



文章栏目：大气污染防治

DOI 10.12030/j.cjee.201901005

中图分类号 X701

文献标识码 A

张潇, 何觉聪, 邓杰帆, 等. 膜生物反应器处理乙二醇醚有机废气[J]. 环境工程学报, 2019, 13(9): 2209-2216.

ZHANG Xiao, HE Juecong, DENG Jiefan, et al. Gas-phase 2-ethoxyethanol removal by membrane biofilm reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(9): 2209-2216.

膜生物反应器处理乙二醇醚有机废气

张潇¹, 何觉聪², 邓杰帆², 黄振山¹, 张再利¹, 樊青娟¹, 魏在山^{1,*}

1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510275

2. 东莞市环境科学研究所, 东莞 523009

第一作者: 张潇(1994—), 女, 硕士研究生。研究方向: 有机废气生物处理新技术。E-mail: 462247353@qq.com

*通信作者: 魏在山(1968—), 男, 博士, 教授。研究方向: 有机废气处理技术。E-mail: wzs89@126.com

摘要 针对水性涂料使用过程中产生的乙二醇醚有机废气, 通过膜生物反应器进行处理, 考察了进气浓度、停留时间、液体喷淋量以及循环液 pH 对净化性能的影响; 研究了膜生物反应器降解乙二醇醚废气动力学; 采用 16S rRNA、宏基因组测序技术对微生物群落结构及功能基因进行了分析。结果表明, 适宜的运行条件为停留时间 10 s, 循环液 pH 7.60, 喷淋密度 $1.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$; 生化降解乙二醇醚的最大反应速率为 $666.67 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$; 经过 2 次进气负荷的提高, 反应器中的优势菌属发生变化, 由 30 d 的 *Methyloversatilis*、90 d 的 *Methyloversatilis*、*Pseudomonas* 变为 145 d 的 *Thauera* 和 *Flavobacterium*。膜生物反应器能够高效降解乙二醇醚有机废气, 去除率可达 99.6%, 本研究为处理水性涂料产生的醇醚类有机废气提供了参考。

关键词 膜生物反应器; 挥发性有机物 (VOCs); 水性涂料; 乙二醇醚

目前, 我国大气复合污染形势依然严峻, 挥发性有机物 (VOCs) 排放量仍呈增长趋势^[1-2], 重点地区年排放量超过 $1 \times 10^7 \text{ t}$ ^[3-4]。2018 年, 我国打赢蓝天保卫战 3 年行动计划和“十三五”挥发性有机污染防治工作方案要求实施 VOCs 专项整治活动, 明确提出从源头控制 VOCs 的排放, 大力发展水性涂料行业, 推广水性涂料使用。但水性涂料使用过程中会产生乙二醇醚有机废气^[5], 而乙二醇醚类废气具有血液毒性、生殖毒性、肝肾毒性、发育毒性和致畸毒性等^[6], 因此, 研究水性涂料喷涂有机废气治理具有十分重要的现实意义。

生物法具有无二次污染、运行费用低等优点, 近年来已逐步被应用于有机废气处理, 而新型膜生物反应器^[7](membrane biofilm reactor, MBfR) 将膜分离技术与生物降解作用相结合, 既充分利用纤维膜材料较大的比表面积作为气液吸收的传质界面和微生物附着, 又可增强有机污染物的降解效果^[8], 在处理 VOCs 方面备受青睐。聚偏氟乙烯中空纤维膜生物反应器能有效处理二甲苯、乙酸乙酯单一废气以及双组分有机废气^[9-10], 乙酸乙酯废气^[11]最大去除能力达 $225 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$; 复合型平板膜生物反应器净化甲苯废气^[12], 可增强甲苯的生物降解^[13]; 利用 *Pseudomonas putida* 为菌种挂膜的中空纤维膜生物反应器处理甲苯, 通过中空纤维膜提高了氧的传质能力, 能承受更高的负荷^[14]。

膜生物反应器广泛应用于处理疏水性单一废气以及双组分有机废气方面, 但用此技术处理水性涂料喷涂过程中产生的乙二醇醚有机废气鲜有报道。本研究采用膜生物反应器处理乙二醇

收稿日期: 2019-01-02; 录用日期: 2019-05-17

基金项目: 东莞市社会科技发展重点项目 (2017507101425)

醚有机废气, 研究各种因素对去除效率的影响; 通过 16S rRNA 和宏基因组测序技术研究反应器内微生物群落结构与功能, 以为膜生物反应器处理乙二醇醚废气的实际应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验原料

气相色谱 (GC-1690, 杭州捷岛科学仪器有限公司); 玻璃转子流量计 (LZB-3WB, 余姚市舜寰流量仪表有限公司), pH 计 (pHB-3 型, 上海三信仪表厂)。

磷酸二氢钾 (KH_2PO_4)、磷酸氢二钾 (K_2HPO_4)、硫酸镁 (MgSO_4)、蛋白胨、氯化钠 (NaCl); 超纯氮气 (N_2 , 99.999 9%); 实验室所用污泥取自广东省某生活污水处理厂的厌氧池和好氧池, 接种的微生物类型有芽孢杆菌、陶厄氏菌属、噬氢菌属、蛭弧菌属等。

1.2 实验装置

膜生物反应器处理乙二醇醚有机废气的实验装置流程如图 1 所示。膜生物反应器内膜组件为聚丙烯 (PP) 中空纤维膜, 纤维内径为 0.38 mm, 外径为 0.50 mm, 纤维膜数量为 2 400 根, 有效长度为 300 mm, 反应器有效体积为 90 mL, 废气处理量为 $0.1\sim 0.6\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 。乙二醇醚气体采用动态法配制, 乙二醇醚经孟氏洗瓶后和压缩空气进入缓冲瓶混合, 混合后的气体从膜生物反应器底部进入, 由膜内扩散传质至膜外的生物膜表面, 与湿润生物膜接触被微生物降解, 净化后的气体从反应器顶部排出; 循环液体从顶部向下喷淋, 在中空纤维膜外流动, 由底部排出至循环液储槽。

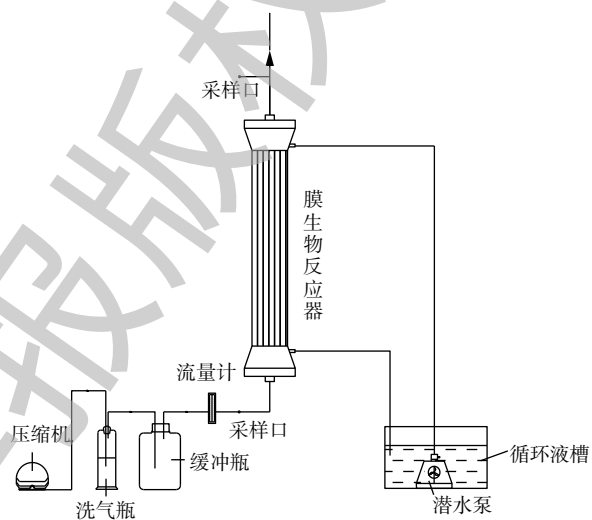


图 1 膜生物反应器处理乙二醇醚废气的实验流程图

Fig. 1 Flow chart of membrane biofilm reactor treating 2-ethoxyethanol

1.3 实验方法

在膜生物反应器 180 d 的运行期间, 每天采用气相色谱仪测定进出气中乙二醇醚浓度。在研究喷淋量和 pH 影响因素时, 每次调整运行参数运行 3 d 后, 监测进出气中乙二醇醚浓度; 在研究气体停留时间和进气浓度影响因素时, 每次调整运行参数运行 1 d 后, 监测进出气中乙二醇醚浓度。定期向循环液槽中投加氮磷营养液。

1.4 分析方法

采用气相色谱测定乙二醇醚浓度, 具体分析方法为: 采用 5% 苯基-1% 乙烯基聚甲基硅氧烷交联毛细管柱, 初始柱温为 $100\text{ }^\circ\text{C}$, 升温速率为 $10\text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, 保持 5 min; 进样口温度为 $270\text{ }^\circ\text{C}$, 检测器温度为 $240\text{ }^\circ\text{C}$, 采用氢火焰离子化检测器检测; 采用 pHB-3 型 pH 计测定循环液 pH; 采用 16S rRNA 技术分析第 30、90、145 天反应器内微生物群落结构; 采用宏基因组测序技术分析反应器内微生物的功能基因。

2 结果与讨论

2.1 膜生物反应器运行稳定性

在气体停留时间为 10 s、乙二醇醚进气浓度为 $35.0\sim 200.0\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 、循环液 pH 为 6.00~8.50、喷淋量为 $0.2\sim 1.8\text{ m}^3\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 的条件下, 膜生物反应器处理乙二醇醚的运行稳定性如图 2(a) 所示, 进出气浓度随时间变化如图 2(b) 所示。在膜生物反应器系统运行初期 (1~13 d), 进行低浓度 (40.0 ± 5.0) $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 驯化。由于聚丙烯中空纤维膜高效分离和膜基水吸收乙二醇醚的作用, 第 1 天

乙二醇醚的去除率可达 71.9%，随着纤维膜表面附着的微生物逐渐形成生物膜，第 13 天上升至 99.0%。在驯化适应期 (14~43 d)，将进气浓度提高到 $(60.0 \pm 10.0) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，乙二醇醚去除率先下降，再由 84.7% 升至 94.0%，平均去除负荷为 $20.9 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。为提高反应器抗冲击负荷能力，第 44 天将进气浓度增加到 $(140.0 \pm 10.0) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，乙二醇醚去除率由 92.2% 下降至 90.1%，然后升至 93.8%，60 d 的平均去除负荷达 $49.1 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$ 。这表明膜生物反应器具有抗冲击负荷的能力。为考察高负荷承受能力，第 105 天将乙二醇醚浓度提高到 $(180.0 \pm 10.0) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，乙二醇醚去除率由 93.8% 下降至 92.1%，第 106 天迅速恢复到 93.7%，以后 79 d 维持稳定在 94.0% 左右。这表明膜生物反应器具有较强的抗冲击负荷能力和良好的稳定性。

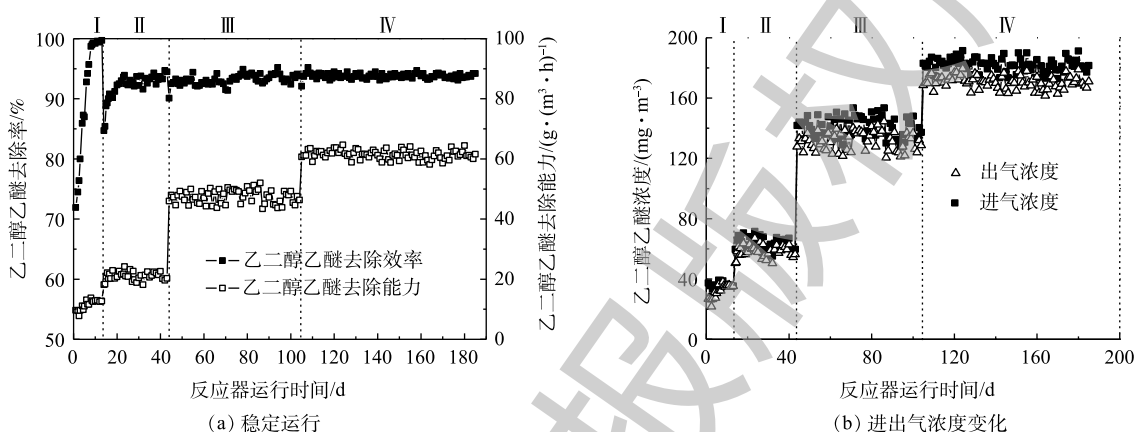


图 2 膜生物反应器稳定运行和进出气浓度变化曲线

Fig. 2 Stable operation curve with membrane biofilm reactor and operation curve of inlet and outlet gas concentrations

2.2 进气浓度和停留时间的影响

由图 3(a)可知，在气体停留时间为 10 s、循环液 pH 为 7.65、喷淋量为 $1.3 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的条件下，随着进气浓度增加，乙二醇醚的去除率先升高后下降，由 87.7% 升至 96.2%，再下降至 93.1%；进气浓度为 $314.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时，去除率最高，为 96.2%。这可能是由于乙二醇醚从纤维膜内扩散到膜外的传质速率和微生物的活性随着进气浓度升高而增加，提高了微生物捕获降解能力^[15-16]，导致去除率逐渐升高；当进气浓度超过 $314.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 时，生物膜中有限的生物量在单位时间内无法通过代谢降解过量的乙二醇醚，导致去除率逐渐下降^[17-18]。由图 3(b)可知，在进气浓度为 $140.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，

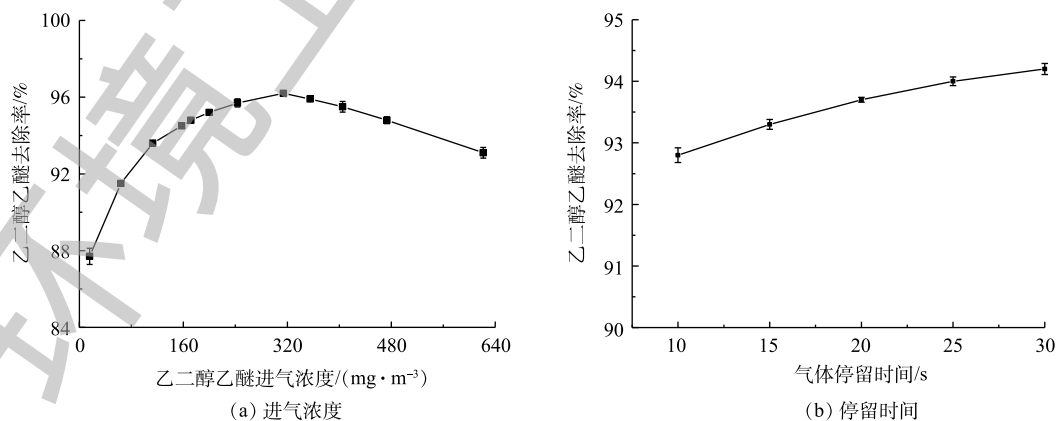


图 3 进气浓度和停留时间对乙二醇醚去除率的影响

Fig. 3 Influence of inlet concentrations and residence time on 2-ethoxyethanol removal

循环液 pH 为 7.50、喷淋量为 $1.3 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的条件下, 随着气体停留时间由 10 s 延长至 30 s, 乙二醇醚的去除率由 92.8% 升至 94.2%。延长停留时间有利于提高乙二醇醚的去除率, 但增幅较小, 同时会显著增加反应器体积, 故选取适宜的气体停留时间为 10 s。

2.3 循环液喷淋量和 pH 的影响

循环液喷淋量和 pH 对乙二醇醚去除率影响如图 4 所示。在气体停留时间为 10 s, 乙二醇醚进气浓度为 $140.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 循环液 pH 稳定在 7.52, 设置不同喷淋密度, 每个密度下反应器运行 3 d。由图 4(a) 可知, 当喷淋密度由 $0.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 增大至 $1.8 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 乙二醇醚去除率由 71.3% 升至 96.9%。这是由于乙二醇醚易溶于水, 喷淋液能吸收乙二醇醚, 增大喷淋量能增大循环液吸收乙二醇醚, 循环液中有乙二醇醚的富集, 进而增加液相中乙二醇醚与生物膜的接触, 中空纤维膜表面的生物膜和循环液中的微生物共同降解乙二醇醚。当循环液喷淋量高于 $1.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 时, 乙二醇醚去除率增幅很小, 同时会使运行成本增加, 故选取适宜的循环液喷淋量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。在气体停留时间为 10 s, 乙二醇醚进气浓度为 $140.0 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$, 喷淋量为 $1.3 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 的条件下, 由图 4(b) 可知, 乙二醇醚去除率随 pH 的升高呈现先升高后下降的趋势; 当 pH 为 7.57 时, 去除率最大为 93.5%。这是因为体系 pH 过高或者过低都会影响微生物的活性, 不利于其生长繁殖^[19-20], 进而影响乙二醇醚降解速率。因此, 本实验循环液以磷酸氢二钾、磷酸二氢钾为缓冲物质, 调节 pH, 适宜 pH 为 7.60。

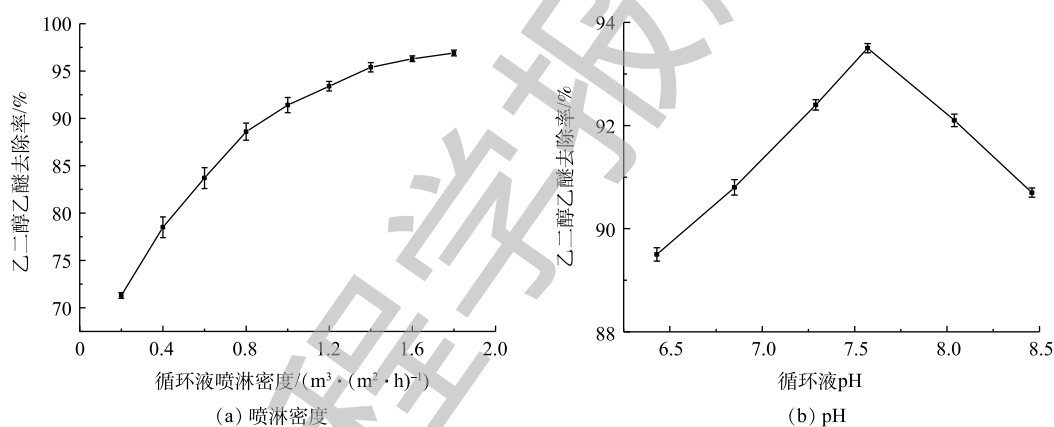


图 4 循环液喷淋密度和 pH 对乙二醇醚去除率影响

Fig. 4 Influence of liquid spraying density and pH of circulating liquid on 2-ethoxyethanol removal

2.4 乙二醇醚的生物降解动力学

膜生物反应器处理乙二醇醚的本质是酶促反应, 是利用体系中微生物产生的酶来降解乙二醇醚。Michaelis-Menten 方程被广泛运用于研究酶催化反应动力学, 因此, 采用米门方程^[21]式(1)拟合, 得出生化降解乙二醇醚的最大反应速率和半饱和常数。

$$\frac{1}{R} = \frac{K_s}{V_m} \frac{1}{C_m} + \frac{1}{V_m} \quad (1)$$

式中: R 为表观去除率; C_m 为进出气浓度的对数平均值; V_m 为最大反应速率; K_s 为半饱和常数。

将实验数据带入方程, 结果如图 5 所示。拟合所得方程为 $y=0.0007x+0.0015$, 因此, 本实验酶促反应的最大反应速率为 $666.67 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$, 半饱和常数为 $0.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

2.5 微生物群落结构与功能

采用 16S rRNA 技术分析膜生物反应器运行第 30、90、145 天的微生物群落结构变化, 结果如图 6 所示。由图 6(a) 可知, 在门分类水平上, 反应器中的微生物在第 30、90、145 天的优势菌门

均为 *Proteobacteria*(54.4%, 78.8%, 34.2%) 和 *Bacteroidetes*(26.5%, 7.9%, 50.2%)。膜生物反应器在 30~145 d, 经过 2 次进气负荷的提高, 微生物优势菌属、微生物群落结构发生了变化。在属分类水平上, 膜生物反应器中的微生物群落结构变化如图 6(b) 所示, 相对丰度在前 10 的优势菌属由第 30 天的 OC32、*Denitromonas*、*Methyloversatilis*、OLB12、*Chryseolinea*、*Bacillus*、*Thauera*、*Lewinella*、*Limnohabitans*、*Hydrogenophaga*, 第 90 天的 *Azospirillum*、C39、*Desulfovibrio*、*Blvii28*, wastewater-sludge group、*Sphaerochaeta*、*Desulfomicrobium*、*Lentimicrobium*、*Pseudomonas*、SM1A02、*Oceanimonas*, 变为第 145 天的 *Flavobacterium*、*Thauera*、*Blvii28*, wastewater-sludge group、*Oceanimonas*、*Azoarcus*、*Pseudomonas*、*Azospirillum*、*Desulfuromonas*、*Acinetobacter*、*Methyloversatilis*。第 30 天微生物菌属相对丰度较大的 OC32、*Lewinella* 和 *Limnohabitans* 在装置运行到第 90 天后消失, *Flavobacterium*、*Oceanimonas* 和 *Azoarcus* 等菌属在运行至第 145 天时, 相对丰度有明显上升, 分别为 31.5%、5.5% 和 4.2%。*Bacillus*、*Pseudomonas* 能够降解多种醚类物质^[22]; *Pseudomonas* 和 *Hydrogenophaga* 具有降解多种有机物的能力^[23], 包括酯类、醚氧化物等^[24-25]; *Flavobacterium* 在降解 2-乙基乙酸丁酯有机物中发挥重要作用, 能够降解含氧有机物^[26]; *Azoarcus* 和 *Thauera* 能共同参与酚类、吡啶等有机物的降解^[27]。

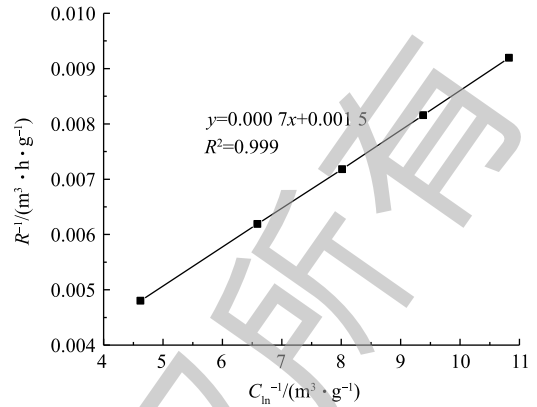


图 5 C_{ln}^{-1} 和 R^{-1} 关系图

Fig. 5 Relationship between C_{ln}^{-1} and R^{-1}

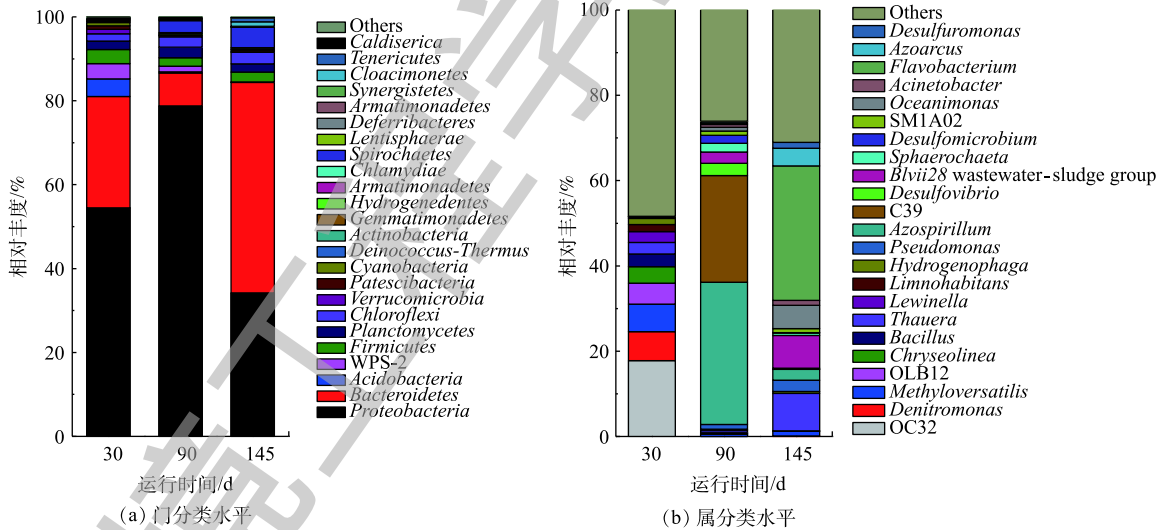


图 6 微生物在门、属分类水平上物种相对丰度

Fig. 6 Relative abundance of microorganism species at the phylum and genus level

膜生物反应器内乙二醇醚代谢主要功能基因如图 7 所示。乙二醇醚降解的功能基因分为加氧酶、醇脱氢、醛脱氢、乙酸氧化、乙醇酸氧化、乙二醇脱氢等 6 类。其中, NAD^+ 、*adhE*、*aldH* 能够将醛类物质氧化为羧酸类有机物^[28], *glcD* 能够代谢乙醇酸^[29], *adh* 能够将乙醇降解为乙醛, 乙醛被 *aldB* 继续氧化为乙酸和水^[30], *dmpB*、*xyl* 属于加氧酶, 能够在有机物的碳原子上加入氧键, 与醚键的断裂相关^[31]。宏基因组测序结果显示, 微生物菌属 *Methyloversatilis* 含有功能基因 *aldB*、*xylQ*、*glcD*、*mdh2*、*mxal*、*exaA*、*ACSS*、*acs*; *Pseudomonas* 含有功能基因 *adh*、*aldH*、*glcD*、*catA*;

Azoarcus 含有功能基因 *adhP*、*exaA*、*glcD*；*Thauera* 含有功能基因 *exaA*、*aldB*、ACSS *acs*、*frmB* ESD *fghA*、*pct*；*Hydrogenophaga* 含有功能基因 *puuC* *aldH*、ACSS *acs*、*glcD*。这些菌属能将乙二醇醚降解为二氧化碳和水。

3 结论

1) 膜生物反应器处理乙二醇醚废气的最佳运行条件为：气体停留时间为 10 s，循环液 pH 为 7.60，循环液喷淋量为 $1.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$ 。

2) 采用米门方程和双倒数方程拟合得出生化降解乙二醇醚的最大反应速率为 $666.67 \text{ g} \cdot (\text{m} \cdot \text{h})^{-1}$ ，半饱和常数为 $0.47 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

3) 采用 16S rRNA 研究膜生物反应器内的微生物群落结构变化，经过 2 次进气负荷的提高，降解乙二醇醚的主要功能菌属由第 30 天的 *Methyloversatilis* 变为第 90 天的 *Methyloversatilis*、*Pseudomonas*，最终变为第 145 天的 *Thauera* 和 *Flavobacterium*。

4) 宏基因组测序技术结果表明，*adh*、*viaY*、*adhP*、*gbsB*、*mah1*、*mxaf* 等是乙二醇醚代谢功能基因。

5) 膜生物反应器能高效降解乙二醇醚废气，去除率可达 99.6%。本研究结果为降解水性涂料生产过程中产生的有机废气提供了数据支持。

参考文献

- [1] ZHEN Y H, MENG Z L, HONG W, et al. Characteristics of atmospheric volatile organic compounds (VOCs) at a mountainous forest site and two urban sites in the southeast of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 657: 1491-1500.
- [2] ZHUANG M Z, QING E S, JUN Y Z, et al. Sector-based VOCs emission factors and source profiles for the surface coating industry in the Pearl River Delta region of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 583: 19-28.
- [3] 张俊刚, 王跃思, 王珊, 等. 京津地区大气中非甲烷烃(NMHCs)质量浓度水平和反应活性研究[J]. *环境科学研究*, 2008, 21(5): 158-162.
- [4] 吴方堃, 王跃思, 安俊琳, 等. 北京奥运时段VOCs浓度变化、臭氧产生潜势及来源分析研究[J]. *环境科学*, 2010, 31(1): 10-16.
- [5] 魏巍, 王书肖, 郝吉明. 中国涂料应用过程挥发性有机物的排放计算及未来发展趋势预测[J]. *环境科学*, 2009, 30(10): 2809-2815.
- [6] RUIZA P, MUMTAZ M, GOMBAR V, et al. Assessing the toxic effects of ethylene glycol ethers using quantitative structure toxicity relationship models[J]. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 2011, 254(2): 198-205.
- [7] ZHAO H P, STEVEN V G, TANG Y N, et al. Interactions between perchlorate and nitrate reductions in the biofilm of a hydrogen-based membrane biofilm reactor[J]. *Environmental Science and Technology*, 2011, 45: 10155-10162.
- [8] KUMAR A, DEWLUF J, HERMAN V L, et al. Membrane-based biological waste gas treatment[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 136(2/3): 82-91.

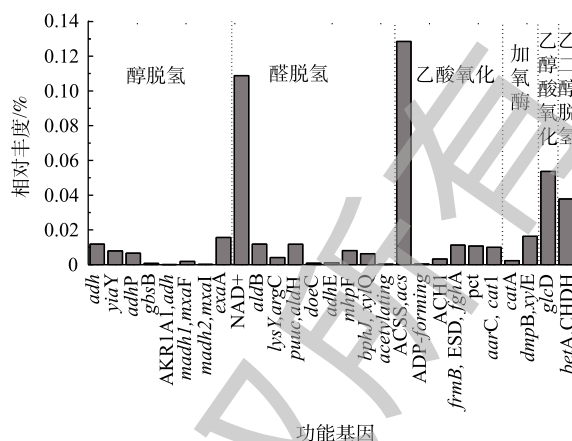


图7 乙二醇醚代谢主要功能基因

Fig. 7 Major functional genes for 2-ethoxyethanol metabolism

- [9] 修光利, 张晓峰, 赵康, 等. 中空纤维膜生物反应器处理二甲苯废气[J]. 环境工程学报, 2010, 4(10): 2287-2292.
- [10] 徐孟孟, 陈效, 蒋轶锋, 等. 滤袋式膜生物反应器净化二甲苯[J]. 环境工程学报, 2016, 10(1): 257-261.
- [11] VOLCKAERT D, HEYNDERICKX P M, LANGENHOVE H V, et al. Performance of a composite membrane bioreactor for the removal of ethyl acetate from waste air[J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(19): 8893-8898.
- [12] KUMAR A, DEWLUF J, VERCRUYSEN A, et al. Performance of a composite membrane bioreactor treating toluene vapors: Inocula selection, reactor performance and behavior under transient conditions[J]. *Bioresource Technology*, 2009, 100(8): 2381-2387.
- [13] 陈蓉, 曹明福, 王永忠, 等. 膜生物反应器处理甲苯废气的降解特性及传质过程强化[J]. 环境工程学报, 2012, 6(1): 253-257.
- [14] KIM D J, KIM H. Degradation of toluene vapor in a hydrophobic polyethylene hollow fiber membrane bioreactor with *Pseudomonas putida*[J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(6): 2015-2020.
- [15] 孙珮石, 王洁, 孙悦, 等. 吸附-生物膜理论对生物法净化气态污染物的研究[J]. 武汉理工大学学报, 2007, 29(10): 42-46.
- [16] MORRAL E, LAO C, GABRIEL D, et al. Capillary membrane bioreactor for abatement of low soluble compounds in waste gas[J]. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 2018, 93(2): 548-556.
- [17] 陈波, 张耀斌, 吴丹, 等. 生物滴滤法去除低浓度苯乙烯[J]. 环境工程学报, 2010, 4(3): 644-648.
- [18] 叶纪宏, 魏在山, 肖盼, 等. 膜生物反应器处理甲苯性能及机制[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2558-2562.
- [19] KUMAR A, DEWULF J, LUVSANJAMBA M, et al. Continuous operation of membrane bioreactor treating toluene vapors by *Burkholderia vietnamiensis* G4[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2008, 140: 193-200.
- [20] 刘建伟, 黄力华, 马文林. 生物滴滤-生物过滤组合工艺处理汽车喷漆废气中试研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(4): 871-875.
- [21] MANAN F Y A, ATTAN N, ZAKARI A, et al. Enzymatic esterification of eugenol and benzoic acid by a novel chitosan chitin nanowhiskers supported *Rhizomucor miehei* lipase: Process optimization and kinetic assessments[J]. *Enzyme and Microbial Technology*, 2018, 108: 42-52.
- [22] YU Y Y, YIN H, PENG H, et al. Biodegradation of decabromodiphenyl ether (BDE-209) using a novel microbial consortium GY1: Cells viability, pathway, toxicity assessment, and microbial function prediction[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 668: 958-965.
- [23] HAO W, GUO C Y, YIN Z H, et al. Performance and bacterial diversity of biotrickling filters filled with conductive packing material for the treatment of toluene[J]. *Bioresource Technology*, 2018, 257: 201-209.
- [24] PEI L X, YANG W, CHENG N N, et al. Evaluation on the removal performance of dichloromethane and toluene from waste gases using an airlift packing reactor[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2019, 366: 105-113.
- [25] MICHALE H. Biodegradation of gasoline ether oxygenates[J]. *Bioresource Technology*, 2013, 24: 443-450.
- [26] ZHANG Y, LIU J, WEI D, et al. Research on pressure drop solution and pilot-scale application of biotrickling filter for the treatment of butan-2-yl ethanoate[J]. *Process Biochemistry*, 2019, 79: 118-126.
- [27] MA Q, QU Y Y, SHEN W L, et al. Bacterial community compositions of coking wastewater treatment plants in steel industry revealed by Illumina high-throughput sequencing[J]. *Bioresource Technology*, 2015, 179: 436-443.

- [28] HOLM N B, NOBLE C, LINNET K, et al. JWH-018 v-OH, a shared hydroxy metabolite of the two synthetic cannabinoids JWH-018 and AM-2201, undergoes oxidation by alcohol dehydrogenase and aldehyde dehydrogenase enzymes in vitro forming the carboxylic acid metabolite[J]. *Toxicology Letters*, 2016, 259: 35-43.
- [29] PEREIRA B, LI Z J, MEY M D, et al. Efficient utilization of pentoses for bioproduction of the renewable two-carbon compounds ethylene glycol and glycolate[J]. *Metabolic Engineering*, 2016, 34: 80-87.
- [30] SUNG C K, KIM S M. Taraxerone enhances alcohol oxidation via increases of alcohol dehydrogenase (ADH) and acetaldehyde dehydrogenase (ALDH) activities and gene expressions[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50: 2508-2514.
- [31] PFEFFER F, SCHACHT S, KLEIN J, et al. Degradation of diphenylether by *Pseudomonas cepacia*[J]. *Archives Microbiology*, 1989, 152(6): 515-519.

(本文编辑: 金曙光, 王萌萌, 郑晓梅)

Gas-phase 2-ethoxyethanol removal by membrane biofilm reactor

ZHANG Xiao¹, HE Juecong², DENG Jiefan², HUANG Zhenshan¹, ZHANG Zaili¹, FAN Qingjuan¹, WEI Zaishan^{1,*}

1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275, China

2. Dongguan Institute of Environmental Science, Dongguan 523009, China

*Corresponding author, E-mail: wzs89@126.com

Abstract In this study, membrane biofilm reactor (MBfR) was used to treat waste gases containing 2-ethoxyethanol emitted from water-based painting works. The effects of operating parameters such as inlet concentration, residence time, liquid spray density and pH of circulating liquid on the purification performance of MBfR were investigated, as well as the degradation kinetics of 2-ethoxyethanol. The 16S rRNA and macromomic sequencing technologies were used to analyze the structure and functional genes of microbial community. The results show that the optimal residence time, pH of circulating liquid and spray density were 10 s, 7.6 and $1.2 \text{ m}^3 \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, respectively. The maximum reaction rate of 2-ethoxyethanol was $666.67 \text{ g} \cdot (\text{m}^3 \cdot \text{h})^{-1}$. The increase of inlet load affects to the shift of the microbial community structure in MBfR. The predominant genera changed from *Methyloversatilis* at 30 d, *Methyloversatilis* and *Pseudomonas* at 90 d, to *Flavobacterium* and *Thauera* at 145 d. The experimental results show that MBfR could effectively degrade 2-ethoxyethanol with the removal efficiency up to 99.6%. It provides reference for treating alcohol-ethers waste gas produced by water-based painting.

Keywords membrane biofilm reactor; volatile organic compounds (VOCs); water-based painting; 2-ethoxyethanol