Vol. 43 No. 5

**DOI:** 10. 13718/j. cnki. xdzk. 2021. 05. 021

# 磁场−真菌生物滴滤器

去除三氯乙烯废气的研究

王曼凝<sup>1</sup>, 颜廷春<sup>1</sup>, 耿 炎<sup>1</sup>, 尹成日<sup>2</sup>, 权 跃<sup>3</sup>

1. 延边大学 农学院, 吉林 延吉 133002; 2. 延边大学 理学院, 吉林 延吉 133002;

3. 延边大学 地理与海洋科学学院, 吉林 延吉 133002

摘要:构建了磁场-真菌生物滴滤器,接种经驯化的真菌,以木片为填料,考察了不同磁场强度(MFI),不同 三氯乙烯(TCE)进气质量浓度条件下,系统的去除率(RE)和去除容量(EC),并分析了真菌群落结构和功能. 结果表明:不同 MFI 对 TCE 的处理效率为 MFI 20.0 mT>MFI 60.0 mT>MFI 80.0 mT>MFI 0 mT. 低 磁场强度 MFI 20.0 mT 对 TCE 的处理效果最好,TCE 的质量浓度分为低进气质量浓度 370 mg/m<sup>3</sup>,变质量浓 度 500~900 mg/m<sup>3</sup>,高质量浓度 1 000 mg/m<sup>3</sup>, RE 和  $EC_{max}$ 分别为:75.9%,2 548.1 mg/m<sup>3</sup>h;67.4%~ 46.1%,3 684.3 mg/m<sup>3</sup>h和52.9%,4 854.1 mg/m<sup>3</sup>h. 高通量测序结果表明,不同磁场强度对真菌群落结构影 响明显,真菌丰富度为 MFI 0 mT>MFI 80.0 mT>MFI 60.0 mT>MFI 20.0 mT. 优势门为 Ascomycota,丰度 为 90.82%(MFI 20.0 mT)>83.17%(MFI 60.0 mT)>79.37%(MFI 80.0 mT)>51.67%(MFI 0 mT).

关键 词:磁场;真菌;生物滴滤器;三氯乙烯

**中图分类号: X172; X701** 文献标志码: A 文章编号: 1673-9868(2021)05-0172-10

有机氯废气(Chlorinated Volatile Organic Compounds, Cl-VOCs)属于美国环境保护署优先控制的污染物<sup>[1]</sup>. Cl-VOCs种类多,应用广,此类污染物具有高挥发性、外源性和持久性,在环境中非常稳定,难降解<sup>[2]</sup>. 大多数 Cl-VOCs 对人体具有致癌性,排入大气中易形成雾霾、臭氧空洞、光化学烟雾和温室效应等环境问题<sup>[3]</sup>. 过去几十年,人们在生产和使用过程中将 Cl-VOCs 泄露到环境,再加上不合适的末端处理方法,使其在世界环境范围内广泛分布<sup>[4]</sup>. Cl-VOCs 已经被划分为有害有机污染物,很多国家将其作为高度有害化学物质并列入减排的工作目标中<sup>[3]</sup>. 因此,开发 Cl-VOCs 高效、绿色治理技术已引起全世界的极大重视.

应用生物技术处理有机废气,具有操作简单、经济、安全和无二次污染物等优点<sup>[5]</sup>.其中生物滴滤器(Biotrickling filter, BTF)被广泛应用于废气治理领域,具有结构简单、寿命长、压降低、耐酸的优势<sup>[6]</sup>. 然而,该技术在处理工业 Cl-VOCs 却受到一定限制,原因为:Cl-VOCs 疏水性差,气液传质弱;另外其生物可利用性差;多数 Cl-VOCs 还具有生物毒性,导致微生物活性降低.这些因素都是造成生物滴滤器应用

收稿日期: 2019-09-12

- 作者简介: 王曼凝, 硕士研究生, 主要从事有机污染物降解研究.
- 通信作者:权 跃,博士,讲师.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51968073, 21966031); 吉林省教育厅项目(JJKH20191127KJ).

效果差的原因[7].

近年研究发现,真菌由于独特的生长环境和个体特性,对难降解的有机物具有独特的优势,可应用于降解多环芳烃、染料等<sup>[8]</sup>.真菌对恶劣环境具有更好的适应力和忍耐力,能在低湿度、低 pH 值的环境中生存,比细菌对污染物具有更好的降解能力.另外,菌丝作为多数真菌营养生长的主要模式,具有巨大比表面积,增加了对污染物的吸收和传质,进而提高降解能力<sup>[9]</sup>.

磁技术在多个领域被广泛应用,如工农医、石油和水处理等领域,具有经济、环保、易操作等优点<sup>[10]</sup>. 近年来,有报道称在废水生化处理中,一定强度磁场可以提高废水的处理能力<sup>[11]</sup>.生物体均会受到外磁 场、环境磁场和体内磁场的影响,磁性为物质的基本属性<sup>[12]</sup>.尤其是对于生物的生长,弱磁场对其具有积 极作用.除此之外,不同种类生物对相同的磁场强度反应也不同<sup>[13]</sup>.

三氯乙烯(Trichloroethylene, TCE)属于典型的 Cl-VOCs, 溶解力强, 被广泛使用. 微溶水或以非水溶 相游离于水中, 引起水环境问题. 另外, 挥发进入大气, 形成温室效应、光化学烟雾、臭氧层空洞、雾霾等 大气污染<sup>[14]</sup>. TCE 具有持久性、难降解性, 无法被微生物直接降解, 原因为无法直接提供微生物生长的物 质和能量, 但是可以被共代谢降解, 在共代谢基质所诱导出的酶和辅因子的作用下被降解<sup>[15]</sup>.

鉴于此,本研究首次将磁场、真菌和生物滴滤器进行耦合,以提高对废气的去除效果.以 TCE 为目标 废气,培养驯化降解 TCE 的混合真菌,接种在以木片为填料的 BTF 中,研究不同磁场强度下 BTF 对不同 质量浓度 TCE 的去除性能,并应用高通量测序技术首次对磁场与真菌群落结构和功能之间的关系进行了 分析,以期为磁场、真菌和 BTF 耦合技术应用于疏水性 VOCs 的去除提供有效借鉴.

# 1 材料与方法

# 1.1 生物滴滤器的构建与启动

反应流程见图 1,内部填料为 8~10 mm 粒径的木片,*MFI* 分别为 0,20.0,60.0,80.0 mT,接种菌 液为已驯化好的真菌,气体流量为 0.4 L/min,空床停留时间(EBRT)为 405 s. TCE 的质量浓度 1~15 d,为 24.6~204.6 mg/m<sup>3</sup>;16~157 d,为 370~1 000 mg/m<sup>3</sup>.营养液为改良后的马丁氏营养液,生物滴滤器 及启动具体方法见已发表文献[6].



图 1 处理 TCE 的生物滴滤器

#### 1.2 真菌的培养与驯化

取 3.0 g 腐烂木头,无菌操作环境下,于1L 的锥形瓶中,添加改良后的马丁氏营养液至 500.0 mL,同

时加入一定质量浓度的 TCE, 密封后放于 25 ℃, 80 r/min 振荡器中驯化培养. 每4 d 离心分离菌液, 重复上述操作, 并逐次加大 TCE 质量浓度, 持续 40 d 结束.

#### 1.3 培养液

改良的马丁氏营养液: 2.0 g/L 乙酸钠, 1.0 g/L 蛋白胨, 1.0 g/L KH<sub>2</sub> PO<sub>3</sub>, 0.5 g/L MgSO<sub>4</sub>, 0.5 g/L 微 量元素, 3.0 mL 的 1%链霉素, 3.3 mL 的 1%孟加拉红溶液, 加灭菌水定容至 1 000.0 mL, 调节 pH 值 为 7.0 ± 0.2.

#### 1.4 分析方法

TCE 质量浓度由岛津气相色谱 (GC-2010)测定, FID 和 Rtx-1701 (30 m×0.25 mm×0.25 μm)分别 为检测器和色谱柱,保留时间为 2.59 min,具体分析方法见已发表文献[6].

# 1.5 真菌群落结构分析

1.5.1 基因组 DNA 提取

为分析不同磁场强度下真菌群落结构,取0.3000g生物膜样品放入2.0mL灭菌离心管中.取自反应 器底部取样口,取样时间为27d(MFI0mT),69d(MFI20.0mT),103d(MFI60.0mT),137d (MFI80.0mT).根据说明书提取DNA(OMEGA试剂盒E.Z.N.A<sup>TM</sup> Mag-Bind Soil DNA Kit 的试剂 盒),使用-80℃冰箱保存提取后的DNA.

1.5.2 PCR 扩增

提取后的 DNA 委托生工生物工程(上海)股份有限公司进行高通量测序.其中扩增 DNA 分两轮完成, 第一轮扩增:基因组 DNA 精确定量选用 Qubit3.0 DNA 检测试剂盒. PCR 所用的引物已融合了 Miseq 测 序平台的 ITS1-2 通用引物; ITS1 引物: CCCTACACGACGCTCTTCCGATCTN(barcode)CTTGGT-CATTTAGAGGAAGTAA; ITS2-Rev 引物:GTGACTGGAGTTCCTTGGCACCCGAGAATTCCAGCT GCGTTCTTCATCGATGC. 第二轮扩增引入 Illumina 桥式 PCR 兼容引物. 扩增产物再进行 DNA 纯化 回收.

#### 1.5.3 高通量测序

回收的 DNA 使用 Qubit3.0 DNA 检测试剂盒进行精确定量,按照 1:1 等量混合,等量混合后的 DNA 样品量为 10 ng,物质的量为 20 pmol. Illumina Miseq 2× 300 bp 为上机测序平台,原始数据上传 至 NCBI 数据库, SRA: 126692.

# 2 结果与讨论

# 2.1 生物滴滤器的挂膜启动

启动阶段, TCE 的进气质量浓度控制在 24.6~204.6 mg/m<sup>3</sup>, EBRT 为 405 s, *MFI* 0 mT, 乙酸钠为 共代谢底物, 每天提供 4.5 L 营养液, 系统运行温度 25 ℃.

启动时间为 1~15 d, 生物滴滤器对 TCE 的去除率(Removal Efficiencies, RE)见图 2 I. 由图可知随 着启动时间的延长, RE 逐渐增加, 生物膜形成加快. 挂膜第 1 d, TCE 的质量浓度为 24.6 mg/m<sup>3</sup>, RE 为 17.17%. 接下来的启动时间里,随着生物膜的快速形成, RE 也快速提高. 尤其是第 5 d, TCE 质量 浓度为 69.6 mg/m<sup>3</sup>, RE 为 95.5%. 为了确定生物膜形成是否成熟,在 6~15 d,提高 TCE 进气质量 浓度为 86.7~204.6 mg/m<sup>3</sup>, RE 逐渐增大,在 15 d,稳定在 87.8%. 图 3 I 所示此时最大去除容量 (Maximum Elimination Capacities, EC<sub>max</sub>)为 1 630.0 mg/m<sup>3</sup>h,对应的进气负荷(Inlet Loading Rate, ILR)为 1 818.4 mg/m<sup>3</sup>h,说明生物滴滤器的挂膜启动阶段基本完成. 此结果表明,以木片为填料的 生物滴滤器,接种已驯化的真菌菌液,生物滴滤器启动时间短,缩短进入稳定运行期的时间.

### 2.2 磁场强化下对真菌生物滴滤器去除效果影响

16~157 d 反应器进入稳定运行期,依次改变磁场强度: *MFI* 0 mT, *MFI* 20.0 mT, *MFI* 60.0 mT, *MFI* 80.0 mT,考察对 TCE 的 *RE* 和*EC* 的影响. 共代谢基质仍然为乙酸钠,营养液仍为改良后的 MDS 培养液,EBRT 为 405 s; 为考察不同磁场强度下反应器对不同质量浓度 TCE 的去除效果,TCE 的进气质 量浓度设置为:低质量浓度 370 mg/m<sup>3</sup>,变质量浓度梯度 500~900 mg/m<sup>3</sup>,高质量浓度1 000 mg/m<sup>3</sup>. 2.2.1 生物滴滤器对低进气质量浓度 TCE(370 mg/m<sup>3</sup>)的去除效果

TCE 质量浓度为 370 mg/m<sup>3</sup>, 生物滴滤器对 TCE 的 RE 如图 2 所示. 由图可知,随着处理时间的延长, RE 逐渐增大. 变换磁场大小时, RE 开始均较小, 32.3% (MFI 20.0 mT) < 37.6% (MFI 0 mT) < 39.2% (MFI 80.0mT) < 41.8% (MFI 60.0mT), 尤其是 MFI 20.0 mT, 开始的 RE 最小,主要由于磁场刚建立,有 些真菌不适合磁场环境,生长速度变慢甚至死亡,而随着外加磁场时间的延长,一些真菌逐渐适合磁场环 境,生长速度和产酶量也随之增大, RE 增大,并达到稳定值. 当磁场强度分别为 MFI 20.0 mT, MFI 60.0 mT, MFI 80.0 mT 和 MFI 0 mT,达到的稳定 RE 及所需时间分别为: 75.9%,18 d; 71.4%,14 d; 67.3%,14 d; 61.0%,12 d. 由此可见,磁场强度越小,稳定后 RE 越大, RE 最大为 75.9%,此时的 MFI 为 20.0 mT. 图 3a 表示 ILR 为 3 300 g/m<sup>3</sup>h条件下,不同磁场强度下的 EC 图,由图可知,随着磁场强化 时间的延长, EC 逐渐增大, EC<sub>max</sub> 顺序为: 2 548.1 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 20.0 mT) > 2 412.2 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 60.0 mT) > 2 318.0 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 80.0 mT) > 2 038.8 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 0 mT). 此结果说明,磁场提高对 370 mg/m<sup>3</sup> 低质量浓度 TCE 的去除效果,尤其是 MFI 20.0 mT 下的去除效果最好. 2.2.2 生物滴滤器对变质量浓度 TCE(500~900 mg/m<sup>3</sup>)的去除效果

工厂排放的废气质量浓度多变,因此,考察了不同磁场强度下(0 mT,20.0 mT,60.0 mT,80.0 mT) 生物滴滤器对变质量浓度 TCE 的处理效果,每2 d 改变 TCE 质量浓度(500~900 mg/m<sup>3</sup>),结果如图2、 图3 所示.

由图 2b 可见,随着 TCE 质量浓度的增大, RE 呈现降低趋势. MFI 20.0 mT 下生物滴滤器对 TCE 的 RE 最佳,维持在 67.4%~46.1%,而当磁场强度增大到 60.0,80.0 mT, RE 分别在 62.8% ~41.8%,58.7%~38.1%.由此可见随着磁场强度的增大,生物滴滤器对 TCE 的处理效果降低. 而 MFI 0 mT 条件下生物滴滤器对 TCE 的处理效果最差,RE 为 56.5%~36.8%.结果说明,生物 滴滤器外置磁场可以提高对 TCE 的去除效果,尤其是低 MFI 20.0 mT 的效果好于 MFI 60.0 mT 和 MFI 80.0 mT. 图 3b 为 ILR 和 EC 之间的关系图,ILR 为 4 400~8 000 g/m<sup>3</sup>h.如图所示,当 MFI 0 mT, 60.0 mT, 80.0 mT, EC 随着 ILR 的增大而增大,达到最大值后出现下降趋势,主要是由于 传质的限制和反应限制所致<sup>[16]</sup>.此外,高质量浓度 TCE 也可能引起底物抑制作用,这也会使高质量浓 度下的处理效果降低<sup>[16]</sup>.然而 MFI 20.0 mT 时,EC 却随着 ILR 的增加而增大,没有出现底物抑制作 用,说明低磁场强度可以克服底物抑制作用.EC<sub>max</sub>的顺序为:3 684.3 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 20.0 mT)> 3 425.4 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 60.0 mT)>3 289.4 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 80.0 mT)>3 138.4 mg/m<sup>3</sup>h (MFI 0 mT), 对应的 ILR 分别为 7 984.2, 7 162.9, 7 204.7, 7 154.9 mg/m<sup>3</sup>h.

2.2.3 生物滴滤器对高质量浓度 TCE(1 000 mg/m<sup>3</sup>)的去除效果

高质量浓度 TCE 具有质量浓度抑制作用,因此考察高质量浓度(1 000 mg/m<sup>3</sup>)下不同磁场强度对 TCE 的去除效果.如图 2c 所示, RE 的变化趋势明显,均表现为开始较小,后随时间延长,呈现增大趋势,达到最大值. RE 大小依次为 MFI 20.0 mT>MFI 60.0 mT>MFI 80.0 mT>MFI 0 mT. 4 种磁场强度下,开始阶段 RE 均较低,主要是因为高质量浓度 TCE 引起溶剂压力<sup>[17]</sup>.开始增大 TCE 质量浓度,由于真菌对 TCE 的去除能力较差,随着时间的延长,溶剂压力的影响减弱.尤其是 MFI 20.0 mT

表现较好的 RE,为41.2%~52.9%,8d达到最大值.而 MFI 60.0 mT 和 IMF80 mT,也在8d达最大 RE,对应的 RE 范围稍低,分别为 36.3%~46.6%和 32.6%~43.3%.而无磁场下,MFI 0 mT 的 RE 仅为 26.8%,10 d后稳定在 39.4%左右.由此可见,外置磁场可以减小溶剂压力,提高 TCE 的去除效 果.分析原因:不同磁场强度下真菌群落结构不同,导致 RE 不同;另外,不同磁场强度下优势降解 真菌种类也不同,其对高质量浓度的 TCE 具有不同的耐受性.图 3c为 EC 和 ILR 的关系图,进气质量浓度为 1 000 mg/m<sup>3</sup> TCE,对应的进气负荷为 9 000 mg/m<sup>3</sup> h.由图可见,随着时间的延长,4种磁场强度下的 EC 均呈现增大趋势, EC<sub>max</sub>: 4 854.1 mg/m<sup>3</sup> h (MFI 20.0 mT)>4 168.2 mg/m<sup>3</sup> h (MFI 60.0 mT)>3 975.4 mg/m<sup>3</sup> h (MFI 80.0 mT)>3 594.8 mg/m<sup>3</sup> h (MFI 0 mT).

图 2a,b,c和 3a,b,c表明,外置磁场可以增加生物滴滤器对 TCE 的去除效果,不同磁场强度对 RE 和 EC 的影响不同.尤其是低磁场强度处理效果最好,MFI 20.0 mT 的去除效果好于 MFI 60.0 mT 和 MFI 80.0 mT,高磁场强度 80.0 mT 对 TCE 去除效果不明显.关于生物滴滤器处理 TCE 的研究不多, 已报道的接种 B. cepacia G<sub>4</sub>,以陶粒为填料,空床停留时间为 8.0~9.8 min,进气负荷为 ILR 0.492 0~ 1.708 mg/m<sup>3</sup>h,所取得的 EC<sub>max</sub> 仅为1167 mg/m<sup>3</sup>h<sup>[18]</sup>.空床停留时间为 202.5 s,填料为火山石,降解菌 为细菌, MFI 60.0 mT, EC<sub>max</sub> 为 2 656.8 mg/m<sup>3</sup>h,对应的 ILR 为 4 253.0 mg/m<sup>3</sup>h<sup>[6]</sup>.本研究中,当 MFI 20.0 mT, EC<sub>max</sub> 为 4 854.1 mg/m<sup>3</sup>h,比已报道的 EC<sub>max</sub> 大.



图 2 进出气质量浓度与去除率曲线



I:启动阶段; II:MFI0mT; III:MFI20.0mT; Ⅳ:MFI60.0mT; V:MFI80.0mT; a: 370 mg/m<sup>3</sup>; b: 500~900 mg/m<sup>3</sup>; c: 1 000 mg/m<sup>3</sup>.

#### 图 3 进气负荷与去除容量曲线

#### 2.3 磁场强度对真菌群落结构影响

2.3.1 Alpha 多样性指数分析

对样本聚类后, MFI 0 mT, MFI 20.0 mT, MFI 60.0 mT 和 MFI 80.0 mT 的生物膜样品分别获得 902, 680, 721, 749 条 OTU. 4 个生物膜样本的覆盖率均为 0.99, 说明本实验所抽取的序列数足够可以反映真菌群落的特征.

Chao 指数越大,群落物种数越多,丰富度越高.由表1可知,Chao 指数 MFI 80.0 mT>MFI 0.0 mT> MFI 60.0 mT>MFI 20.0 mT. 群落中物种个体数目分配均匀程度用 Shannon 指数表示,其均匀度顺序为 MFI 0 mT>MFI 80.0 mT>MFI 60.0 mT>MFI 20.0 mT.由此说明,MFI 20.0 mT 作用下的真菌群 落物种数最少,均匀度最小.分析原因为 MFI 20.0 mT 对某些种类真菌起抑制作用,导致真菌种类减少, 而对优势菌具有促进作用,群落以优势菌为主,从而均匀度最小,由此解释了 MFI 20.0 mT 下对 TCE 的 去除效果最佳的原因.

MFI/mT	有效序列	OTUs	Chao1	ACE	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖率
0	74, 191	902	2 691	3 111	3.80	0.06	0.99
20.0	81, 678	680	2 334	4 085	2.33	0.22	0.99
60.0	78, 914	721	2 422	4 488	2.71	0.13	0.99
80.0	85, 252	749	2 885	4 049	3.20	0.08	0.99

表1 生物滴滤器中真菌多样性

2.3.2 稀疏性曲线

图 4 为样品在 0.97 相似性水平下的稀释曲线,比较说明测序数据量不同的样本中物种的丰富度.由图 4 可知曲线虽未饱和,但均趋平坦,说明样品均已获取了绝大多数样本信息,可表达样品中真菌群落组 成<sup>[19]</sup>.样本中物种丰富度顺序为:*MFI* 0 mT>*MFI* MFI 80.0 mT ≈ MFI 60.0 mT>MFI 20.0 mT,说 明无磁场条件下的真菌物种最多,而 MFI 20.0 mT 作用下的物种数最少.

2.3.3 主坐标分析(PCoA)

PCoA 表示样本间差异,样品间距越近,说明群落组成越相似.图 5 说明 4 个样本中真菌群落间的差异,主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)是样品的最大 2 条差异特征,分别 69.2%和 18.9%的贡献率.*MFI* 80.0 mT 和 *MFI* 60.0 mT 的样品聚在一个格室,距离较近,两者的真菌群落相似性较高.*MFI* 20.0 mT 和 *MFI* 0 mT 分别聚在一个格室,真菌群落差异较大.由于主成分 1 (PC1)的贡献率最大为 69.2%,所以 *MFI* 20.0 mT 和 *MFI* 0 mT 真菌群落差异最大.由此可见,经过磁场强化作用的真菌群落结构与无磁场 作用下的差异较大.



178

真菌门分类水平见表 2,表明不同条件下真菌在门水平存在一定差异,主要门包括 Ascomycota, Basidiomycota, Zygomycota, Chytridiomycota, Microsporidia. 磁场强化下优势门 Ascomycota 丰度增大,说明磁场对 Ascomycota 具有促进作用,低磁场 MFI 20.0 mT下的丰度最大. Ascomycota 丰度大小顺序为 MFI 20.0 mT(90.82%)>MFI 60.0 mT(83.17%)>MFI 80.0mT(79.37%)>MFI 0 mT(51.67%).

本研究结果表明,优势门 Ascomycota 在磁场作用下的丰度明显增大.Ascomycota 门的真菌具有强 氧化能力,可被外源物质利用和降解,现已广泛应用于生物修复中:如有机氯化物、多环芳烃、芳香烃 类和农药等<sup>[20]</sup>.实验结果表明,磁场下 TCE 去除性提高,由此说明 Ascomycota 可以共代谢降解 TCE, 磁场作用下增大 Ascomycota 的丰度,从而提高磁场作用下对 TCE 的去除效果.作为 TCE 的降解真菌, Ascomycota 比其他的降解菌具有更多的优势,具有更强的降解能力.白腐真菌也常用于生物修复中,但 在酸性环境中生长快,而 Ascomycota 在中性环境中生长快,不降解木质素,不会引起木片填料的降解, 导致压降<sup>[21]</sup>.所以应用 Ascomycota 为优势真菌,构建的真菌生物滴滤器对降解 CI-VOCs 具有较好的效 果,具有广泛的应用前景.

гч	 丰   度/%					
] –	MFI 0	MFI 20.0	MFI 60.0	MFI 80.0		
Ascomycota	51.67	90.82	83.17	79.37		
Basidiomycota	2.83	0.33	0.22	0.40		
Zygomycota	0.03	0	0.01	0.04		
Chytridiomycota	0.03	0	0	0.01		
Microsporidia	0.01	0	0	0		
未分类	45.43	8.85	16.60	20.18		
总	100.00	100.00	100.00	100.00		

表 2 不同磁场强度下的门水平

2.4.2 属水平分析

为了深入地了解真菌的种类和功能,对排名前 10 的属进行了分析(表 3).由表 3 可见,不同磁场条件 下真菌群落存在明显差异.存在 6 个主要属,分别为 Pseudallescheria, Parascedos porium, Exophiala, unclassified Ascomycota, unclassified Sordariomycetes 和 unclassified Herpotrichiellaceae genera,功能上 可能起到共代谢降解 TCE 的作用.6 个属的丰度依次为:MFI 20.0 mT (85.9%) > MFI 60.0 mT (79.7%) > MFI 80.0 mT (63.9%) > MFI 0 mT (34.4%),该顺序与生物滴滤器对 TCE 的去除效果一 致. Pseudallescheria 在 MFI 20.0 mT 中的相对丰度最大为 22.1%,而在 MFI 0 mT 中为 16.4%,磁场 MFI 60.0 mT 和 MFI 80.0 mT 中仅为 4.8%和 3.9%.由此可见弱磁场有利于提高 Pseudallescheria 的 丰度,而高磁场强度对其具有抑制作用. Pseudallescheria sp. 分布广泛,在营养条件差的好氧土壤、污染 的水体、腐烂的木头、粪便和城市污泥中均有分布<sup>[22]</sup>.研究表明 Pseudallescheria sp. 可以用于原油<sup>[22]</sup>、 二噁英、四氯化到十氯化混合物的二噁英的降解<sup>[23]</sup>.通常以葡萄糖为共代谢底物<sup>[24]</sup>,真菌生长的最佳 pH 值小于 9,相比酸性 pH 值下的白腐真菌具有一定优势<sup>[25]</sup>.因此推测 Pseudallescheria 提高了 MFI 20.0 mT 下生物滴滤器对 TCE 的去除效果.

表 2 和表 3 说明, 磁场对真菌群落结构存在影响, 通过提高优势门 Ascomycota 的丰度, 从而提高对 TCE 的去除效率, 尤其是弱磁场 MFI 20.0 mT 作用下去除效果最佳. 多数研究表明弱磁场对微生物起 促进作用, 而磁场强度增大则起抑制作用. 如安燕等<sup>[26]</sup>发现由磁粉产生的弱磁场可以加速微生物生长, 1~4 g/L的磁粉有利于微生物对数生长期的提前.Okuno等<sup>[27]</sup>研究发现低磁场强度促进大肠杆菌生长, 高强度磁场则无此作用.分析原因为合适大小的磁场磁化了生物膜中的水,改变了介质水溶液的很多性 质,尤其是介质水溶剂渗透压的改变提高了微生物细胞膜的通透性,从而使营养液更容易被微生物吸 收,促进了微生物的生长和繁殖<sup>[28]</sup>.另外,相同磁场强度对不同种微生物的影响也不同,代群威等<sup>[29]</sup>研 究发现 0.15 T磁场对葡萄球菌、大肠杆菌的生长影响不明显,但抑制白色念珠菌生长.磁场对微生物 的影响因素复杂,随着磁场大小和类型、作用时间和温度、生长介质、微生物种类的不同而不同<sup>[13]</sup>.

Гſ	4 <del>0</del>	冨	丰 度/%			
	5K)	/)丙	MFI 0	MFI 20.0	MFI 60.0	MFI 80.0
Ascomycota	Sordariomycetes	Pseudallescheria	16.4	22.1	4.8	3.9
Ascomycota	_	Unclassified Ascomycota	2.5	39.9	9.2	9.4
Ascomycota	Sordariomycetes	Parascedos porium	1.3	12.5	23.3	14.8
Ascomycota	Sordariomycetes	Unclassified Sordariomycetes	2.8	6.4	17.0	20.8
Ascomycota	Chaetothyriomycetes	Exophiala	3.6	3.0	17.1	5.0
Ascomycota	Eurotiomycetes	Unclassified Herpotrichiellaceae	7.8	2.1	8.3	10.0
Ascomycota	Leotiomycetes	Unclassified Pseudeurotiaceae	2.5	1.6	0.8	4.7
Ascomycota	Sordariomycetes	Cosmospora	1.5	0.3	0.1	1.0
Ascomycota	Sordariomycetes	Atractium	0.2	0.2	0.2	3.6
Ascomycota	Sordariomycetes	Haptocillium	1.1	0.0	0.0	0.5
others	_	—	55.3	10.2	17.3	24.9
Sum	_	_	100	100	100	100

表 3 不同磁场强度下的属水平

# 3 结 论

以木片为填料,真菌为降解菌,考察磁场强化下生物滴滤器对 TCE 废气的去除效果. 2.0 g/L 乙酸 钠为共代谢底物,EBRT 为 405 s,营养液为改良后的马丁氏营养液,供给量为 4.5 L/d,主要结论如下: 挂膜启动阶段,TCE 进气质量浓度为 24.6~204.6 mg/m<sup>3</sup>,磁场强度为 0,在 15 d内可快速完成挂 膜启动,RE 稳定在 87.8%;磁场提高真菌生物滴滤器对 TCE 的去除效果,尤其是 MFI 20.0 mT下 TCE 的去除效果最好:TCE 质量浓度为 370,500~900,1 000 mg/m<sup>3</sup>, RE 和  $EC_{max}$  分别为 75.9%, 2 548.1 mg/m<sup>3</sup>h; 67.4%~46.1%,3 684.3mg/m<sup>3</sup>h; 52.9%,4 854.1 mg/m<sup>3</sup>h;磁场作用下降低真菌丰 富度和均匀度,但提高优势菌的丰度.优势门为 Ascomycota, MFI 20.0 mT 中丰度最大为 90.82%,明显 高于 MFI 0 mT(51.67%). MFI 20.0 mT 中的优势属为 Pseudallescheria,丰度为 22.1%.

# 参考文献:

- [1] BHATT P, KUMAR M S, MUDLIAR S, et al. Biodegradation of Chlorinated Compounds—A Review [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2007, 37(2): 165-198.
- [2] LEIC, LIANG F Y, LI J, et al. Electrochemical Reductive Dechlorination of Chlorinated Volatile Organic Compounds (Cl-VOCs): Effects of Molecular Structure on the Dehalogenation Reactivity and Mechanisms [J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 358: 1054-1064.
- [3] DAIC H, ZHOU Y Y, PENG H, et al. Current Progress in Remediation of Chlorinated Volatile Organic Compounds: a Review [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2018, 62: 106-119.
- [4] ZHANGZ, HUANG J, XIA H Q, et al. Chlorinated Volatile Organic Compound Oxidation over SO<sub>42</sub>-/Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Catalysts

[J]. Journal of Catalysis, 2018, 360: 277-289.

- [5] 边凌涛,刘晓伟,赵 萌.固定化高效微生物与 MBR-RO 组合技术深度处理焦化废水的研究 [J].西南师范大学学报 (自然科学版), 2017, 42(12): 113-118.
- [6] 权 跃,吴 吴,尹振浩,等.静态磁场对生物滴滤池强化的研究——以三氯乙烯废气的去除及细菌群落结构研究为例[J].中国环境科学,2018,38(3):1099-1108.
- [7] LOPEZL R, MORA M, BAEZA J A, et al. Titrimetry as a Tool for the On-Line Monitoring of Biological Activity in a Desulfurizing Biotrickling Filter under Aerobic Conditions [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, 124: 151-157.
- [8] ZHANGY, LIU J, QIN Y W, et al. Performance and Microbial Community Evolution of Toluene Degradation Using a Fungi-Based Bio-Trickling Filter [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365: 642-649.
- [9] VERGARA-FERNÁNDEZ A, HERNÁNDEZ S, REVAH S. PhenomenologicalModel of Fungal Biofilters for the Abatement of Hydrophobic VOCs [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2008, 101(6): 1182-1192.
- [10] 张 军,李书光,胡松青.磁处理技术的应用与研究进展 [J]. 青岛大学学报(自然科学版),2002,15(4):71-74.
- [11] HUANGT, ZHANG G M, ZHANG N, et al. Pre-Magnetization by Weak Magnetic Field Enhancing Fe0-Fenton Process for Wastewater Treatment [J]. Chemical Engineering Journal, 2018, 346: 120-126.
- [12] 李广新. 电磁学生物应用概论 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 106-107.
- [13] MATEESCU C, BURUNŢEA N, STANCU N. Investigation of Aspergillus Niger Growth and Activity in a Static Magnetic Flux Density Field [J]. Romanian Biotechnological Letters, 2011, 16(4): 6364-6368.
- [14] RAN L, ZHAO C S, XU W Y, et al. VOCReactivity and Its Effect on Ozone Production during the HaChi Summer Campaign [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2011, 11(10): 4657-4667.
- [15] ZHANG Y, TAY J. Toxic and Inhibitory Effects of Trichloroethylene Aerobic Co-Metabolism on Phenol-Grown Aerobic Granules [J]. Journal of Hazardous Materials, 2015, 286: 204-210.
- [16] WANS G, LI G Y, ZU L, et al. Purification of Waste Gas Containing High Concentration Trimethylamine in Biotrickling Filter Inoculated with B350 Mixed Microorganisms [J]. Bioresource Technology, 2011, 102(12): 6757-6760.
- [17] MCDERMOTT C, HEFFRON J J A. Toxicity of Industrially Relevant Chlorinated Organic Solvents in Vitro [J]. International Journal of Toxicology, 2013, 32(2): 136-145.
- [18] LEE E Y, YE B D, PARK S. Development andOperation of a Trickling Biofilter System for Continuous Treatment of Gas-Phase Trichloroethylene [J]. Biotechnology Letters, 2003, 25(20): 1757-1761.
- [19] 王彦锟, 韦建玉, 金亚波, 等. 生物有机肥对黄壤烟田真菌群落结构和烟叶产质量的影响 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 38-45.
- [20] ARANDA E, GODOY P, REINA R, et al. Isolation of AscomycotaFungi with Capability to Transform PAHs: Insights into the Biodegradation Mechanisms of Penicillium Oxalicum [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2017, 122: 141-150.
- [21] KÜES U. FungalEnzymes for Environmental Management [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2015, 33: 268-278.
- [22] APRIL T M, ABBOTT S P, FOGHT J M, et al. Degradation of Hydrocarbons in Crude Oil by the Ascomycete Pseudallescheria Boydii (Microascaceae) [J]. Canadian Journal of Microbiology, 1998, 44(3): 270-278.
- [23] NAKAMIYA K, FURUICHI T, ISHII K. Isolation of a Fungus from Denitrifying Activated Sludge that Degrades Highly Chlorinated Dioxins [J]. Journal of Material Cycles and Waste Management, 2002, 4(2): 127-134.
- [24] ISHII K, FURUICHI T, TANIKAWA N, et al. Estimation of theBiodegradation Rate of 2, 3, 7, 8-Tetrachlorodibenzo-p-Dioxin by Using Dioxin-Degrading Fungus, Pseudallescheria Boydii [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 162(1): 328-332.
- [25] BEHNOOD M, NASERNEJAD B, NIKAZAR M. Biodegradation ofCrude Oil from Saline Waste Water Using White Rot Fungus Phanerochaete Chrysosporium [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(4):

1879-1885.

- [26] 安 燕, 刘 云. 磁化水及其溶液表面性质的研究 [J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 1998, 27(4): 103-106.
- [27] OKUNO K, FUJINAMI R, ANO T, et al. Disappearance of Growth Advantage in Stationary Phase (GASP) Phenomenon under a High Magnetic Field [J]. Bioelectrochemistry, 2001, 53(2): 165-169.
- [28] 韩星航,李 星,杨艳玲,等.电磁场对污泥回流工艺混凝效能和絮体特性的影响 [J].中国环境科学,2016,36(4): 1087-1092.
- [29] 代群威, 董发勤, 王 勇. 静磁场对大肠杆菌生长过程的作用机制研究 [J]. 生物磁学, 2004, 4(3): 21-23.

# Removal of Trichloroethylene by a Magnetic Field-Fungal Biotrickling Filter

WANG Man-ning<sup>1</sup>, YAN Ting-chun<sup>1</sup>, GENG Yan<sup>1</sup>, YIN Cheng-ri<sup>2</sup>, QUAN Yue<sup>3</sup>

1. School of Agricultural, Yanbian University, Yanji Jilin 133002, China;

2. School of Sciences, Yanbian University, Yanji Jilin 133002, China;

3. School of Geography and Marine Sciences, Yanbian University, Yanji Jilin 133002, China

Abstract: A fungal biotrickling filter (BTF) packed with wood chipswas employed to treat trichloroethylene (TCE) gas under different magnetic field intensities (MFI), and the relationship between fungal community structure and function was analyzed. The results showed thatthe removal performances followed the order: MFI 20.0 mT>MFI 60.0 mT>MFI 80.0 mT>MFI 0 mT. MFI 20.0 mT achieved the best removal performances. When TCE concentration was set at approximately 370 mg/m<sup>3</sup>, 500 to 900 mg/m<sup>3</sup> and 1000 mg/m<sup>3</sup>, the corresponding removal efficiencies(RE) and maximum elimination capacities( $EC_{max}$ ) were 75.9% and 2 548.1 mg/m<sup>3</sup>h, 67.4%~46.1% and 3 684.3 mg/m<sup>3</sup>h; and 52.9% and 4 854.1 mg/m<sup>3</sup>h, respectively. High-through put sequencing indicated that MFI had a prominent influence on fungal community structure, and speciesrichness followed the order: MFI 0 mT>MFI 80.0 mT>MFI 60.0 mT>MFI 20.0 mT. The relative abundance of the predominant phylumAscomycota followed the order: 90.82%(MFI 20.0 mT)>83.17% (MFI 60.0 mT)>79.37%(MFI 80.0 mT)>51.67%(MFI 0 mT).

Key words: magnetic field; fungus; biotrickling filter; trichloroethylene

#### 责任编辑 包 颖