

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.21.013

砾间接触氧化处理河水中试及微生物菌属特性

张晓雅^{1,2}, 陈俊², 董阳², 杨涛², 董良飞¹

(1. 常州大学 环境与安全工程学院, 江苏 常州 213164; 2. 常州市排水管理处, 江苏 常州 213017)

摘要: 针对某河流的水质净化问题,自制砾间接触氧化反应器(GCOR)并对其启动及运行影响因素进行研究。试验结果表明,通过逐步提高水力负荷,反应器约需30 d可完成自然挂膜启动;在稳定运行阶段,研究了HRT、曝气条件和分段进水方式对反应器运行的影响,当HRT为5 h,接触氧化区1曝气,配水区1、3按6:4的比例分段进水时装置运行效果最佳。菌群高通量测序结果表明,系统内填料表面生物膜微生态环境复杂,微生物多样性较高,系统前端生物膜中细菌多样性及优势菌的富集情况优于后端生物膜;不同区域生物膜上富集不同功能的微生物菌群,从而实现有机物的高效降解及脱氮除磷。

关键词: 砾间接触氧化反应器; 河水净化; 菌属特性; 启动与挂膜; 分段进水

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)21-0093-08

A Pilot-scale Test of Gravel Contact Oxidation for River Water Treatment and Characteristics of Bacterial Genera

ZHANG Xiao-ya^{1,2}, CHEN Jun², DONG Yang², YANG Tao², DONG Liang-fei¹

(1. School of Environmental & Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China; 2. Changzhou Drainage Management Office, Changzhou 213017, China)

Abstract: A gravel contact oxidation reactor (GCOR) was made to purify the water from a river, and the influencing factors of its start-up and operation were investigated. The reactor successfully realized biofilm culturing within approximately 30 days by gradually increasing the hydraulic load. In the stable operational stage, the effects of hydraulic retention time (HRT), aeration conditions and step feed mode on the operation of the reactor were investigated. The operation of the reactor was the best when HRT was 5 h, aeration was provided in contact oxidation zone 1, and the distribution ratio of water distribution zones 1 and 3 was 6 to 4. The high-throughput sequencing results showed that the biofilm on the packing media surface of the system had complex microecological environment and high microbial diversity. The diversity of bacteria and the enrichment of dominant bacteria in the front of the biofilm system were better than those in the back end. Different functional microbial communities were enriched on biofilm in different areas, so as to achieve efficient organic matter degradation and nitrogen and phosphorus removal.

基金项目: 常州市科技支撑计划(社会发展)项目(CE20175045); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJCX19-0634)

通信作者: 董良飞 E-mail: dlfc@cczu.edu.cn

Key words: gravel contact oxidation reactor (GCOR); river water purification; bacterial genera characteristics; start-up and biofilm culturing; step feed

砾间接触氧化法是一种生态工法技术,通过人工填充砾石,使污水与生物膜的接触面积增大数十甚至上百倍^[1]。水中污染物在砾间流动过程中与砾石上附着的生物膜接触,进而被微生物作为营养物质吸收利用^[2]。日本80%的河流直接净化项目采用砾间接触氧化技术,其对BOD₅和NH₄⁺-N的去除率为50%~60%,SS去除率为75%~85%。国内这一技术应用起步较晚,但近年来相关研究也越来越多。由于砾间接触氧化技术对处理低污染水具有显著效果,该技术主要应用于河水净化、雨水收集处理及与常规污水处理工艺结合进行尾水深度处理等。Lin等^[3]利用水平流砾间曝气接触氧化床与人工湿地结合处理某流域水体,去除了69%的SS,86%的BOD和58%的TN;刘楠楠等^[4]设计的砾间接触氧化与高效旋流分离集成式雨水处理装置,对各项指标的去除率均在70%以上;姚澄宇等^[5]比较了两种工艺对污水厂尾水的深度处理效果,发现砾间接触氧化+表面流人工湿地工艺的出水效果及稳定性优于水平潜流湿地+表面流人工湿地组合。

李涛等^[6]介绍了国内外典型的砾间接触氧化案例,发现砾间接触氧化法基本采用水平流态。水平流对砾石的尺寸及孔隙率要求严格,易发生堵塞壅水等问题,这是由于砾石床上下层阻力不均,水体在流动过程中出现上层流速快、下层流速慢的现象,存在下层砾石利用率不高的弊端。为缓解这一弊端一般需要在建造时设计相应坡度^[7],这样就限制了实施场地。针对这一问题,试验设计了垂直流态多级串联的砾间接触氧化反应器(GCOR),水流自上而下穿过砾石层可提高砾石填料的利用率。通过现场搭建试验装置,开展GCOR启动及稳定运行影响因素中试研究,旨在为河道水环境修复提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验水质

处理原水取自当地三宝滨河流,试验开展期间(2019年2月—2020年2月),河流水质情况如下:COD为8~52 mg/L,均值为18 mg/L;NH₄⁺-N为0.75~2.83 mg/L,均值为1.79 mg/L;TP为0.17~0.32 mg/L,

均值为0.23 mg/L;TN为2.95~4.58 mg/L,均值为3.76 mg/L;浊度为3~20 NTU,均值为12 NTU;温度为15~35℃,均值为25℃。

1.2 中试装置

图1为GCOR中试装置工艺流程。

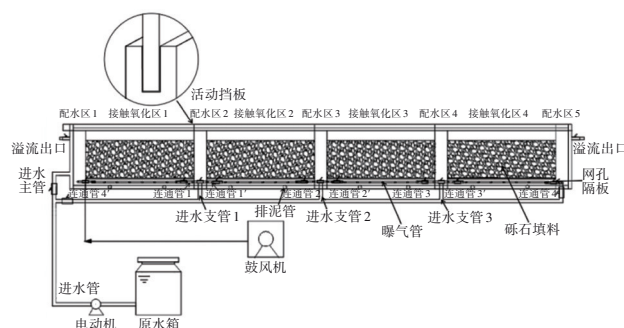


图1 中试装置工艺流程

Fig.1 Process flow of pilot device

装置主体部分材质为碳钢,尺寸为12.0 m×2.0 m×1.5 m,由5个配水区(每格长0.4 m)和4个接触氧化区(每格长2.5 m)依次连接组成。每个配水区均有进水口,可通过进水支管分段进水。接触氧化区内距底部0.2 m处设有网孔隔板,网孔隔板上填充砾石,下方均匀布设8根长度为1 m左右的曝气管,采用鼓风机供气。装置由配水区下端进水,进水积累到一定高度后从配水区和接触氧化区之间的隔板溢出,在接触氧化区内为下向流,由上而下穿过砾石填料。为使水流进入下一配水区,在接触氧化区侧边(网孔隔板以下)与下一配水区通过外部连通管相连,连通管装有阀门。根据连通管原理,中间配水区水位达到溢流高度,由于砾石阻力作用,其上一接触氧化区水位至少应为相应高度。为避免接触氧化区水流由隔板上方溢出,在接触氧化区与配水区之间的隔板顶部设置凹槽,插入活动挡板(高0.3 m)。接触氧化区底部设有排泥管,用于排出剩余污泥。装置主体结构对称,为提高砾石利用率,延长装置使用寿命,设计双向运行方式,两端均有溢流出口,可根据水流方向调整活动挡板位置。图1为正向运行(由左向右)方式,关闭前端溢流出口阀门,连通管(1、2、3、4)阀门开启。

砾石填料粒径是影响水力传导性的重要因素,

接触氧化区1、4填充砾石粒径为40~60 mm,接触氧化区2、3填充砾石粒径为20~40 mm。主要因为反应器两端都可作进水端,砾石粒径较大,不容易发生堵塞;而中间两个反应区砾石粒径较小,附着的生物膜较多,处理效率更高。综合考虑装置高度及过流能力,设计砾石填充高度为1 m,填充后装置有效容积为18 m³。

1.3 检测项目与方法

COD采用重铬酸钾法测定,TN采用碱式过硫酸钾消解紫外分光光度法测定,NH₄⁺-N采用纳氏试剂分光光度法测定,NO₃⁻-N采用紫外分光光度法测定,NO₂⁻-N采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定,TP采用钼酸铵分光光度法测定,浊度采用浊度计测定,pH采用pH计测定,温度和DO采用便携式溶氧仪测定,微生物菌群采用16S rDNA测序法测定。

2 结果与分析

2.1 启动与挂膜

启动期全程连续曝气,控制DO在2~4 mg/L以上,满足微生物生长对氧气的需求。前10 d由配水区1进水,HRT为12 h;第11天改变进水方式,控制配水区1、3进水,进水比为1:1,HRT降为10 h;第21天调整为前4个配水区均进水,进水比为1:1:1:1,HRT降为8 h,连续运行到第30天。

图2为挂膜阶段COD和NH₄⁺-N去除率的变化,随着时间的延长,去除率逐渐升高。挂膜前期主要依靠砾石填料层的机械截留和物理吸附作用去除COD,前10 d内COD平均去除率仅为21.5%,挂膜初期去除率甚至出现负增长现象,这可能是异养菌生物膜未大量形成,且砾石表面原有的附着污染物随出水流出,增加了出水的COD。随着时间的推移,填料上异养菌数量逐渐增加,COD去除率明显提升,挂膜第11~20天其平均去除率为37.3%,第21~30天为46.1%,生物膜成熟后COD去除率基本可维持在55.0%左右。降解水中NH₄⁺-N主要依靠微生物的硝化作用,由于硝化细菌世代周期长、比增长速率小且环境敏感性强,为保证挂膜顺利,需控制适宜的环境条件(温度:25℃左右,pH:7.5~8.5)。随着挂膜时间的延长,NH₄⁺-N去除率逐渐升高,3个阶段的平均去除率分别为60.3%、75.8%、85.3%。葛俊^[8]认为砾石填料对NH₄⁺-N具有一定的离子交换和吸附作用,而且反应器DO充足,原水

中的硝化细菌可将NH₄⁺-N转化为NO₂⁻-N和NO₃⁻-N。陈冬令等^[9]也表示少量的硝化细菌同样可以有效去除NH₄⁺-N。因此反应器在挂膜初期即对原水中NH₄⁺-N具有一定的去除效果,随着生物膜不断生长,硝化细菌逐渐成熟,NH₄⁺-N的去除率也逐渐升高。

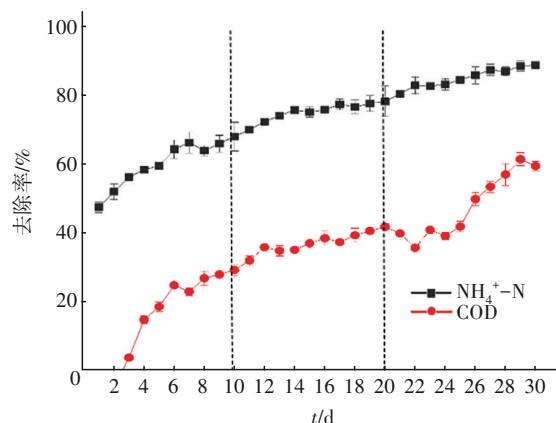


图2 挂膜阶段COD和NH₄⁺-N的去除效果

Fig.2 Removal effects of COD and NH₄⁺-N in biofilm culturing stage

在挂膜第30天,COD和NH₄⁺-N的去除率分别为59.5%和89.0%,砾石填料上附着黄褐色生物膜。一般来说,COD去除率达到50%^[10],NH₄⁺-N去除率稳定在60%以上,基本可认为挂膜成功^[5]。王曼^[11]研究认为挂膜成功的标志是生物膜有细菌、原生动物和后生动物,生物相丰富稳定。图3为生物膜镜检结果,发现生物膜菌落内部多为放线菌的菌丝体,并夹有许多匍匐类及附着类原生动物和少量微型后生动物,这标志着生物膜结构已经达到稳定状态,反应器启动与挂膜完成。

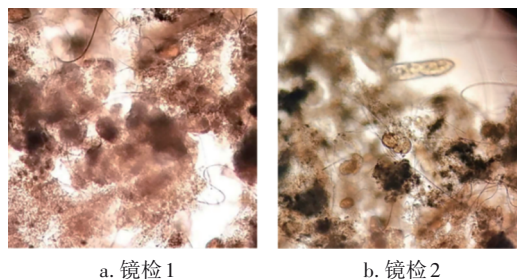


图3 生物膜镜检结果

Fig.3 Microscopic examination of biofilm

2.2 稳定运行影响因素

2.2.1 HRT对除污效果的影响

微生物降解水中污染物需要一定的反应时间,

一般来说,HRT越长,生物氧化分解反应越充分,但考虑到经济性,HRT过长,反应器处理效率降低,工程基建投资也相应增加。因此在保证生物处理达到一定效果的前提下,应尽量减少HRT。图4是HRT分别为7、5、4、3 h条件下的除污效果。

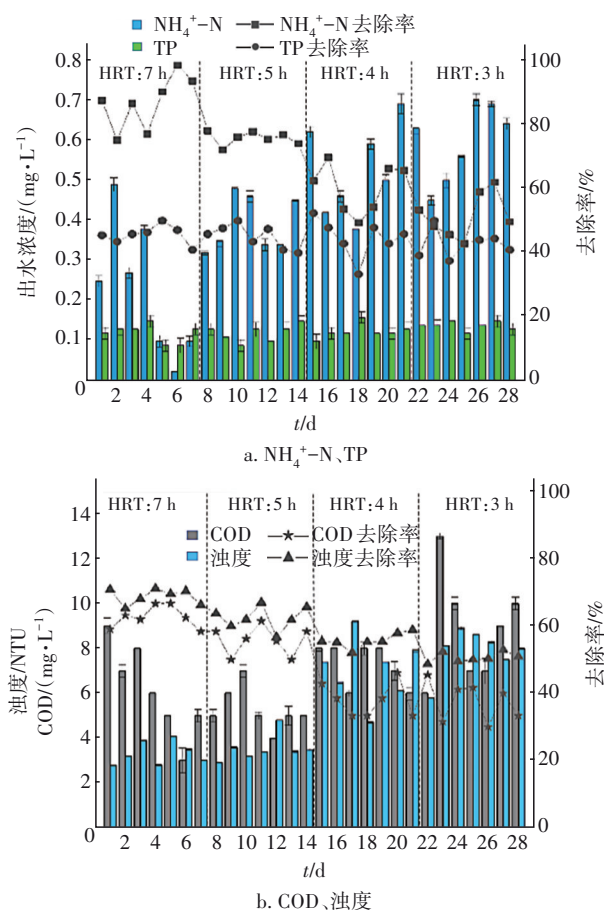


图4 不同HRT条件下污染物出水浓度及去除率

Fig.4 Pollutants effluent concentration and removal rate under different HRT conditions

随着HRT缩短,污染物去除率逐渐降低,这是因为HRT减小,有机负荷增加,水流剪切力增大致使滤料表面生物膜加速脱落,造成出水污染物浓度上升,这与Niu等^[12]的研究结果相吻合。当HRT由7 h缩短为3 h时,4种污染物中COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率变化最为明显,其中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率降低了35%左右,表明HRT对GCOR的硝化性能影响显著。由于HRT缩短致使有机负荷增加,异养菌获取营养物质大量繁殖,这样势必导致硝化细菌的活性空间减少。姜昕等^[13]也表示硝化细菌和异养菌存在竞争关系,当有机负荷较高时,异养菌的竞争能力更强。其次砾石表面较为光滑,水流剪切力过大会使生物

膜脱落更新速度加快,硝化细菌难以富集。因此,反应器运行过程中HRT不宜过短。由图4可知,当HRT为5 h时,出水污染物浓度可达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)Ⅲ类水质标准。

2.2.2 曝气条件对除污效果的影响

图5为不同曝气条件下污染物出水浓度及去除率。

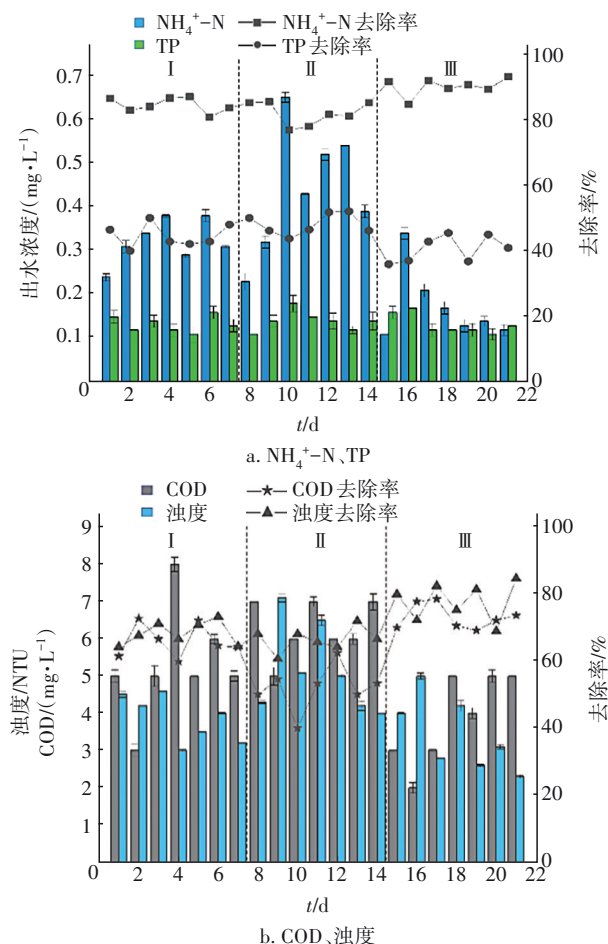


图5 不同曝气条件下污染物出水浓度及去除率

Fig.5 Pollutants effluent concentration and removal rate under different aeration conditions

研究表明,在接触氧化生物膜系统中增加曝气量可提高有机物和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除效果,但反硝化性能变差^[4],因此曝气条件对反应器除污效果影响较大。由于进水污染物浓度不高,砾间接触氧化系统培养的生物膜厚度较小,无法在同一载体上同时形成好氧和厌氧区域,硝化和反硝化条件矛盾。因此设计系统曝气方式为反应器前端曝气,后端停止曝气,使硝化与反硝化反应在不同区域内完成,提高系统的脱氮效果。试验设置了3种曝气条件,分别

为Ⅰ(仅接触氧化区1曝气)、Ⅱ(仅接触氧化区2曝气)、Ⅲ(接触氧化区1、2同时曝气),HRT为5 h。由图5可知,工况Ⅲ中4种污染物的去除效果较前两者好,说明增加曝气量可提高污染物的去除效果。但工况Ⅲ曝气区容积为前两者的两倍,相应的设施及运行成本也较高。

图6为3种工况条件下沿程氮素浓度分布。

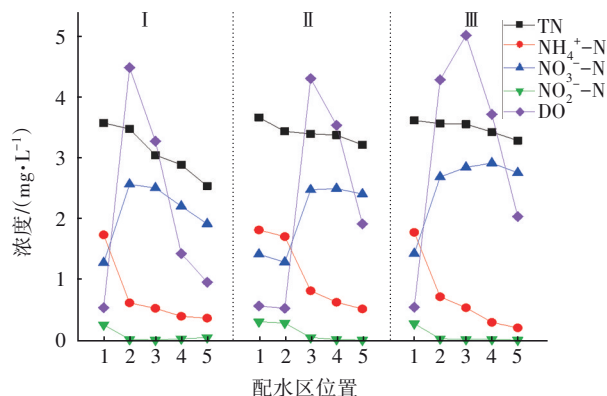


图6 不同曝气条件下沿程氮素浓度分布

Fig.6 Nitrogen concentration distribution along the way under different aeration conditions

工况Ⅰ, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 迅速下降, $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 呈先上升后下降的趋势,这是由于反应器前端曝气, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^+\text{-N}$ 都转化为 $\text{NO}_3^+\text{-N}$; $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 在反应器后半程有明显下降趋势,而在接触氧化区2内几乎没有变化,因为虽然接触氧化区2没有曝气,但池内DO在3.5 mg/L以上,反硝化细菌难以富集,而后半程DO较低,发生了反硝化反应,使 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 逐渐降低。工况Ⅱ,接触氧化区1没有曝气,由于进水DO较低,可能发生反硝化反应,但由图6可见 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 降低很少,说明反硝化反应效率不高。工况Ⅱ和工况Ⅲ在接触氧化区2都进行了曝气,后面非曝气区域较小,很难形成缺氧环境,由于反硝化反应不充分,两种工况下 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 上升后下降较少。其中工况Ⅲ的曝气区占总容积的1/2,曝气区末端携带进入非曝气区的DO较多,非曝气区很难形成缺氧环境,全段DO较高,这种条件虽然有利于进行硝化反应,但反硝化过程受到抑制。

2.2.3 进水方式对除污效果的影响

反应器前段曝气,好氧异养菌大量消耗原水中有机物,可能会导致后段反硝化反应提供电子的有机物不足。本装置设计的分段进水方式可补充反硝化阶段所需碳源。试验设计了4种进水方式:Ⅰ(配水区1、2进水,进水比例为7:3)、Ⅱ(配水区1、2

进水,进水比例为6:4)、Ⅲ(配水区1、3进水,进水比例为7:3)、Ⅳ(配水区1、3进水,进水比例为6:4)。图7为4种工况下污染物的出水浓度及去除率,可知分段进水位置距离装置前端越远,进水量越多,对污染物的去除率越低。分析原因,第二段进水流经装置距离缩短即HRT缩短,污染物被砾石上的微生物摄取后反应的时间缩短,因此出水污染物浓度稍高。但由于进水污染物浓度不高,并且砾间接氧化的反应效率较高,即使在工况Ⅳ条件下出水水质仍然较佳。

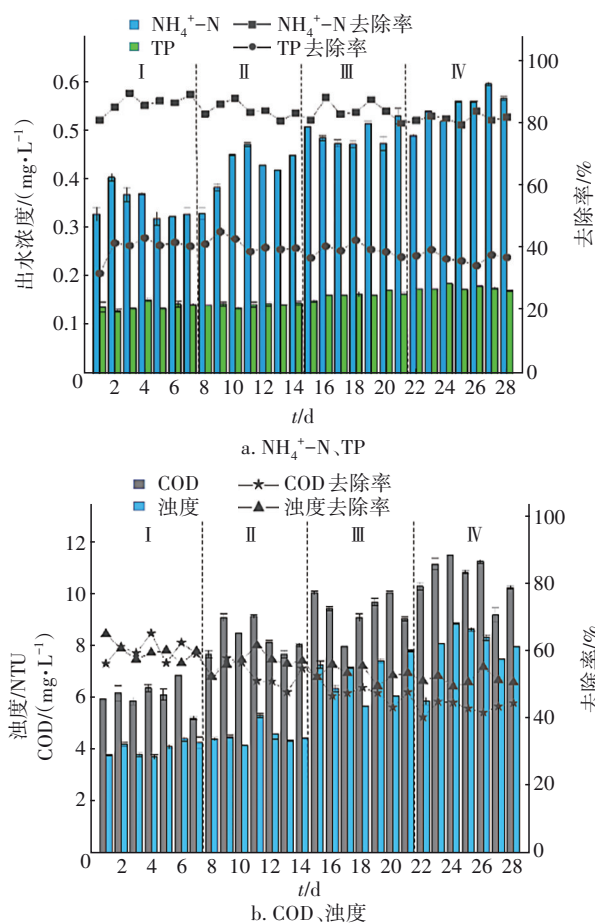


图7 不同进水条件下污染物出水浓度及去除率

Fig.7 Pollutants effluent concentration and removal rate under different influent conditions

图8为4种工况下沿程氮素浓度分布,前两种工况出水 $\text{NO}_3^+\text{-N}$ 浓度较高,说明反硝化反应不充分。因为前两种工况是曝气结束后立刻进行第二段进水,此时池内DO仍然较高。Keene等^[14]认为较高的DO会对反硝化过程产生抑制作用,因为氧会与硝酸盐竞争电子供体,同时分子态的氧也会抑制硝酸盐还原酶的合成及活性。因此这一阶段的反

硝化细菌不占优势,好氧异养菌利用氧气将进水中的有机物分解,导致后续缺氧段碳源不足。由于接触氧化区3距曝气区较远,池内DO经前段消耗后浓度降低,好氧异养菌不占优势,反硝化细菌逐渐富集,此时进行第二段进水可提高反硝化效率。由图8可知,后两种工况反硝化细菌将 NO_3^- -N还原为 N_2 的效率更高,出水TN浓度也较低。由于工况IV分段进水提供的碳源更多,反硝化反应更加充分。

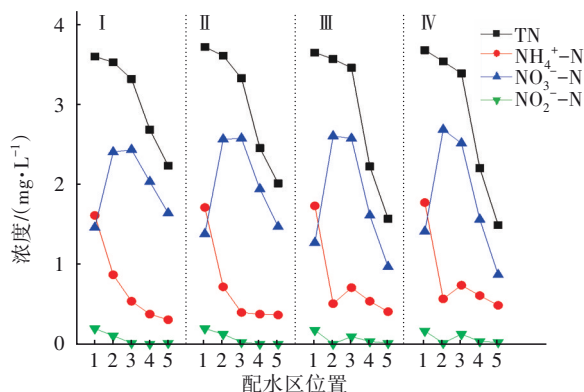


图8 不同进水条件下沿程氮素浓度分布

Fig.8 Nitrogen concentration distribution along the way under different influent conditions

2.3 生物菌群特性

物种多样性评价是将物种的数目及分配情况综合考虑的统计结果,它反映了生物群落和生态系统的特征^[15]。通过单样品的多样性分析(Alpha分析)可以反映微生物群落的丰度和多样性,利用统计学分析指数估计环境群落的物种丰度和多样性。基于OTU分类方法,采用ACE指数和Chao1指数反映微生物种类丰度,指数越高,表明物种丰度越高;Shannon指数和Simpson指数反映微生物多样性,Shannon指数越高且Simpson指数越低,表明物种多样性越高;Coverage指数反映样本覆盖率,指数越高表明此测序结果中被检测到的物种种类越全面。

分别对装置前端和后端砾石生物膜上的细菌进行多样性分析,试验结果见表1,可知装置前端生物膜细菌的ACE指数、Chao1指数和Shannon指数均高于后端,且Simpson指数较低。由此可知前端生物膜中细菌的多样性及优势菌的富集情况优于后端,主要因为装置前端为好氧环境,好氧菌群为主导;沿程装置内DO逐渐降低,氧气供应量变小,因此主导菌群由好氧菌转变为兼性厌氧菌;再到后端DO更低,主导菌群又逐渐转变为厌氧菌。Huang

等^[16]利用分子生物学手段分析多级厌氧/好氧反应器内微生物分布,发现好氧菌群的丰度及多样性一般优于厌氧菌群。这也证明了装置内微生物多样性及分布状况符合前端为好氧菌,向后端逐渐分布兼性厌氧菌及厌氧菌的环境特点。表1中Coverage指数分别为0.99和0.98,表明检测的物种种类覆盖率指数均在98%以上,说明测序结果可代表样本的真实情况。

表1 细菌多样性评价

Tab.1 Evaluation of bacterial diversity

项 目	ACE 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	Coverage 指数
前端生物膜	6 247.49	4 779.21	5.25	0.03	0.99
后端生物膜	5 481.48	3 865.89	4.60	0.04	0.98

从装置前端和后端砾石生物膜上取样,检测不同位置砾石填料上的微生物种类及分布状况。系统内微生物在门水平的优势菌群主要为变形杆菌门(*Proteobacteria*)、浮霉菌门(*Planctomycetes*)、疣微菌门(*Verrucomicrobia*)和拟杆菌门(*Bacteroidetes*),其总量占总菌群丰度的90%以上,其中*Proteobacteria*丰度最高为72.28%。在纲分类水平上, α -变形菌纲(*Alphaproteobacteria*)的丰度最高,占50.09%, β -变形菌纲(*Betaproteobacteria*)的丰度为11.05%, γ -变形菌纲(*Gammaproteobacteria*)的丰度相当,为10.56%。在目分类水平上,红细菌目(*Rhodobacterales*)、鞘氨醇目(*Sphingomonadales*)和伯克氏菌目(*Burkholderiales*)等为系统内主要的优势菌目。

在众多污水处理工艺中*Proteobacteria*占绝对优势,也是降解有机物的主要菌门。该门下的细菌多为兼性异养菌,即当有机物充足时,能够利用有机物进行异养生长,在自养环境中,又可通过矿物质等获得能量进行生长,因此具有呼吸/发酵的双重代谢方式^[17]。*Proteobacteria*门下多数细菌在装置前端和后端分布丰度差异不大,这也表明有机物的降解贯穿整个反应过程。

部分细菌在装置前端和后端的分布丰度差异较大,这是因为不同位置的环境条件不同。装置前端有机物浓度高,DO较高;后端有机物浓度降低,DO下降呈缺氧环境。表2列出了分布差异较大的部分功能菌在装置前端和后端的相对丰度,硝化螺旋菌(*Nitrospirales*)、嗜甲基菌(*Methylophilales*)、红环菌(*Rhodocyclales*)和鞘脂杆菌(*Sphingobacteriales*)

在装置前端的丰度远超过后端,特别是 *Nitrospirales* 几乎仅存在于装置前端。分析原因, *Nitrospirales* 是将亚硝酸盐氧化为硝酸盐的一类菌种,由于亚硝化和硝化过程需要氧气,所以这类细菌主要集中在 DO 相对较高的装置前端。魏小涵等^[18]也发现,当 DO 为 4~5 mg/L 时,反应器中硝化细菌的 OTU 的比例较高,当 DO 降为 2 mg/L 以下时,硝化细菌的 OTU 的比例明显下降。 *Methylophilales*、*Rhodocyclales*、*Sphingobacteriales* 主要进行好氧呼吸^[19],具有降解有机物和除磷功能,因此在装置前端丰度较高。芽孢杆菌(*Gemmobacter*)、红细菌(*Rhodobacter*)、产硫酸杆菌(*Thiobacillus*)和假单胞菌(*Pseudomonas*) 在装置后端的丰度较高,主要因为这类细菌绝大多数为兼性或专性厌氧异养菌,具有反硝化除磷功能,可通过反硝化作用将 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 转化为 N_2 ^[20]。综上,GCOR 在试验所得的最佳工况下运行,装置中可富集不同功能的微生物菌群,从而实现有机物的降解及脱氮除磷。

表2 部分细菌在装置前端和后端的相对丰度

Tab.2 Relative abundance of some bacteria in the front and back of the device %

细菌种类	丰度	
	前端	后端
硝化螺旋菌(<i>Nitrospirales</i>)	0.87	0.06
嗜甲基菌(<i>Methylophilales</i>)	0.89	0.36
红环菌(<i>Rhodocyclales</i>)	0.61	0.21
鞘脂杆菌(<i>Sphingobacteriales</i>)	5.01	1.40
芽孢杆菌(<i>Gemmobacter</i>)	0.02	0.58
红细菌(<i>Rhodobacter</i>)	1.37	3.27
产硫酸杆菌(<i>Thiobacillus</i>)	0.98	1.43
假单胞菌(<i>Pseudomonas</i>)	0.42	0.95

3 结论

① 采用自然挂膜法启动砾间接触氧化中试装置,第30天 COD 和 NH_4^+ -N 的去除率分别可达到 59.5% 和 89.0%,反应器挂膜完成。

② 稳定阶段试验得到的最佳运行工况如下: HRT 为 5 h,接触氧化区 1 曝气,配水区 1、3 同时进水,进水比例为 6:4。

③ 系统内填料表面生物膜微生态环境复杂,微生物多样性较高,系统前端生物膜中细菌的多样性及优势菌的富集情况优于后端。不同区域生物膜富集不同功能的微生物菌群,从而实现有机物的高效降解及脱氮除磷。

参考文献:

- [1] LIN S, JIN Y, FU L, et al. Microbial community variation and functions to excess sludge reduction in a novel gravel contact oxidation reactor [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 165(1/3): 1083-1090.
- [2] MOLLEMA P N, ANTONELLINI M. Water and (bio)chemical cycling in gravel pit lakes: a review and outlook [J]. Earth-science Reviews, 2016, 5 (6) : 247-270.
- [3] LIN J L, TU Y T, CHIANG P C, et al. Using aerated gravel-packed contact bed and constructed wetland system for polluted river water purification: a case study in Taiwan [J]. Journal of Hydrology, 2015, 525: 400-408.
- [4] 刘楠楠,迟杰,褚一威,等. 高效旋流分离—生态砾间接触氧化联合装置处理初期雨水径流应用研究[J]. 环境污染与防治, 2019, 41(9): 1043-1049.
LIU Nannan, CHI Jie, CHU Yiwei, et al. Study on application of efficient hydrocyclone separation combined with ecological gravel contact oxidation device to treat initial rainwater runoff [J]. Environmental Pollution & Control, 2019, 41 (9) : 1043-1049 (in Chinese).
- [5] 姚澄宇,王志杰,陈建宏,等. 砾间接触氧化法在污水处理厂尾水深度净化中的应用[J]. 给水排水, 2016, 42(1): 50-55.
YAO Chengyu, WANG Zhijie, CHEN Jianhong, et al. Application of gravel contact oxidation process in advanced treatment of effluent from WWTP [J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42 (1) : 50-55 (in Chinese).
- [6] 李涛,石小峰,胡天媛,等. 砾间接触氧化技术在流域治理中的应用[J]. 工业用水与废水, 2017, 48(3): 43-48, 52.
LI Tao, SHI Xiaofeng, HU Tianyuan, et al. Application of gravel contact oxidation process in watershed management [J]. Industrial Water & Wastewater, 2017, 48(3): 43-48, 52 (in Chinese).
- [7] 魏俊,赵梦飞,王济来,等. 宋公河人工湿地设计方案优化探讨[J]. 中国给水排水, 2019, 35(4): 16-19.
WEI Jun, ZHAO Mengfei, WANG Jilai, et al. Study on optimization of design of constructed wetlands in Songgong River [J]. China Water & Wastewater, 2019, 35(4): 16-19 (in Chinese).
- [8] 葛俊. 砾间接触氧化技术在洱海白鹤溪水质净化中应用研究[D]. 苏州:苏州科技学院, 2015.

- GE Jun. Research of Lightly Contaminated Water Application in Baihe River of Erhai Lake by Gravel Contact Oxidization Process [D]. Suzhou: Suzhou University of Science and Technology, 2015 (in Chinese).
- [9] 陈冬令,张键,孙腾.前置反硝化BAF工艺处理微污染景观河水的试验研究[J].水处理技术,2011,37(11):92-95.
- CHEN Dongling,ZHANG Jian,SUN Teng. Experimental study on the slightly polluted landscape river using BAF with pre-denitrification process[J]. Technology of Water Treatment,2011,37(11):92-95(in Chinese).
- [10] 李思敏,高沛,吕永康.改性石英砂生物滤池深度处理污水厂二级出水[J].中国给水排水,2015,31(9):104-108.
- LI Simin,GAO Pei,LÜ Yongkang. Modified bio-sand filters for advanced treatment of secondary effluent of WWTP[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(9): 104-108(in Chinese).
- [11] 王曼.接触氧化工艺对污染河道的脱氮性能研究[D].北京:北京工业大学,2012.
- WANG Man. Study on the Removal of Nitrogen of Polluted River by Bio-contact Oxidization Process [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2012 (in Chinese).
- [12] NIU W, GUO J, LIAN J, *et al.* Effect of fluctuating hydraulic retention time (HRT) on denitrification in the UASB reactors [J]. Biochemical Engineering Journal, 2018, 132:29-37.
- [13] 姜昕,马鸣超,李俊,等.污水处理系统中活性污泥细菌多样性研究[J].地学前缘,2008,15(6):163-168.
- JIANG Xin,MA Mingchao,LI Jun,*et al.* Analysis on the bacterial diversity of active sludge in wastewater treatment plant [J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15 (6):163-168(in Chinese).
- [14] KEENE N A, REUSSER S R, SCARBOROUGH M J, *et al.* Pilot plant demonstration of stable and efficient high rate biological nutrient removal with low dissolved oxygen conditions [J]. Water Research, 2017, 121: 72-85.
- [15] 林山杉,金玉花,付丽丽.砾间接接触氧化反应器中细菌多样性评价[J].地理科学,2007(6):849-852.
- LIN Shanshan, JIN Yuhua, FU Lili. Phylogenetic diversity assessment of bacterial in a gravel contact oxidation reactor [J]. Scientia Geographica Sinica, 2007 (6):849-852(in Chinese).
- [16] HUANG X, DONG W, WANG H, *et al.* Biological nutrient removal and molecular biological characteristics in an anaerobic-multistage anaerobic/oxic (A-MAO) process to treat municipal wastewater [J]. Bioresource Technology, 2017, 241:969-978.
- [17] MEHRANI M J, SOBOTKA D, KOWAL P, *et al.* The occurrence and role of *Nitrospira* in nitrogen removal systems [J]. Bioresource Technology, 2020, 303: 122936.
- [18] 魏小涵,毕学军,尹志轩,等.温度和DO对MBBR系统硝化和反硝化的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):612-618.
- WEI Xiaohan, BI Xuejun, YIN Zhixuan, *et al.* Effects of temperature and dissolved oxygen on nitrification and denitrification in MBBR system [J]. China Environmental Science, 2019, 39 (2) : 612-618 (in Chinese).
- [19] LI C, YAN K, TANG L, *et al.* Change in deep soil microbial communities due to long-term fertilization [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 75:264-272.
- [20] FREDRIKSSON N J, HERMANSSON M, WILEN B M. Long-term dynamics of the bacterial community in a Swedish full-scale wastewater treatment plant [J]. Environmental Technology, 2017, 40(7): 912-928.
- 作者简介:张晓雅(1996-),女,安徽淮南人,硕士研究生,主要研究方向为水处理技术及污水资源化。
- E-mail:1574481796@qq.com
- 收稿日期:2020-07-01
- 修回日期:2020-08-08

(编辑:沈靖怡)