

# CRI 处理氧化沟出水的效果及菌群分析

高明刚, 童山原, 钟振兴, 余屿锋, 陆谢娟  
(华中科技大学 环境科学与工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 采用改进型人工快速渗滤系统(CRI)对氧化沟出水进行深度处理,对比分析添加/不添加玉米芯作为固体碳源的CRI系统对COD、氨氮、TN、TP的去除效果和机制,并对饱水段和非饱水段的微生物菌群进行Illumina高通量测序分析。结果表明,CRI对COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN和TP的去除率分别达到60%~73.3%、62.5%~100%、57.1%~89.3%和85.9%~99.4%。CRI去除TP的主要途径是化学沉淀、渗滤介质吸附和微生物代谢等,其中海绵铁的高效化学除磷是主要作用。高通量测序结果表明,*Proteobacteria*、*Bacteroidetes*、*Firmicutes*和*Acidobacteria*是CRI内主要的门级菌群;但在属水平上,饱水层和非饱水层的厌氧菌、兼性菌、好氧菌、聚磷菌、硝化菌和反硝化菌等存在明显差异,这可能与溶解氧浓度和外加碳源有关。

**关键词:** 人工快速渗滤系统; 氧化沟出水; 深度处理; TP去除机理; 功能菌群

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)05-0091-07

## Performance and Bacterial Communities of Constructed Rapid Infiltration (CRI) Treating Oxidation Ditch Effluent

GAO Ming-gang, TONG Shan-yuan, ZHONG Zhen-xing, YU Yu-feng, LU Xie-juan  
(School of Environmental Science & Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** A modified constructed rapid infiltration (CRI) was applied for advanced treatment of oxidation ditch effluent. The removal efficiency and mechanisms of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TN and TP by the CRI with or without corn cob as an additional solid carbon source were investigated. High-throughput sequencing technology was applied to analyze the microbial community compositions of the saturated and non-saturated layers in the CRI. The removal rates of COD,  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ , TN and TP reached 60% - 73.3%, 62.5% - 100%, 57.1% - 89.3% and 85.9% - 99.4%, respectively. The removal mechanism of TP mainly included chemical precipitation, media adsorption and microbial degradation, and the sponge iron played a major role in TP removal. Meanwhile, high-throughput sequencing showed that *Proteobacteria*, *Bacteroidetes*, *Firmicutes* and *Acidobacteria* were the dominant phyla. However, obvious differences between the saturated and the non-saturated layers were found in the composition and relative abundance of anaerobes, facultative bacteria, aerobes, PAOs, nitrifiers and denitrifiers at the genus level, which might be related to the DO concentration and the additional carbon source.

**Key words:** constructed rapid infiltration (CRI); oxidation ditch effluent; advanced

treatment; removal mechanism of TP; functional bacterial communities

人工快速渗滤系统(CRI)是在传统污水快速渗滤系统基础上发展起来的一种污水处理技术。它利用渗透性能较好的天然石英砂等材料替代传统快速渗滤工艺中的天然土层,克服了传统土地处理系统中水力负荷低、占地面积大等缺点,CRI系统中淹水和落干相结合,可交替运行,污染物去除机理包括过滤截留、吸附和生物降解等。目前,对人工快速渗滤系统的研究主要集中在出水效果监测、结构参数优化等方面,而对其内部起关键作用的微生物研究甚少,也未深入探究其处理效率及污染物降解机理。

笔者采用改进型人工快速渗滤系统,对 $A^2/O$ 型氧化沟处理生活污水的二沉池出水进行深度处理,分析CRI柱内污染物的纵向降解规律及机理;采用Illumina高通量测序对CRI中微生物菌群组成进行测定分析,以便深入研究CRI中微生物构成和分布、优势菌群、功能细菌以及各种污染物的去除途径,旨在为CRI工艺优化和后续研究提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验装置及填料配比

人工快速渗滤柱如图1所示,采用圆柱形有机玻璃材质,内径为100 mm,高为1 700 mm。试验中采用两个CRI渗滤柱,其中2号渗滤柱在毛细阻断层增加体积约为80 cm<sup>3</sup>的玉米芯碳源。填料层由保护层、布水层、非饱水层、毛细阻断层、饱水层和承托层构成。其中,保护层的高度为100 mm;布水层的高度为100 mm,填装鹅卵石(粒径为10~20 mm,高度为60 mm)、砾石(粒径为5~10 mm,高度为20 mm)、陶粒(粒径为2~3 mm,高度为20 mm);非饱水层的高度为600 mm,填装90%的石英砂(粒径为0.6~1.0 mm)和10%的火山岩(粒径为0.6~1.0 mm);毛细阻断层的高度为100 mm,填料为砾石(粒径为5~10 mm),2号柱增加10%的玉米芯(粒径为5~10 mm);饱水层的高度为600 mm,填装90%的石英砂(粒径为0.6~1.0 mm)和10%的海绵铁(粒径为0.5~1.0 mm),海绵铁的密度为2.2 g/cm<sup>3</sup>,比表面积为8.8 m<sup>2</sup>/g,全铁、活性铁、碳及杂质、锰、MgO、镍的含量分别为91%~92%、≥88%、5%~6%、0.28%、0.051%和0.038%<sup>[1]</sup>;承托层的高度为100 mm,填装陶粒(粒径为2~3 mm,高度为20 mm)、砾石(粒径为5~10 mm,高度为20 mm)、鹅卵

石(粒径为10~20 mm,高度为60 mm)。两个CRI柱的水力负荷均为2 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·d),运行周期均为24 h,湿干比均为1:1,通过时控开关控制淹水与落干周期循环。

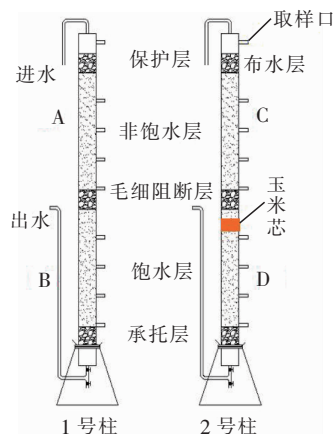


图1 CRI试验装置示意

Fig.1 Schematic diagram of CRI

### 1.2 试验用水

CRI装置的进水来源于实验室长期稳定运行的 $A^2/O$ 型氧化沟处理市政生活污水的二沉池出水,再人工添加一定量的氨氮,模拟冬季生物池硝化效果欠佳状态下的出水,具体进水水质:COD为10~45 mg/L、 $NH_4^+-N$ 为8~15 mg/L、TN为15~28 mg/L、TP为0.7~1.5 mg/L。

### 1.3 分析项目及方法

COD采用哈希快速消解分光光度法测定,氨氮采用纳氏试剂分光光度法测定,TN采用TOC/TN分析仪测定, $NO_2^- - N$ 采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定, $NO_3^- - N$ 采用麝香草酚分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定。

### 1.4 高通量测序分析方法

试验末期,分别从1号柱和2号柱上端的好氧段及下端的厌氧段各取一个富含微生物的填料样品,编号分别为A、B、C、D,采用第二代Illumina MiSeq高通量技术对4个微生物样品进行测序分析,具体流程参见文献[2]、[3]。

## 2 结果与讨论

### 2.1 CRI对碳氮污染物的纵向去除效果

CRI装置连续稳定运行两个多月,1号柱出水中COD、 $NH_4^+-N$ 、TN、TP浓度分别为4~12、0~3、

1.6 ~ 12、0.05 ~ 0.2 mg/L, 2 号柱出水的相应指标分别为 4 ~ 16、0 ~ 3、1.6 ~ 10、0.05 ~ 0.2 mg/L。可以看出, 1 号柱和 2 号柱对 COD 的去除率分别达到 60% ~ 73.3% 和 60% ~ 64.4%。2 号柱的去除率略微低于 1 号柱, 这可能是由于外加碳源玉米芯释放了少量有机物造成的。两个 CRI 柱的出水 COD 均达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) III 类标准, 表明 CRI 作为一种廉价、高效的处理工艺, 对普通生活污水深度处理和城市地表水环境的水质提升具有重要意义。

CRI 柱中 COD 浓度纵向沿程变化如图 2 所示。可知, 1 号柱和 2 号柱对有机物的去除主要集中在填料的上半段非饱水层部分, 其中前 700 mm 填料层对 COD 的去除率分别达到 52% 和 55%。在 CRI 柱内部, 进水有机物首先被填料介质吸附截留, 然后在布水期依靠厌氧菌及兼性菌进行生物降解。在落干期, 由于空气抽吸作用使上半部的溶解氧得以恢复, 好氧异养菌可利用有机物进行分解代谢<sup>[4]</sup>。随着高度的下降, 溶解氧沿程被消耗, 好氧菌的数量减少, CRI 下半段对 COD 的去除作用较微弱。1 号柱下半段 700 mm 处填料层对 COD 的去除率仅为 20%, 而 2 号柱下半段则出现 COD 浓度先小幅升高再缓慢下降的特点, 这是由于外加的玉米芯碳源经过分解缓慢释放了有机物。王枫等<sup>[5]</sup>将 CRI 系统用于处理生活污水, 发现其对有机物的去除途径主要包括过滤截留、填料介质吸附以及微生物降解等作用。

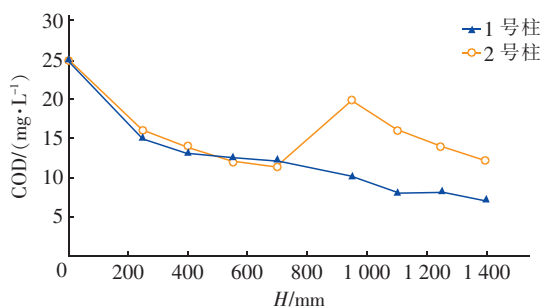


图 2 COD 浓度的沿程变化

Fig. 2 Change of COD along CRI

1 号柱和 2 号柱对氨氮的去除率可分别达到 62.5% ~ 100% 和 64.6% ~ 100%, 对 TN 的去除率分别达到 57.1% ~ 89.3% 和 64.3% ~ 89.3%。CRI 装置出水中氨氮和 TN 均能达到一级 A 排放标准, 且出水氨氮浓度接近地表水 V 类水质标准。CRI 对

氨氮的去除主要通过混合滤料的吸附和硝化反应等作用, 而火山岩和石英砂等填料对氨氮的吸附作用比较微弱。

4 种氮素在 CRI 柱中的沿程变化如图 3 所示。可以看出, 在 1 号柱和 2 号柱上半段 700 mm 内的非饱水层中, 氨氮基本同步降低, 去除率分别为 57.2% 和 62.0%, 而下半段的饱水层对氨氮的去除率仅为 33.6% 和 24.0%, 说明氨氮主要在上半段非饱水层经过好氧硝化反应去除。CRI 柱中非饱水层的硝态氮浓度逐渐上升, 在饱水层大幅下降, 表明下半段的饱水层主要进行缺氧反硝化去除硝态氮过程。CRI 柱沿程有少量亚硝态氮产生, TN 在非饱水层仅略微下降, 在饱水层 700 ~ 1100 mm 填料段进行反硝化反应而降低至 2 mg/L 左右。在 2 号柱中, 由于外加的玉米芯表面逐渐释放纤维素等大分子有机物并转化为小分子有机物, 为反硝化提供少量碳源, 故 2 号柱的  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  下降速率比 1 号柱略快<sup>[6]</sup>。

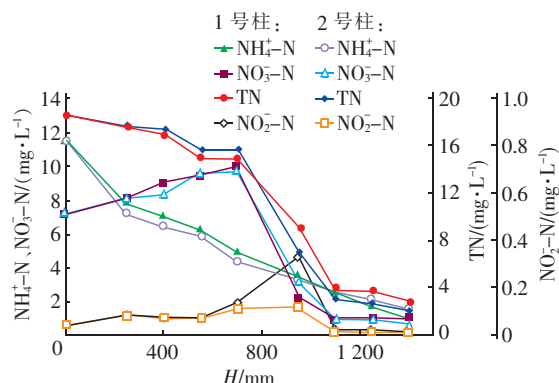


图 3  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NO}_2^- - \text{N}$  和 TN 的沿程变化

Fig. 3 Change of  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ ,  $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ,  $\text{NO}_2^- - \text{N}$  and TN along CRI

## 2.2 CRI 的除磷效果及机理

两个 CRI 装置对 TP 的去除效果如图 4 所示。从图 4(a)可以看出, 在近 70 d 的稳定运行中, 1 号柱和 2 号柱对 TP 的平均去除率可以分别达到 85.9% ~ 99.1% 和 86.3% ~ 99.4%, 出水 TP 浓度均可以达到地表水 III 类水质标准, 可见添加海绵铁的 CRI 柱对二沉池出水中的 TP 具有非常优异的去磷效果。与仅仅以石英砂为填料的 CRI 相比, 添加海绵铁的 CRI 柱可达到更高的 TP 去除率和更稳定、优质的出水<sup>[5,7]</sup>。从图 4(b)可知, CRI 柱的非饱水层中 TP 浓度呈现略微上升的趋势, 可能是因为上一运行周期中填料截留的部分总磷缓慢释放所

致。在饱水层,两个 CRI 柱中 TP 浓度快速降低,其除磷的主要机理是渗滤介质吸附、化学沉淀和微生物代谢等<sup>[1,7]</sup>。

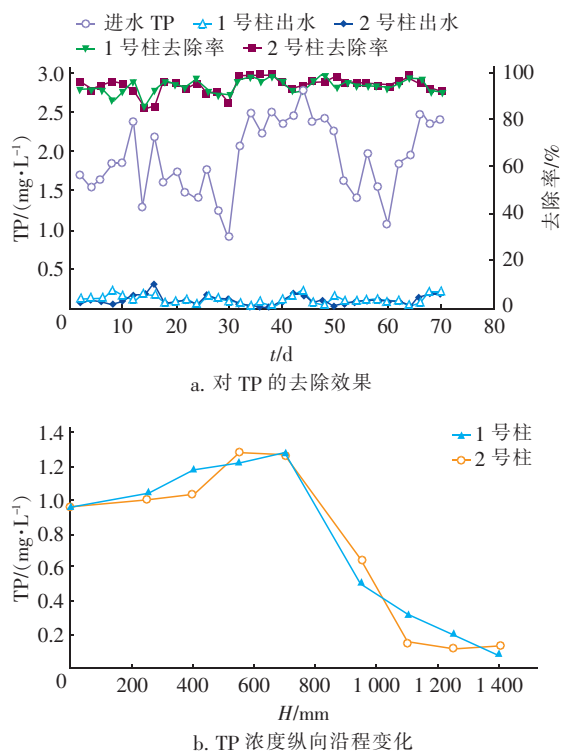
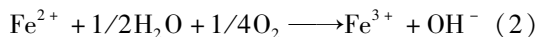
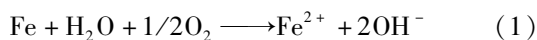


图4 CRI 对 TP 的去除效果

Fig. 4 Removal efficiency of TP by CRI

对于 CRI 系统而言,其饱水层微生物通过同化代谢除磷作用较微弱,而石英砂等填料的阴离子交换容量较小,对磷的离子交换及吸附效果较差。因此,1 号柱和 2 号柱对 TP 的高效去除主要归因于海绵铁的化学除磷作用。海绵铁具有多孔、比表面积大的特点,88% 的成分是活性金属铁,也包含少量其他金属以及碳等杂质。在中性或偏酸性环境中,海绵铁通过式(1)产生  $\text{Fe}^{2+}$ ,而  $\text{Fe}^{2+}$  进一步氧化成  $\text{Fe}^{3+}$ ,见式(2)。 $\text{Fe}^{2+}$  和  $\text{Fe}^{3+}$  与废水中的磷酸根发生化学反应<sup>[8]</sup>,从而实现高效除磷<sup>[6]</sup>。海绵铁、石英砂等外加填料中释放的少量  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  等金属离子与废水中的磷酸根生成难溶化合物,也有助于化学除磷<sup>[8-10]</sup>。



## 2.3 CRI 中微生物的多样性

### 2.3.1 多样性分析

试验应用 Illumina 高通量测序对稳定运行的 1

号(A、B)和 2 号(C、D)CRI 柱的饱水层和非饱水层微生物分别进行测序,主要微生物群落的多样性指数见表 1。

表 1 4 个样品菌群丰富度及多样性指数

Tab. 1 Abundance and diversity index of bacterial communities in A, B, C and D

项目	Reads	OTU	Ace	Chao	Coverage	Shannon	Simpson
A	36 899	1 005	1 045	1 051	0.997 0	5.54	0.010 45
B	28 102	941	1 120	1 152	0.992 0	4.62	0.041 43
C	36 605	1 010	1 056	1 062	0.997 2	5.35	0.016 05
D	34 946	933	1 049	1 057	0.995 1	4.57	0.042 54

由表 1 可知,4 个样品的 Coverage 指数均达到 99.2% 以上,说明测序结果可以很好地反映样品的真实情况,具有较高的可信度。从 Ace 和 Chao 丰富度指数可知,1 号柱饱水层(B)的微生物丰富度稍高于其他 3 个样品。从 Shannon 和 Simpson 多样性指数可知,两个非饱水层样品 A 和 C 的微生物多样性明显比饱水层样品 B 和 D 的丰富,这一结果很可能与 CRI 柱的进水位点和工艺特点有关。首先,1 号柱和 2 号柱的进水位点均设置在非饱水层,即 A 和 C,由于进水中含有相对较高的有机物,有利于异养菌群的生长繁殖,因而该层填料表面微生物多样性较高。另外,由于进水与落干交替进行,非饱水层在约 50% 的运行周期内均含有一定浓度的溶解氧,有利于好氧菌的繁殖代谢<sup>[11-12]</sup>。

### 2.3.2 相似性分析

维恩图主要被用来表征多个微生物样品之间的相似性和独特性,可直观表示出样品间相互重叠和独有的 OTU 数量。图 5 为样品微生物种类对照维恩图。

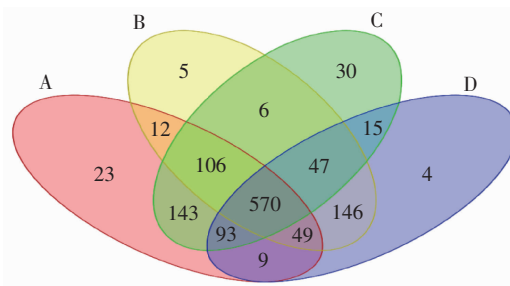


图5 样品微生物种类对照维恩图

Fig. 5 VENN diagram of microbial communities

由图 5 可知,4 个样品共检出 1 258 个 OTU,其中 A、B、C、D 分别含有 1 005、941、1 010、933 个;4 个样品共同种类有 570 个,A 和 C 共同种类有 912



个,B 和 D 共同种类有 812 个,A、B、C 和 D 特有的 OTU 种类分别为 23、5、30 和 4 个。可以看出,A 与 C 样品间的微生物种类相似性最高,主要原因是两个 CRI 柱的上部区域具有相同的填料介质、进水水质、运行周期和湿干比,并且 DO 和 pH 值等环境条件差异较小,因而其填料表面的微生物组成也非常相似。B 和 D 样品均取自饱水层缺氧段,尽管也具有较高的相似性,但是 D 段有外加的固体玉米芯碳源,由于营养物质等细微差异,微生物种类表现出一定的区别<sup>[12]</sup>。

## 2.4 CRI 功能菌群结构分析

### 2.4.1 门水平群落结构

在门级分类水平上,A、B、C 和 D 样品分别检出 41、37、42 和 41 个门级种群,总共检测出 42 个门,主要包括变形菌门(*Proteobacteria*)、拟杆菌门(*Bacteroidetes*)、厚壁菌门(*Firmicutes*)、酸杆菌门(*Acidobacteria*)等。图 6 为 A、B、C、D 微生物门水平结构。

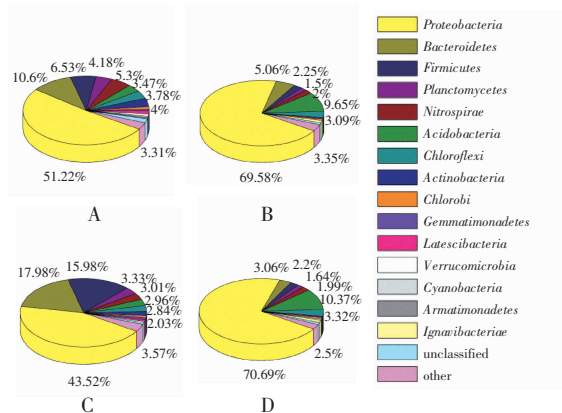


图 6 A、B、C、D 微生物门水平结构

Fig. 6 Comparison of microbial communities at phylum level

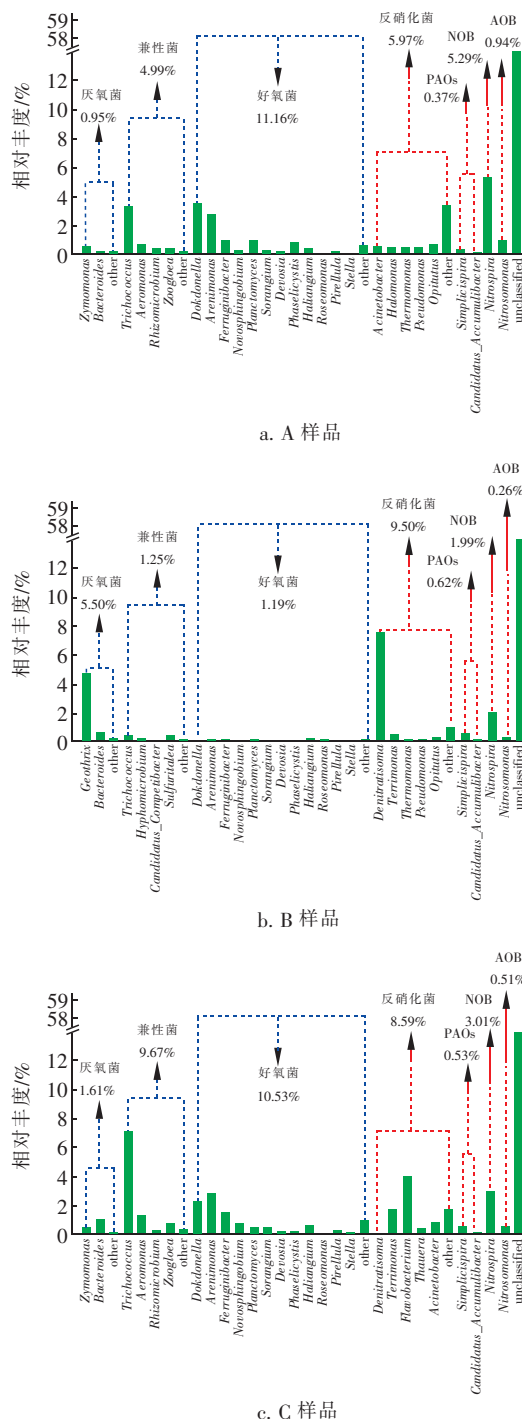
从图 6 可以看出,CRI 装置非饱水层 A 和 C 中变形菌门 *Proteobacteria* 的相对丰度分别为 51.22% 和 43.52%,显著低于饱水层样品 B (69.58%) 和 D (70.69%);但非饱水层 A 和 C 中 *Bacteroidetes* 的相对丰度分别为 10.6% 和 17.98%,明显高于饱水层 B (5.06%) 和 D (3.06%)。

分析原因,可能是因为 *Proteobacteria* 更适合生长在有机物浓度较低的 CRI 柱下部的厌氧区域,而 *Bacteroidetes* 则适合于有机物浓度较高的上部好氧段。*Firmicutes* 的分布特性与 *Bacteroidetes* 较为类似。有研究指出,*Proteobacteria* 和 *Bacteroidetes* 是大多数人工湿地的优势菌种,并且 *Proteobacteria* 是参

与有机物降解、脱氮除磷和去除芳香族化合物的最主要菌种<sup>[2]</sup>。

### 2.4.2 属水平菌群结构分析

在属水平上,基于对主要功能菌群[如反硝化菌、氨氧化菌(AOB)、亚硝酸盐氧化菌(NO<sub>2</sub>)和聚磷菌(PAOs)等]的分类分析,本试验进一步探究了两个 CRI 柱 4 个区域微生物样品中的功能菌群结构,结果如图 7 所示。



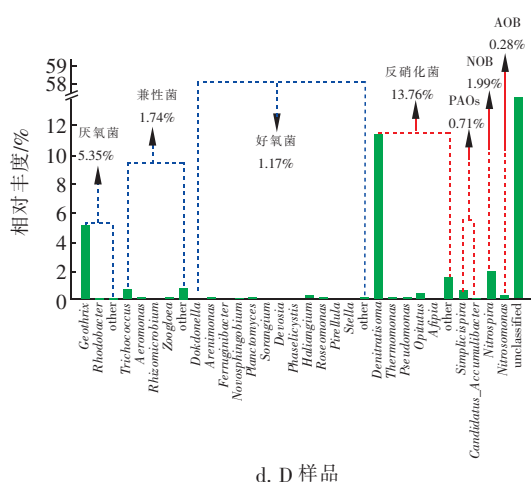


图7 A、B、C、D微生物在属水平的对比

Fig. 7 Comparison of microbial communities at genus level

从图7可以看出,B和D样品反硝化菌的相对丰度分别为9.50%和13.76%,明显高于A和C,其中A样品的优势反硝化菌为*Opatutus*(0.73%),其他包括*Acinetobacter*、*Halomonas*、*Thermomonas*等;而B样品的优势反硝化菌为*Denitratisoma*(7.56%),其他包括*Terrimonas*、*Thermomonas*等;C样品的优势反硝化菌为*Flavobacterium*(3.98%),其他包括*Terrimonas*、*Acinetobacter*等;D样品的优势反硝化菌为*Denitratisoma*(11.42%),其他包括*Pseudomonas*、*Opatutus*等。对比发现,B样品反硝化菌的相对丰度低于D,说明投加玉米芯作为外加碳源对反硝化菌的生长代谢具有促进作用。4个样品的PAOs主要包括*Simplicispira*和*Candidatus\_Accumulibacter*,相对丰度分别为0.37%、0.62%、0.53%和0.71%。B、D样品的PAOs略高于A、C样品,说明PAOs更适合在厌氧环境中增殖。

4个样品中,氨氧化菌(AOB)均为*Nitrosomonas*,相对丰度分别为0.94%、0.26%、0.51%和0.28%;亚硝酸盐氧化菌(NO)均为*Nitrospira*,相对丰度分别为5.29%、1.99%、3.01%和1.99%。CRI柱中AOB和NOB的存在进一步说明氨氮的高效去除主要归因于硝化反应。而非饱水层的A、C样品中AOB和NOB的相对丰度均远高于饱水层的B和D样品,这也再次说明上半段的DO浓度较高,有利于AOB和NOB的生长。好氧段A和C样品中,好氧菌的相对丰度分别为11.16%和10.53%,而厌氧段B和D好氧菌的相对丰度仅分别为1.19%和1.17%。其中A和C的优势好氧菌

均为*Dokdonella*和*Arenimonas*,而B和D的优势好氧菌均为*Planctomyces*和*Haliangium*。对比可知,DO浓度是影响好氧菌群相对丰度的最主要因素,4个样品不同优势的好氧菌属也说明工艺特点和环境条件是影响微生物群落结构的重要因素。

B和D样品厌氧菌的相对丰度分别为5.50%和5.35%,其主要菌群均为*Geothrix*;而A和C样品厌氧菌的相对丰度仅分别为0.95%和1.61%,远远低于B和D样品,其主要菌群均为*Bacteroides*和*Zymomonas*。A和C样品中的主要兼性菌是*Trichococcus*,相对丰度分别为3.39%和7.11%,B和D样品中兼性菌的相对丰度仅分别为1.25%和1.74%。可以看出,DO浓度较高和营养物质较为充足的条件更有利于兼性菌生长。在A和C样品中,均检出*Aeromonas*兼性菌(分别为0.68%和1.26%),该菌属是典型的兼性菌,在有氧环境下依靠呼吸作用产能,在无氧条件下通过发酵产能。此前有研究指出,*Aeromonas*属中已成功分离出高效好氧反硝化菌<sup>[13]</sup>,且其可作为一种聚磷菌参与生物除磷过程。

### 3 结论

① 采用改进型CRI对氧化沟出水进行深度处理,COD、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TN和TP去除率分别达到60%~73.3%、62.5%~100%、57.1%~89.3%和85.9%~99.4%,出水水质接近《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)V类标准。

② 改进型CRI去除TP的途径主要是化学沉淀、渗滤介质吸附和微生物代谢等,其中海绵铁对TP的高效化学去除作用起主要贡献。

③ Illumina高通量测序结果表明,在门级别水平上,*Proteobacteria*、*Bacteroidetes*、*Firmicutes*和*Acidobacteria*是CRI内主要的菌群。在属水平上,AOB、NOB和反硝化菌主要参与 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 和TN的去除过程,而聚磷菌的存在可强化对TP的去除,厌氧菌、兼性菌和好氧菌很可能对有机物的去除起主要作用。

### 参考文献:

- [1] 张立东,白廷洲,谭彪. 海绵铁与微生物协同互促除磷研究[J]. 广东化工,2015,42(21):19-20,46.  
Zhang Lidong, Bai Tingzhou, Tan Biao. The study on phosphorus removal with sponge iron and microbial

- synergy and mutual promotion[J]. Guangdong Chemical Industry, 2015, 42(21): 19–20, 46 (in Chinese).
- [2] Zhong Z X, Wu X H, Gao L, *et al.* Efficiency and microbial communities for pollutant removal in a distributed-inflow biological reactor for treating piggery wastewater[J]. RSC Adv, 2016, 6 (98): 95987 – 95998.
- [3] 钟振兴, 兰雄, 丁兴辉, 等. CIBR 处理模拟生活污水的效果及菌群分析[J]. 武汉科技大学学报, 2016, 39 (6): 439 – 445.
- Zhong Zhenxing, Lan Xiong, Ding Xinghui, *et al.* Performance and bacterial community analysis of continuous-inflow integrated biological reactor treating simulated domestic wastewater[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 2016, 39 (6): 439 – 445 (in Chinese).
- [4] 平玉焕, 张焕祯, 王智丽, 等. 人工快速渗滤系统非饱水层去除 COD 和氨氮[J]. 环境工程学报, 2015, 9 (12): 5837 – 5842.
- Ping Yuhuan, Zhang Huanzhen, Wang Zhili, *et al.* Non-saturated layer of constructed rapid infiltration system about removing COD and ammonia nitrogen[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9 (12): 5837 – 5842 (in Chinese).
- [5] 王枫, 骆灵喜, 刘欢, 等. 人工快速渗滤系统中人工快渗池对污染物的去除效果研究[J]. 环境污染与防治, 2013, 35(5): 58 – 63.
- Wang Feng, Luo Lingxi, Liu Huan, *et al.* Study on the contaminant removal efficiency of rapid infiltration pond in constructed rapid infiltration system [J]. Environmental Pollution & Control, 2013, 35(5): 58 – 63 (in Chinese).
- [6] Jia L X, Wang R G, Feng L K, *et al.* Intensified nitrogen removal in intermittently-aerated vertical flow constructed wetlands with agricultural biomass: Effect of influent C/N ratios[J]. Chem Eng J, 2018, 345: 22 – 30.
- [7] 侯云霞, 张建强, 许文来, 等. 人工快速渗滤系统除磷效率研究[J]. 环境污染与防治, 2014, 36(5): 29 – 32.
- Hou Yunxia, Zhang Jianqiang, Xu Wenlai, *et al.* Research on the phosphorus removal efficiency of constructed rapid infiltration system[J]. Environmental Pollution & Control, 2014, 36(5): 29 – 32 (in Chinese).
- [8] Yu G W, Zhang B P, Lu X J, *et al.* Efficient removal of phosphorus in bioretention system by sludge pyrolysis residue[J]. Arab J Geosci, 2015, 8(6): 3491 – 3499.
- [9] Hiemstra T, Antelo J, Rahnamaie R, *et al.* Nanoparticles in natural systems I: The effective reactive surface area of the natural oxide fraction in field samples [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74 (1): 41 – 58.
- [10] Yao Y, Gao B, Chen J J, *et al.* Engineered biochar reclaiming phosphate from aqueous solutions: mechanisms and potential application as a slow-release fertilizer[J]. Environ Sci Technol, 2013, 47 (15): 8700 – 8708.
- [11] 李杰, 王亚娥, 王志盈, 等. 生物海绵铁在生活污水脱氮除磷中的应用研究[J]. 中国给水排水, 2007, 23 (1): 97 – 100.
- Li Jie, Wang Ya'e, Wang Zhiying, *et al.* Study on application of biological sponge iron in nitrogen and phosphorus removal from domestic wastewater [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23 (1): 97 – 100 (in Chinese).
- [12] Fouts D E, Szpakowski S, Purushe J, *et al.* Next generation sequencing to define prokaryotic and fungal diversity in the bovine rumen [J]. PLoS One, 2012. DOI:10.1371/journal.pone.0048289.
- [13] 张兆君. 生物除磷机理及除磷微生物[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(8): 4205 – 4207, 4211.
- Zhang Zhaojun. Mechanism and microorganism of biological phosphorus removal [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(8): 4205 – 4207, 4211 (in Chinese).



作者简介:高明刚(1994 – ),男,湖北黄冈人,硕士,助理工程师,主要研究方向为污水处理技术。

E-mail: 1194758839@qq.com

收稿日期:2019 – 08 – 28