足时, 厌氧微生物将会大量繁殖, 好氧微生物受到抑制甚至大量死亡。然而, DO 过高, 将导致有机污染物分解过快, 从而使微生物缺乏营养, 活性污泥易于老化。MBR 系统的反应器中 DO 值的影响结果表明, 随着 DO 浓度的减少, COD 去除率降低。当 DO 值增加到 3 mg/L 后, COD 去除率的增加速率逐渐减小, 但能趋于较高的水平。因此, 设计反应器中 DO 值在 3 mg/L 左右, 可以使 MBR 维持较好的废水净化效果。

3 结论

用孔径为 0.3 μm 的 PVDF 中空纤维膜的圆柱状组件制作的反应器容积为 15 L 的 MBR 装置, 通过好氧微生物分解污水中的污染物, 依靠膜的过滤作用获得净化水, 对 COD_{Cr} 700~1600 mg/L, NH₄-N 10~50 mg/L, TP 3~17 mg/L 和 HCHO 20~160 mg/L 的海带废水, 相应的水质指标的平均去除率分别达到 95.2%、93.8%、58.8%、99.2%。

反应器中 HRT、容积负荷、污泥含量和 DO 的量对 MBR 去除污染物的影响十分显著。以 HRT 为 12~14 h, 容积负荷为 1.5~2.5 kg/(m³·d), 污泥含量约为 5 g/L, DO 值约为 3 mg/L 的工艺条件下, 好氧 MBR 处理海带加

(下转第 345 页)

度的 23 a 长时间序列数据的处理分析, 首先得到了长年平均的季节变化特征, 结果表明: 长江口表层溶解氧浓度的季节周期非常稳定, 且在不同区域存在位相和幅度上的偏差; 其次, 通过对去除季节周期信号的月资料的长期变化趋势进行线性拟合, 发现趋势变化不明显; 对不同季节的长期变化趋势进行拟合发现: 两区域冬季的上升趋势比较明显, 长江口外夏季的下降趋势较明显; 在同一区域由于不同季节的长期趋势相互抵消而导致年均变化趋势不明显; 并且, 长江口及邻近海域的不同区域、不同季节的年际变化存在约 4 a 左右的周期性。

参考文献:

- [1] 石晓勇, 陆 茸, 张传松, 等. 长江口邻近海域溶解氧分布特征及主要影响因素 [J]. 中国海洋大学学报, 2006 36(2): 287-294
- [2] 石晓勇, 王修林, 陆 茸, 等. 东海赤潮高发区春季溶解氧和 pH 分布特征及影响因素探讨 [J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(5): 404-412
- [3] 张莹莹, 张 经, 吴 莹, 等. 长江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(8): 1649-1654.
- [4] 杨庆雷, 董娅婕, 蒋岳文, 等. 黄海和东海海域溶解氧的分布特征 [J]. 海洋环境科学, 2001, 20(3): 9-13
- [5] 胡小猛, 陈美君. 黄东海表层海水溶解氧时空变化规律研究 [J]. 地理与地理信息科学, 2004 20(6): 40-43
- [6] 王保栋, 刘 峰, 王桂云. 南黄海溶解氧的平面分布及其季节

- 变化 [J]. 海洋学报, 1999 21(4): 47-53
- [7] 王保栋, 战 闯, 藏家业. 长江口及其邻近海域营养盐的分布特征和输送途径 [J]. 海洋学报, 2002 24(1): 53-58
- [8] 汤毓祥, 李兴宰, 赵 哲, 等. 东海东北部春季若干重要水文结构的分析 [J]. 东海海洋, 1997, 15(4): 1-11
- [9] 顾宏堪. 黄海溶解氧垂直分布的最大值 [J]. 海洋学报, 1980 2(2): 73-83.
- [10] 王保栋. 黄海溶解氧垂直分布最大值的成因 [J]. 黄渤海海洋, 1997, 15(3): 10-15
- [11] 蒋国昌, 王玉衡, 唐仁友. 东海溶解氧垂直分布和季节变化 [J]. 海洋学报, 1991, 13(3): 56-63
- [12] 刁焕祥, 姜传贤, 陆家平. 南海溶解氧垂直分布最大值 [J]. 海洋学报, 1984, 6(6): 56-66
- [13] 柯东胜. 南海溶解氧的年际变化与厄尔尼诺的关系 [J]. 海洋与湖沼, 1991, 22(5): 49-56.
- [14] 柯东胜. ENSO 对我国海洋环境的若干影响 [J]. 海洋预报, 1994, 11(3): 32-37
- [15] 何桂芳, 袁国明. 用模糊数学对珠江口近 20 a 来水质进行综合评价 [J]. 海洋环境科学, 2007, 26(1): 53-57
- [16] 李 岫, 仵彦卿, 范海梅. 高维空间插值在海洋环境数据预处理中的应用 [J]. 海洋环境科学, 2009, 28(6): 729-733.
- [17] 李 岫, 仵彦卿, 范海梅. 上海海域水体表层溶解氧浓度分布变化分析 [J]. 中国海洋大学学报, 待刊.
- [18] 王 燕. 应用时间序列分析 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2006. 108-139.

(上接 332 页)

工废水的运行稳定, 废水净化效果好。提出的工艺参数及其运行工艺调整策略, 对于处理高浓度有机废水的 MBR 工程建设, 具有重要指导意义。

参考文献:

- [1] 王学昌, 姜安刚, 郑丙辉, 等. 不同方式污水排海对海水水质的影响 [J]. 海洋环境科学, 2002 21(3): 57-60
- [2] 张 晴. 潜流人工湿地处理生活污水研究 [J]. 海洋环境科学, 2008, 27(增刊 1): 86-89.
- [3] 李 波, 徐高田, 邹伟国, 等. 上海合流污水深海排放强化一级预处理的研究 [J]. 海洋环境科学, 2002, 21(4): 50-53
- [4] 国 峰, 陆 斌, 黄晓琛. 高雄市污水海洋排放消毒试验研究 [J]. 海洋环境科学, 2004, 23(2): 66-68.
- [5] MELINA T, JEFFERSON B B, BIXIO D, et al Membrane bioreactor technology for wastewater treatment and reuse [J]. Desalination, 2006 187(1-3): 271-282.
- [6] CHRISTELLE W. Membrane bioreactor for water reuse [J]. Desalination, 2007, 203(1-3): 15-19
- [7] PORNTIP C S, ANTHONY P, CHRISTELLE W, et al Performance and microbial surveying in submerged membrane bioreactor

for seabed processing wastewater treatment [J]. Journal of Membrane Science, 2008, 317(1-2): 43-49

- [8] JUDD S, JEFFERSON B (编著). 蔡邦肖译. 膜技术与工业废水处理 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
- [9] 冯文婕, 蔡邦肖. 膜生物反应器技术与市场的发展 [J]. 海洋技术, 2007, 26(4): 126-130.
- [10] 薛德明, 于品早, 张国防, 等. 膜技术处理褐藻酸钠废水 [J]. 膜科学与技术, 2003 23(4): 47-50.
- [11] 单宝田, 赵中华, 胡立阁, 等. 海洋褐藻胶生产废水的絮凝-氧化处理研究 [J]. 海洋科学, 2002, 26(11): 31-34
- [12] 许 翔, 许玉东. 海带工业生产废水处理技术研究 [J]. 环境污染治理技术与设备, 2001 2(1): 77-79.
- [13] 李克勋, 近藤和史, 张振家. 高浓度褐藻酸钠生产废水处理工程设计 [J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(2): 65-66
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 (第四版) [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002
- [15] 张志超, 黄 霞, 肖 康, 等. 脱氮除磷膜生物反应器的除磷效果及特性 [J]. 清华大学学报 (自然科学版), 2008, 48(9): 1472-1474.
- [16] 封 莉, 张立秋, 吕炳南. 污泥浓度对 MBR 运行特性的影响研究 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2003 35(3): 307-310