



不同接种源对微生物电解池去除水中氨氮的影响

李 涵^{1,2}, 赵开心^{1,2}, 王 菲¹, 吴大付¹, 郭丽丽³

(1. 河南科技学院, 河南新乡 453003; 2. 河南师范大学, 河南新乡 453007;

3. 河南科技大学, 河南洛阳 471000)

[摘要] 使用双室微生物电解池(MEC)装置, 分别以回流污泥、曝气池污泥、小麦根际土壤为接种源, 探究 MEC 去除模拟废水中氨氮的最佳电压及相关微生物群落变化。结果显示, 不同的微生物接种源都有其最佳外加电压, 外加电压对氨氮去除率的影响也呈现出不同趋势, 以回流污泥为接种源的 MEC 在 0.5 V 电压下的氨氮去除率最高为 75%。利用高通量测序对微生物群落进行多样性分析, Proteobacteria 为硝化反应的优势微生物菌门, 在最佳电压下培养前后, 以回流污泥和曝气池污泥为接种源的 MEC 中的 Proteobacteria 均出现了增长, 分别由 36.1%、36.4% 增加到 68.4%、60.7%, 而以根际土壤为接种源的 MEC 中的微生物群落基本未发生明显变化。就微生物组成而言, 曝气池污泥和回流污泥的组成较为接近, 外加电压对其影响也呈现出一定的相似性, 而以根际土壤为接种源的 MEC 与前两者差别较大。不同接种源微生物的多样性和丰富度均有所不同, 结合氨氮去除效果推测, 外加电压促使了 MEC 中硝化功能菌聚集, 从而提高了 MEC 去除氨氮的能力。

[关键词] 微生物接种源; 微生物电解池; 氨氮; 高通量测序; 微生物群落

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)10-0104-07

Microbial inoculation influences on ammonia nitrogen removal in a microbial electrolysis cell reactor

LI Han^{1,2}, ZHAO Kaixin^{1,2}, WANG Fei¹, WU Dafu¹, GUO Lili³

(1. Henan Institute of Science and Technology, Xinxiang 453003, China; 2. Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 3. Henan University of Science and Technology, Luoyang 471000, China)

Abstract: A two-compartment microbial electrolysis cell (MEC) was used to investigate the optimal voltage and related microbial community changes of ammonia nitrogen removal from simulated wastewater by using reflux sludge, sludge from an aeration tank, and soil from wheat roots as microbial inoculation sources. The results showed that different microbial inoculation sources had their best applied voltage, and the effect of applied voltage on ammonia removal rate also showed different trends. The maximum ammonia removal rate of MEC inoculated with reflux sludge was 75% at 0.5 V. High-throughput sequencing was used to analyze the diversity of microbial communities and Proteobacteria were found to be the dominant microbial phyla for nitrification reaction. Before and after culture, the dominant microflora Proteobacteria in the MEC inoculated with reflux sludge and aeration tank sludge increased from 36.1% and 36.4% to 68.4% and 60.7% under the optimum voltage, respectively, while the microflora in the MEC inoculated with root soil did not change significantly. In terms of microbial composition, the compositions of the aerator tank sludge and reflux sludge were similar, and the influence of applied voltage also showed certain similarity. However, the microbial composition of the reactor inoculated from roots soil was quite different from that of the former two. The diversity and richness of different inoculated microorganisms were different. Combined with the ammonia nitrogen removal effect, it was speculated that the applied voltage promoted the accumulation of nitrifying bacteria in the MEC, thus improving their ammonia nitrogen removal ability.

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(31872184, 51708184); 河南省科技攻关项目(212102310021); 博士后自然科学基金资助项目(2018M632784)

Key words: microbial inoculating sources; microbial electrolysis cell; ammonia nitrogen; high-throughput sequencing; microbial community

随着工农业的快速发展,化工、化肥、养殖等行业产生了大量氨氮废水^[1-2]。如果这类废水排入河流湖泊,将加剧水体富营养化、毒害水生生物,也严重危害饮用水安全。目前报道最多的氨氮废水处理方法主要有吹脱法、吸附法、化学沉淀法、离子交换法、折点氯化法等物化法^[3-7],但物化法存在运行成本高、对运行环境要求严格、易产生二次污染等缺点,并不是理想的处理技术。生物法具有运行成本低、无二次污染、可回收有用物质、条件温和等优点,克服了物化法的一些缺点^[8],在处理氨氮废水方面具有良好的应用前景。

生物法利用微生物将污水中的氨氮最终转化为 N_2 ,去除效果较好,但往往需要补充碳源,且具有占地面积大、操作复杂、启动缓慢等弊端。生物电化学法将电化学法与生物法相结合,弥补了2种方法单独运行时的不足,有效提高了反应器内的生物脱氮性能,已成为废水处理技术发展的趋势^[9-10]。生物电化学系统(BES)主要包括微生物燃料电池(MFC)和微生物电解池(MEC)。生物电化学法脱氮时,外加电压可显著影响微生物的活性、生长速率及新陈代谢,从而影响微生物的硝化作用,同时水电解产生的部分中间产物也可将氨氮转化为氮气^[11-12]。因此,生物电化学脱氮具有更高效、节能的优点。Xue WU等^[13]采用MEC模式对阴极室模拟废水和实际废水(NH_4^+-N 质量浓度为1 g/L)进行处理,二者的氨氮回收率分别为94%和79%。Tingting ZHU等^[14]构建了单室BES,当阳极电势控制为-0.5 V时,氨氧化速率加快。

目前,有关不同微生物接种源对双室MEC处理氨氮废水的影响还未见报道,本研究以小麦根际土壤、回流污泥、曝气池污泥为微生物接种源,以碳毡为阴极电极材料,利用双室MEC去除模拟废水中的氨氮,考察不同微生物接种源和外加电压对氨氮去除率的影响,并对阴极室的碳毡进行高通量测序,重点分析微生物的多样性。

1 材料及方法

1.1 试剂、废水及微生物接种源

试剂主要包括磷酸盐(PBS)缓冲液、矿物质溶液。矿物质溶液成分包含50 mg/L EDTA、4.32 mg/L $MnSO_4 \cdot H_2O$ 、5.00 mg/L $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 、4.15 mg/L $CaCl_2 \cdot 2H_2O$ 、

1.61 mg/L $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ 、2.20 mg/L $ZnSO_4$ 、1.57 mg/L $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ 、0.1 mg/L H_3BO_3 、1.1 mg/L Na_2MoO_4 。

模拟废水成分:1.8 g/L Na_2HPO_4 、0.66 g/L NaH_2PO_4 、0.1 g/L KCl、1 g/L $NaHCO_3$ 、0.1 g/L NH_4Cl 、0.012 g/L $MgSO_4$ 、25 mL/L 矿物质溶液。

本研究微生物接种源选择回流污泥、曝气池污泥和小麦根际土壤。回流污泥和曝气池污泥取自新乡市骆驼湾污水处理厂,常规指标见表1。小麦根际土壤采集自试验田,采用5点取样法,去除土壤表层可见的动植物残体,深挖到20 cm处,将根系和土壤一同装入无菌袋中,放于4℃冰盒内带回实验室;到实验室后将根系取出,轻轻抖掉根系表层的土壤,用毛刷将附着在根系上的土壤刷下;将5个样点的根际土壤混匀并过筛(1 mm),即得到实验用的根际土壤,常规指标见表2。

表1 回流污泥和曝气池污泥常规指标

Table 1 Index of reflux sludge and aeration tank sludge

项目	pH	MLSS/(g·L ⁻¹)	SV ₃₀ /%	SVI/(mL·g ⁻¹)
曝气池污泥	6.8	8.12	70	86.15
回流污泥	7.1	14.09	92	65.29

表2 小麦根际土壤常规指标

Table 2 Index of wheat roots soil

项目	pH	有机质/(g·kg ⁻¹)	TN/(g·kg ⁻¹)
数值	8.16	9.428	65.29

1.2 实验装置

主反应器采用双室MEC反应器,结构见图1。

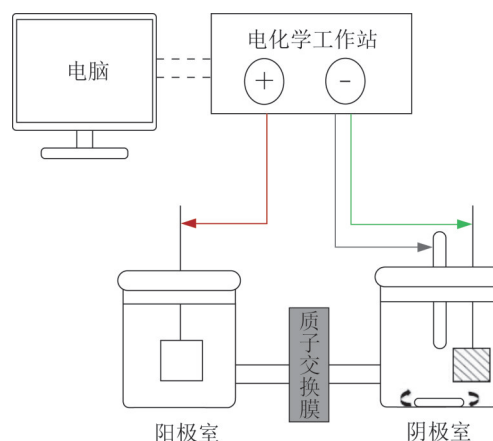


图1 双室MEC反应器

Fig. 1 Two-chamber MEC reactor

如图1所示,采用阳离子交换膜将阴极室和阳极室分隔,阳离子交换膜材质为Nafion[®]N117膜,厚度为0.180 mm,交换容量 ≥ 0.90 mmol/g, CAS: 31175-20-9 d.1.98。阴阳极室的有效工作容积均为100 mL,阴极材料为预处理(在沸水中煮2 h后自然风干)后的碳毡(50 mm \times 50 mm),阳极材料为石墨板(50 mm \times 50 mm)。采用与三电极系统相连的CHI1000C恒电位仪(上海辰华仪器公司)控制电极电位,以阴极为工作电极,阳极为对电极,Ag/AgCl电极(上海辰华仪器公司CHI111)为参比电极并置于阴极室中。

1.3 实验方法

在阴极室内加入回流污泥与模拟废水,在阳极室内加入PBS缓冲液。将阴阳极室放到显热磁力搅拌器上,分别设置4个电压:0.3、0.5、0.7、0.9 V。将设置好的4个MEC装置同时运行,并设置空白对照(不加电压)。每天定时取样,装置运行3 d后,将碳毡剪掉一小块保存,并检测其上的微生物类型。曝气池污泥与根际土壤接种源的操作同回流污泥。表3为MEC装置的运行条件,反应序号中R1、A1、S1分别表示回流污泥、曝气池污泥和根际土壤微生物接种源,V1、V2、V3、V4分别代表0.3、0.5、0.7、0.9 V的运行电压。此外,R0、A0、S0分别代表回流污泥、曝气池污泥和根际土壤的空白对照组。

表3 MEC的运行条件

Table 3 Operating conditions of MEC

微生物接种源	反应序号	运行电压 U/V	运行时间 t/d	运行温度 T/°C
回流污泥	R1V1	0.3	3	30 \pm 1
	R1V2	0.5	3	30 \pm 1
	R1V3	0.7	3	30 \pm 1
	R1V4	0.9	3	30 \pm 1
曝气池污泥	A1V1	0.3	3	30 \pm 1
	A1V2	0.5	3	30 \pm 1
	A1V3	0.7	3	30 \pm 1
	A1V4	0.9	3	30 \pm 1
根际土壤	S1V1	0.3	3	30 \pm 1
	S1V2	0.5	3	30 \pm 1
	S1V3	0.7	3	30 \pm 1
	S1V4	0.9	3	30 \pm 1

1.4 分析方法

每天取阴极室中的上清液,经0.22 μ m玻璃纤维滤纸过滤后,使用纳氏试剂分光光度法测定上清液氨氮含量,并计算氨氮去除率。

1.5 高通量测序

高通量测序被广泛应用在工厂污染废水、土壤

和大气中微生物多样性的分析,被称为“新一代的测序技术”^[15-17]。采用高通量测序检测阴极碳毡上生物膜的微生物结构,并对微生物菌群进行OTU(可操作分类单元)分类^[18]。本研究高通量测序送往上海派森诺生物公司测定。

2 结果与讨论

2.1 不同接种源 MEC 的氨氮去除效果

不同微生物接种源的MEC中氨氮去除率随运行电压的变化见图2。

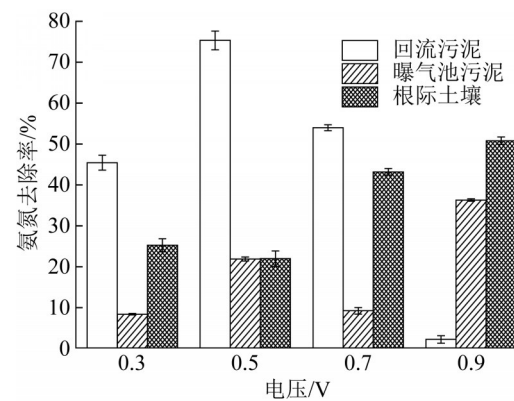


图2 不同微生物接种源的MEC中氨氮去除率随运行电压的变化

Fig. 2 The removal rate of ammonia nitrogen in MEC of different microbial inoculation sources varies with operating voltage

由图2可以看出,电压对不同微生物接种源的MEC的影响有较大不同。以回流污泥为接种源的MEC,随着电压的增大(0.3~0.5 V),氨氮去除率也相应提高,在电压为0.5 V时,氨氮去除效果最佳,去除率达到75.00%;电压超过0.5 V后氨氮去除率又出现下降趋势,0.9 V时氨氮去除率降至最低(2%)。以根际土壤为接种源的MEC,随着电压的升高,氨氮去除率也逐渐升高,在电压为0.9 V时最佳,氨氮去除率为50.52%。而曝气池污泥在电压刺激下对氨氮的去除效果不佳,在最佳电压0.9 V时仅取得了36.02%的氨氮去除率,原因可能是曝气池污泥中具有硝化能力的微生物含量较少,不利于氨氮的转化去除。同一外加电压下,不同微生物接种源的MEC中氨氮去除率也差别较大,电压低于0.9 V时,以回流污泥为接种源的MEC的氨氮去除效果较好;而电压为0.9 V时,根际土壤的氨氮去除率最高。因此,不同微生物接种源的MEC在去除模拟废水中氨氮时都有其最佳外加电压,不同外加电压和接种源对氨氮去除率的影响也呈现不同趋势。

2.2 生物结构分析

2.2.1 门分类水平上的韦恩图

对3组不同微生物接种源的 MEC 阴极生物膜进行高通量测序,得到门分类水平上的 OTU 丰度矩阵。根据 OTU 丰度矩阵,使用 R 软件计算各样本组共有 OTU 的数量,并通过韦恩图直观地呈现各样本微生物的分布。图 3 为在 4 个不同电压下发生硝化反应的阴极生物膜在门分类水平上微生物的 OTU 数量。

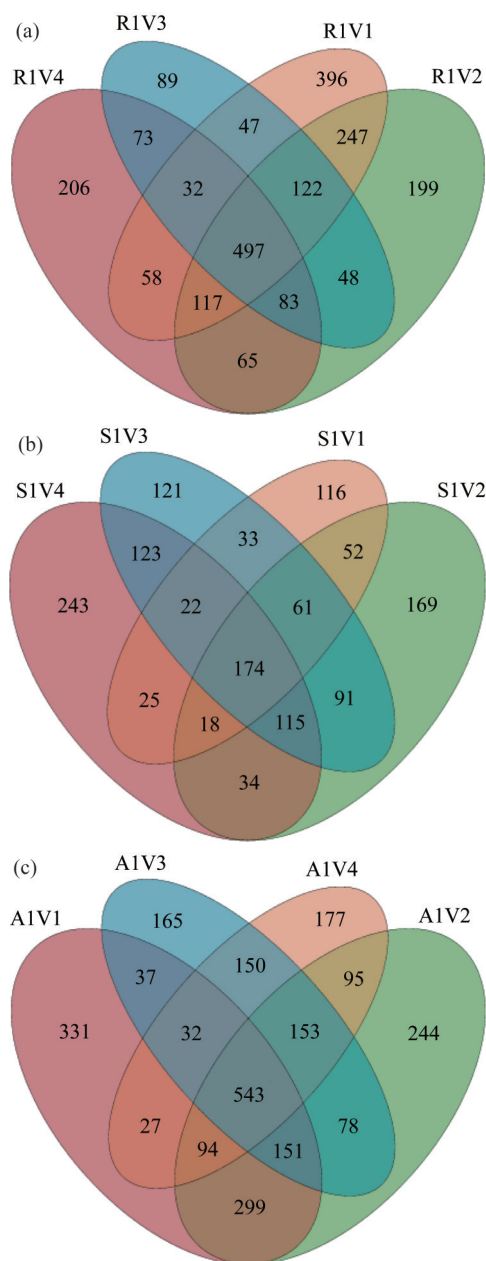


图3 不同电压下不同接种源的 MEC 生物膜中微生物在门分类水平上的韦恩图

Fig. 3 Wenn diagram of the microbial community at the phylum level in MEC with different inoculation sources at different voltages

由图 3(a)可知,以回流污泥为接种源的 MEC 阴极生物膜在 4 个运行电压下的总 OTU 数量为 2 279,共有 OTU 数量为 497,占总 OTU 数量的 21.8%;0.3 V 与 0.5 V 电压条件下共有 OTU 数量为 983,占总 OTU 数量的 43.1%。由图 3(b)可知,以根际土壤为接种源的 MEC 阴极生物膜在 4 个运行电压下的总 OTU 数量为 1 397,共有 OTU 数量为 174,占总 OTU 数量的 12.5%;以根际土壤为接种源的硝化反应中,0.7 V 与 0.9 V 电压条件下氨氮去除率相近(分别为 43.92% 和 50.52%),共有 OTU 数量为 434,占总 OTU 数量的 31.1%;4 个电压中独有 OTU 数量最多的是 0.9 V,独有 OTU 数量为 243,然后依次为 0.5 V、0.7 V、0.3 V,独有 OTU 数量分别为 169、121、116。由图 3(c)可知,以曝气池污泥为接种源的 MEC 阴极生物膜在 4 个运行电压下的总 OTU 数量为 2 576,共有 OTU 数量为 543,占总 OTU 数量的 21.1%。整体来看,外加电压对不同接种源的 MEC 阴极生物膜中微生物的生长影响较大。

2.2.2 门分类水平上微生物培养前后对比

模拟废水经不同接种源的 MEC 处理后,阴极生物膜上的微生物组成及数量会发生一定变化。外加电压通过促进或者抑制某些微生物的生长繁殖来影响氨氮的去除率。图 4 为最佳电压下不同接种源的 MEC 中微生物在门分类水平上培养前后的变化。

从图 4(a)可以明显看出,回流污泥接种源培养前后 MEC 中的优势菌种均为 Proteobacteria;在 0.5 V 电压下培养 3 d 后,Proteobacteria 相对丰度明显增多,由原来的 36.1% 增加到 68.4%;Chloroflexi 相对丰度明显减少,由原来的 24.1% 减少到 8.5%。根际土壤接种源培养前后 MEC 中的优势菌种均为 Proteobacteria,相对丰度变化也不明显(85.7%→84.9%),Actinobacteria 的相对丰度由 9.5% 增至 11.9%[图 4(b)]。由图 4(c)可见,曝气池污泥接种源培养前后 MEC 中的优势菌种均为 Proteobacteria,在 0.9 V 电压下培养 3 d 后,Proteobacteria 相对丰度明显增多,由原来的 36.4% 增加到 60.7%。Proteobacteria 是 3 种不同接种源的 MEC 硝化反应过程中的优势菌门,该菌门包含大量具有硝化及反硝化作用的细菌,对水体的脱氮效果起重要作用。J. DESLOOVER 等^[19]报道了 BES 中自养脱氮的主要优势菌归属 Proteobacteria,这些菌广泛依附在脱氮电极上,尽管数量不多,但脱氮效率比较高。Rui DU 等^[20]通过分析稳定运行的反硝化氨氧化反应器,也发现反应器

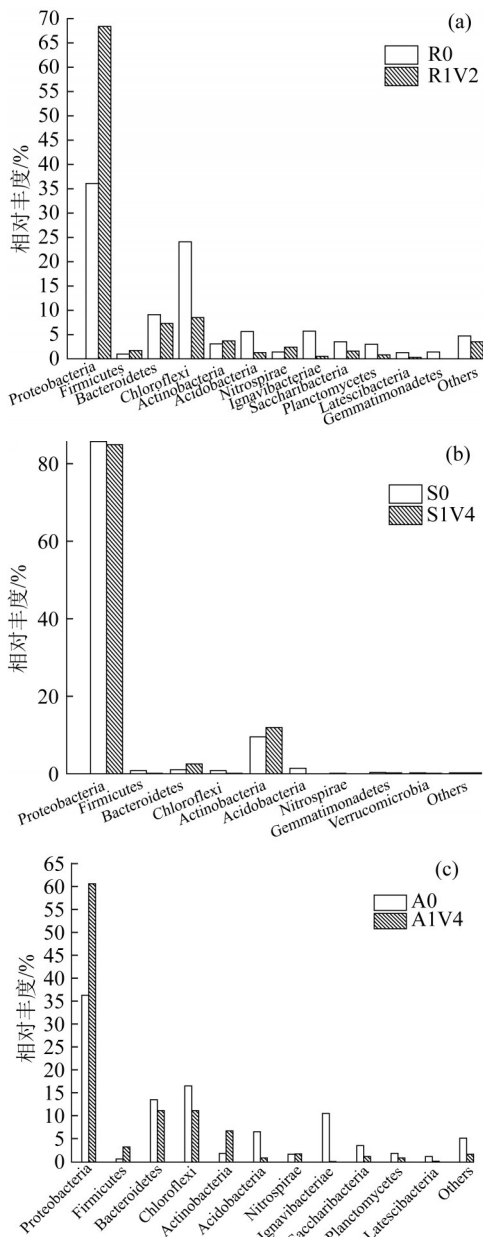


图4 最佳电压下不同接种源的 MEC 培养前后微生物变化

Fig. 4 Microbial changes of MEC with different inoculation sources before and after culture under the optimum voltage

中 Proteobacteria 为优势菌门。

2.2.3 微生物群落属水平热图

为进一步分析不同微生物接种源细菌群落组成差异,利用热图(图5)聚类排名前30的细菌属,不同的微生物接种源和外加电压引起了各菌种不同的分布情况。

如图5所示,在A0、R0、S0、R1V2、A1V4和S1V4中,*Pseudomonas*、*Alcanivorax*、*Hahella*、*Hyphomicrobium*、*Ferruginibacter*、*Nitrospira* 相对丰度较高,其中 *Pseudomonas* 的相对丰度分别为 11.37%、11.89%、44.33%、

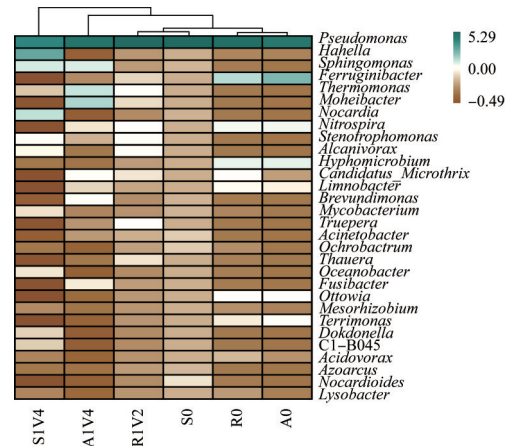


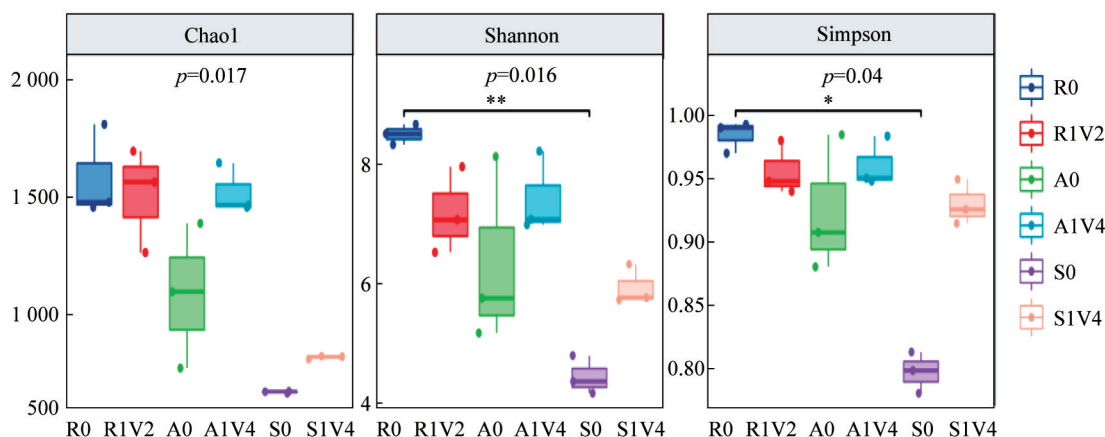
图5 不同接种源在最佳电压下微生物属水平热图

Fig. 5 Microbial community heatmap analysis on genus level with different inoculation sources under the optimum voltage

24.34%、77.06%、23.97%, 占据绝对优势。在本次研究中出现的功能菌属中,*Pseudomonas* 为最常见的脱氮菌,属于革兰氏阴性菌,杆状,有极性鞭毛,部分为产孢菌。*Pseudomonas* 随接种源和外加电压的不同呈现出不同的变化趋势,对回流污泥和曝气池污泥来说,外加电压显著增加了 *Pseudomonas* 的相对丰度;而对于根际土壤接种源,*Pseudomonas* 的相对丰度出现小幅下降趋势。3种微生物接种源中,*Nitrospira* 随着弱电流的出现相对丰度变化不是特别明显。外加电压提高了 *Alcanivorax* 的相对丰度,其在以回流污泥、曝气池污泥和根际土壤为接种源的 MEC 中的相对丰度都出现明显增加,分别由 0、0、0.01% 提升至 3.78%、0.52%、2.45%。*Hahella* 在以根际土壤为接种源的 MEC 中的相对丰度变化最为明显,从未检出增至 17.43%。其他排名靠前的菌种丰度随着接种源和外加电压的不同也都呈现出不同的变化趋势。整体来看,以微生物聚集的程度为依据,微生物接种源为曝气池污泥和回流污泥的 MEC 阴极微生物组成较为接近,外加电压对其影响也呈现一定的相似性,而以根际土壤为接种源的反应器与前两者差别较大。

2.2.4 微生物群落 Alpha 多样性指数分析

对于微生物群落 Alpha 多样性,常用的度量指数主要包括侧重于体现群落丰富度的 Chao1 指数,以及兼顾群落均匀度的 Shannon 指数和 Simpson 指数。一般而言,Chao1 指数越大,群落的丰富度越高;Shannon 指数和 Simpson 指数越高,群落的多样性越高。不同微生物接种源的 MEC 在最佳电压下微生物的 Alpha 多样性指数如图6所示。



*表示两组差别有显著意义;**表示两组差别有非常显著意义。

图6 最佳电压下不同接种源微生物的 Alpha 多样性指数

Fig. 6 Alpha diversity indexes of different inoculation sources under the optimum voltage

由图6可见,不同接种源的微生物的多样性和丰富度均有所不同,在最佳电压下,以回流污泥为接种源的 MEC 的 Chao1 最大,平均值为 1 559.77;曝气池污泥次之,平均值为 1 466.49;而根际土壤最低,平均值仅为 812.13。以回流污泥和曝气池污泥为接种源的 MEC 的 Shannon 指数和 Simpson 指数较为接近,而以根际土壤为接种源的 MEC 的 Shannon 指数和 Simpson 指数低于前两者。随着外加电压的加入,以曝气池污泥和根际土壤为接种源的反应器微生物的 Chao1 指数、Shannon 指数和 Simpson 指数均出现了上升,表明外加电压可以提高其微生物的多样性和丰富度;而回流污泥则出现了不同的变化,外加电压的刺激引起微生物丰富度的提高,而多样性则有一定程度的降低,结合氨氮的最佳去除效果(75%)是以回流污泥为接种源的 MEC 在外加电压 0.5 V 下得到的,可推测外加电压促使了硝化功能菌的聚集,从而提高了其去除氨氮的能力。

3 结论

(1)不同微生物接种源的 MEC 在去除模拟废水中氨氮时有着不同的最佳外加电压,外加电压对氨氮去除率的影响也呈现出不同趋势。以回流污泥、根际土壤、曝气池污泥为微生物接种源的 MEC 硝化过程中的最佳电压分别为 0.5、0.9、0.9 V,氨氮去除率分别为 75%、50.52%、36.02%。

(2)不同电压对不同接种源的 MEC 中微生物生长影响较大。Proteobacteria 是以回流污泥、根际土壤和曝气池污泥为接种源的 MEC 硝化反应过程中起主要作用的微生物菌门。

(3)不同的微生物接种源和外加电压引起了菌种分布情况的不同,接种源为曝气池污泥和回流污泥的 MEC 中的微生物组成较为接近,外加电压对其影响也呈现一定的相似性,而以根际土壤为接种源的反应器与前两者差别较大。

(4)不同接种源的 MEC 中微生物的多样性和丰富度均有所不同,结合氨氮去除效果推测,外加电压促使了硝化功能菌的聚集,从而提高了其去除氨氮的能力。

参考文献

- [1] 李天育,陈钰琦,张静,等.含氮废水的处理方法研究[J].广东化工,2020,47(24):82-83.
LI Tianyu, CHEN Yuqi, ZHANG Jing, et al. Research on the treatment of ammonia-nitrogen wastewater[J]. Guangdong Chemical Industry, 2020, 47(24): 82-83.
- [2] 李志.工业废水氨氮处理工艺探讨[J].低碳世界,2019,9(7):8-9.
LI Zhi. Discussion on ammonia nitrogen treatment technology of industrial wastewater[J]. Low Carbon World, 2019, 9(7): 8-9.
- [3] 裴军,洪阳,胡小宇,等.吹脱和吸附协同降解高氨氮废水研究[J].广州化工,2021,49(19):73-74.
PEI Jun, HONG Yang, HU Xiaoyu, et al. Study on synergistic degradation of high ammonia nitrogen wastewater by stripping and adsorption[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2021, 49(19): 73-74.
- [4] 聂程.汽提蒸氨法处理三元前驱体生产中的高浓度氨氮废水[J].水处理技术,2021,47(10):136-139.
NIE Cheng. Steam stripping treatment on high concentration ammonia-nitrogen wastewater from ternary precursor production[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(10): 136-139.
- [5] 张攀.吹脱-吸附工艺处理高氨氮脱硫废水应用研究[J].能源环境保护,2021,35(4):70-73.

- ZHANG Pan. Study on the application of the stripping-adsorption process in the treatment of high ammonia nitrogen desulfurization wastewater[J]. Energy Environmental Protection, 2021, 35(4): 70-73.
- [6] 杨仁俊, 张伟, 赫瑞元, 等. 氨氮废水处理技术综述[J]. 浙江化工, 2020, 51(9): 42-45.
- YANG Renjun, ZHANG Wei, HE Ruiyuan, et al. Review of ammonia nitrogen wastewater treatment technology[J]. Zhejiang Chemical Industry, 2020, 51(9): 42-45.
- [7] 唐朝春, 许荣明. 化学法处理氨氮废水研究进展[J]. 应用化工, 2019, 48(4): 878-882.
- TANG Chaochun, XU Rongming. Progress in chemical treatment of ammonia nitrogen wastewater[J]. Applied Chemical Industry, 2019, 48(4): 878-882.
- [8] 陶美霞, 陈明, 胡兰文, 等. 生物技术在处理氨氮废水中的研究进展[J]. 现代化工, 2018, 38(12): 24-28.
- TAO Meixia, CHEN Ming, HU Lanwen, et al. Research progress of new biotechnology in treatment of ammonia-containing wastewater[J]. Modern Chemical Industry, 2018, 38(12): 24-28.
- [9] 蒋沁芮, 杨暖, 吴亭亭, 等. 生物电化学脱氮技术研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 408-414.
- JIANG Qinrui, YANG Nuan, WU Tingting, et al. Nitrogen removal from wastewater using the bioelectrochemical technology: A review[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2018, 24(2): 408-414.
- [10] 张一帆, 王爱杰, 程浩毅. 生物电化学系统在废水脱氮中的应用研究进展[J]. 水处理技术, 2017, 43(10): 54-59.
- ZHANG Yifan, WANG Aijie, CHENG Haoyi. Research progress of the application of nitrogen removal in wastewater[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(10): 54-59.
- [11] 边喜龙, 于景洋, 王宇清, 等. 电解-微生物燃料电池耦合系统处理染料废水性能[J]. 工业水处理, 2020, 40(10): 59-62.
- BIAN Xilong, YU Jingyang, WANG Yuqing, et al. Treatment performance of dyes wastewater by combining electrolysis and microbial fuel cell[J]. Industrial Water Treatment, 2020, 40(10): 59-62.
- [12] 齐世华, 于景洋, 刘芳, 等. 微生物燃料电池与电解池去除有机碳及氨氮性能[J]. 工业水处理, 2019, 39(12): 74-78.
- QI Shihua, YU Jingyang, LIU Fang, et al. Performance of microbial fuel cell and microbial electrolysis cell on removal of organic carbon and ammonia nitrogen[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(12): 74-78.
- [13] WU Xue, MODIN O. Ammonium recovery from reject water combined with hydrogen production in a bioelectrochemical reactor[J]. Bioresource Technology, 2013, 146: 530-536.
- [14] ZHU Tingting, ZHANG Yaobin, BU Guanhong, et al. Producing nitrite from anodic ammonia oxidation to accelerate anammox in a bioelectrochemical system with a given anode potential[J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 291: 184-191.
- [15] HU Man, WANG Xiaohui, WEN Xianghua, et al. Microbial community structures in different wastewater treatment plants as revealed by 454-pyrosequencing analysis[J]. Bioresource Technology, 2012, 117: 72-79.
- [16] LIU Junjie, SUI Yueyu, YU Zhenhua, et al. High throughput sequencing analysis of biogeographical distribution of bacterial communities in the black soils of northeast China[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 70: 113-122.
- [17] BOWERS R M, MCLETCHE S, KNIGHT R, et al. Spatial variability in airborne bacterial communities across land-use types and their relationship to the bacterial communities of potential source environments[J]. The ISME Journal, 2011, 5(4): 601-612.
- [18] MILLER J R, DELCHER A L, KOREN S, et al. Aggressive assembly of pyrosequencing reads with mates[J]. Bioinformatics, 2008, 24(24): 2818-2824.
- [19] DESLOOVER J, PUIG S, VERSTRAETE W, et al. Autotrophic nitrous oxide removal in bioelectrochemical systems[J]. Communications in Agricultural and Applied Biological Sciences, 2011, 76(2): 51-53.
- [20] DU Rui, CAO Shenbin, LI Baikun, et al. Performance and microbial community analysis of a novel DEAMOX based on partial-denitrification and anammox treating ammonia and nitrate wastewaters[J]. Water Research, 2017, 108: 46-56.
- [作者简介] 李涵(1987—), 博士, 副教授。电话: 15936564197, E-mail: lihanenjoy@hist.edu.cn。
- [收稿日期] 2022-07-08(修改稿)