

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第38卷 第6期

Vol.38 No.6

2017

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

PM _{2.5} 浓度空间分异模拟模型对比:以京津冀地区为例	吴健生,王茜,李嘉诚,涂媛杰(2191)
北京地区近35年大气污染扩散条件变化	郭淳薇,孙兆彬,李梓铭,张小玲,杨慧玲(2202)
北京市典型区域夏季降水及其对大气污染物的影响	韩力慧,张海亮,向欣,张鹏,程水源,魏巍(2211)
北京山谷风环流特征分析及其对PM _{2.5} 浓度的影响	董群,赵普生,王迎春,苗世光,高健(2218)
北京市建筑施工扬尘排放特征	薛亦峰,周震,黄玉虎,王堃,聂滕,聂磊,秦建平(2231)
生物质成型燃料锅炉挥发性有机物排放特征	吴昌达,张春林,白莉,沈雨冉,王伯光,刘军,杨立辉(2238)
广州番禺大气成分站复合污染过程VOCs对O ₃ 与SOA的生成潜势	邹宇,邓雪娇,李菲,殷长泰(2246)
南京北郊大气臭氧周末效应特征分析	王俊秀,安俊琳,邵平,邹嘉南,林旭,张玉欣(2256)
亚热带稻区大气氨/铵态氮污染特征及干湿沉降	王杰飞,朱潇,沈健林,曾冠军,王娟,吴金水,李勇(2264)
宣威肺癌高发区燃煤排放颗粒物中铁的价态及其氧化性	王强翔,谭正莹,赵慧,李继华,田林玮,王青曜,米持真一,吕森林(2273)
垃圾焚烧厂区二噁英污染及厂区工人呼吸暴露评估	杜国勇,汪倩,张姝琳,张素坤,邓春萍,张洪铭,朱盟翔,蒋昕,朱成旺,任燕玲(2280)
重庆市新型干法水泥厂汞排放特征	张成,张雅惠,王永敏,王定勇,罗程钟,徐凤,何秀清(2287)
轻型汽油车简易瞬态工况法与定容全流稀释采样法(CVS)的排放相关性	王鸿宇,黄成,胡馨遥,李莉,陈勇航,徐健(2294)
不同排放标准公交车燃用生物柴油颗粒物排放特性	楼狄明,赵成志,徐宁,谭丕强,胡志远(2301)
西江水氢氧同位素组成的空间变化及环境意义	许琦,李建鸿,孙平安,何师意,于爽(2308)
基于SWAT与DNDC模型对比研究亚热带流域氮淋溶与输出过程	韩宁,陈维梁,高扬,郝卓,于贵瑞(2317)
三峡库区澎溪河与磨刀溪电导率等水质特征与水华的关系比较	姜伟,周川,纪道斌,刘德富,任豫霜,Douglas Haffner,谢德体,张磊(2326)
滇池草海间隙水与上覆水氮磷时空变化特征	王一茹,王圣瑞,焦立新,张云,高秋生,杨枫(2336)
香溪河沉积物、间隙水的磷分布特征及释放通量估算	罗玉红,聂小倩,李晓玲,戴泽龙,胥焘,黄应平(2345)
大冶湖表层水和沉积物中重金属污染特征与风险评价	张家泉,田倩,许大毛,占长林,刘婷,姚瑞珍,刘先利,肖文胜(2355)
海水淡化低温多效蒸馏工艺(LT-MED)沿程溴代消毒副产物的生成	齐菲,孙迎雪,杨哲,胡春芳,常学明,胡洪营(2364)
两种水体铜配合容量测试方法的适用性比较及应用	王晨烨,姜括,谢文龙,汪磊(2373)
高地下水位地区透水铺装控制径流污染的现场实验	金建荣,李田,时珍宝(2379)
稳定型纳米零价铁去除地下水中2,4-二氯苯酚	张永祥,常杉,李飞,徐毅,高维春(2385)
超声、紫外增强H ₂ O ₂ /KI降解磺胺甲基嘧啶	魏红,孙博成,杨小雨,李克斌(2393)
不同铅负载量改性膨润土对水中磷酸盐吸附作用的对比	姜博汇,林建伟,詹艳慧,邢云青,黄宏,储鸣,王星星(2400)
铁炭内电解垂直流人工湿地对污水厂尾水深度脱氮效果	郑晓英,朱星,周翔,徐亚东,王菊,韦诚,高雅洁,周橄(2412)
组合生物滤池对养殖废水的净化效率及影响因素分析	张世羊,张胜花,张翔凌,王广军(2419)
温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响	张玲,彭党聪,常蝶(2429)
海洋厌氧氨氧化菌的富集培养及其脱氮特性	冯莉,于德爽,李津,单晓静,杨振琳(2435)
不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析	周洪玉,韩梅琳,仇天雷,高敏,孙兴滨,王旭明(2444)
磷酸盐对厌氧氨氧化活性污泥脱氮效能的影响	周正,刘凯,王凡,林兴,李祥,黄勇,顾澄伟(2453)
碳源胁迫下脱氮除磷颗粒污泥性能变化及其机制	秦诗友,陈威,马兆瑞,刘小英,陈晓国,余文韬,夏媛媛,黄健(2461)
外源Ca ²⁺ 对SBR启动期活性污泥胞外多聚物的动态影响	任丽飞,杨新萍,张雯雯(2470)
膨胀污泥中丝状菌的分离鉴定与特性分析	张崇森,牛全睿,徐雨梅,王陇梅,王岱,武少华(2477)
反硝化悬浮填料适用性及其微生物群落结构解析	谭阳,李激,徐巧,付磊,尤世界,王硕(2486)
硫代硫酸钠对排硫硫杆菌固碳能力的影响及其作用机制	李欢,王磊,王亚楠(2496)
关帝山森林土壤真菌群落结构与遗传多样性特征	乔沙沙,周永娜,柴宝峰,贾彤,李鑫(2502)
基于受体模型与地统计的城市居民区土壤重金属污染源解析	陈秀端,卢新卫(2513)
基于蒙特卡罗模拟的土壤环境健康风险评价:以PAHs为例	佟瑞鹏,杨校毅(2522)
Eh、pH和铁对水稻土钾释放的影响机制	钟松雄,尹光彩,陈志良,林亲铁,黄润林,刘德玲,彭焕龙,黄玲,王欣,蒋晓璐(2530)
典型土壤不同提取态Cd与水稻吸收累积的关系	陈齐,邓潇,陈珊,侯红波,彭佩钦,廖柏寒(2538)
复合改良剂对Cd污染稻田早晚稻产地修复效果	陈立伟,杨文骏,辜娇峰,周航,高子翔,廖柏寒(2546)
两种钝化剂对土壤Pb、Cd、As复合污染的菜地修复效果	田桃,雷鸣,周航,杨文骏,廖柏寒,胡立琼,曾敏(2553)
大豆和小麦根系对非的吸持作用及其生物有效性	王红菊,李倩倩,沈羽,顾若尘,盛好,占新华(2561)
源自腐殖土的溶解性有机质组分对棕壤和黑土吸附苯并三唑的影响	杨宁伟,毕二平(2568)
地形、树种和土壤属性对喀斯特山区土壤胞外酶活性的影响	罗攀,陈浩,肖孔操,杨利琼,文丽,李德军(2577)
长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤N ₂ O排放的影响	郝耀旭,刘继璇,袁梦轩,周应田,杨学云,顾江新(2586)
基于大气被动式采样的人体头发中类二噁英多氯联苯暴露的途径	袁浩东,白瑶,李秋旭,王英,金军(2594)
广西刁江野生鱼类重金属积累特征及其健康风险评价	王俊能,马鹏程,张丽娟,陈棉彪,黄楚珊,柳晓琳,胡国成,许振成(2600)
活性炭在中高温条件下对玉米秸秆厌氧发酵的影响	甘荣,葛明民,刘勇迪,贾红华,闫志英,雍晓雨,吴夏荒,周俊(2607)
工艺过程源和溶剂使用源挥发性有机物排放成分谱研究进展	王红丽,杨肇勋,景盛翱(2617)
《环境科学》征稿简则(2452) 《环境科学》征订启事(2560) 信息(2201, 2230, 2384)	

不同生物过滤系统铵态氮转化速率及生物膜特性分析

周洪玉^{1,2}, 韩梅琳¹, 仇天雷^{1*}, 高敏¹, 孙兴滨², 王旭明^{1,3}

(1. 北京市农林科学院生物技术研究中心, 北京 100097; 2. 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040; 3. 农业部都市农业(北方)重点实验室, 北京 100097)

摘要: 实验模拟循环水养殖系统, 运行了移动床生物膜反应器(moving bed biofilm reactor, MBBR)和挂帘式生物滴滤池两类生物过滤系统的6种不同填料反应器, 对比分析了各反应器的填料挂膜效果、铵态氮转化速率和生物膜微生物群落结构等特征。结果表明, 与MBBR相比, 挂帘式生物滴滤池挂膜速度快且生物量较多, 其中碳纤维挂帘式生物滴滤池的脱膜后生物膜重最大, 为 $45.97 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$, $8 \text{ h NH}_4^+ \text{-N}$ 去除率(86.76%)高于其他反应器(61.96%~78.76%), 并且 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 累积少, 16 h 时 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 浓度在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 以下。通过Illumina高通量测序技术对生物过滤系统中生物膜微生物群落结构进行解析, 结果表明, 不同类型反应器的生物膜内的细菌、真核微生物群落构成有明显区别, 无论是细菌还是真核微生物, 挂帘式生物滴滤池的物种丰度和多样性均高于MBBR, 但MBBR的细菌群落物种集中度更高。硝化螺菌属(*Nitrospira*)及放线菌中的*Nakamurella*属在两类反应器的生物膜中均占优势, 腐螺旋菌科(Saprospiraceae)在挂帘式生物滴滤池更多, 而丛毛单胞菌科(Comamonadaceae)更倾向于在MBBR中富集。在真核微生物属水平相对丰度上, 挂帘式生物滴滤池中小杆目中的Rhabditida norank占明显优势, 而MBBR中绿藻纲中的Chlorophyceae norank占明显优势。以上研究结果为挂帘式生物滴滤池在循环水养殖水质净化中的应用奠定了实验基础。

关键词: 循环水养殖; 移动床生物膜反应器; 挂帘式生物滴滤池; 铵态氮转化速率; 高通量测序

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2017)06-2444-09 DOI: 10.13227/j.hjks.201610142

Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater

ZHOU Hong-yu^{1,2}, HAN Mei-lin¹, QIU Tian-lei^{1*}, GAO Min¹, SUN Xing-bin², WANG Xu-ming^{1,3}

(1. Beijing Agro-Biotechnology Research Center, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097, China; 2. College of Forestry Science, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 3. Key Laboratory of Urban Agriculture (North), Ministry of Agriculture, Beijing 100097, China)

Abstract: Three MBBRs and three curtain type trickling filters (CTFs) with different carriers were operated in lab-scale simulated RASs. The characteristics of biofilms, ammonia removal rates and microbial communities in six reactors were compared with each other. Compared with the biofilms of MBBRs, the biofilms of CTFs were heavier and grew faster. The weight of biofilms on CTFs with carbon fiber carriers was the maximum ($45.97 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$), and the ammonia nitrogen removal efficiency (86.76%) of this CTFs was higher than the other filters or reactors (61.96%~78.76%). In addition, the concentration of the accumulated nitrite in the carbon fiber CTFs was the lowest in all the six reactors. The microbial communities of biofilms in the six biofilters were evaluated by the high-throughput Illumina-MiSeq sequencing technology. The results showed that the microbial (bacteria and eukaryote) community in biofilms of CTFs was different from that in biofilms of MBBRs. At both bacteria and micro-eukaryote level, the species richness and biological diversity of biofilms in the trickling filters were higher than those in the MBBRs. On the contrary, the Simpson index of bacterial community in biofilms of MBBRs was higher than that in the trickling filters. In all the six biofilters, *Nitrospira* and *Nakamurella* were the dominated bacterial genera. Saprospiraceae was more abundant in CTFs than in MBBRs, but Comamonadaceae was enriched in the MBBRs. At the micro-eukaryote genus level, Rhabditida norank genus was more abundant in CTFs, while Chlorophyceae norank genus was more abundant in the MBBRs. The results provide useful information about microbial ecology that can be used for the application of CTFs in RAS.

Key words: recirculating aquaculture system; MBBR; trickling filter; ammonia removal rate; Illumina-MiSeq sequencing technology

近30年来,我国水产养殖业得到快速发展,养殖产量已经连续多年居世界第1位^[1]。在面临我国资源与环境严峻形势下,传统粗放的养殖模式必然会向节水、环保、生产效率高、养殖周期短、可持续生产的循环水养殖系统(recirculating aquaculture systems, RAS)转变^[2]。RAS兴起于20世纪80年代

末^[3],它通过沉淀、过滤、生物净化、增氧、杀菌消

收稿日期: 2016-10-21; 修订日期: 2017-01-16

基金项目: 北京市农林科学院青年科学基金项目(QNJJ201417); 北京市农林科学院科技创新能力建设专项(KJCX20140420)

作者简介: 周洪玉(1991~),女,硕士研究生,主要研究方向为水污染控制技术与原理, E-mail: 453012151@qq.com

* 通信作者, E-mail: qqray@hotmail.com

毒等一系列物理、化学和生物手段主动控制养殖水质环境和营养供给^[4],生物过滤系统是 RAS 污染物去除的重要组成部分^[5]. 在循环水养殖系统中,养殖对象的排泄物及残饵残渣等物质是 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等污染物的主要来源^[6],如何高效去除对养殖水产构成威胁的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等污染物是水产养殖水质净化的关键性问题^[7]. 反应器填料性质变化有时也会对生物膜微生物群落造成影响,了解生物膜内微生物群落结构,尤其是硝化菌群结构组成也有利于循环水养殖系统的稳定运行^[8~10].

不同种类的填料对于生物过滤系统的硝化性能有重要影响. 本研究采用移动床生物膜反应器 (moving bed biofilm reactor, MBBR) 和挂帘式生物滴

滤池处理模拟养殖废水,分析比较 6 种不同填料条件下, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的效率,同时研究不同生物过滤系统内生物膜的微生物群落结构,来筛选最适填料,以期为更有效地处理循环水产养殖废水奠定实验基础.

1 材料与方法

1.1 实验材料

本实验以 3 组 (编号 M1、M2、M3) 悬浮填料组成的 MBBR 系统和 3 组 (编号 F1、F2、F3) 滤布填料构成的挂帘式生物滴滤池作为研究对象,其填料基本参数见表 1、表 2. 多孔流化悬浮填料塑料 P1, 高密度聚乙烯 K1, K2 填料.

活性污泥:取自水产养殖生物过滤系统的污泥.

表 1 悬浮填料的基本参数

Table 1 Basic parameters of the fillers

编号	填料种类	填料直径 /mm	填料厚度 /mm	比表面积 / $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$	比重 / $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
M1	K2	15	10	600	0.96~0.97
M2	P1	25	4	500	0.95
M3	K1	10	7	500	0.96~0.97

表 2 挂帘滤布的基本参数

Table 2 Basic parameters of the filter cloth

编号	材质	比表面积/ $\text{m}^2\cdot\text{m}^{-3}$	密度/ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$
F1	碳纤维	1 300~1 500	220
F2	涤纶无纺布	900~1 100	225
F3	工业滤纸	700~900	160

1.2 实验装置

水处理生物过滤系统分为 MBBR 和挂帘式生物滴滤池,图 1(a) 为 MBBR 装置示意,材料为有机玻璃,内径为 13.7 cm 的圆柱体,总体积为 3 L,有效体积为 2 L,填料填充率为 30%. 图 1(b) 为挂帘式

生物滴滤池装置示意图,生物滤池材质为有机玻璃板,构型为长方体,总体积为 3 L,长 20 cm,宽 10 cm,高 15 cm,生物滤池内纵向插入 4 张滤布. 人工配水在两种生物过滤系统中反复循环处理,具体循环过程如下:进水从集水桶 (有效容积 6 L) 经蠕动泵泵入生物过滤系统,经过生物过滤系统处理后出水回流集水桶,再泵入系统中循环处理.

1.3 实验方法

本实验用水为人工模拟养殖废水,进水配方为: $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ 33.3 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NH_4Cl 68.76 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 18 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, NaHCO_3 71.4 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Na_2HPO_4

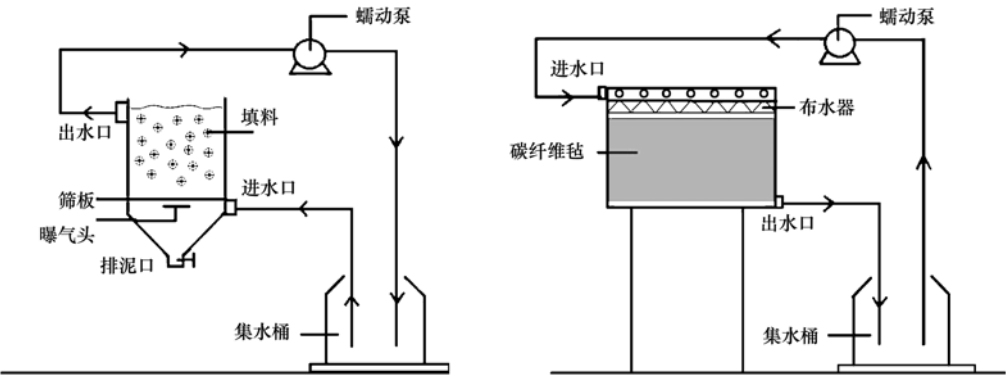


图 1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

18.85 mg·L⁻¹, 混合微量元素 1 mg·L⁻¹.

混合微量元素: MnSO₄·H₂O 33.8 mg·L⁻¹, H₃BO₃ 49.4 mg·L⁻¹, ZnSO₄·7H₂O 43.1 mg·L⁻¹, FeSO₄·7H₂O 97.3 mg·L⁻¹, CuSO₄·5H₂O 25.0 mg·L⁻¹.

反应器启动方法:将 6 mL 稀释污泥按 1‰(体积比),接种到反应器中,配置模拟养殖废水 6 L, pH 调至 7.5~8.0,流速为 0.5 L·min⁻¹, DO 为 8~8.5 mg·L⁻¹,循环运行 2 d,待大量污泥附着在生物填料上,将剩余污泥排出后,加入人工模拟养殖废水进行驯化,循环运行 2 周.

序批式实验反应器运行参数:反应器挂膜启动后,进水更换为新配人工模拟养殖废水, pH 调至 7.5~8.0,流速为 0.5 L·min⁻¹(即反应器水力停留时间为 4 min), DO 为 8~8.5 mg·L⁻¹,温度利用加热棒控制在 25℃,实验运行 40 h,重复 3 个批次. 每 8 h 取反应器出水口水样,检测 NH₄⁺-N、NO₂⁻-N 和 NO₃⁻-N 浓度.

1.4 分析方法

NH₄⁺-N 浓度的检测方法:纳氏试剂光度法^[11],检测试剂购自连华科技有限公司. NO₂⁻-N 浓度检测方法:重氮偶合分光光度法^[11](GB/T 5750.5-2006). NO₃⁻-N 浓度检测方法:紫外分光光度法^[11]. DO 使用溶解氧测量仪(哈希 LDO 便携式溶氧仪). pH 使用德国 WTW inoLab pH7310 台式 pH 测量仪.

1.5 高通量测序及数据分析方法

1.5.1 DNA 提取和 PCR 扩增

取反应器填料(60 d),收集生物膜,采用 PowerSoil® DNA 提取试剂盒(MO BIO Laboraterie, Inc., Carlsbad, CA, USA)提取细菌 DNA. PCR 扩增细菌 16S 核糖体 RNA 基因的 V3 可变区提取 DNA 送美吉公司进行 Illumina MiSeq 测序. 所用引物为 515F 5'-barcode-GTGCCAGCMGCCGCGG)-3' 和 907R 5'-CCGTCAATTCMTTTRAGTTT-3',且每个样本分别加上 8 bp 的标签(barcode)序列. 具体扩增条件及体系见文献[12]:95℃预变性 2 min, 95℃变性 30 s, 55℃退火 30 s, 72℃复性 30 s, 25 个循环,再 72℃延伸 5 min. 反应体系为 20 μL,包括 4 μL 的 5×FastPfu Buffer, 2 μL 的 2.5 mmol·L⁻¹ dNTPs,引物(5 μmol·L⁻¹)各 0.8 μL, 0.4 μL 的 Fast Pfu Polymerase 和 10 ng 模板 DNA. 每个样品的扩增重复 3 次.

PCR 扩增真核微生物 18S RNA 基因的 V4 可变

区,引物为 3NDF(5'-GGCAAGTCTGGTGCCAG-3')和反向引物 V4-euk-R2(5'-ACGGTATCTRATC RTCTTCG-3')^[13,14],95℃预变性 2 min,接着 30 个循环,95℃变性 30 s, 55℃退火 30 s, 72℃延伸 30 s,最后 72℃延伸 5 min. 反应体系为 20 μL,包括每种引物 0.2 μmol·L⁻¹, 1×PCR Buffer, 2.5 U 的 Pfu DNA Polymerase 和 10 ng 模板 DNA^[14,15].

1.5.2 Illumina MiSeq 测序

从 2% 琼脂糖凝胶中回收扩增子,依照 AxyPrep DNA Gel Extraction Kit 说明书进行纯化(Axygen Biosciences, Union City, CA, U. S.),再用 QuantiFluor™-ST (Promega, U. S.)进行定量. 将纯化后的扩增子等量混合,然后根据 Illumina MiSeq 测序平台的标准流程进行双端(2×250 bp 或 2×300bp)测序.

1.5.3 数据分析及作图

用 QIIME (version 1.17) 软件对原始文件进行处理,用 UPARSE (version 7.1 <http://drive5.com/uparse/>) 软件聚类生成操作分类单元(operational units, OTUs),相似度为 97%. 分类学比对时,用 silva (SSU115) 16S 核糖体 RNA 数据库,算法为 RDP Classifier (<http://rdp.cme.msu.edu/>),置信阈值为 70%^[16]. 用 R 语言(版本 3.1.0)绘图包 pheatmap 软件,选取相对丰度前 20 的属,对相对丰度取 10 为底的对数,制作热图. 利用 R 语言中 prcomp 软件做主成分分析.

2 结果与讨论

2.1 填料挂膜效果对比

在同样的挂膜时间内,3 种挂帘式生物滴滤池的总体挂膜效果要好于 3 种 MBBR,挂膜第 10 d,填料表面逐渐变为黄色,第 40 d 时 M1、M2、M3 这 3 种填料内部有明显黄褐色的生物膜形成,目测与 M2 相比较,M1 和 M3 内部有更厚的生物膜,从生物膜干重测量表明(表 3),单位体积的 M1 填料的生物膜重量(11.9 g·L⁻¹)与 M2(6 g·L⁻¹)和 M3(9.1 g·L⁻¹)相比,M1 含有较多的生物膜,说明 M1 填料具有更好的挂膜效果. F1、F2、F3 表面附有大量生物膜,单位面积碳纤维填料(45.97 g·m⁻²)与涤纶无纺布(41.24 g·m⁻²)和工业滤纸(6.34 g·m⁻²)相比含有较多的生物膜,说明比表面积大有利于微生物的附着与生长,这与 Zhang 等^[17]研究结果类似,说明具有更大内部表面积的填料挂膜启动更快. MBBR 中悬浮填料会随着曝气的水流而上下摆动,

在水流的冲刷下导致悬浮填料上附着的微生物容易脱落,而挂帘式生物滴滤池填料相对固定,微生物不仅附着在填料表面,也会附着在滤布填料内部,避免了硝化细菌由于水流和曝气冲刷而脱落,挂帘式生物滴滤池的结构更适于微生物的附着与生长,有利于提高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的去除效率.

表 3 填料生物膜干重对比

Table 3 Dry weights of biofilms on carriers

编号	填料	滤料干重 /g	脱膜干重 /g	生物膜重
M1	K2	23.3	20.8	$11.9\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$
M2	P1	23.7	22.5	$6\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$
M3	K1	29.6	27.8	$9.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$
F1	碳纤维	36.15	28.978	$45.97\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$
F2	涤纶无纺布	43.9	37.26	$41.24\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$
F3	工业滤纸	17.07	16.1	$6.34\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$

2.2 稳定运行阶段不同填料反应器运行效果对比

挂膜成熟后,不同填料过滤系统去除模拟养殖废水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的情况如图 2,初始 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度为 $18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,随着反应系统的运行, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度逐渐降低,经过 16 h 的处理 6 个反应器的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度均降低到 0 左右. 但 8 h 时,碳纤维挂帘式生物滴滤池的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度最低,其 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率 (86.76%) 高于其他反应器 ($61.96\% \sim 78.76\%$). 8 h 时碳纤维挂帘式生物滴滤池具有更高的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率,其比表面积大,能够为微生物的附着提供更大的空间和良好的生存环境,刘雨等^[18]认为当单位面积上附着的生物膜上微生物含量多,有助于对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的快速降解,而反之则降解速率越低.

$\text{NO}_2^-\text{-N}$ 能通过鳃和皮肤渗透到鱼体使亚铁血红蛋白失活,从而失去携带氧的功能,使水生生物体内缺氧而导致死亡,所以在处理养殖废水时要尤其注意 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的积累量. 序批式实验中 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度均是先升再降, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 峰值达到 $4.18\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,而相比较而言挂帘式生物滴滤池去除 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 更为迅速(图 2),16 h 时基本降为 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下. 由于本研究中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 一次性添加,所以前期的高 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度会引起 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累,这与邱立平等^[19]认为游离 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度过高引起 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累的原因相类似. $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 生成规律 6 个反应器保持一致,均是不断积累的过程, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的峰值基本是在 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度达到最低值时出现的,说明 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 已基本转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$.

MBBR 在充分曝气的条件下,悬浮填料随流水扰动上下摆动,利用生长在填料表面的硝化细菌对

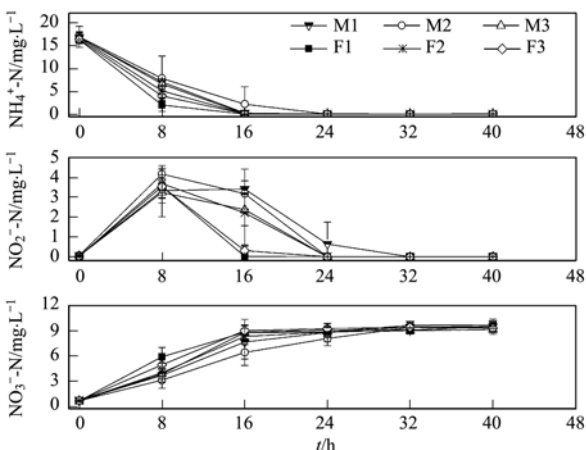


图 2 序批式实验中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度变化

Fig. 2 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2^-\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ concentration changes in the batch experiments

养殖废水进行处理. 挂帘式生物滴滤池以滤布为填料,在布水器的作用下,养殖废水均匀淋在滤布上,利用生长在滤布填料上的微生物对养殖废水进行降解,整个过程并不需要曝气. 碳纤维滤布填料与其他 5 种填料相比具有更好的挂膜效果,挂膜速度快、挂膜生物量多且稳定;碳纤维挂帘式生物滴滤池具有较好的硝化效率,对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有更好的处理效果,并且 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 积累程度低. 而且不需要传统工艺中的曝气与反冲洗步骤,简化工艺流程的同时节省了运行成本,适宜在水产养殖等低碳氮比废水脱氮中推广应用.

2.3 不同反应器内生物膜上微生物群落结构解析

α 多样性分析可以衡量区域内物种资源的丰富度,评价微生物群落的结构特征及稳定性^[20]. 不同反应器的生物膜 DNA 经过提取、扩增和高通量测序分析,去除嵌合体后序列平均长度为 656 bp,经过均一化后,每个样品有 20 998 条序列,将相似性高于 97% 的序列归为 1 个 OTU,并进行 α 多样性分析,所有样品的覆盖率 (coverage) 说明测序数量能够覆盖 99% 的细菌种类. 无论是细菌还是真核微生物,挂帘式生物滴滤池 (编号 F1 ~ F3) 中表征物种丰度的 Chao1、ACE 及表征群落均匀多样性的 Shannon 等指数,均高于 MBBR (编号 M1 ~ M3),见表 4 和表 5, Simpson 指数^[21]也可以表示样品的多样性程度,其值越大表明样品群落多样性越低. 结果表明,挂帘式生物滴滤池生物膜中含有更为丰富的微生物,在细菌方面,以碳纤维滤布为填料的 F1 生物滤池的物种丰度与多样性均是最高,即相对于 MBBR,而真核微生物方面,以涤纶无纺布为填料的 F2 生物滤池

的真核微生物丰度最高,以工业滤纸为填料的 F3 生物滤池的多样性最高. 可以看出挂帘式生物滴滤池的微生物群落的稳定性更强,不利于病原菌的大量生长^[22,23].

表 4 微生物群落中细菌种系覆盖和多样性指数对比

Table 4 Comparison of phylotype coverage and diversity estimators in the bacterial communities

样品编号	序列数	OTU	ACE	Chao1	覆盖率	Shannon 指数	Simpson 指数
F1	20 998	656	692	710	0.99	5.42	0.009
F2	20 998	603	651	657	0.99	5.00	0.018 5
F3	20 998	577	615	618	0.99	4.77	0.026 7
M1	20 998	423	479	496	0.99	4.44	0.026 7
M2	20 998	434	485	504	0.99	4.13	0.047 8
M3	20 998	399	455	455	0.99	4.33	0.026 9

表 5 微生物群落中真核微生物种系覆盖和多样性指数对比

Table 5 Comparison of phylotype coverage and diversity estimators in the microeukaryote communities

样品编号	序列数	OTU	ACE	Chao1	覆盖率	Shannon 指数	Simpson 指数
F1	23 810	109	112	114	0.99	2.31	0.206 2
F2	23 810	124	130	130	0.99	2.43	0.235 2
F3	23 810	111	116	113	0.99	2.84	0.129 2
M1	23 810	67	74	76	0.99	2.12	0.193 1
M2	23 810	55	56	56	0.99	1.82	0.220 8
M3	23 810	67	68	67	0.99	2.02	0.226 7

两种反应器的生物膜上微生物群落在门水平分类上的相似性能够明显将挂帘式生物滴滤池(编号 F1 ~ F3)和 MBBR(编号 M1 ~ M3)区分开(图 3). 在细菌群落系统总体上看,变形菌门(Proteobacteria,43.8%)、放线菌门(Actinobacteria,15.2%)、拟杆菌门(Bacteroidetes,12.4%)、硝化螺菌门(Nitrospirae,6.6%)、酸杆菌门(Acidobacteria,

6.6%),5 个门的平均相对丰度高于 5%. 这几大类微生物是水生环境中的常见微生物,变形菌门是一类对氮素循环有重要作用的微生物^[24],其中存在具有氨氧化能力的细菌,可以在好氧条件下将 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ ^[25]. 杆菌门是一类在淡水环境中大量存在的异养浮游细菌,能够降解和代谢有机物^[26~28],硝化螺菌门使得 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 转换得以

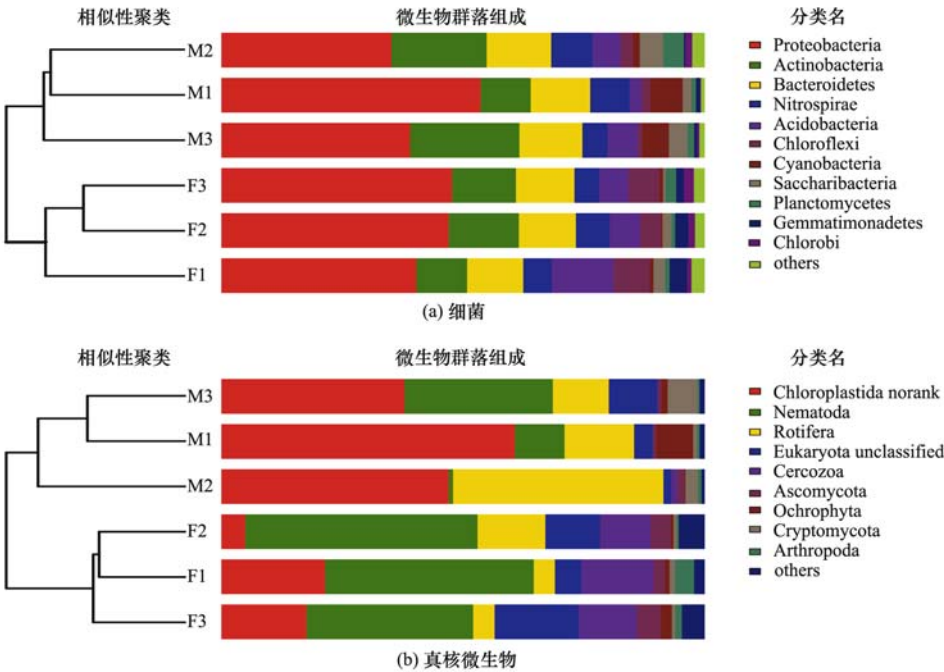


图 3 细菌、真核微生物群落系统发育分类分析-门水平

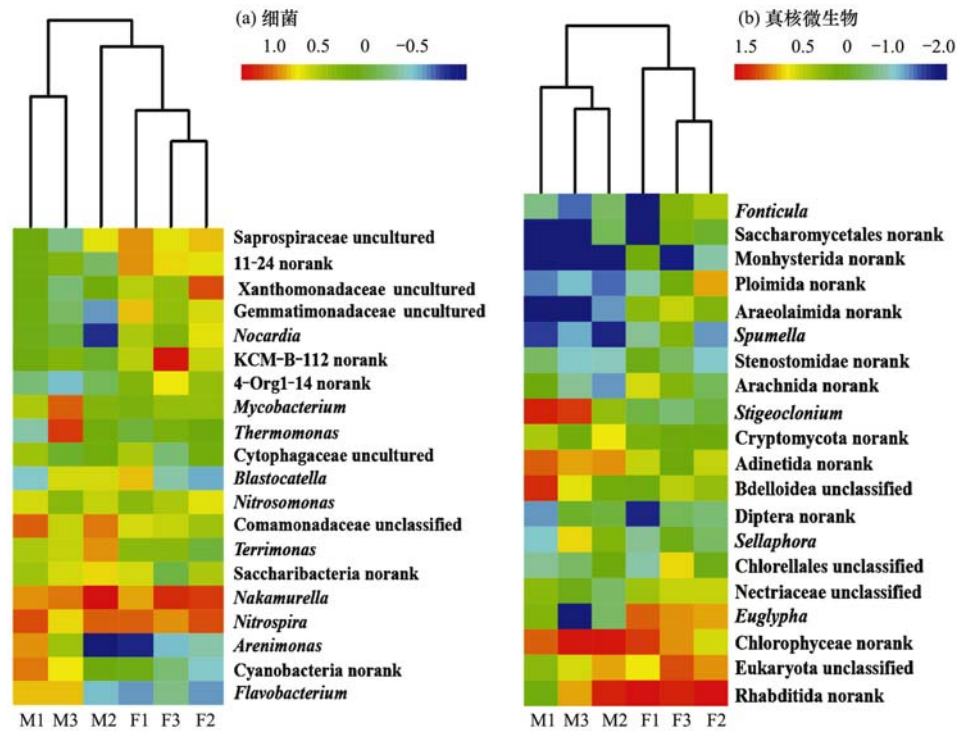
Fig. 3 Phylogenetic classification of bacterial communities and microeukaryote communities

进行^[29]. 变形菌门和硝化螺菌门在硝化过程中承担着重要作用,确保 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 向 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 转化. 在真核微生物落系统中[图 3(b)],总体上看绿藻门(Chloroplastida, 31.62%)、线虫门(Nematoda, 27.93%)、轮形动物门(Rotifera, 15.4%)、丝足虫门(Cerczoa, 6.54%),这 4 个门在 6 种反应器中均有分布,但真核微生物群落系统丰度均有不同差异. 挂帘式生物滴滤池中丝足虫门(Cerczoa)含量明显高于 MBBR,而 MBBR 中绿藻门(Chloroplastida)更占优势. 吕福荣等发现属于绿藻门的小球藻对氮、磷有良好的吸附与利用能力^[30,31]. 刘宏远等发现当生物滤池中出现轮虫和线虫时,标志着生物相已达到完全成熟,生物滤池运行状况良好. 线虫和轮虫都属于无脊椎动物,能够摄食多余和老化的生物膜及有机颗粒物质,延长填料的过滤周期,有着积极作用^[32]. 线虫门是优势类群,常生活在污泥和生物膜上,它们以细菌、藻类、轮虫和其他线虫喂食. 轮形动物门中轮虫通常具有较长的趾,可以靠趾固着介质表面,以吸食表面的细菌和有机碎屑为生^[33].

在细菌属水平相对丰度上[图 4(a)],放线菌中的 *Nakamurella* 属(15.43%)和硝化螺菌属(*Nitrospira*, 12.27%)在 6 个反应器中相对含量均较高,放线菌属的 *Nakamurella multipartita* 菌株是一种

自活性污泥中分离,可以生产多糖,有利于生物膜形成的一类微生物,该类微生物的大量生长有利于微生物在填料上的附着并形成生物膜^[34]. 硝化螺菌属能够将亚硝氮氧化成硝态氮,广泛存在于淡水水生环境中,在水环境硝化过程中起着重要作用^[24]. 亚硝化单胞菌属(*Nitrosomonas*)是能够将氨氮氧化成亚硝态氮的自养亚硝化细菌^[35]. 值得注意的是,在 MBBR 反应器中,3 种填料反应器的硝化螺菌属平均相对丰度为 12.0%,M1 形成的生物膜不但硝化螺菌属含量高,而且亚硝化单胞菌属相对含量(5.3%)也明显高于其他两种载体 M2(2.6%)和 M3(5.0%). 而在挂帘式滴滤池中,硝化螺菌属平均丰度为 12.6%,F1 和 F2 的硝化螺菌属相对丰度高于 F3,但自养的亚硝化单胞菌相对丰度是 F2 最高. 虽然两类型反应器的生物膜中两类自养硝化细菌(硝化螺菌属和亚硝化单胞菌属)的平均相对丰度相差不大,但由于两者的生物膜量差异(表 3),使得挂帘式生物滴滤池的铵态氮向亚硝氮转化,及亚硝氮向硝态氮转化的速率要高于 MBBR 反应器.

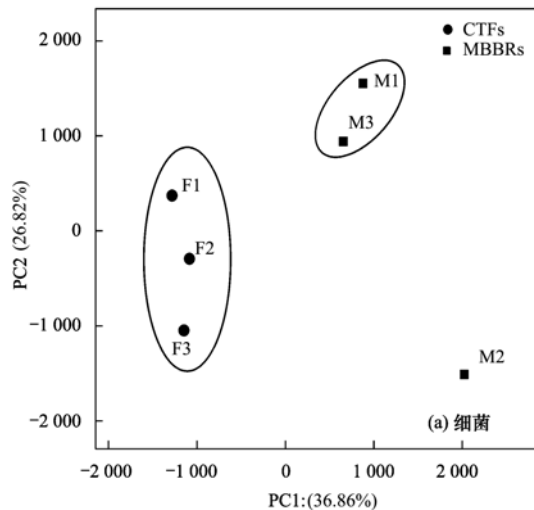
在真核微生物属水平相对丰度上[图 4(b)],可以看出,在挂帘式生物滴滤池(编号 F1 ~ F3)中线虫纲小杆目中的 *Rhabditida* norank (39.49%) 占明



采用排名前 20 的属的相对丰度取以 10 为底的对数作为绘图数据

图 4 细菌、真核微生物群落系统属水平物种相对丰度热图
Fig. 4 Heatmap analysis of bacterial and microeukaryote community

显优势,而 MBBR (编号 M1 ~ M3) 中绿藻纲中的 Chlorophyceae norank (29.66%) 占明显优势. 绿藻纲中的 Chlorophyceae norank (11.81%)、磷壳虫属 (*Euglypha*, 12.03%) 这 2 类菌在挂帘式生物滴滤池中相对丰度较高,而在 MBBR 中,线虫纲小杆目中的 Rhabditida norank (13.93%)、毛枝藻属 (*Stigeoclonium*, 18.47%)、轮虫纲中 Adinetida norank (12.32%)、蛭态目中 Bdelloidea unclassified (10.77%),这四类真核微生物的相对丰度较高,可以看出两种反应器中真核微生物构成有差异.



另一方面,主成分分析也表明两类反应器上生物膜组成有明显区别,如果其组成越相似,反映在 PCA 图中的距离越近. 细菌群落系统而言[图 5 (a)],挂帘式生物滴滤池中细菌群落相似性高,而 MBBR 中不同形状填料上附着的细菌群落间也有区别(如 M1、M3 和 M2 间的差别),两个主成分因子的贡献率分别为 36.86% 和 26.82%. 真核微生物群落系统而言[图 5 (b)],挂帘式生物滴滤池中真核微生物的相似性要高于 MBBR,两个主成分因子的贡献率分别为 70.98% 和 19.8%.

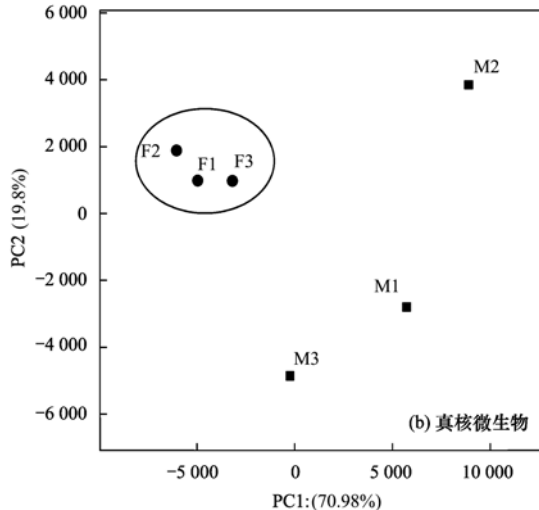


图 5 生物膜微生物群落的主成份分

Fig. 5 Principal component analyses of bacterial and microeukaryote community structure in biofilms

3 结论

(1)挂帘式生物滴滤池与 MBBR 相比具有更好的挂膜效果,挂膜速度快、挂膜生物量多且稳定;碳纤维挂帘式生物滴滤池铵态氮转化速率高,短时间内对 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 有更好的处理效果,并且 $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 积累程度低.

(2)通过生物膜上细菌群落结构解析表明,在不同类型反应器内形成的生物膜上细菌群落结构有明显差别,且同一类型反应器不同填料上的细菌群落结构也有所不同. 两种生物过滤系统中两类主要自养硝化细菌(硝化螺菌属和亚硝化单胞菌属)的平均相对丰度相差不大,但同种生物过滤系统中两种硝化细菌相对丰度高的填料,对应的铵态氮转化效率也较高. 与 MBBR 相比,挂帘式生物滴滤池内生物膜的细菌群落具有更好的稳定性.

(3)通过生物膜上真核微生物群落结构解析表明,在不同类型反应器内形成的生物膜上真核微生物群落结构有明显差别,虽然两种生物过滤系统菌

群相类似但是存在丰度上的差异,挂帘式生物滴滤池中丝足虫门含量明显高于 MBBR,而 MBBR 中绿藻更占优势.

参考文献:

- [1] 李道亮,王剑秦,段青玲,等. 集约化水产养殖数字化系统研究[J]. 中国科技成果, 2008, (2): 8-11.
Li D L, Wang J Q, Duan Q L, et al. Research on digital systems of intensive aquaculture [J]. China Science and Technology Achievements, 2008, (2): 8-11.
- [2] 沈加正,史明明,阮贇杰,等. 变速流操控对调节循环水养殖系统水质效果的研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 309-314.
Shen J Z, Shi M M, Ruan Y J, et al. Effects of variable flow rates on water qualities in recirculating aquaculture system [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 309-314.
- [3] 朱建新,刘慧,徐勇,等. 循环水养殖系统生物滤器负荷挂膜技术[J]. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 118-124.
Zhu J X, Liu H, Xu Y, et al. Dual-Culture techniques for the rapid start-up of recirculating aquaculture system [J]. Progress in Fishery Sciences, 2014, 35(4): 118-124.
- [4] 王威,曲克明,朱建新,等. 3 种滤料生物滤器的挂膜与黑鲷幼鱼循环水养殖效果[J]. 中国水产科学, 2012, 19(5): 833-840.

- Wang W, Qu K M, Zhu J X, *et al.* Biofilm cultivation with three stuffings and their effect on the growth of young black sea bream, *Sparus macrocephalus* [J]. Journal of Fishery Sciences of China, 2012, **19**(5): 833-840.
- [5] 周子明, 李华, 刘青松, 等. 工厂化循环水养殖系统中生物填料的研究现状[J]. 水处理技术, 2015, (12): 33-37.
- Zhou Z M, Li H, Liu Q S, *et al.* Current situation of the research on biological media in recirculating aquaculture system [J]. Technology of Water Treatment, 2015, (12): 33-37.
- [6] Åsgård T, Shearer K D. Dietary phosphorus requirement of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar* L. [J]. Aquaculture Nutrition, 1997, **3**(1): 17-23.
- [7] 丁爱中, 陈繁忠, 雷剑泉, 等. 光合细菌调控水产养殖业水质的研究[J]. 农业环境保护, 2000, **19**(6): 339-341, 344.
- Ding A Z, Chen F Z, Lei J Q, *et al.* Water quality for aquiculture improved by photosynthetic bacteria [J]. Agro-environmental Protection, 2000, **19**(6): 339-341, 344.
- [8] Dong B, Tan J, Yang Y, *et al.* Linking nitrification characteristic and microbial community structures in integrated fixed film activated sludge reactor by high-throughput sequencing [J]. Water Science and Technology, 2016, **74**(6): 1354-1364.
- [9] Leyva-Díaz J C, González-Martínez A, Muñoz M M, *et al.* Two-step nitrification in a pure moving bed biofilm reactor-membrane bioreactor for wastewater treatment: nitrifying and denitrifying microbial populations and kinetic modeling [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2015, **99**(23): 10333-10343.
- [10] 于莉芳, 杜倩倩, 傅学焘, 等. 城市污水中硝化菌群落结构与性能分析[J]. 环境科学, 2016, **37**(11): 4366-4371.
- Yu L F, Du Q Q, Fu X T, *et al.* Community structure and activity analysis of the nitrifiers in raw sewage of wastewater treatment plants [J]. Environmental Science, 2016, **37**(11): 4366-4371.
- [11] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002. 266-281.
- [12] Qiu T L, Liu L L, Gao M, *et al.* Effects of solid-phase denitrification on the nitrate removal and bacterial community structure in recirculating aquaculture system [J]. Biodegradation, 2016, **27**(2-3): 165-178.
- [13] Bråte J, Logares R, Berney C, *et al.* Freshwater Perkinsea and marine - freshwater colonizations revealed by pyrosequencing and phylogeny of environmental rDNA [J]. ISME Journal, 2010, **4**(9): 1144-1153.
- [14] Luo W, Li H R, Gao S Q, *et al.* Molecular diversity of microbial eukaryotes in sea water from Fildes Peninsula, King George Island, Antarctica [J]. Polar Biology, 2016, **39**(4): 605-616.
- [15] Wang L, Cheung M K, Kwan H S, *et al.* Microbial diversity in shallow-water hydrothermal sediments of Kueishan Island, Taiwan as revealed by pyrosequencing [J]. Journal of Basic Microbiology, 2015, **55**(11): 1308-1318.
- [16] Amato K R, Yeoman C J, Kent A, *et al.* Habitat degradation impacts black howler monkey (*Alouatta pigra*) gastrointestinal microbiomes [J]. The ISME Journal, 2013, **7**(7): 1344-1353.
- [17] Zhang S F, Wang Y Y, He W T, *et al.* Linking nitrifying biofilm characteristics and nitrification performance in moving-bed biofilm reactors for polluted raw water pretreatment [J]. Bioresource Technology, 2013, **146**: 416-425.
- [18] 刘雨, 赵庆良, 郑兴灿. 生物膜法污水处理技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000. 38-40.
- [19] 邱立平, 马军, 张立昕. 水力停留时间对曝气生物滤池处理效能及运行特性的影响[J]. 环境污染与防治, 2004, **26**(6): 433-436.
- Qiu L P, Ma J, Zhang L X. Effect of hydraulic retention time on the treatment efficiency and operational characteristics of biological aerated filter [J]. Environmental Pollution & Control, 2004, **26**(6): 433-436.
- [20] 裘钱玲琳, 徐如卫, 朱建林, 等. 凡纳滨对虾土塘养殖与循环养殖系统细菌群落结构比较研究[J]. 生物学杂志, 2015, **32**(6): 45-49.
- Qiu Q L L, Xu R W, Zhu J L, *et al.* Comparison of bacterial communities in the earthen pond and the recirculating aquaculture system for *Litopenaeus vannamei* cultivation [J]. Journal of Biology, 2015, **32**(6): 45-49.
- [21] 黄志涛, 宋协法, 李勋, 等. 基于高通量测序的石斑鱼循环水养殖生物滤池微生物群落分析[J]. 农业工程学报, 2016, **32**(S1): 242-247.
- Huang Z T, Song X F, Li X, *et al.* Analysis of microbial diversity of submerged biofilters in recirculating aquaculture system (RAS) for grouper (*Epinehelus moara*) based on high-throughput DNA sequencing [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, **32**(S1): 242-247.
- [22] Attramadal K J K, Truong T M H, Bakke I, *et al.* RAS and microbial maturation as tools for K-selection of microbial communities improve survival in cod larvae [J]. Aquaculture, 2014, **432**: 483-490.
- [23] Loreau M, Naeem S, Inchausti P, *et al.* Biodiversity and ecosystem functioning: current knowledge and future challenges [J]. Science, 2001, **294**(5543): 804-808.
- [24] Rurangwa E, Verdegem M C J. Microorganisms in recirculating aquaculture systems and their management [J]. Reviews in Aquaculture, 2015, **7**(2): 117-130.
- [25] 宋爱红. 强化脱氮人工湿地处理分散养猪冲洗水特性研究[D]. 西安: 长安大学, 2015.
- [26] Kirchman D L. The ecology of *Cytophaga-Flavobacteria* in aquatic environments [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2002, **39**(2): 91-100.
- [27] Itoi S, Niki A, Sugita H. Changes in microbial communities associated with the conditioning of filter material in recirculating aquaculture systems of the pufferfish *Takifugu rubripes* [J]. Aquaculture, 2006, **256**(1-4): 287-295.
- [28] van Kessel M A, Dutilh B E, Neveling K, *et al.* Pyrosequencing of 16S rRNA gene amplicons to study the microbiota in the gastrointestinal tract of carp (*Cyprinus carpio*, L.) [J]. AMB Express, 2011, **1**: 41.
- [29] Hovanec T A, Taylor L T, Blakis A, *et al.* *Nitrospira*-Like bacteria associated with nitrite oxidation in freshwater aquaria [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1998, **64**(1): 258-264.
- [30] 吕福荣, 杨海波, 李英敏, 等. 自养条件下小球藻净化氮、磷能力的研究[J]. 生物技术, 2003, **13**(6): 46-47.
- Lv F R, Yang H B, Li Y M, *et al.* Study on the N, P purification ability of chlorella under autotrophic condition [J]. Biotechnology, 2003, **13**(6): 46-47.

- [31] 孙诗琦, 肖文帅, 王亮, 等. 藻类对重金属废水的处理进展 [J]. 广东化工, 2014, **41**(15): 201-202, 196.
Sun S Q, Xiao W S, Wang L, *et al.* Progress in treatment of heavy metal wastewater by algae [J]. Guangdong Chemical Industry, 2014, **41**(15): 201-202, 196.
- [32] 李小伟. 生物活性炭滤池无脊椎动物群落分析及控制技术 [D]. 广州: 暨南大学, 2008. 10-11.
- [33] 王家楫. 中国淡水轮虫志 [M]. 北京: 科学出版社, 1961.
- [34] Tice H, Mayilraj S, Sims D, *et al.* Complete genome sequence of *Nakamurella multipartita* type strain (Y-104^T) [J]. Standards in Genomic Sciences, 2010, **2**: 2.
- [35] Schreier H J, Mirzoyan N, Saito K. Microbial diversity of biological filters in recirculating aquaculture systems [J]. Current Opinion in Biotechnology, 2010, **21**(3): 318-325.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.

2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.

3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.

4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.

5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.

6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.

7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.

8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用 (1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.

9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.

10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:

期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.

图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.

会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.

学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.

报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.

专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.

11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.

12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjks@rcees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Comparison of Models on Spatial Variation of PM _{2.5} Concentration; A Case of Beijing-Tianjin-Hebei Region	WU Jian-sheng, WANG Xi, LI Jia-cheng, <i>et al.</i> (2191)
Change of Atmospheric Pollution Diffusion Conditions in Beijing in Recent 35 Years	GUO Chun-wei, SUN Zhao-bin, LI Zi-ming, <i>et al.</i> (2202)
Precipitation and Its Effects on Atmospheric Pollutants in a Representative Region of Beijing in Summer	HAN Li-hui, ZHANG Hai-liang, XIANG Xin, <i>et al.</i> (2211)
Impact of Mountain-Valley Wind Circulation on Typical Cases of Air Pollution in Beijing	DONG Qun, ZHAO Pu-sheng, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2218)
Fugitive Dust Emission Characteristics from Building Construction Sites of Beijing	XUE Yi-feng, ZHOU Zhen, HUANG Yu-hu, <i>et al.</i> (2231)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Emitted from Biomass-pellets-fired Boilers	WU Chang-da, ZHANG Chun-lin, BAI Li, <i>et al.</i> (2238)
Effect of VOCs on O ₃ and SOA Formation Potential During the Combined Pollution Process in Guangzhou Panyu Atmospheric Composition Station	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (2246)
Characteristic Study on the "Weekend Effect" of Atmospheric O ₃ in Northern Suburb of Nanjing	WANG Jun-xiu, AN Jun-lin, SHAO Ping, <i>et al.</i> (2256)
Atmospheric Ammonia/Ammonium-nitrogen Concentrations and Wet and Dry Deposition Rates in a Double Rice Region in Subtropical China	WANG Jie-fei, ZHU Xiao, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (2264)
Species of Iron in Size-resolved Particle Emitted from Xuanwei Coal Combustion and Their Oxidative Potential	WANG Qiang-xiang, TAN Zheng-ying, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2273)
Dioxin Pollution and Occupational Inhalation Exposure of PCDD/Fs in Municipal Solid Waste Incinerator	DU Guo-yong, WANG Qian, ZHANG Shu-lin, <i>et al.</i> (2280)
Characteristics of Mercury Emissions from Modern Dry Processing Cement Plants in Chongqing	ZHANG Cheng, ZHANG Ya-hui, WANG Yong-min, <i>et al.</i> (2287)
Correlations of Light-duty Gasoline Vehicle Emissions Based on VMAS and CVS Measurement Systems	WANG Hong-yu, HUANG Cheng, HU Qing-yao, <i>et al.</i> (2294)
Emission Characteristics of Particulate Matter from Diesel Buses Meeting Different China Emission Standards Fueled with Biodiesel	LOU Di-ming, ZHAO Cheng-zhi, XU Ning, <i>et al.</i> (2301)
Spatial Variation and Environmental Significance of δ ¹⁸ O and δD Isotope Composition in Xijiang River	XU Qi, LI Jian-hong, SUN Ping-an, <i>et al.</i> (2308)
Comparative Study of SWAT and DNDC Applied to N Leach and Export from Subtropical Watershed	HAN Ning, CHEN Wei-liang, GAO Yang, <i>et al.</i> (2317)
Comparison of Relationship Between Conduction and Algal Bloom in Pengxi River and Modao River in Three Gorges Reservoir	JIANG Wei, ZHOU Chuan, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (2326)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in Sediment Pore Water and Overlying Water of Dianchi Caohai Lake	WANG Yi-ru, WANG Sheng-ru, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (2336)
Distribution and Emission Flux Estimation of Phosphorus in the Sediment and Interstitial Water of Xiangxi River	LUO Yu-hong, NIE Xiao-qian, LI Xiao-ling, <i>et al.</i> (2345)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Water and Sediment from Daye Lake	ZHANG Jia-quan, TIAN Qian, XU Da-mao, <i>et al.</i> (2355)
Formation of Brominated Disinfection By-products in Low Temperature Multi-effect Distillation (LT-MED) Process for Seawater Desalination	QI Fei, SUN Ying-xue, YANG Zhe, <i>et al.</i> (2364)
Applicability Comparison and Application Study of Two Methods for Determination of the Copper Complexing Capacity of Waters	WANG Chen-ye, JIANG Kuo, XIE Wen-long, <i>et al.</i> (2373)
Performance of Applying Scale Permeable Pavements for Control of Runoff Pollution in an Area with High Groundwater Level	JIN Jian-rong, LI Tian, SHI Zhen-bao (2379)
Removal of 2,4-dichlorophenol in Underground Water by Stabilized Nano Zero-valent Iron	ZHANG Yong-xiang, CHANG Shan, LI Fei, <i>et al.</i> (2385)
Enhancement of Sulfamerazine Degradation Under H ₂ O ₂ /KI System by Ultrasound and UVA Irradiation	WEI Hong, SUN Bo-cheng, YANG Xiao-yu, <i>et al.</i> (2393)
Comparison of Phosphate Adsorption onto Zirconium-Modified Bentonites with Different Zirconium Loading Levels	JINAG Bo-hui, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2400)
Removal of Nitrogen in Municipal Secondary Effluent by a Vertical Flow Constructed Wetland Associated with Iron-carbon Internal Electrolysis	ZHENG Xiao-ying, ZHU Xing, ZHOU Xiang, <i>et al.</i> (2412)
Purification Efficiency and Influencing Factors of Combined Bio-filters for Aquaculture Wastewater	ZHANG Shi-yang, ZHANG Sheng-hua, ZHANG Xiang-ling, <i>et al.</i> (2419)
Effect of Temperature on PAO Activity and Substrate Competition	ZHANG Ling, PENG Dang-cong, CHANG Die (2429)
Enrichment and Nitrogen Removal Characteristics of Marine Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	FENG Li, YU De-shuang, LI Jin, <i>et al.</i> (2435)
Ammonia Removal Rate and Microbial Community Structures in Different Biofilters for Treating Aquaculture Wastewater	ZHOU Hong-yu, HAN Mei-lin, QIU Tian-lei, <i>et al.</i> (2444)
Influence of Phosphate on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	ZHOU Zheng, LIU Kai, WANG Fan, <i>et al.</i> (2453)
Characteristics and Mechanism of Biological Nitrogen and Phosphorus Removal Granular Sludge Under Carbon Source Stress	QIN Shi-you, CHEN Wei, MA Zhao-nui, <i>et al.</i> (2461)
Evolution of Extracellular Polymeric Substances of the Activated Sludge with Calcium Ion Addition During Set-up Period of Sequencing Batch Reactors	REN Li-fei, YANG Xin-ping, ZHANG Wen-wen (2470)
Isolation, Identification and Characterization of the Filamentous Microorganisms from Bulking Sludge	ZHANG Chong-miao, NIU Quan-rui, XU Li-mei, <i>et al.</i> (2477)
Applicability and Microbial Community Structure of Denitrification Suspended Carriers	TAN Yang, LI Ji, XU Qiao, <i>et al.</i> (2486)
Effect of Thiosulfate on the Carbon Fixation Capability of <i>Thiobacillus thioparus</i> and Its Mechanism	LI Huan, WANG Lei, WANG Ya-nan (2496)
Characteristics of Fungi Community Structure and Genetic Diversity of Forests in Guandi Mountains	QIAO Sha-sha, ZHOU Yong-na, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (2502)
Source Apportionment of Soil Heavy Metals in City Residential Areas Based on the Receptor Model and Geostatistics	CHEN Xiu-duan, LU Xin-wei (2513)
Environmental Health Risk Assessment of Contaminated Soil Based on Monte Carlo Method; A Case of PAHs	TONG Rui-peng, YANG Xiao-yi (2522)
Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil	ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, <i>et al.</i> (2530)
Correlations Between Different Extractable Cadmium Levels in Typical Soils and Cadmium Accumulation in Rice	CHEN Qi, DENG Xiao, CHEN Shan, <i>et al.</i> (2538)
Remedying Effects of a Combined Amendment for Paddy Soil Polluted with Cd for Spring and Autumn Rice	CHEN Li-wei, YANG Wen-tao, GU Jiao-feng, <i>et al.</i> (2546)
Effects of Two Amendments on Remedying Garden Soil Complexly Contaminated with Pb, Cd and As	TIAN Tao, LEI Ming, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (2553)
Sorption of Phenanthrene to Soybean and Wheat Roots and the Bioavailability of Sorbed Phenanthrene	WANG Hong-ju, LI Qian-qian, SHEN Yu, <i>et al.</i> (2561)
Effects of Dissolved Organic Matter Fractions Extracted from Humus Soil on Sorption of Benzotriazole in Brown Soil and Black Soil	YANG Ning-wei, BI Er-ping (2568)
Effects of Topography, Tree Species and Soil Properties on Soil Enzyme Activity in Karst Regions	LUO Pan, CHEN Hao, XIAO Kong-cai, <i>et al.</i> (2577)
Effects of Long-term Organic Amendments on Soil N ₂ O Emissions from Winter Wheat-maize Cropping Systems in the Guanzhong Plain	HAO Yao-xu, LIU Ji-xuan, YUAN Meng-xuan, <i>et al.</i> (2586)
Exposure Route of Dioxin-like Polychlorinated Biphenyls in Hair Based on Passive Sampling	YUAN Hao-dong, BAI Yao, LI Qiu-xu, <i>et al.</i> (2594)
Accumulation Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Wild Fish Species from Diaojiang River, Guangxi	WANG Jun-neng, MA Peng-cheng, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (2600)
Effect of Activated Carbon Addition on the Anaerobic Fermentation of Corn Straw in Mesophilic and Thermophilic Conditions	GAN Rong, GE Ming-min, LIU Yong-di, <i>et al.</i> (2607)
Volatile Organic Compounds (VOCs) Source Profiles of Industrial Processing and Solvent Use Emissions; A Review	WANG Hong-li, YANG Zhao-xun, JING Sheng-ao (2617)