



铁-碳缓释碳源基质强化尾水脱氮除磷

于鲁冀¹, 郭智更¹, 范鹏宇², 谷立坤³, 李廷梅³, 任昆阳¹, 彭赵旭⁴

(1. 郑州大学生态与环境学院, 河南郑州 450001; 2. 郑州大学环境政策规划评价研究中心, 河南郑州 450001;
3. 河南工程学院, 河南郑州 450001; 4. 郑州大学水利科学与工程学院, 河南郑州 450001)

[摘要] 投加缓释碳源是降低低碳氮比废水总氮(TN)的有效途径。使用聚己内酯(PCL)、玉米芯(CC)和二价铁盐(FeSO_4 、 FeCl_2)为电子供体,以聚乙烯醇和海藻酸钠为骨架,经过化学交联制备了PCL-CC基质(PC)、PCL-CC- FeSO_4 基质(PCF-S)和PCL-CC- FeCl_2 基质(PCF-C)3种固体缓释碳源,构建了铁-碳协同脱氮除磷的反硝化滤池,并将其用于处理模拟废水,比较了PC、PCF-S和PCF-C在连续流反硝化滤池中的有机物释放特性与其强化脱氮除磷的性能。结果表明:PC、PCF-S和PCF-C 3种基质均可长期稳定释碳达48 d以上;在PCF-C与PCF-S缓释碳源滤池中,铁自养反硝化和异养反硝化之间存在明显的协同作用,2种反硝化作用的结合可显著增强滤池对氮磷的去除效果,3种碳源基质中PC反硝化潜能最好;相较于中低浓度阶段,高浓度进水阶段3种碳源滤池对氮素的去除率均有所下降,脱氮效果变差,这是由于高浓度进水阶段2种PCF基质出现铁壳积累现象,其积累程度由有机物释放速率和脱氮负荷共同决定。

[关键词] 反硝化滤池;缓释碳源;共基质;铁盐脱氮

[中图分类号] X703.1 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2023)03-0158-08

Enhanced nitrogen and phosphorus removal from tail water by iron-carbon slow-release carbon source matrix

YU Luji¹, GUO Zhigeng¹, FAN Pengyu², GU Likun³, LI Tingmei³, REN Kunyang¹, PENG Zhaoxu⁴

(1. College of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
2. Research Center for Environmental Policy Planning & Assessment of Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;
3. Henan University of Engineering, Zhengzhou 450001, China; 4. College of Water Conservancy and
Environmental Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The addition of slow-release carbon source is an effective way to reduce the total nitrogen (TN) in wastewater with lower C/N ratio. In this study, three solid slow-release carbon sources including PCL-CC matrix (PC), PCL-CC- FeSO_4 matrix (PCF-S) and PCL-CC- FeCl_2 matrix (PCF-C) were prepared using polycaprolactone (PCL), corn cob (CC) and divalent iron salt (FeSO_4 and FeCl_2) as electron donor with polyvinyl alcohol-sodium alginate (PVA-SA) as hybrid scaffolds. The denitrifying filter with iron-carbon synergistic nitrogen and phosphorus removal was constructed and the organic matter release characteristics and the enhanced nitrogen and phosphorus removal performance of PC, PCF-S and PCF-C in continuous flow denitrifying filter were compared. The results showed that, the three substrates could release carbon stably for more than 48 d. In PCF-C and PCF-S slow-release carbon source filters, there was an obvious synergistic effect between iron autotrophic denitrification and heterotrophic denitrification. The combination of two kinds of denitrification could significantly enhance the removal effect of nitrogen and phosphorus in the filter. PC has the best denitrification potential among the three carbon source substrates. Compared with the medium and low concentration stage, the nitrogen removal efficiency of the three carbon source filters in the high concentration influent stage had decreased, and the denitrification effect had become worse. This was due to the accumulation of iron shells in the two PCF matrices in the high concentration influent

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2015ZX07204-002-004, 2012ZX07204-001-004)

stage, and the degree of accumulation was determined by the organic matter release rate and denitrification load.

Key words: denitrification filter; slow-release carbon source; co-substrate; ferrous iron-dependent denitrification

城镇污水处理厂的二级出水进入地表水会造成水质恶化和河湖富营养化^[1],我国部分地区为了提升所在地流域水质,要求污水处理厂出水水质要达到《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) V类甚至是IV类水的要求。面对越来越严格的出水标准,二级出水TN的进一步去除已成为需要迫切解决的问题。在二级出水中,TN的主要存在形式为 NO_3^- -N,其约占TN的90%^[2]。去除TN的方法有很多,生物法脱氮效率高且经济,其主要是利用微生物进行硝化反硝化作用对氮素进行削减,在二级出水处理中得到了广泛的应用。但我国城镇污水处理厂二级处理出水碳源不足现象突出^[3],这极大地限制了生物法脱氮效能的提升。

反硝化滤池作为尾水处理装置,其占地面积小,脱氮和过滤效果良好,在污水处理提标工程中得到广泛应用。为强化脱氮效果,在反硝化滤池中常采用纤维素类农业废弃物作为缓释碳源载体,为微生物提供附着场所和碳源^[4-7],此类缓释碳源载体具有释碳时间长,利于微生物附着等特点。也有研究提出采用聚己内酯(PCL)、聚羟基烷酸酯(PHA)和聚乙烯醇(PVA)等有机高分子聚合物作为碳源,其具有释碳量大,但释碳时间较短的特点^[8]。有研究认为,多种碳源协同释碳能稳定提升脱氮效果,因此,采用化学交联等方法将上述2类碳源物质制成复合材料用于反硝化脱氮被大量研究^[9-11]。但释碳源种类少、装置启动时间较长的问题依旧存在^[5]。

2009年,K. A. WEBER等^[12]提出了共基质的概念,认为在有机电子供体和无机电子供体同时存在的情况下,自养反硝化菌所需碳源和能源主要由有机电子供体提供,无机电子供体作为“第二基质”为反硝化提供能源,二者协同反硝化。有研究表明,基于铁盐的自养反硝化菌多为混合营养型细菌,添加有机物可促进铁盐脱氮微生物的活性^[13],而在共基质模式下,自养反硝化菌为铁盐脱氮反硝化的脱氮主力军,这也表明铁自养反硝化的应用离不开有机电子供体的协同脱氮^[14-15]。

本研究拟以PCL、玉米芯(CC)和二价铁盐为电子供体,以聚乙烯醇和海藻酸钠(SA)为骨架,经化学交联制备3种缓释碳源基质(PC、PCF-C和

PCF-S),在连续流反硝化滤池中考察3种碳源基质脱氮除磷效能,以期实现反硝化滤池快速启动,为开发更具有实用意义的缓释碳源和工艺提供参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验用水为模拟废水,采用 KNO_3 (优级纯,天津市科密欧化学试剂有限公司)和 KH_2PO_4 (优级纯,天津市风船化学试剂有限公司)进行配制。

实验用污泥取自郑州某生活污水处理厂回流污泥,将其离心后使用生理盐水对其进行洗涤,重复操作2~3次,之后加入生理盐水调节体积,获得菌悬液,其污泥质量浓度(MLSS)约为35 000 mg/L。

按照表1所示配比称取各基质所需主要材料,将材料混匀后加入PVA-SA水凝胶,搅拌均匀后于-20℃冷冻12 h,成型后脱模,放入含4% CaCl_2 的饱和硼酸溶液中低温交联24 h,交联完成后用超纯水冲洗表面交联剂,完成PC、PCF-C、PCF-S的制备。

表1 缓释碳源基质材料组成

Table 1 Matrix material composition of slow-release carbon sources

基质名称	材料配比(每500 g基质)
PC	PCL(40 g)+玉米芯(40 g)+菌悬液(20 mL)+PVA-SA水凝胶
PCF-C	PCL(40 g)+玉米芯(40 g)+菌悬液(20 mL)+ FeCl_2 (4.54 g)+PVA-SA水凝胶
PCF-S	PCL(40 g)+玉米芯(40 g)+菌悬液(20 mL)+ FeSO_4 (5.40 g)+PVA-SA水凝胶

1.2 实验装置及方法

构建反硝化滤池用于实验研究,其容量为1 L,装置示意图1。

如图1所示,装置内上、下层均填充小粒径砾石,填充体积占比为10%,装置中下部分填充大粒径砾石,填充体积占比为30%,大粒径砾石上方装填碳源基质,填充体积占比为40%。装置填充完毕后,采用蠕动泵将模拟废水泵入装置,水力停留时间设置为4.5 h。实验共分为4个阶段,不同阶段进水水质如表2所示。各组反应器以低浓度进水进入启动期,待反应器处理效果稳定后进入实验期,每日监测

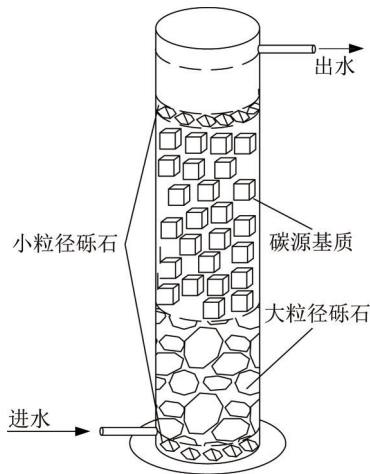


图1 实验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of experimental device

进出水中TP(仅中高浓度阶段)、TOC、COD、 Fe^{2+} 、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N的浓度,对比不同碳源基质的强化脱氮效果。因中、高浓度更接近污水处理厂二级出水实际情况,本研究仅于中、高浓度阶段考察各碳源滤池对TP的去除特性。

表2 各阶段进水水质

Table 2 Influent water quality at each stage

进水阶段	NO_3^- -N/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	TP/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
启动阶段(0~7 d)	5.00 ± 1.00	0
低浓度阶段(8~25 d)	5.00 ± 1.00	0
中浓度阶段(26~36 d)	10.00 ± 1.00	0.50 ± 0.10
高浓度阶段(37~47 d)	20.00 ± 2.00	0.50 ± 0.10

1.3 分析方法

实验对TOC、 Fe^{2+} 、COD、 NO_3^- -N、 NO_2^- -N、TP等指标进行检测。其中TOC采用TOC分析仪(TOC-LCPN,岛津公司)进行测定, Fe^{2+} 采用邻菲罗啉分光光度法进行测定,其余指标依据参考文献[16]进行测定。

由于本研究中进水仅含有硝态氮,采用式(1)对反硝化速率进行计算。

$$r = \frac{\Delta C}{\text{HRT}} = \frac{C_0 - C_1}{\text{HRT}} \quad (1)$$

式中: C_0 ——进水 NO_3^- -N, mg/L ;

C_1 ——出水 NO_3^- -N, mg/L ;

HRT——水力停留时间,取4.6 h。

利用式(2)所示的 Monod 模型对滤池内反硝化反应过程进行拟合,采用双倒数法计算拟合参数。

$$r = \frac{kC}{K_s + C} \quad (2)$$

式中: r ——反硝化速率, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$;

k ——最大反硝化速率, $\text{mg}/(\text{L} \cdot \text{h})$;

C ——进水 NO_3^- -N, mg/L ;

K_s ——半饱和常数, mg/L 。

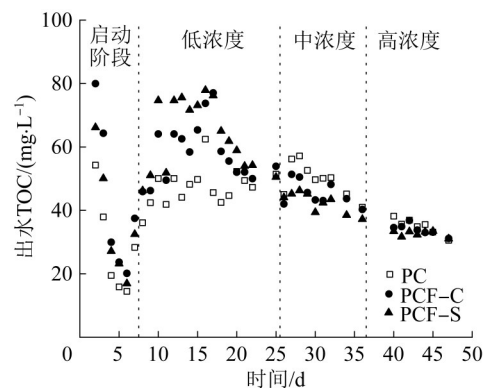
将式(2)变形为式(3),以 $\frac{1}{r}$ 为纵坐标, $\frac{1}{C}$ 为横坐标进行线性拟合,可得到反硝化动力学参数。

$$\frac{1}{r} = \frac{K_s}{k} \cdot \frac{1}{C} + \frac{1}{k} \quad (3)$$

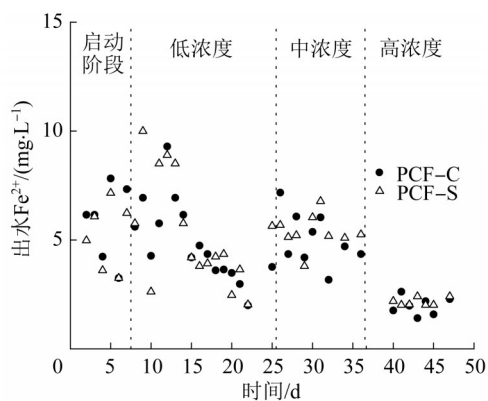
2 结果与讨论

2.1 各基质条件下出水电子供体浓度变化

在各基质反应器中,TOC 与 Fe^{2+} 均作为还原剂为反硝化反应提供电子,图2所示为出水中这2种电子供体浓度变化。



(a) 出水 TOC 变化



(b) 出水 Fe^{2+} 浓度变化

图2 出水各电子供体浓度变化

Fig. 2 Change of each electron donor concentration in effluent

由图2(a)可知,实验期内3种基质条件下出水TOC均呈现先升高再逐渐下降的趋势,初期碳源溶出量大,释碳迅速,此时碳源的释放机制为骨架溶蚀

和扩散作用,之后碳源释放量逐渐衰减^[9],经过长达48 d的释碳,最终出水中TOC稳定在35 mg/L左右。由图2(b)可知,2种PCF基质条件下,实验前期铁释放量较大,随着时间推移铁释放量逐渐下降,最终在高浓度进水阶段出水中 Fe^{2+} 稳定在2.1 mg/L左右。以上说明2种PCF基质均具有较好的有机碳源和 Fe^{2+} 长期释放性能。

图3所示为3种基质条件下滤池出水COD的变化。由图3可知,3种基质条件下滤池出水COD均于启动阶段下降后再次上升,之后平稳下降,2种PCF碳源滤池出水COD上升幅度更大,这可能是由于PCF基质中 Fe^{2+} 的溶出提升了出水COD,且 Fe^{2+} 的溶出使得基质内部出现细密的孔洞结构,增大了碳源与污水的接触面积,进一步促进了碳源骨架的侵蚀溶出,这导致PCF碳源滤池出水COD普遍高于PC,有利于装置的快速挂膜,在实验前期实现较好脱氮效果。

表3 3种基质条件下滤池对不同浓度进水中氮素的平均去除率

Table 3 Average nitrogen removal rates in influent with different concentrations under three substrate conditions

指标	低浓度阶段			中浓度阶段			高浓度阶段		
	PC	PCF-C	PCF-S	PC	PCF-C	PCF-S	PC	PCF-C	PCF-S
NO_3^- -N 平均去除率/%	90.8	92.8	92.9	97.9	98.6	97.9	86.5	69.8	73.4
NO_x^- -N 平均去除率/%	90.5	92.6	92.7	97.7	98.5	97.8	85.3	68.2	71.7

由表3可知,低浓度进水阶段PCF碳源滤池对 NO_3^- -N的去除效果更好,中浓度阶段3种碳源滤池对 NO_3^- -N的去除效果相近,而在高浓度条件下PCF-C和PCF-S对 NO_3^- -N去除效果不如PC。这说明PCF碳源滤池经过36 d的运行后,在高浓度进水阶段脱氮效果不如PC。而在各浓度进水条件下,PCF-C和PCF-S展现出相近的去除效果,表明2种基质分别释放的 Cl^- 与 SO_4^{2-} 对缓释碳源反硝化脱氮的影响并无显著区别。

表3还显示了不同进水条件下各碳源滤池对 NO_x^- -N的去除情况。由表3可知,PCF-C、PCF-S和PC 3种碳源滤池的最适进水 NO_3^- -N均为10 mg/L;相较于中浓度阶段,高浓度进水阶段3种碳源滤池对氮素的去除率均有所下降,脱氮效果变差。J. T. MORAGHAN等^[17]研究发现亚硝酸盐对 Fe^{2+} 具有化学氧化作用,并且从动力学角度证实了 NO_2^- -N和 Fe^{2+} 的化学反应非常快。近来有研究表明,微生物主导的铁自养反硝化过程是由

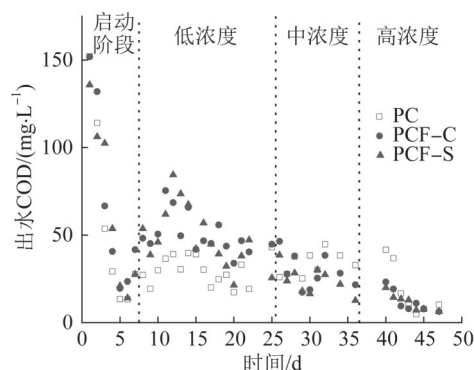


图3 3种基质条件下滤池出水COD变化

Fig. 3 COD changes of filter effluent under three substrate conditions

2.2 基质对不同浓度进水的氮素去除效果

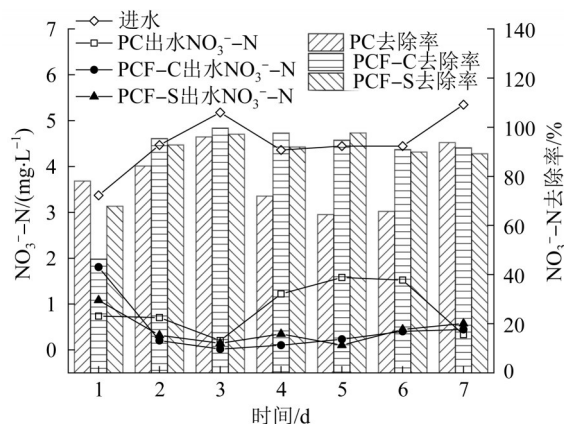
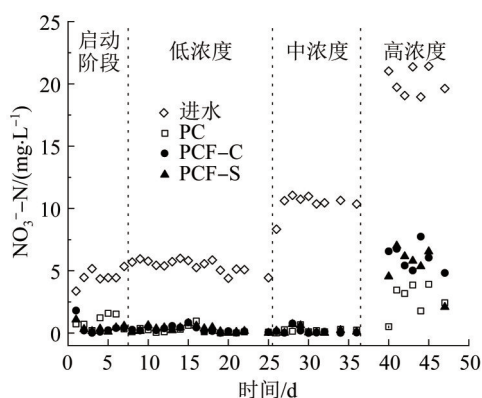
2.2.1 3种基质条件下滤池对不同浓度进水中 NO_3^- -N和 NO_x^- -N的去除

3种基质条件下滤池对不同浓度进水中氮素的去除率见表3。

生物过程和化学反应耦合而成^[18]。在PCF碳源基质中, NO_3^- -N在脱氮微生物细胞内反硝化酶的作用下得到电子从而转化为 NO_2^- -N释放到细胞周边,与细胞周边 Fe^{2+} 发生反应转化为气态氮化物,同时 Fe^{2+} 离子转化为 Fe(III) 氧化物。高浓度阶段脱氮负荷提升,碳源基质释放的碳源相对不足,会使 NO_2^- -N出现一定累积,这加速了 Fe(III) 氧化物的生成,微生物外层逐步形成一定厚度的铁壳,阻碍微生物进行物质交换,导致部分反硝化微生物失活,影响了滤池的脱氮能力。Tian TIAN等^[19]在所运行的铁自养反硝化反应器中同样观察到由 Fe(II) 氧化产物和微生物组成的细胞复合体的形成,其中 Fe(II) 氧化产物主要由铁氧化物和氢氧化铁组成^[20],这与本实验中PCF碳源滤池在高浓度阶段基质上出现黄色物质现象相一致。

滤池在不同阶段进出水 NO_3^- -N随反应时间的变化见图4。

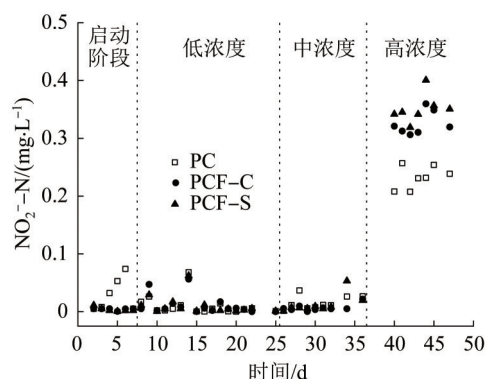
由图4可知,在进水初期,PCF碳源滤池启动迅

(a) 实验前期 NO_3^- -N 去除情况(b) 不同阶段 NO_3^- -N 变化图4 3种基质条件下滤池进出水 NO_3^- -N 的变化Fig. 4 Changes of NO_3^- -N in filter influent and effluent under three substrate conditions

速, PCF-C、PCF-S 碳源滤池在第2天即分别实现对 NO_3^- -N 91.73%、87.03% 的去除率, 而 PC 碳源滤池启动期出水 NO_3^- -N 波动较大, 用时 7 d 实现对 NO_3^- -N 的稳定去除, 可见 PCF 基质可实现反应器的快速启动, 原因在于: (1) PCF 碳源基质前期碳源溶出量较高, 有利于脱氮微生物的大量生长繁殖; (2) PCF 基质中玉米芯和聚己内酯溶蚀产生的有机碳源和 Fe^{2+} 有利于反硝化滤池中基质的形成, 研究表明基于铁盐的自养反硝化菌多为混合营养型细菌, 添加有机物可提高铁盐脱氮微生物的活性^[13], PCF 基质即是在铁自养脱氮微生物和异养脱氮微生物的共同作用下完成了滤池的快速启动。

2.2.2 3种基质条件下滤池出水 NO_2^- -N 的变化

滤池在不同阶段出水 NO_2^- -N 随反应时间的变化见图5。

图5 3种基质条件下滤池出水 NO_2^- -N 的变化Fig. 5 Changes of NO_2^- -N in filter effluent under three substrate conditions

由图5可知, 在启动阶段, 2种 PCF 碳源滤池出水中几乎未出现 NO_2^- -N 的积累, 这主要是由于前期滤池内电子供体充足, 且 PCF 基质中铁离子的释放丰富了可利用电子供体的种类, 在自养反硝化菌和异养反硝化菌的协同作用下, 2种 PCF 基质可实现反硝化滤池的快速启动; 而 PC 碳源滤池出水中 NO_2^- -N 波动明显, 至第7天方才稳定。此外, 不同进水条件下3种碳源滤池也均未出现明显的 NO_2^- -N 积累现象, 仅在高浓度进水阶段存在轻微的 NO_2^- -N 积累, 且 PCF-C、PCF-S 碳源滤池出水 NO_2^- -N 平均分别为 0.33、0.35 mg/L, 高于 PC 碳源滤池 0.23 mg/L 的积累量, 原因可能在于反硝化过程中亚硝酸盐还原酶控制 NO_2^- -N 的还原, 这些还原酶可以催化 NO_2^- -N 还原成 NO , 但是其合成离不开 $\text{Fe}(\text{II})$, 而后续微生物周围 $\text{Fe}(\text{II})$ 氧化产物形成的铁壳影响了细胞与碳源物质的交换, 导致 NO_2^- -N 存在一定程度的积累。

2.2.3 脱氮机理研究

实验测定了3种碳源滤池的反硝化速率, 并采用 Monod 模型对反硝化过程进行拟合, 结果见图6及表4。

由图6(a)可知, 启动阶段 PCF-C 碳源滤池脱氮速率较高, 平均为 0.52 mg/(L·h), 高于 PC 的 0.45 mg/(L·h), 与 PCF-S 碳源滤池脱氮速率 [0.51 mg/(L·h)] 基本相当; 在中低浓度阶段时, 各碳源滤池反硝化速率基本相同, 此时3种缓释碳源基质的电子供体释放均十分充足, 反硝化反应充分, NO_3^- -N 被充分去除, 这与各碳源滤池出水 NO_3^- -N 结果相印证。但在高浓度阶段, PC、

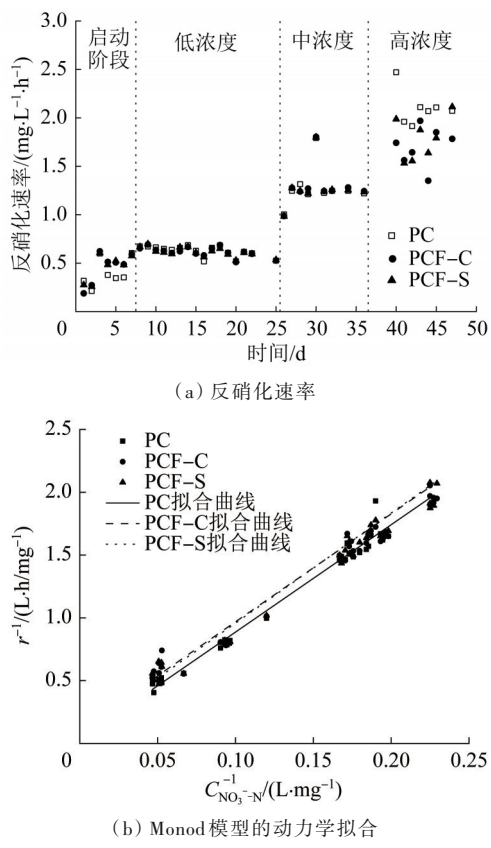


图6 3种基质条件下反硝化速率变化及其动力学拟合结果

Fig. 6 Changes of denitrification rates and kinetic fitting results under three substrate conditions

表4 动力学拟合参数				
Table 4 Dynamic fitting parameters				
基质	拟合方程式	$k/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}\cdot\text{h}^{-1})$	$K_s/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	R^2
PC	$y=8.55x+0.031$	32.05	274.09	0.980 03
PCF-C	$y=8.60x+0.109$	9.20	79.10	0.900 66
PCF-S	$y=8.77x+0.081$	12.31	107.91	0.923 23

PCF-C、PCF-S碳源滤池反硝化速率平均分别为2.1、1.7、1.8 mg/(L·h),这是由于高浓度进水阶段2种PCF基质出现铁壳积累现象,阻碍了碳源等底物与反硝化微生物的充分接触。

由图6(b)及表4可以看出,Monod模型对于反硝化过程的拟合较好, R^2 均在0.9以上。对3种基质下拟合参数进行对比,PC的*k*和*K_s*均为最大,这说明PC具有更好的反硝化脱氮潜能。但结合系统对NO₃⁻-N、NO_x⁻-N的去除情况分析,认为前期PCF碳源滤池反硝化潜能更高,因为前期PCF所释放的有机碳源和Fe²⁺可共同作为电子供体。有研究表明,

大多数分离得到的基于亚铁盐的反硝化菌为混合营养型细菌,需要与有机碳源形成共基质才能生长^[21],因此在有机基质和Fe²⁺协同作用下,PCF基质具有较高的反硝化潜能。但在高浓度进水阶段,铁自养反硝化所产生铁氧化产物会在细胞周围形成化合物沉淀,影响细胞的物质交换速率,因而影响了PCF基质的脱氮性能。

2.2.4 3种基质条件下滤池对不同浓度进水中磷的去除

对中、高浓度进水条件下各碳源滤池对总磷的去除情况进行分析,结果见图7。

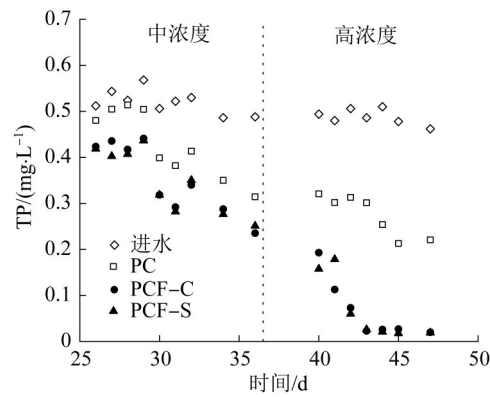


图7 3种基质条件下滤池进出水TP变化

Fig. 7 Changes of TP in filter influent and effluent under three substrate conditions

从图7可以看出,自中浓度阶段开始(第26天),PCF碳源滤池出水TP即优于PC碳源滤池出水TP,随着时间的推移,滤池内TP去除率逐渐提升,到第43天时,PCF-C和PCF-S碳源滤池TP出水开始稳定,出水TP分别为0.023、0.026 mg/L,去除率可达到95.3%和94.7%。PCF基质对TP的去除是化学过程和生物过程的共同作用结果,化学过程依靠Fe³⁺与PO₄³⁻形成磷酸铁沉淀,之后通过反冲洗将磷酸铁等从滤池中去除,生物过程则是依靠反硝化除磷菌对TP进行去除。操家顺等^[22]认为Fe³⁺有助于提升反硝化除磷系统中除磷效率及有机物降解速率,李永等^[23]认为Fe²⁺可促进聚磷菌群落生长并能去除胞外聚合物(EPS)中的PO₄³⁻,在PCF碳源滤池中,基质释放的Fe²⁺与Fe²⁺氧化生成的Fe³⁺均在一定程度上强化了滤池内反硝化除磷的反应,有利于对TP的去除。从图7还可以看出,高浓度阶段磷去除效果明显

优于中浓度阶段磷的去除,原因可能在于高浓度阶段 PCF 碳源滤池中出现不同程度的 NO_2^- -N 累积, NO_2^- -N 与 Fe^{2+} 反应生成 Fe^{3+} , 致使 Fe^{3+} 浓度提升, 因而对 PO_4^{3-} 的共沉淀作用加强, 同时 NO_2^- -N 也可作为反硝化除磷的电子受体, 从而强化了反硝化除磷。

3 结论

本研究通过模拟反硝化滤池运行对 PCF-C、PCF-S 和 PC 3 种基质的脱氮除磷效果进行探究, 结论如下:

(1) PCF-C、PCF-S 和 PC 3 种基质释碳稳定, 释碳时间均达 48 d 以上; 依靠碳源骨架的溶蚀、扩散作用以及铁离子溶出所形成的细密孔状结构, PCF-C 和 PCF-S 在实验前期电子供体溶出效果更好。

(2) PCF-C 和 PCF-S 可依靠铁-碳共基质模式在 2 d 内实现滤池的快速启动。PC、PCF-C 和 PCF-S 3 种基质的最适进水 NO_3^- -N 均为 10 mg/L 左右, 此时 3 种基质对 NO_x^- -N 去除率平均分别为 97.7%、98.5%、97.8%。3 种碳源基质中, PC 反硝化潜能最好, 铁壳积累是 PCF 高浓度进水条件下脱氮较差的原因, 可通过调节铁-碳共基质缓释碳源的投加量改善其脱氮效果。

(3) PCF-C 和 PCF-S 可依靠 Fe^{3+} 与反硝化除磷菌的协同作用实现对 TP 的去除, 运行第 43 天时 PCF-C、PCF-S 碳源滤池对 TP 的去除达到稳定, 去除率分别可达到 95.3% 和 94.7%。因此 PCF-C、PCF-S 可用于反硝化滤池的同步深度脱氮除磷, 具有较好的应用前景。

参考文献

- [1] GAO Lei, ZHOU Weili, HUANG J, et al. Nitrogen removal by the enhanced floating treatment wetlands from the secondary effluent[J]. Bioresource Technology, 2017, 234: 243-252.
- [2] 刘宗杨, 程庆峰, 刘盛余. 城镇二级出水深度脱氮研究进展[J]. 水处理技术, 2021, 47(12): 8-12.
- LIU Zongyang, CHENG Qingfeng, LIU Shengyu. Research progress in tertiary nitrogen removal from secondary effluent of wastewater treatment plants[J]. Technology of Water Treatment, 2021, 47(12):

8-12.

- [3] DU Rui, PENG Yongzhen, CAO Shenbin, et al. Mechanisms and microbial structure of partial denitrification with high nitrite accumulation[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2016, 100(4): 2011-2021.
- [4] 马男. 以玉米芯为缓释碳源的反硝化滤池深度脱氮效能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- MA Nan. Advanced nitrogen removal of denitrification filter with corncob as slow-release carbon source[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [5] 邵兵, 张立秋, 李淑更, 等. 2 种缓释碳源材料的释碳特性及脱氮性能研究[J]. 水处理技术, 2020, 46(12): 34-38.
- SHAO Bing, ZHANG Liqiu, LI Shugeng, et al. Study on carbon release properties and denitrification performances of two slow-release carbon sources materials[J]. Technology of Water Treatment, 2020, 46(12): 34-38.
- [6] 彭锦玉, 张克峰, 王全勇, 等. 以 4 种天然植物材料为碳源的固相反硝化研究[J]. 工业水处理, 2021, 41(10): 104-108.
- PENG Jinyu, ZHANG Kefeng, WANG Quanyong, et al. Solid phase denitrification using four natural plant materials as carbon sources[J]. Industrial Water Treatment, 2021, 41(10): 104-108.
- [7] 张立秋, 王登敏, 李淑更, 等. 固体碳源生物膜 SND 处理实际低碳源城市污水[J]. 工业水处理, 2019, 39(8): 19-22.
- ZHANG Liqiu, WANG Dengmin, LI Shugeng, et al. Treatment of actual low carbon source urban sewage with solid carbon source bio-film SND[J]. Industrial Water Treatment, 2019, 39(8): 19-22.
- [8] 易成豪, 秦伟, 陈湛, 等. 聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 4143-4151.
- YI Chenghao, QIN Wei, CHEN Zhan, et al. Comparison of polycaprolactone and poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for nitrogen removal[J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 4143-4151.
- [9] XIONG Rui, YU Xinxiao, YU Luji, et al. Biological denitrification using polycaprolactone-peanut shell as slow-release carbon source treating drainage of municipal WWTP[J]. Chemosphere, 2019, 235: 434-439.
- [10] 钟丽燕, 郝瑞霞, 万京京, 等. 新型缓释碳源耦合海绵铁同步脱氮除磷的研究[J]. 中国给水排水, 2017, 33(9): 69-72.
- ZHONG Liyan, HAO Ruixia, WAN Jingjing, et al. New slow-release organic carbon source coupling sponge iron for denitrification and phosphorus removal[J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(9): 69-72.
- [11] 张克峰, 王琪琨, 丁万德, 等. 香茅/聚砜缓释碳源 SBR 反应器脱氮效能研究[J]. 工业水处理, 2022, 42(12): 128-135.
- ZHANG Kefeng, WANG Qikun, DING Wande, et al. Study of nitrogen removal efficiency of lemongrass/PS slow release carbon source SBR

- reactor[J]. Industrial Water Treatment, 2022, 42(12): 128-135.
- [12] WEBER K A, HEDRICK D B, PEACOCK A D, et al. Physiologic and taxonomic description of the novel autotrophic, metal oxidizing bacterium, *Pseudogulbenkiania* sp. strain 2002[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2009, 83(3): 555-565.
- [13] 王茹, 刘梦瑜, 刘冰茵, 等. 共基质模式下铁盐脱氮反应器的运行性能及微生物学特征[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5446-5455.
- WANG Ru, LIU Mengyu, LIU Bingyin, et al. Operational performance and microbiological characteristics of an iron-salt denitrification reactor in co-substrate mode [J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5446-5455.
- [14] JAMIESON J, PROMMER H, KAKSONEN A H, et al. Identifying and quantifying the intermediate processes during nitrate-dependent iron(II) oxidation[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(10): 5771-5781.
- [15] SCHERSON Y D, WELLS G F, WOO S G, et al. Nitrogen removal with energy recovery through N_2O decomposition[J]. Energy Environ Sci., 2013, 6(1): 241-248.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- SEPA. Water and wastewater monitoring analysis method[M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [17] MORAGHAN J T, BURESH R J. Chemical reduction of nitrite and nitrous oxide by ferrous iron [J]. Soil Science Society of America Journal, 1977, 41(1): 47-50.
- [18] MELTON E D, SWANNER E D, BEHRENS S, et al. The interplay of microbially mediated and abiotic reactions in the biogeochemical Fe cycle [J]. Nature Reviews Microbiology, 2014, 12(12): 797-808.
- [19] TIAN Tian, ZHOU Ke, XUAN Liang, et al. Exclusive microbially driven autotrophic iron-dependent denitrification in a reactor inoculated with activated sludge [J]. Water Research, 2020, 170: 115300.
- [20] XIU Wei, GUO Huaming, SHEN Jiaxing, et al. Stimulation of Fe(II) oxidation, biogenic lepidocrocite formation, and arsenic immobilization by *Pseudogulbenkiania* sp. strain 2002 [J]. Environmental Science & Technology, 2016, 50(12): 6449-6458.
- [21] WEBER K A, PICARDAL F W, RODEN E E. Microbially catalyzed nitrate-dependent oxidation of biogenic solid-phase Fe(II) compounds [J]. Environmental Science & Technology, 2001, 35(8): 1644-1650.
- [22] 操家顺, 谢玉洁, 方芳, 等. Fe^{3+} 对反硝化系统除磷效果及微生物产物的影响[J]. 环境科学研究, 2015, 28(1): 125-133.
- CAO Jiashun, XIE Yujie, FANG Fang, et al. Influences of Fe^{3+} on phosphorus removal and microbial products in denitrifying phosphorus removal system [J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(1): 125-133.
- [23] 李永. 反硝化除磷工艺中亚铁协同除磷技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- LI Yong. Ferrous cooperative dephosphorization in denitrifying phosphorous removal process [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [作者简介] 于鲁冀(1962—), 教授. E-mail: yuluji@zzu.edu.cn。通讯作者: 彭赵旭, 博士, 副教授. E-mail: pengzhaoxu1983@163.com。
- [收稿日期] 2022-12-23(修改稿)