



**增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理冬季养殖废水的影响**

刘方剑, 杨海龙, 陈晓露, 李琳秋, 周化斌

引用本文:

刘方剑, 杨海龙, 陈晓露, 等. 增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理冬季养殖废水的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 770-776.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0345>

**您可能感兴趣的其他文章**

Articles you may be interested in

**不同植物种植对矿区复垦土壤微生物多样性的影响**

张变华, 靳东升, 张强, 郜春花, 李建华, 籍晟煜

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 355-360 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0304>

**西北半干旱荒漠草原与耕地土壤可培养微生物多样性及分布特征比较**

李彦林, 陈吉祥, 周永涛, 杨智, 王永刚, 张继义, 岳靓

农业资源与环境学报. 2016, 33(3): 244-252 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0257>

**黄鸢尾对牛场养殖废水肥用过程中的耐受性研究**

丁飞飞, 张克强, 渠清博, 赵英, 杨鹏, 沈晨

农业资源与环境学报. 2019, 36(2): 214-220 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0224>

**施氮对间作条件下玉米、马铃薯根际微生物群落功能多样性的影响**

覃潇敏, 郑毅, 汤利, 龙光强

农业资源与环境学报. 2015(4): 354-362 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0353>

**施氮水平对稻-稻-紫云英稻田土壤细菌数量及群落结构的影响**

周艳飞, 聂江文, 王幼娟, 刘章勇, 朱波

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 508-517 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0021>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘方剑, 杨海龙, 陈晓露, 等. 增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理冬季养殖废水的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(5): 770–776.



开放科学 OSID

LIU Fang-jian, YANG Hai-long, CHEN Xiao-lu, et al. Effect of different aeration methods on swine wastewater treated by *Oenanthe javanica* combined with microbes in winter[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(5): 770–776.

## 增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理冬季养殖废水的影响

刘方剑, 杨海龙, 陈晓露, 李琳秋, 周化斌\*

(温州大学生命与环境科学学院, 浙江 温州 325000)

**摘要:**为探究不同增氧方式对水芹菜-微生物联合作用处理养殖废水消化液及微生物群落结构变化的影响,设置循环和曝气两组试验,以静置处理作为对照,共运行 35 d,间隔 7 d 取样,测定常规水质指标,在试验开始和结束时分别测定水芹菜生长情况,并采用高通量测序技术对微生物群落结构进行分析。结果显示,经过 35 d 的处理,静置组、曝气组和循环组的 DO(溶解氧)分别达到 0.60、10.38 mg·L<sup>-1</sup> 和 10.85 mg·L<sup>-1</sup>;静置培养的水芹菜长势最好,相对生长速率为 0.03 g·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>;三种处理方式对水质的净化效果差异显著,循环组的水质净化效果最好,COD(化学需氧量)、NH<sub>3</sub>-N(氨氮)和 TN(总氮)的去除率分别达 89.89%、69.40% 和 77.65%;黄杆菌属(*Flavobacterium*)的相对丰度从 43.21% 下降到 0.16%,克里斯滕森菌属(*Christensenellaceae*)和瘤胃球菌属(*Ruminococcaceae*)的相对丰度则大幅增加。水芹菜在冬季于养殖废水消化液中可以正常生长,曝气和循环处理可以明显提高净化效率;黄杆菌属和假单胞菌属(*Pseudomonas*)是脱氮的功能菌属,梭菌纲(*Clostridia*)的大量繁殖有利于 COD 的去除。

**关键词:**水芹菜;污水净化;群落结构;高通量测序

中图分类号:X172

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)05-0770-07

doi: 10.13254/j.jare.2019.0345

### Effect of different aeration methods on swine wastewater treated by *Oenanthe javanica* combined with microbes in winter

LIU Fang-jian, YANG Hai-long, CHEN Xiao-lu, LI Lin-qiu, ZHOU Hua-bin\*

(College of Life and Environmental Science, Wenzhou University, Wenzhou 325000, China)

**Abstract:** The aim of this research is to study the effect of different aeration methods on swine wastewater treated by *Oenanthe javanica* combined with microbes, and the change in the microbial community. Experiments were conducted by circulation, aeration, and standing (control) groups, and a sample was taken at 7-day intervals during the treatment period of 35 days. The water indices were analyzed by national standard methods. The microbial community characteristics were analyzed using a high-throughput sequencing technology (Illumina MiSeq sequencer). The dissolved oxygen values in the control, aeration, and circulation groups were 0.60, 10.38 mg·L<sup>-1</sup> and 10.85 mg·L<sup>-1</sup>, respectively. The best growth of *Oenanthe javanica* was observed in the control group, where a relative growth rate of 0.03 g·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup> was achieved. The water purification efficiency of the three treatments was significantly different, in this case, the circulation group showed superior results with the removal rates of chemical oxygen demand (COD), ammonium nitrogen, and total nitrogen at 89.89%, 69.40%, and 77.65%, respectively. The relative abundance of *Flavobacterium* decreased from 43.21% to 0.16%, while that of *Christensenellaceae* and *Ruminococcaceae* increased significantly. *Oenanthe javanica* grew well in the treated swine wastewater during winter. The purification efficiency can be obviously improved by supplementing oxygen through circulation or aeration. After 35 days of treatment, the microbial diversity in the water increased; Moreover, *Flavobacteria* and *Pseudomonas* were identified as the functional bacteria of denitrification. The proliferation of Clostridiales is also beneficial for the removal of COD.

**Keywords:** *Oenanthe javanica*; wastewater purification; microbial community; Illumina sequencing

收稿日期:2019-06-29 录用日期:2019-11-07

作者简介:刘方剑(1994—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,从事环境微生物研究。E-mail:lfj19941030@163.com

\*通信作者:周化斌 E-mail:zhb@wzu.edu.cn

基金项目:温州市科技计划项目(W20170009)

Project supported: The Science and Technology Support Program of Wenzhou, Zhejiang (W20170009)

厌氧发酵是目前畜禽养殖废水的主要处理工艺,但经过厌氧处理后的消化液仍属于高浓度有机废水。植物-微生物联合作用兼具单独使用植物或微生物的优点,因其处理成本低、效果好、植物资源可回收等特点而广受关注。植物生长时,其根区为微生物提供必要的附着和形成菌落的场所,通过根茎向下传送氧,促进微生物对根际周围沉积物的生物化学反应<sup>[1]</sup>,同时,微生物的旺盛生长,加速对污染物的降解,改善了植物的生长环境,在这个过程中,植物与微生物是互利关系。目前常用的水生植物主要为凤眼莲和伊乐藻等,功能微生物分为光合细菌、氮循环菌和聚磷菌。魏瑞霞等<sup>[2]</sup>研究了凤眼莲、美人蕉、鸢尾等多种植物与微生物联合作用,当植物单独存在时,对化学需氧量(COD)的去除率只有33.90%,而植物-微生物组合对COD的去除率可达62.70%。邹万生等<sup>[3]</sup>利用苦草和菹草搭配EM菌(光合细菌、乳酸菌、酵母菌、放线菌),可以去除水体中98.79%的氮素。但目前针对植物-微生物联合作用的研究,主要集中在水生植物的选择和植物与功能微生物的搭配方式上<sup>[4-6]</sup>,用水循环或曝气的方式强化植物-微生物联合作用研究较少。研究表明,水体的循环不仅可以避免热分层和化学分层,还可以提高水体中的溶解氧<sup>[7-8]</sup>。另外,由于植物在冬季的衰老和根系腐烂及低温条件下微生物活性降低而导致的净化效率降低,是植物-微生物联合修复面临的主要问题<sup>[9]</sup>。水芹菜作为喜凉性植物,在低温条件下能够正常生长,具有在冬季处理废水的潜力。但目前水芹菜多应用于河道污水、水产养殖废水、纺织废水和农田退水的治理<sup>[10-13]</sup>,利用水芹菜在冬季处理养猪废水消化液的研究鲜有报道。

本研究利用水芹菜的喜凉性,通过循环和曝气来强化植物-微生物联合作用,以静置处理作为对照,探究不同增氧方式(循环和曝气)对水质的净化效果,分析试验前后微生物群落结构,确定对水质变化产生主要作用的功能菌属,以为植物-微生物联合修复提供一种新的强化方式和菌源。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

水芹菜(*Oenanthe javanica*)为自然样本,从水田中选取株高10 cm左右、腋芽饱满、分蘖数和长势相同的

健壮植株。所有植株用蒸馏水冲洗,去除附着土壤。

试验用水为温州市某养殖场污水处理站的连续搅拌反应器(Continuous stirred tank reactor, CSTR)出水。试验用水水质指标见表1。

### 1.2 试验设计

试验设置三个处理组,分别为循环组、曝气组和静置组(对照),运行时间为2018年12月10日—2019年1月14日,地点为楼栋走廊向阳一侧,环境温度为5~18℃。

循环组(图1A):试验装置由一个20 L的带盖水箱和一个种植架组成,废水经潜污泵输送至总长为4 m的S型种植架,水芹菜的根系用海绵固定于定植杯中,每个种植架上种植水芹菜36株。潜污泵流量为0.2 L·min<sup>-1</sup>,工作15 min,停止45 min。废水在种植架和水箱中循环流动,达到增氧效果。

曝气组(图1B):水芹菜在聚苯乙烯泡沫塑料载体上水培,每个载体上种植水芹菜36株。培养箱为580 mm×400 mm×200 mm水箱,每箱盛水20 L。采用空气泵曝气增氧,水箱底部均匀布设12个曝气头,空气泵的输出流量为0.05 L·min<sup>-1</sup>,工作15 min,停止45 min。

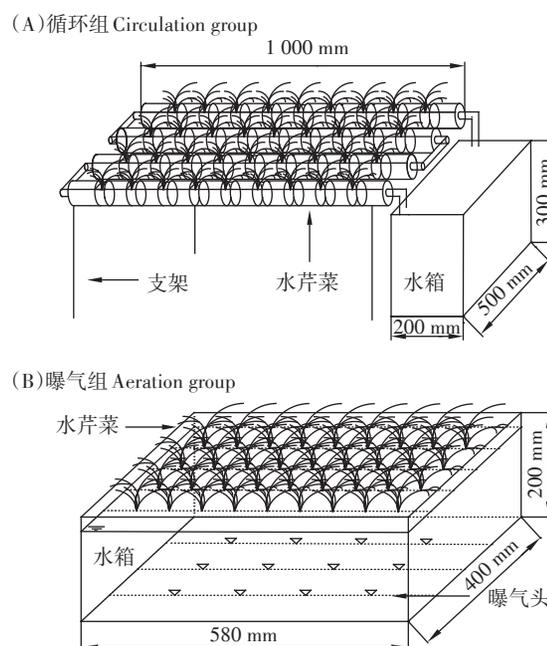


图1 试验装置示意图

Figure 1 Schematic diagram of test equipment

表1 试验用水水质指标

Table 1 Quality index of the test water

化学需氧量 COD/(mg·L <sup>-1</sup> )	氨氮 NH <sub>3</sub> -N/(mg·L <sup>-1</sup> )	总磷 TP/(mg·L <sup>-1</sup> )	总氮 TN/(mg·L <sup>-1</sup> )	pH	溶解氧 DO/(mg·L <sup>-1</sup> )
405.10±44.60	86.83±3.58	16.28±2.84	138.19±15.60	6.81±0.24	0.36±0.10

静置组:试验设置与曝气组相同,但不通入空气。

### 1.3 水质指标测定

试验运行35 d,运行期间每7 d采集一次水样,在水箱上、中、下三层分别取100 mL水样混匀,其中40 mL用作分析,剩余水样倒回水箱中,COD、总氮(TN)、氨氮(NH<sub>3</sub>-N)和总磷(TP)的测定方法参照《水和废水监测分析方法》<sup>[14]</sup>。

### 1.4 植物生长性能测定

在试验开始和结束时,随机采集植株,用吸水纸擦干植株表面的水分,称量鲜质量。然后将植株分成根和茎叶两部分,置于烘箱中105 ℃杀青15 min,70 ℃烘干至恒质量,称量干质量。

### 1.5 微生物群落结构测定

在试验开始和结束时,在水箱上、中、下三层分别取样200 mL混匀,取其中500 mL用0.22 μm滤膜过滤,采用Power Soil DNA试剂盒(MO BIO, Cat. No. 12888)进行DNA提取,提取过程参考说明书进行。用1%琼脂糖凝胶检测DNA浓度和纯度,根据DNA浓度,用无菌水稀释至1 ng·μL<sup>-1</sup>。将符合试验要求的DNA样品送至浙江天科高新技术发展有限公司扩增,采用具有Barcode标记的引物341F(CCCTACAC-GACGCTCTTCGATCTG(barcode) CCTACGGGNGGC-WGCAG)和805R(GACTGGAGTTCCTTGGCACCC-

GAGAATTCAGACTACHVGGGTATCTAATCC)对V3~V4区进行扩增,PCR扩增采用KAPA HiFi Hot Start Ready Mix高保真DNA聚合酶预混液。产物使用Beckman DNA Clean Beads进行纯化,使用Qubit 2.0对纯化后的PCR产物进行定量,并采用Illumina MiSeq测序平台进行高通量测序。

## 2 结果与讨论

### 2.1 废水处理结果

试验运行35 d后,循环组和曝气组的水质达到《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005)。三种处理方式下,污染物的浓度变化如图2所示。循环组对污染物的去除效果最好,COD、NH<sub>3</sub>-N和TN去除率分别为89.89%、69.40%和77.65%,不同处理方式对TP的去除没有明显差异。

三种处理方式对COD的去除效果明显,同一阶段各处理组间差异显著( $P < 0.05$ ),处理方式和处理时间及两者的交互作用对COD均有影响。前期COD的去除以植物根系过滤、吸附和沉积作用为主。由于曝气组和循环组的水体处于流动状态,使有机物的沉淀效果变差,前7 d,静置组中COD的去除率为16.16%,高于曝气组(8.12%)和循环组(4.90%)。第14~35 d,循环组和曝气组对COD的去除率高于静置

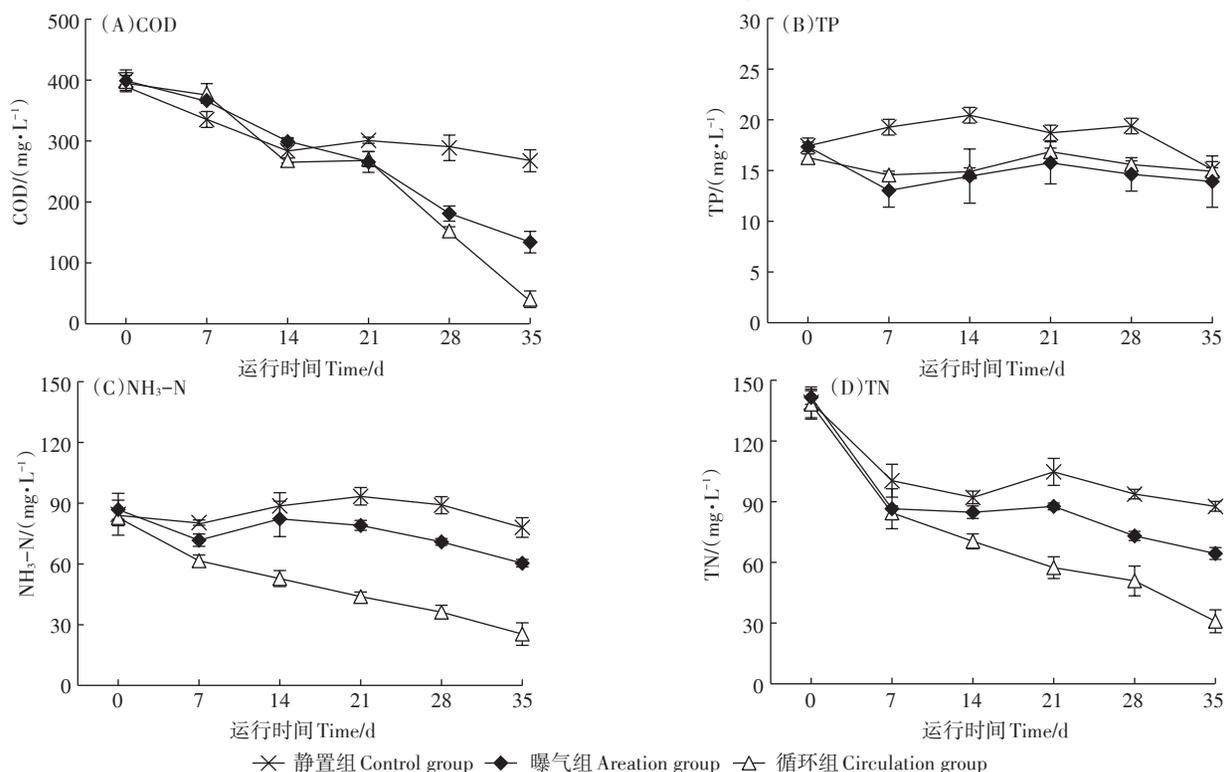


图2 猪场废水中污染物的浓度变化

Figure 2 Changes in concentration of each pollutant in the swine wastewater

组,这是由于溶解氧(DO)的增加有助于异养微生物的代谢,从而提高了COD的去除率<sup>[15]</sup>。经过35 d的处理,循环组对COD的去除率为89.89%,出水COD浓度为40.20 mg·L<sup>-1</sup>。

氮素的去除过程中,同一阶段各处理组间差异显著( $P<0.05$ ),处理方式和处理时间及两者的交互作用对NH<sub>3</sub>-N均有影响。前7 d,三种处理方式对氮素均有较好的去除效果,这是由于试验前期植物处于快速营养生长阶段,对氮素的吸收利用较快,其中循环组的NH<sub>3</sub>-N和TN去除速率最高,分别为3.04 mg·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>和7.67 mg·L<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>。7~21 d,循环组中氮素去除速率降低,静置组与曝气组中氮素浓度的升高,可能与试验前期被根系截滤的氮素重新释放到水体有关<sup>[16]</sup>。经过35 d的处理,循环组对NH<sub>3</sub>-N和TN的去除率分别为69.40%和77.65%。

## 2.2 植物生长性能

如表2所示,静置组在处理前后,水芹菜的生长性能表现出显著差异,其鲜质量从2.00 g升高至5.77 g,呈现出良好的生长态势,相对生长速率为0.03 g·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>,与凤眼莲在养殖废水消化液中的生长速率相近<sup>[6]</sup>。研究表明,水体中的氮素浓度过高会抑制植物的生长,常用的湿地植物香蒲,在总凯氏氮(TKN)浓度达到54.50 mg·L<sup>-1</sup>(或NH<sub>3</sub>-N 24.70 mg·L<sup>-1</sup>)时,叶片枯黄或植株死亡<sup>[17]</sup>。樊后保等<sup>[18]</sup>认为,当系统中有大量的NH<sub>3</sub>-N输入时,植物体内的NH<sub>4</sub><sup>+</sup>与其他阳离子进行交换,使阳离子从叶片中淋洗掉,造成体内养分不平衡,从而抑制植物生长。静置组的水芹菜生长良好,表明水芹菜对猪场养殖废水具有适应性和耐受性。

循环组和曝气组的植物生长性能在试验前后没有显著差异,甚至在试验后期出现叶边发黄、根系腐烂等不良症状,表明循环组和静置组的植物生长受到了抑制。推测其原因,一方面是相较于静置培养,曝气组和循环组中的流动水体会导致微小颗粒难以被植物根系上的生物膜吸附,甚至将根系表面的生物膜

冲刷脱落,从而抑制植物对营养物质的吸收<sup>[19]</sup>;另一方面是水体中的DO浓度会影响水芹菜的生长,试验后期,循环组和曝气组的DO分别为10.85和10.38 mg·L<sup>-1</sup>。赵锋等<sup>[20]</sup>在研究根际氧浓度对水稻养分吸收的影响时,也出现高氧处理组(DO为7.00 mg·L<sup>-1</sup>)叶片发黄的现象。胡志华等<sup>[21]</sup>也提出,过度增氧(DO为7.50 mg·L<sup>-1</sup>)会抑制水稻产量和干物质的积累。卢晓明等<sup>[22]</sup>研究了海寿在连续曝气黑臭河水中的生理响应,同样发现曝气槽(DO为2.64 mg·L<sup>-1</sup>)植物的根、茎、叶长度和叶片叶绿素含量均小于非曝气槽(DO为0.68 mg·L<sup>-1</sup>),由于目前尚未有DO浓度影响水芹菜生长的相关文献记载,其原因需要进一步研究。

## 2.3 微生物群落结构变化

如表3所示,样品覆盖率均达到0.99,说明测序稳定,可以用来表示实际环境中微生物群落结构的真实信息。Chao1指数作为指示微生物种群丰度的指标之一,其值越大,反映样品中种群越丰富。本研究中,三种处理方式在试验结束时的Chao1指数均大于试验前。香农指数(Shannon)和辛普森指数(Simpson)作为指示微生物多样性的两个指标,它们与样本的丰度和均匀度有关,值越大反映样品中种群多样性越高。经过35 d的处理,所有处理组的香农指数和辛普森指数均升高,表明经过水芹菜和增氧处理,微生物多样性升高。

从门的生物学分类水平对样本进行分析,如图3A所示,处理前,水体中的优势菌门为拟杆菌门(Bacteroidetes)(51.04%),其次为变形菌门(Proteobacteria)(26.62%)和放线菌门(Actinobacteria)(13.99%),其他少量微生物为厚壁菌门(Firmicutes)(5.24%)。经过35 d的处理,水体优势菌门类发生明显变化。原本优势度很低的厚壁菌门在三种处理方式中均成为优势菌门,在静置组、循环组和曝气组中的占比分别为40.02%、42.16%和43.28%。为揭示不同处理方式中发挥作用的功能菌属,选取相对丰度前10的菌属进行分析,如图3B所示。在试验开始前,黄

表2 植物生长性能

Table 2 Growth performance of the study plants

处理 Treatments	时间 Time/d	植株鲜质量 Fresh weight of plants/g	根干质量 Dry weight of roots/g	茎叶干质量 Dry weight of shoots/g
未处理	0	2.00±0.89b	0.13±0.04b	0.19±0.07b
循环组	35	1.89±0.92b	0.10±0.04b	0.13±0.05b
曝气组	35	1.98±0.71b	0.11±0.03b	0.12±0.04b
静置组	35	5.77±1.50a	0.28±0.16a	0.32±0.10a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Notes: The different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at  $P<0.05$ .

表 3 样品测序结果及多样性指数

Table 3 Sequencing results and diversity indices of different samples

处理 Treatments	时间 Time/d	测序结果 Sequencing results		多样性指标 Diversity indices			
		操作分类单元 OTUs	覆盖度 Coverage/%	Shannon 指数 Shannon index	Simpson 指数 Simpson index	Ace 指数 Ace index	Chao1 指数 Chao1 index
未处理	0	449	0.99	4.20	0.73	561.66	565.83
静置组	35	1 156	0.99	8.08	0.99	1 335.16	1 315.35
循环组	35	1 213	0.99	8.15	0.99	1 364.00	1 366.55
曝气组	35	1 194	0.99	8.15	0.98	1 330.05	1 327.28

注:将序列相似性达到 97% 的序列归类为一个操作分类单元。

Note:Species level at 97% similarity threshold is defined as one operational taxonomic unit(OTU).

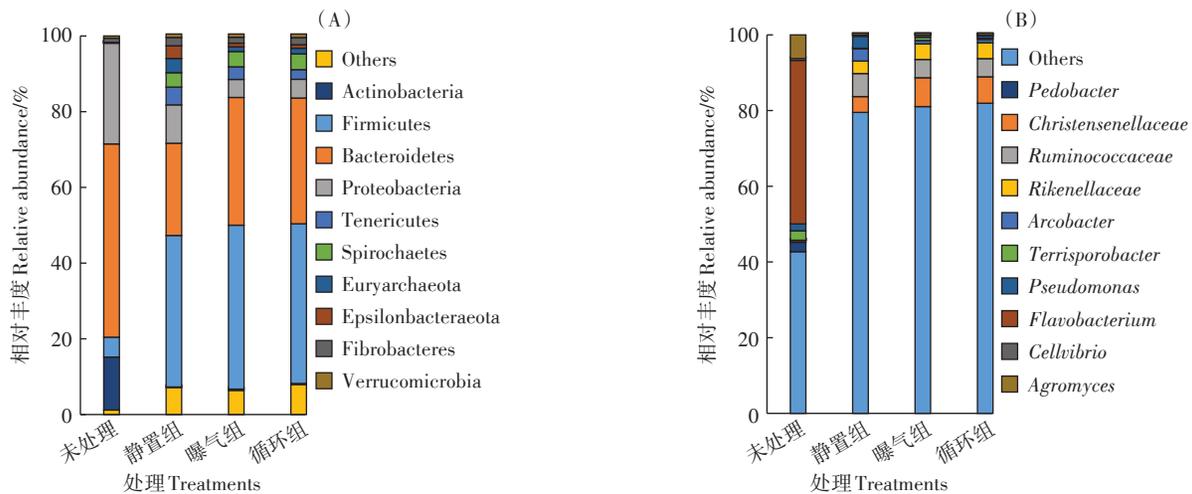


图 3 不同处理方式微生物在门(A)和属(B)水平上的群落结构及分布

Figure 3 Bacterial community structure and distribution of the samples in different treatments at phylum(A) and genus(B) level

杆菌属 (*Flavobacterium*) 的相对丰度为 43.19%, 为优势菌属, 其次为壤霉菌属 (*Agromyces*) (6.26%)、消化球菌属 (*Terrisporobacter*) (2.49%) 和地杆菌属 (*Pedobacter*) (2.48%)。经过 35 d 的处理, 循环组和曝气组的优势菌属为克里斯滕森菌属 (*Christensenellaceae*), 相对丰度分别为 6.96% 和 7.64%。静置组中, 瘤胃球菌属 (*Ruminococcaceae*) (6.10%) 成为优势菌属。

本试验中的优势菌属与其他学者的研究存在差异。王青璐等<sup>[23]</sup>研究表明, 污水类型和温度是影响微生物群落结构的主要因素。本试验中的克里斯滕森菌和瘤胃球菌属是典型的肠道微生物, 这与试验所用的污水来源符合。另外温度也会影响微生物群落结构的变化, 温度降低导致膜的流动性变差, 从而抑制微生物对营养物质的吸收和代谢产物的排除。本试验时段的环境温度为 5~18 °C, 此时中温菌的活性受到抑制, 而低温微生物仍具有降解盐类、有机物、表面活性剂等污染物的能力<sup>[24]</sup>。在废水处理中, 常见的低温菌主要为拟杆菌门、厚壁菌门和变形菌门。这与本试验所处的低温环境所得到的优势微生物门类相符。

在本研究中, 假单胞菌属 (*Pseudomonas*) 的相对丰度由 1.82% 下降到 0.53% (曝气组) 和 0.69% (循环组), 而静置组则上升到 3.15%。假单胞菌属作为典型的氨化细菌, 曾在人工湿地中被发现为优势菌属, 可将有机氮转化为 NH<sub>3</sub>-N, 具有很强的分解蛋白质和酯酶的能力<sup>[25]</sup>。何腾霞等<sup>[26]</sup>对假单胞菌属的研究发现, 在低于 10 °C 的条件下, 假单胞菌属对 TN 的去除率仍可达到 81.90%。黄有志等<sup>[27]</sup>研究表明, 有机氮浓度与氨化细菌数量呈显著正相关, NH<sub>3</sub>-N 浓度越高, 氨化细菌越多。静置组中的 COD 在研究期间始终维持较高水平, 有机氮源充足, 使得氨化细菌大量存在, 循环组和曝气组中, DO 的增加促进了微生物好氧反应进程, 有机物含量下降, 可溶性有机氮减少, 导致氨化细菌的相对丰度减少。Martín 等<sup>[28]</sup>对垂直流人工湿地净化城市污水的研究也表明, 当可供微生物生长的营养物质浓度降低时, 功能微生物的丰度也会逐渐降低。

黄杆菌属的相对丰度从 43.19% 下降到 0.09% (曝气组)、0.16% (循环组) 和 0.36% (静置组); 地杆菌属

则从2.48%下降到“未检出”。黄杆菌属和地杆菌属可以在低温环境下进行代谢作用,且多数菌种含有硝酸盐还原酶,是典型的反硝化菌<sup>[29-30]</sup>。试验所用废水来自厌氧反应器,反硝化菌大量存在,反硝化菌对DO敏感,在试验结束时,静置组、循环组和曝气组的DO分别为0.60、10.85 mg·L<sup>-1</sup>和10.38 mg·L<sup>-1</sup>,黄杆菌属和地杆菌属相对丰度的下降可认为是系统中DO浓度改变所致。

梭菌纲(Clostridia)的相对丰度从4.69%上升到40.59%(曝气组)、39.56%(循环组)和38.09%(静置组),梭菌纲是重要的酸化发酵菌,并且多数种可以产生芽孢,以抵抗外部极端环境,并参与水中有机物的降解<sup>[31]</sup>。孔德望等<sup>[32]</sup>在研究猪粪厌氧发酵消化液回流体系中微生物群落结构特征时,认为梭菌纲相对丰度的增加是由于该种群较其他微生物具有更强的竞争力。瘤胃球菌属和克里斯滕森菌属均属于梭菌纲,对环境变化具有很强的适应性,所以相对含量增加。

综合三种方式对污水的净化效果与植株的生长情况,静置组水芹菜生长态势较好,但对污水的净化效率较低,说明水芹菜对污染物的直接吸收仅占少部分。循环组和曝气组提高了微生物多样性,水质净化效率明显提高,但是其生长态势不如静置组,说明微生物对污染物质的降解才是净化污水的主体,而增氧处理对水中微生物的生长及其净化作用的发挥具有显著促进作用。

### 3 结论

(1)水芹菜在冬季对养殖废水消化液具有适应性和耐受性,具有弥补植物修复在冬季净化效率低的潜力,辅以循环和曝气处理可以提高其对COD、NH<sub>3</sub>-N、TN的去除效率。

(2)增氧处理可以提高微生物的丰富度,加速污染物的降解与转化,但是增氧引起的水力条件和溶解氧浓度变化会抑制植物的生长,其机理需要进一步研究。

(3)氨化细菌(如假单胞菌属)相对丰度与水体中有机氮的含量正相关,溶解氧的升高会抑制反硝化菌(如黄杆菌属和地杆菌属)的生长。

#### 参考文献:

[1] Headley T R, Tanner C C. Constructed wetlands with floating emergent macrophytes: An innovative stormwater treatment technology[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, 42(21): 2261-2310.

- [2] 魏瑞霞, 武会强, 张锦瑞, 等. 植物浮床-微生物对污染水体的修复作用[J]. *生态环境学报*, 2009, 18(1): 68-74.  
WEI Rui-xia, WU Hui-qiang, ZHANG Jin-rui, et al. Remediation effects of plant floating bed-microorganism on contaminated water[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 68-74.
- [3] 邹万生, 张景来, 刘良国, 等. 有效微生物菌与水生植物联合净化珍珠蚌养殖废水[J]. *环境工程学报*, 2012, 6(6): 1773-1779.  
ZOU Wan-sheng, ZHANG Jing-lai, LIU Liang-guo, et al. Purification effect of effective microorganisms combined with aquatic plants on aquaculture wastewater of pearl mussel[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(6): 1773-1779.
- [4] 董健, 刘超翔, 王振, 等. 水生植物滤床对猪场养殖废水的深度处理研究[J]. *水处理技术*, 2012, 38(9): 54-58.  
DONG Jian, LIU Chao-xiang, WANG Zhen, et al. Tertiary treatment of swine wastewater using aquatic plant filter bed[J]. *Technology of Water Treatment*, 2012, 38(9): 54-58.
- [5] 廖新伟, 骆世明. 人工湿地对猪场废水有机物处理效果的研究[J]. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 113-117.  
LIAO Xin-di, LUO Shi-ming. Treatment effect of constructed wetlands on organic matter in wastewater from pig farm[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(1): 113-117.
- [6] Sudiarto S I A, Rengaman A, Choi H L, et al. Floating aquatic plants for total nitrogen and phosphorus removal from treated swine wastewater and their biomass characteristics[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 34(6): 763-769.
- [7] Sanares R C, Katase S A, Fast A W, et al. Water quality dynamics in brackishwater shrimp ponds with artificial aeration and circulation[C]. Manila: Asian Fisheries Forum, 1986.
- [8] Boyd C E. Pond water aeration systems[J]. *Aquacultural Engineering*, 1998, 18(1): 9-40.
- [9] 张彩莹, 杜瑞卿, 王岩, 等. 季节气温变化对潜流人工湿地处理效果的影响[J]. *环境工程学报*, 2016, 10(4): 1706-1712.  
ZHANG Cai-ying, DU Rui-qing, WANG Yan, et al. Effect of season and temperature on treatment of subsurface flow constructed wetland[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2016, 10(4): 1706-1712.
- [10] 黄亮, 吴乃成, 唐涛, 等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(S1): 1-6.  
HUANG Liang, WU Nai-cheng, TANG Tao, et al. Enrichment and removal of nutrients in eutrophic water by aquatic macrophytes[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(S1): 1-6.
- [11] 武艳. 水生经济植物浮床在水产养殖废水净化中的应用[D]. 上海: 华东师范大学, 2011.  
WU Yan. The application of aquatic economic plants floating bed in the aquaculture wastewater purification[D]. Shanghai: East China Normal University, 2011.
- [12] 高志勇, 谢恒星, 刘楠楠, 等. 湿地植物在处理纺织工业废水中的应用及作用机制[J]. *北方园艺*, 2016(8): 204-207.  
GAO Zhi-yong, XIE Heng-xing, LIU Nan-nan, et al. Application and mechanism of wetland plants in the treatment of textile industry wastewater[J]. *Northern Horticulture*, 2016, 3(8): 204-207.
- [13] 罗良国, 陈崇娟, 赵天成, 等. 植物修复农田退水氮、磷污染研究进展[J]. *农业资源与环境学报*, 2016, 33(1): 1-9.

- LUO Liang-guo, CHEN Chong-juan, ZHAO Tian-cheng, et al. Progress on phytoremediation of drainage water N and P pollution in farmland drainage ditches: A review[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(1):1-9.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002:701-705.
- State Environmental Protection Administration. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater[M]. 4th Edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002:701-705.
- [15] 张彩莹, 王岩, 王妍艳, 等. 潜流人工湿地对畜禽养殖废水的净化效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17):160-168.
- ZHANG Cai-ying, WANG Yan, WANG Yan-yan, et al. Purification effect of subsurface flow constructed wetland on livestock wastewater[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(17):160-168.
- [16] 李薇. 溶解氧水平对富营养化水体底泥氮磷转化影响的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- LI Wei. Study on the impact of DO on the release of nitrogen and phosphorus from sediment in eutrophic water[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
- [17] 张彩莹, 王妍艳, 王岩, 等. 大狼把草对猪场废水中污染物的净化效果[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4):264-269.
- ZHANG Cai-ying, WANG Yan-yan, WANG Yan, et al. Removal effects of *Bidens frondosa* on pollutants in swine wastewater[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(4):264-269.
- [18] 樊后保, 黄玉梓. 陆地生态系统氮饱和对植物影响的生理生态机制[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(4):395-402.
- FAN Hou-bao, HUANG Yu-zi. Ecophysiological mechanism underlying the impacts of nitrogen saturation in terrestrial ecosystems on plants[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2006, 32(4):395-402.
- [19] 胡碧莹. 湿地植物在不同水力条件处理下的净化效果与生长特性研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- HU Bi-ying. Study on purification effects and growth characteristics of wetland plants under varying hydraulic conditions[D]. Chongqing: Southwest University, 2017.
- [20] 赵锋, 张卫建, 章秀福, 等. 连续增氧对不同基因型水稻分蘖期生长和氮代谢酶活性的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(2):344-351.
- ZHAO Feng, ZHANG Wei-jian, ZHANG Xiu-fu, et al. Effect of continuous aeration on growth and activity of enzymes related to nitrogen metabolism of different rice genotypes at tillering stage[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(2):344-351.
- [21] 胡志华, 朱练峰, 林育炯, 等. 根际氧浓度对水稻产量及其氮素利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(4):382-389.
- HU Zhi-hua, ZHU Lian-feng, LIN Yu-jiong, et al. Effects of rhizosphere oxygen concentration on rice grain yield and nitrogen utilization[J]. *Chin J Rice Sci*, 2015, 29(4):382-389.
- [22] 卢晓明, 陈玉霞, 陈建军, 等. 海寿植物在不同季节连续曝气黑臭河水中的生理响应及净水效果的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9):1919-1923.
- LU Xiao-ming, CHEN Yu-xia, CHEN Jian-jun, et al. Comparative investigation on physiological responses of *Pontederia cordata* and purifying efficiencies of heavily polluted river water under continuous aeration in various seasons[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9):1919-1923.
- [23] 王青璐, 彭明春, 赵安娜, 等. 人工湿地中影响微生物空间分布因素的探讨[J]. 环境科学导刊, 2009, 28(2):1-3.
- WANG Qing-lu, PENG Ming-chun, ZHAO An-na, et al. Study on influencing factors of microorganism's spatial distribution in artificial wetlands[J]. *Environmental Science Survey*, 2009, 28(2):1-3.
- [24] Margesin R, Fonteyne P A, Redl B. Low-temperature biodegradation of high amounts of phenol by *Rhodococcus* spp. and *Basidiomycetous* yeasts[J]. *Research in Microbiology*, 2005, 156(1):68-75.
- [25] Jin D, Wang P, Bai Z, et al. Analysis of bacterial community in bulk-sludge using culture-dependent and -independent approaches[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(11):1880-1887.
- [26] 何腾霞, 李振轮, 徐义, 等. 耐冷亚硝酸盐型反硝化细菌 *Pseudomonas putida* Y-12 脱氮特性[J]. 环境科学学报, 2015, 35(10):3071-3077.
- HE Teng-xia, Li Zhen-lun, XU Yi, et al. Denitrification characteristics of a hypothermia nitrite-denitrifier *Pseudomonas putida* Y-12[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(10):3071-3077.
- [27] 黄有志, 刘永军, 熊家晴, 等. 北方地区表流人工湿地冬季污水脱氮效果及微生物分布分析[J]. 水处理技术, 2013, 39(1):55-59.
- HUANG You-zhi, LIU Yong-jun, XIONG Jia-qing, et al. Analysis on effect of removal nitrogen and microorganism distribution in sewage of surface-flow constructed wetland in northern China in winter[J]. *Technology of Water Treatment*, 2013, 39(1):55-59.
- [28] Martín M, Gargallo S, Hernández-Crespo C, et al. Phosphorus and nitrogen removal from tertiary treated urban wastewaters by a vertical flow constructed wetland[J]. *Ecological Engineering*, 2013, 6(1):34-42.
- [29] 杨浩, 张国珍, 杨晓妮, 等. 16S rRNA 高通量测序研究集雨窖水中微生物群落结构及多样性[J]. 环境科学, 2017, 38(4):1704-1716.
- YANG Hao, ZHANG Guo-zhen, YANG Xiao-ni, et al. Microbial community structure and diversity in cellar water by 16S rRNA high-throughput sequencing[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(4):1704-1716.
- [30] 蔺凌云, 尹文林, 潘晓艺, 等. 自然微生物挂膜处理水产养殖废水的效果及微生物群落分析[J]. 水生生物学报, 2017, 41(6):1327-1335.
- LIN Ling-yun, YIN Wen-lin, PAN Xiao-yi, et al. The study of natural biofilm formation for nitrogen removal from aquaculture wastewater and analysis on microbial community in biofilm[J]. *Acta Hydrobiologica Sinica*, 2017, 41(6):1327-1335.
- [31] Ye L, Shao M F, Zhang T, et al. Analysis of the bacterial community in a laboratory-scale nitrification reactor and a wastewater treatment plant by 454-pyrosequencing[J]. *Water Research*, 2011, 45(15):4390-4398.
- [32] 孔德望, 张克强, 房芳, 等. 猪粪厌氧发酵消化液回流体系微生物群落结构特征与产气关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3):559-566.
- KONG De-wang, ZHANG Ke-qiang, FANG Fang, et al. Study of microbial community and biogas production in anaerobic digestion of pig manure with digested slurry recirculation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(3):559-566.