

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2022.064



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



免曝气混合填料反应器处理生活污水的性能

陈申良¹, 郭其艺¹, 成亮¹, 黎启明¹, 庄琛¹, 张超群¹, 杨阳²

(1. 江苏大学 环境与安全工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘要:采用沸石-塑料混合填料为载体构建固定床生物膜反应器, 周期性进水(厌氧)-排水(好氧)富集培养聚糖菌(GAOs), 结合沸石颗粒吸附作用实现厌氧条件下COD和氨氮的去除。在进水COD和氨氮浓度分别为(508±19)mg/L和(40±3)mg/L、HRT为12 h(厌氧6 h、好氧6 h)的运行条件下, 单级反应器COD、氨氮和总氮去除率分别为89.2%、57.5%、57.5%。双级反应器条件下, COD、氨氮和总氮的平均去除率分别为93.1%、84.9%、70.8%。缩短50% HRT(厌氧/缺氧3 h+好氧3 h)后, 双级反应器总氮去除率提升到81.7%。16S rRNA高通量测序结果显示, 聚糖菌 *Candidatus Competibacter* 的相对丰度在塑料填料表面上升了30.43倍(0.46%→14%), 而在沸石颗粒表面上升了14.35倍(0.46%→6.60%), 表明塑料填料表面更有利于聚糖菌的富集。

关键词:混合填料反应器; 沸石; 聚糖菌; 同步硝化反硝化; 污水处理

中图分类号: X703.1 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2023)06-0198-08

Performance of passive aerated hybrid carrier bioreactor for treatment of domestic sewage

CHEN Shenliang¹, GUO Qiyi¹, CHENG Liang¹, LI Qiming¹, ZHUANG Chen¹,
ZHANG Chaoqun¹, YANG Yang²

(1. School of the Environment and Safety Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, Jiangsu, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: In this study, a fixed-bed biofilm reactor using hybrid zeolite and plastic bio-carriers was constructed, in which successful enrichment of glycogen accumulating organisms (GAOs) under oscillating filling (anaerobic) - draining (aerobic) conditions was achieved. Associated with zeolite chemical adsorption, anaerobic removal of COD by GAOs and ammonia by zeolite was achieved. The hybrid carrier bioreactor was fed with synthetic wastewater with COD and ammonia concentration of (508±19)mg/L and (40±3)mg/L, respectively, and operated under periodical cycles of anaerobic (6 h) and aerobic (6 h). The removal rates of COD, ammonia nitrogen, and total nitrogen (TN) by single-stage treatment were 89.2%, 57.5%, and 57.5%, respectively. The removal rates of COD, ammonia nitrogen, and TN by the two-stage reactors were 93.1%, 84.9%, and 70.8%, respectively. By reducing the HRT by 50% (anaerobic/anoxic 3 h + aerobic 3 h), the TN removal rate in the two-stage reactors was increased to 81.7%. The results of 16S rRNA high-throughput sequencing

收稿日期: 2022-04-06

基金项目: 江苏大学人才启动基金(4111370003)

作者简介: 陈申良(1997-), 男, 主要从事污水处理研究, E-mail: 2211909011@stmail.ujs.edu.cn。

杨阳(通信作者), 男, 博士, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn。

Received: 2022-04-06

Foundation items: Talent Launch Fund of Jiangsu University (No. 4111370003)

Author brief: CHEN Shenliang (1997-), main research interest: wastewater treatment, E-mail: 2211909011@stmail.ujs.edu.cn.

YANG Yang (corresponding author), PhD, E-mail: yyyoung@cqu.edu.cn.

showed that the relative abundance of *Candidatus Competibacter* (GAOs) increased by 30.43 times (0.46% → 14%) on the surface of the plastic carrier, while it only increased by 14.35 times (0.46% → 6.60%) for the zeolite carrier, indicating that the surface of the plastic carrier is more favorable for the enrichment of *Candidatus Competibacter*.

Keywords: hybrid carrier bioreactor; zeolite; glycogen accumulating organisms (GAOs); simultaneous nitrification and denitrification (SND); wastewater treatment

一般认为,生物脱氮包括好氧硝化和缺氧反硝化两个过程,在好氧条件下氨氮通过自养硝化菌转化为硝酸盐和亚硝酸盐,在缺氧条件下被异养反硝化菌还原为氮气^[1]。大量研究结果表明,传统污水处理工艺中,氧传输效率(OTE)一般在4.8%~34.1%范围内^[2-4],较低的OTE导致用于BOD氧化和氨氮硝化的曝气系统所需能耗通常占整个污水处理工艺能耗的50%以上^[5-7]。因此,降低曝气能耗是提升污水处理效率、实现“双碳”目标的关键措施之一^[8]。

有研究表明,在厌氧条件下,聚糖菌(GAOs)能够将有机碳转化为聚羟基烷酸酯(PHAs)^[9]。Flavigny等^[4]研究了序批式固定床生物膜反应器,在周期性进水(厌氧)-排水(好氧)条件下培养了GAOs生物膜,且在免曝气条件下COD去除率高达94.3%。该工艺的核心是,通过排水的方式使空气在填料孔隙内部自然流通,从而直接给生物膜提供新陈代谢所需的氧气,节约了约60%曝气能耗^[4,10]。为了同时获得氨氮的高效去除,在上述工艺的基础上,郭其艺等^[11]以沸石颗粒填料代替传统多孔聚乙烯塑料填料作为生物载体,构建了序批式固定床生物膜反应器。沸石颗粒不仅具有高效的铵根离子吸附作用,同时具有促进氨氧化细菌(Ammonia-oxidizing bacteria, AOB)和抑制亚硝酸氧化细菌(Nitrite-oxidizing bacteria, NOB)的效果,从而具有较高的脱氮效率^[12-13]。通过周期性进水(厌氧)-排水(好氧)成功培养出富含GAOs的生物膜,使得反应器不仅能够高效去除COD,而且氨氮和总氮的去除率都达到83%^[11]。该体系中,COD和氨氮的去除过程可分为两个阶段:1)进水厌氧过程中,生物膜中的GAOs将污水中的有机碳源转化为细胞内PHAs^[2,4],同时,沸石颗粒吸附污水中的铵根离子,实现厌氧阶段污水中COD和氨氮的同时去除;2)排水好氧过程中,通过硝化细菌和聚糖菌(GAOs)等菌属的共同作用,同步硝化反硝化(SND)降解沸石颗粒所吸附的氨氮,实现沸石颗粒吸附能力的再生^[9]。

然而,使用沸石颗粒作为生物填料的主要问题在于,反应器有效容积较小,并且随着反应器的运

行,生物膜持续生长和脱落^[14]。这将导致反应器孔隙堵塞和反应器有效容积降低,从而降低单位反应器的污水处理负荷,不利于系统的长期稳定运行。多孔塑料填料具有强度高、比表面积大、孔隙率高(>95%)等特点,笔者利用沸石颗粒和多孔塑料生物填料制备混合填料,以有效解决长期运行下由于生物膜生长和脱落堵塞颗粒孔隙而造成的反应器污水污染物去除负荷降低的问题,同时,研究不同生物填料表面的微生物群落构成,构建稳定运行的免曝气混合填料固定生物膜污水处理工艺。

1 试验

1.1 试验材料

使用的沸石主要为斜发沸石。筛分后选取尺寸为(10±2) mm的沸石颗粒,经去离子水反复淘洗3~5次,除去表面的污垢及可溶性杂质,在103℃烘箱中烘干24 h后待用。试验测得沸石对40 mg/L氨氮溶液的最大氨氮吸附量为22.4 μg/g。另一多孔塑料填料为齿型聚乙烯填料(HDPE),尺寸φ10 mm×10 mm,密度>0.96 g/cm³,孔隙率>95%,比表面积>500 m²/m³。

根据文献[9],使用的人工合成废水COD/N值为12,其中,进水COD浓度为508±19 mg/L,NH₄⁺-N浓度为40±3 mg/L,其主要成分为:CH₃COONa(660 mg/L)、NH₄Cl(160 mg/L)、NaHCO₃(125 mg/L)、KH₂PO₄(44 mg/L)、MgSO₄·7H₂O(25 mg/L)、CaCl₂·2H₂O(300 mg/L)、FeSO₄·7H₂O(6.25 mg/L)。

1.2 试验装置

实验室规模反应器为亚克力材质的φ6 cm×35 cm圆柱,有效容积约为0.80 L。反应器内填充沸石颗粒和聚乙烯填料,两种填料体积各占50%。该反应器定义为混合填料反应器HCB(Hybrid Carrier Bioreactor)。反应器内所接种物为市政污水处理厂生化曝气池的活性污泥,污泥浓度(MLSS)为6.3 g/L。取2 L用于反应器挂膜,持续循环滤淋,挂膜污泥循环液中污泥逐步富集于填料表面,直至MLSS<1 000 mg/L。经试验测试,最终约有10.28 g活性污泥(干重)被负载在反应器填料表面。当

稳定运行时,反应器内污水MLSS $<(30\pm 2)\text{mg/L}$,表明反应器内污泥主要以生物膜的形式存在。HCB反应器采用序批式进水,厌氧-好氧交替模式运行,进水后反应器进行厌氧处理,并维持厌氧阶段6 h。厌氧处理后,反应器排出废水,继而进入好氧阶段并维持6 h,系统水力停留时间(HRT)为12 h。进水、排水均由电脑程序自动控制。

双混合填料反应器是将两个同样的混合填料反应器(R1和R2)串联运行,即污水在反应器R1厌氧阶段结束后排出,即刻由泵输入反应器R2再次进行缺氧处理,同时,反应器R1进入好氧阶段。缺氧结束后,反应器R2排出污水,进入好氧阶段,此时反应器R1完成好氧阶段并开始泵送新批次污水,开始下一污水处理周期(图1)。在双反应器测试过程中,好氧/缺氧时间分别设定为6 h/6 h和3 h/3 h两种运行工况,以测定不同HRT条件下系统的处理能力。

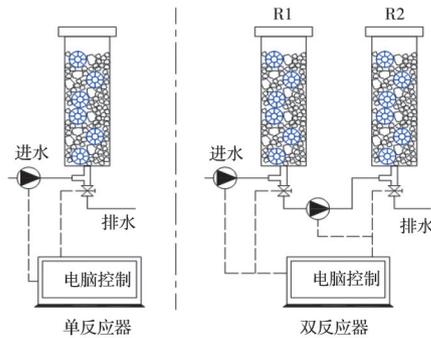


图1 装置运行示意图

Fig.1 Device operation diagram

为了比较不同填料反应器的长期污水处理负荷,在同期进行对比试验,对照组反应器填料为单一沸石颗粒填料,两组反应器体积和容纳污水体积见表1。

表1 各反应器的填料体积和受纳水量

Table 1 Carrier volume and water capacity of each reactor

反应器	反应器体积/L	初始处理水量/L
混合填料反应器	0.80	0.41
沸石反应器	0.80	0.21

1.3 分析方法

取样口位于反应器中部,每次取约10 mL水样^[15]并经0.22 μm过滤器过滤,用于测定污染物浓度,水样分析方法见表2^[16]。在试验中,合成废水不含有机氮,因而总氮(TN)表示为氨氮、硝态氮和亚硝态氮之和。

在反应器运行至稳定期时,分别从沸石填料和

表2 主要分析指标和方法

Table 2 Main analysis indicators and methods

分析指标	检测方法
COD	重铬酸钾法
NH ₄ ⁺	纳氏试剂分光光度法
NO ₃ ⁻	水杨酸分光光度法
NO ₂ ⁻	盐酸萘乙二胺分光光度法
TP	磷钼酸铵分光光度法
PHAs	气相色谱法 ^[4]
糖原	蒽酮比色法
生物群落	16S rRNA 基因测序分析

HDPE 填料表面采集生物膜,离心脱水后的生物膜样品送至南京集思慧远生物科技有限公司进行16S rRNA 基因测序,将得到的OUT 聚类后与Silva 数据库进行比对,结合分类学方法进行物种注释。

2 试验结果与讨论

2.1 混合填料反应器启动

在进水(6 h)-排水(6 h)条件下,单级混合填料反应器对COD 去除效果如图2所示。COD 平均去除率由46.3% 逐步提高到89.2%,出水COD 平均浓度约为54.5 mg/L。厌氧段COD 去除率不断提升主要可能是由于GAOs 丰度的提升。Bengtsson^[17] 研究发现,以厌氧/好氧(A/O)模式运行可以有效富集GAOs。如图3所示,胞内PHAs 和糖原在厌氧-好氧阶段的变化情况表现出GAOs 代谢特征。系统未出现明显的厌氧释磷现象,表明PHAs 合成过程所需能量来源于糖原酵解而不是胞内Poly-P (聚磷)水解^[18]。因此,本研究污水处理系统中COD 的去除主要是通过GAOs 将污水中的有机碳转化为胞内聚羟基烷酸(PHAs)的路径来实现的。初期(第1周)HCB 反应器对氨氮的平均去除率为43.8%,稳定运行后达57.5%,出水氨氮平均浓度约为16.8 mg/L(图4)。在后期的稳定运行阶段,出水中没有检出NO₂⁻和NO₃⁻,说明反硝化完全,因此氨氮和总氮去除率相同。

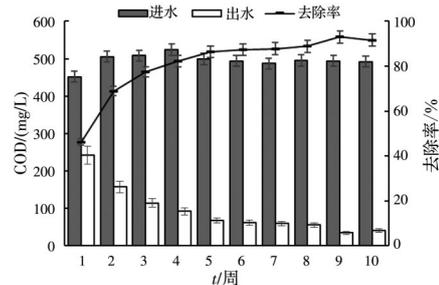


图2 单级混合填料生物膜反应器对COD 的去除效果
Fig. 2 Removal effect of single-stage hybrid carrier bioreactor on COD

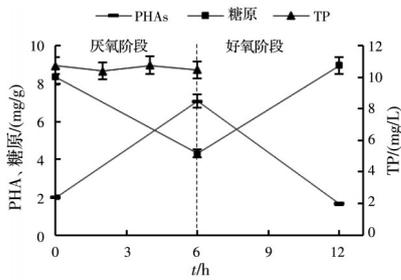


图 3 周期内生物膜 PHAs、糖原和厌氧段 TP 变化
Fig. 3 Changes in biofilm PHAs, glycogen and TP in anaerobic phase during the cycle

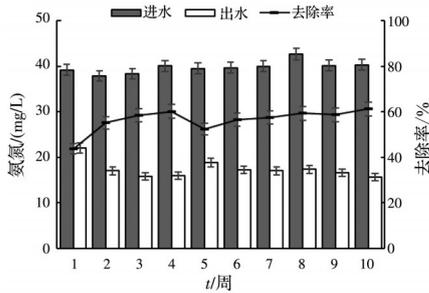


图 4 单级混合填料生物膜反应器对氨氮的去除效果
Fig. 4 Removal effect of single-stage hybrid carrier bioreactor on $\text{NH}_4^+\text{-N}$

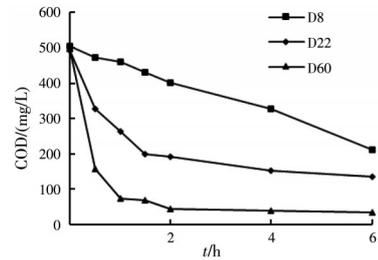
由图 2 可知,单级混合填料反应器运行的启动时间约为 4 周,与 Hossain 等^[10]研究的塑料填料滴滤反应器相比,启动时间缩短了约 2 周。主要原因可能是,相比于惰性塑料填料表面较光滑的微观结构,沸石颗粒粗糙的活性表面更有利于微生物在其表面依附并生长繁殖,因此生物膜的形成时间较短。

2.2 HCB 运行不同阶段 COD 去除效率

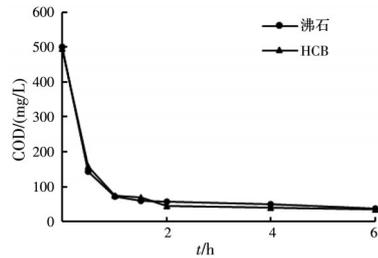
混合填料反应器对 COD 的去除主要依靠聚糖菌(GAOs)在厌氧条件下以溶液中可溶性有机碳作为碳源合成胞内聚羟基烷酸(PHAs)。通过监测不同运行阶段典型周期内 HCB 厌氧段 COD 的浓度变化可以发现,随着运行天数的增加,COD 去除效率和速率均有显著提高。由图 5(a)可见,在反应器运行的第 8 天(D8)、第 22 天(D22)和第 60 天(D60),厌氧阶段 COD 浓度分别降低了 284.5、344.2、462.4 mg/L,去除率分别为 58.0%、72.3%、93.1%。

同时,研究发现,反应器运行约 22 d 后,COD 浓度在厌氧阶段开始 2 h 后趋于平稳,表明 GAOs 对污水中可溶性有机碳的合成转化主要发生在厌氧阶段的前 2 h。由图 5(a)中数据可以进一步计算得出,厌氧阶段前 2 h 的 COD 去除速率由第 8 天的 52.8 mg/(L·h)增大到第 60 天的 226.1 mg/(L·h),反应速率提升了约 4 倍,这主要是由于随着反应器的运行,系统内生物量及聚糖菌丰度显著增长^[4]。图 5(b)显示了稳定运行条件下(第 60 天)HCB 和沸

石填料反应器典型周期厌氧段 COD 的浓度变化,由图 5(b)可知,尽管使用的生物填料,不同但在相同运行条件下,二者的 COD 去除效率和速率无明显差异。



(a) HCB 运行的不同时期



(b) 运行第 60 天 HCB 和沸石填料反应器对比

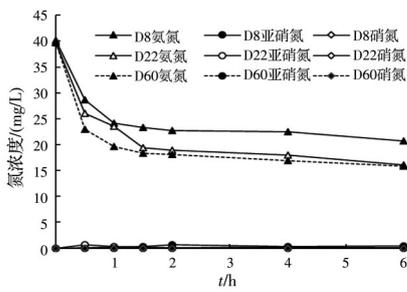
图 5 厌氧阶段的 COD 浓度变化

图 5 Variation of COD concentration in anaerobic phase

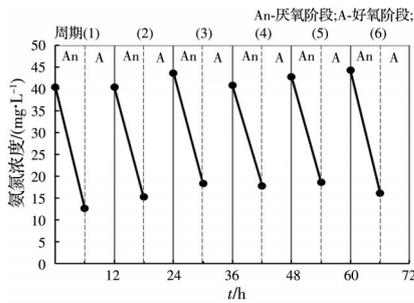
2.3 混合反应器氮的去除

图 6 是不同运行周期下厌氧段 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的浓度变化。由图 6(a)可知,HCB 对氮的去除随运行过程变化不大,在反应器运行的第 8 天(D8)、第 22 天(D22)和第 60 天(D60),厌氧阶段氨氮浓度分别降低了 19.51、23.61、23.97 mg/L,去除率分别为 48.6%、59.4%、60.2%。同时,研究发现,沸石颗粒对氨氮的吸附在厌氧阶段开始 1 h 后基本达到平衡,其氨氮去除速率稳定在 16~20 mg/(L·h)。进一步研究发现,厌氧阶段硝态氮和亚硝态氮的浓度几乎为 0,说明前一周期好氧阶段生物膜内反硝化比较完全,生物膜内没有出现硝态氮的积累。图 6(b)显示,连续污水处理周期中厌氧段氨氮具有稳定的去除率,进一步证明整个工艺过程中混合填料内沸石吸附氨氮能力的持续性和可再生性。Cheng 等^[9]和 Hossain 等^[10]的研究表明,在好氧阶段,沸石颗粒所吸附的氨氮能够被好氧硝化,同时,反硝化聚糖菌利用胞内 PHAs 在生物膜内的厌氧区进行反硝化,从而达到脱氮和沸石颗粒再生的目的(图 6(c))。

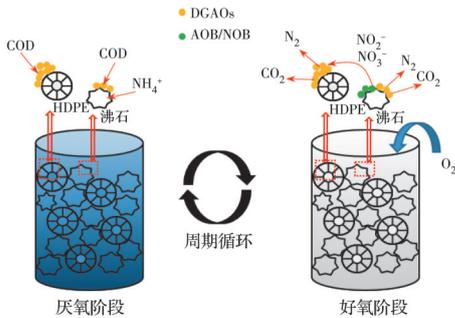
图 7 为稳定运行条件下(第 60 天)典型污水处理周期 HCB 和沸石填料反应器在厌氧阶段的氨氮去除率。结果表明,HCB 填料反应器氨氮的去除率



(a) 反应器运行不同时段厌氧阶段氮浓度变化



(b) 连续周期的厌氧阶段氨氮浓度变化



(c) 氨氮和总氮去除机理示意图

图 6 HCB 厌氧阶段的氮浓度变化情况

Fig. 6 Variation of nitrogen concentration in anaerobic phase of HCB

为 60.2%，低于沸石填料反应器(81.7%)。这主要是由于相对混合填料反应器(沸石颗粒占比 50%，有效污水处理体积 370 mL)，沸石填料反应器具有较高的沸石颗粒占比(100%)以及较低的有效污水处理体积(150 mL)。

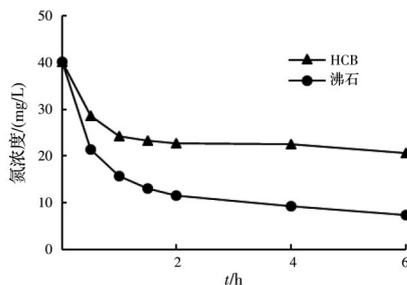
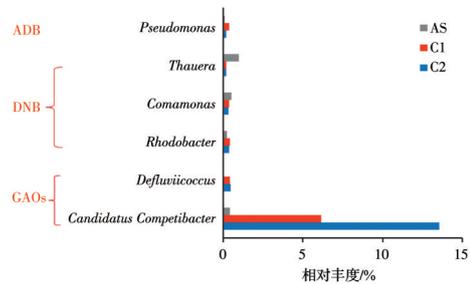


图 7 运行第 60 天 HCB 和沸石填料反应器氨氮浓度的变化

Fig. 7 Changes of NH₄⁺-N concentrations in HCB and zeolite carrier reactors on the 60th day of operation

2.4 生物群落的演变

为了研究混合填料反应器运行过程中生物膜群落结构的变化,在反应器稳定运行第 65 天,分别从沸石和 HDPE 填料表面采集生物膜进行 16S rRNA 基因测序分析,其中属水平结果如图 8 所示。与初始活性污泥(AS)相比,混合填料反应器生物膜中 GAOs 菌属的相对丰度显著提升:在沸石表面生物膜中提升约 14.35 倍(0.46%→6.60%),在 HDPE 填料表面生物膜中提升约 30.43 倍(0.46%→14.00%),说明与沸石填料相比,HDPE 填料更加有利于聚糖菌(GAOs)的富集。生物膜中的 GAOs 菌属包含 *Candidatus Competibacter* 和 *Defluviicoccus*, 其中 *Candidatus Competibacter* 为主要的 GAOs 菌属,占比达 93%。有研究表明, *Candidatus Competibacter* 和 *Defluviicoccus* 的某些分支具有反硝化功能(DGAOs)^[12, 19]。生物膜中的反硝化菌(DNB)包含 *Thauera*、*Comamonas* 和 *Rhodobacter*^[20], 这类细菌的相对丰度在不同填料表面的生物膜中差异较小。在生物膜中还检测到 *Pseudomonas* 相对丰度提升,据研究报道,这一菌属为好氧反硝化菌(ADB)^[21],在好氧条件下能够进行反硝化。填料表面的生物膜组成同填料表面的物理化学特性有着密切关系^[22]。



注:AS 为初始接种污泥;C1 为沸石填料;C2 为塑料填料。

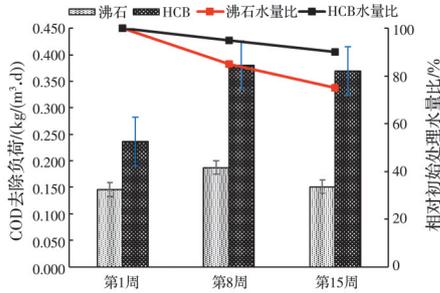
图 8 HCB 生物膜微生物群落组成

Fig. 8 Microbial community composition of HCB biofilm

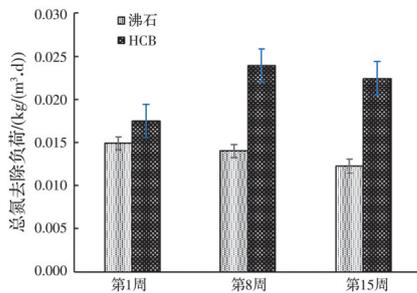
2.5 不同填料反应器长期污水处理负荷

图 9 为沸石颗粒填料和混合填料反应器长期污水处理负荷。结果显示,单级混合填料反应器 COD 处理负荷为 0.38 kg/(m³·d),是沸石颗粒填料反应器的 2.5 倍。主要原因为,相比于沸石颗粒填料反应器的低孔隙率(约为 25%),由于加入了 50% 体积的多孔塑料填料,使得混合填料反应器孔隙率增加了一倍,约 52%。在 COD 去除率相近的条件下,高孔隙率有助于提高反应器单次处理负荷。随着反应器的运行,由于生物膜的生长,沸石颗粒反应器单次污水处理体积降低约 35%,从而导致 COD 处理负荷相应降低。同样地,沸石颗粒反应器总氮去

除负荷由 0.014 kg/(m³·d)降低到 0.012 kg/(m³·d),降低约 14%。然而,单级混合填料反应器 COD 和总氮去除负荷只分别降低了约 6% 和 3%。这主要是由于塑料填料的大孔隙有助于缓解生物膜生长所导致的孔隙堵塞问题。



(a) COD 去除负荷



(b) 总氮去除负荷

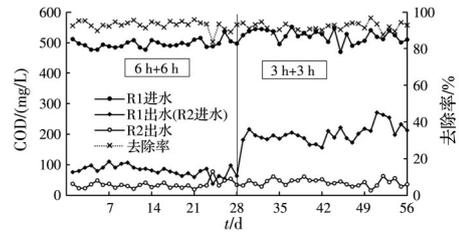
图 9 不同填料反应器的去除负荷

Fig. 9 Removal load of different carrier reactors

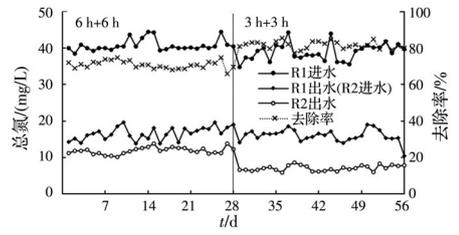
2.6 双级反应器强化污水处理效能

为了进一步提升出水水质,在单级混合填料反应器的基础上增加一级反应器,构成双级反应器。在第 1 级反应器(R1)的厌氧阶段结束后,污水进入第 2 级反应器(R2)进行缺氧处理。图 10(a)为不同 HRT 条件下双级反应器系统(阶段 I 为 12 h,阶段 II 为 6 h)COD 的去除效率。数据显示,阶段 I 和阶段 II COD 平均去除率分别为 93.1% 和 91.9%,平均出水浓度分别为 34.7、42.0 mg/L,降低 HRT 并未影响系统 COD 的去除率。当 HRT=12 h 时,反应器 R1 的 COD 去除率为 83%,出水 COD 浓度约为 80 mg/L。随着 HRT 的降低,反应器 R1 的 COD 去除率降低到 61%,出水 COD 浓度增大到约 200 mg/L。说明降低 HRT 使得更多的 COD 进入第 2 级反应器(R2)中,有助于提升反应器 R2 进水的碳氮比,从而在理论上可以提升反应器 R2 的反硝化和总氮去除能力。

图 10(b)为不同 HRT 条件下双级反应器系统对总氮的去除效率。结果显示,随着 HRT 的降低,总氮的平均去除率分别由 70.8% 增加到 81.7%,出水总氮平均浓度由 11.9 mg/L 降低至 7.1 mg/L。其中,出水氨氮平均浓度分别为 6.2、6.0 mg/L(图



(a) COD 的去除效果

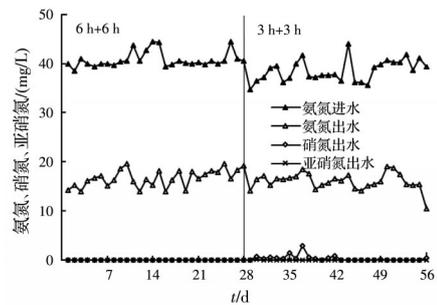


(b) 总氮的去除效果

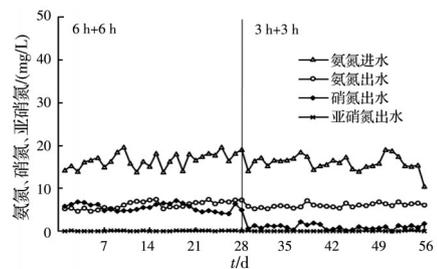
图 10 双混合填料反应器对 COD 和总氮的去除效果

Fig 10 Removal effect of COD and total nitrogen by a double-hybrid carrier bioreactor

11)。相比于单级混合填料反应器,在相同 HRT(6 h)运行条件下,双级反应器总氮去除率提升了约 13.2%。进一步分析发现,反应器 R1 出水水质无明显变化,反应器 R2 的出水硝酸根浓度由原来的平均 5 mg/L 降低到 1 mg/L 以下(图 11(b))。这主要是由于降低 HRT 导致 R2 进水 COD 增多,有更多的碳源用于 R2 的反硝化反应。



(a) 第 1 级反应器(R1)



(b) 第 2 级反应器(R2)

图 11 进水和出水氨氮以及出水硝态氮、亚硝态氮浓度变化

Fig 11 Concentrations of NH₄⁺-N in influent and effluent and NO₃⁻-N and NO₂⁻-N in effluent

3 结论

1)以周期性厌氧-好氧模式运行的单级混合填料反应器,其 COD、氨氮和总氮去除率分别为 89.2%、57.5%、57.5%,出水 COD、氨氮和总氮平均浓度分别为 54.5、16.8、16.8 mg/L。单级混合填料反应器反硝化完全,出水未检出硝态氮和亚硝态氮。

2)双混合填料反应器对 COD、氨氮、总氮的去除率分别为 93.1%、84.9%、70.8%,出水 COD、氨氮、总氮浓度分别为 34.7、6.2、11.9 mg/L。降低水力停留时间(12 h→6 h)对双反应器系统的 COD 和氨氮去除率影响不大,而对总氮的去除率提升了 10.9%,更有利于反应器对总氮的去除。

3)长期运行条件下,混合填料反应器处理水量降低幅度(9.8%)为沸石填料反应器的 40%,并且混合填料反应器的 COD 和总氮去除负荷分别是沸石填料反应器的 2.5、2 倍。同时,在混合填料反应器的不同填料表面 GAOs 都得到高丰度积累,并且在 HDPE 填料表面生物膜中的相对丰度更高,达到 14.0%。

参考文献

- [1] BONASSA G, BOLSAN A C, HOLLAS C E, et al. Organic carbon bioavailability: Is it a good driver to choose the best biological nitrogen removal process? [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 786: 147390.
- [2] BOYLE W C, HELLSTROM B G, EWING L. Oxygen transfer efficiency measurements using off-gas techniques [M]//*Water Pollution Research and Control Brighton*. Amsterdam: Elsevier, 1988: 1295-1300.
- [3] CAPODICI M, CORSINO S F, DI TRAPANI D, et al. Effect of biomass features on oxygen transfer in conventional activated sludge and membrane bioreactor systems [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 240: 118071.
- [4] FLAVIGNY R M G, CORD-RUWISCH R. Organic carbon removal from wastewater by a PHA storing biofilm using direct atmospheric air contact as oxygen supply [J]. *Bioresource Technology*, 2015, 187: 182-188.
- [5] GU Y F, LI Y, LI X Y, et al. The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants [J]. *Applied Energy*, 2017, 204: 1463-1475.
- [6] DREWNOWSKI J, REMISZEWSKA-SKWAREK A, DUDA S, et al. Aeration process in bioreactors as the main energy consumer in a wastewater treatment plant. review of solutions and methods of process optimization [J]. *Processes*, 2019, 7(5): 311.
- [7] GROVES K P, DAIGGER G T, SIMPKIN T J, et al. Evaluation of oxygen transfer efficiency and alpha-factor on a variety of diffused aeration systems [J]. *Water Environment Research*, 1992, 64(5): 691-698.
- [8] FOLEY J, DE HAAS D, HARTLEY K, et al. Comprehensive life cycle inventories of alternative wastewater treatment systems [J]. *Water Research*, 2010, 44(5): 1654-1666.
- [9] CHENG L, FLAVIGNY R M G, HOSSAIN M I, et al. Proof of concept of wastewater treatment via passive aeration SND using a novel zeolite amended biofilm reactor [J]. *Water Science and Technology*, 2018, 78(10): 2204-2213.
- [10] HOSSAIN M I, PAPANINI A, CORD-RUWISCH R. Rapid adaptation of activated sludge bacteria into a glycogen accumulating biofilm enabling anaerobic BOD uptake [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 228: 1-8.
- [11] 郭其艺, 成亮, 黎启明, 等. 沸石颗粒填料固定床生物膜曝气污水处理工艺[J]. *土木与环境工程学报(中英文)*, 2023, 45(4): 192-200.
GUO Q Y, CHENG L, LI Q M, et al. Non-aeration wastewater treatment using zeolite particle based fixed-bed biofilm bioreactor [J]. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 2023, 45(4): 192-200. (in Chinese)
- [12] LI Q, SUN S F, GUO T F, et al. Short-cut nitrification in biological aerated filters with modified zeolite and nitrifying sludge [J]. *Bioresource Technology*, 2013, 136: 148-154.
- [13] YANG Y Y, CHEN Z G, WANG X J, et al. Partial nitrification performance and mechanism of zeolite biological aerated filter for ammonium wastewater treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 241: 473-481.
- [14] 郭其艺. 基于沸石颗粒载体的低能耗固定床生物膜污水处理工艺研究[D]. 江苏镇江: 江苏大学, 2021.
GUO Q Y. Low energy consumption fixed-bed bioreactor based on zeolite particle carrier [D]. Zhenjiang, Jiangsu: Jiangsu University, 2021. (in Chinese)
- [15] 蓝国剑. 探讨环境应急监测中的污水采集采样及保存措施[J]. *节能与环保*, 2020(Sup1): 58-59.
LAN G J. Discussion on collection, sampling and preservation of sewage in environmental emergency monitoring [J]. *Energy Conservation & Environmental Protection*, 2020(Sup1): 58-59. (in Chinese)
- [16] American Public Health Association, American Water

- Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. American Public Health Association, 1912.
- [17] BENGTTSSON S. The utilization of glycogen accumulating organisms for mixed culture production of polyhydroxyalkanoates [J]. *Biotechnology and Bioengineering*, 2009, 104(4): 698-708.
- [18] OSHIKI M, SATOH H, MINO T. Rapid quantification of polyhydroxyalkanoates (PHA) concentration in activated sludge with the fluorescent dye Nile blue A [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(3): 747-753.
- [19] WANG X X, ZHAO J, YU D S, et al. Stable nitrite accumulation and phosphorous removal from nitrate and municipal wastewaters in a combined process of endogenous partial denitrification and denitrifying phosphorus removal (EPDPR) [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 355: 560-571.
- [20] 鞠峰, 张彤. 活性污泥微生物群落宏组学研究进展[J]. *微生物学通报*, 2019, 46(8): 2038-2052.
- JU F, ZHANG T. Advances in meta-omics research on activated sludge microbial community [J]. *Microbiology China*, 2019, 46(8): 2038-2052. (in Chinese)
- [21] LU J, ZHANG Y X, WU J, et al. Nitrogen removal in recirculating aquaculture water with high dissolved oxygen conditions using the simultaneous partial nitrification, anammox and denitrification system [J]. *Bioresource Technology*, 2020, 305: 123037.
- [22] MAZIOTI A A, KOUTSOKERAS L E, CONSTANTINIDES G, et al. Untapped potential of moving bed biofilm reactors with different biocarrier types for bilge water treatment: A laboratory-scale study [J]. *Water*, 2021, 13(13): 1810.

(编辑 胡英奎)