

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.07.017

# 污泥-煤矸石基活性炭的制备及对Anammox的促进

朱薇, 张晶, 游宏坤, 路闯, 岳秀萍, 端允  
(太原理工大学环境科学与工程学院, 山西太原 030024)

**摘要:** 以污泥与煤矸石为原料制备污泥-煤矸石基活性炭(SCAC),探究其作为固定化载体对厌氧氨氧化(Anammox)反应器运行过程的影响。结果表明,向有效容积为450 mL的反应器投加1.0 g SCAC,运行45 d后, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 去除率分别达到94%和99%,化学计量比( $\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}:\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}:\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}=1:1.40:0.25$ )与理论值更接近,运行稳定性明显优于对照组,脱氮性能显著增强;运行100 d后,测得EPS含量增加了约25 mg/gVSS,其中蛋白质(PN)含量增加了近1倍,多糖(PS)含量变化不大,PN/PS值提升了近1倍,微生物疏水性增强,有利于减少微生物流失。通过扫描电子显微镜(SEM)、比表面积测定、傅里叶红外光谱(FTIR)表征,SCAC的BET比表面积为146.25  $\text{m}^2/\text{g}$ ,平均孔径为2.75 nm,主要为微孔介孔海绵状形态,此结构有利于微生物附着;其表面的羰基、羧基等含氧官能团可促进EPS的分泌,提高生物量,提升Anammox反应器的抗负荷冲击能力。

**关键词:** 污泥; 煤矸石; 活性炭; 厌氧氨氧化; 脱氮

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)07-0113-06

## Preparation of Sludge and Coal Gangue Based Activated Carbon and Its Promotion to Anammox

ZHU Wei, ZHANG Jing, YOU Hong-kun, LU Chuang, YUE Xiu-ping, DUAN Yun  
(School of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** This paper prepared the sludge and coal gangue based activated carbon (SCAC) by using sludge and coal gangue as raw materials, and investigated its influence of serving as immobilized carrier on the operation of Anammox reactor. SCAC of 1.0 g was added to the reactor with an effective volume of 450 mL. After 45 days of operation, the removal rates of  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  and  $\text{NO}_2^-\text{-N}$  reached 94% and 99%, respectively, and the stoichiometric ratio ( $\Delta\text{NH}_4^+\text{-N}:\Delta\text{NO}_2^-\text{-N}:\Delta\text{NO}_3^-\text{-N}=1:1.40:0.25$ ) was closer to the theoretical value. In addition, the operating stability was obviously better than that of the control group, and the nitrogen removal performance was significantly enhanced. After 100 days of operation, the EPS content increased by 25 mg/gVSS, of which the protein (PN) content almost doubled, the polysaccharide (PS) content did not change much, and the PN/PS almost doubled. In addition, the microbial hydrophobicity was enhanced, which was conducive to reducing the loss of microorganisms. According to the results of scanning electron microscopy (SEM), specific surface area test and Fourier infrared spectroscopy (FTIR) characterization, the BET specific surface area of SCAC was 146.25  $\text{m}^2/\text{g}$ ,

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170045)

通信作者: 端允 E-mail: duanyun@tyut.edu.cn

the average pore size was 2.75 nm, and the structure was mainly in the form of microporous or mesoporous spongy, which was conducive to the attached growth of microorganisms. The oxygen-containing functional groups such as carbonyl group and carboxyl group on the surface of SCAC promoted the secretion of EPS, increased the biomass, and enhanced the load impact resistance of the Anammox reactor.

**Key words:** sludge; coal gangue; activated carbon; Anammox; removal of nitrogen

厌氧氨氧化(Anammox)是厌氧氨氧化菌(AnAOB)以 $\text{NO}_2^-$ -N为电子受体、 $\text{NH}_4^+$ -N为电子供体生成 $\text{N}_2$ 的过程,易受pH、基质浓度等因素影响,脱氮效果不稳定<sup>[1]</sup>。因此,对AnAOB的有效富集和截留是保证工艺稳定运行和提高脱氮效率的必要条件。研究表明,向反应器中投加活性炭、竹炭、无纺布、沸石、海绵等载体,可富集生物量,从而提高处理性能<sup>[2-4]</sup>。另外,Fe、Mg、Ca以及反应器中的低浓度有机物均可以促进Anammox反应<sup>[5-6]</sup>。

污泥和煤矸石是我国占比较大的固体废物,目前对两者的资源化利用较少,且已有的研究主要集中在以两者其一为原料制备活性炭方面<sup>[7-8]</sup>,鲜少有利用污泥与煤矸石共同制备活性炭用于Anammox的研究。污泥中的有机质以及煤矸石中C、Si、Al共存的矿物特性和含有的Fe、Ca、Mg等金属元素有利于Anammox的进行,同时,在制备活性炭的过程中,金属与酸反应后生成的金属离子可起到去除杂质、疏通孔隙结构的作用,能有效改善活性炭的孔隙结构和材料性能,从而有利于微生物富集<sup>[9]</sup>。为此,笔者以污泥和煤矸石为原料制备污泥-煤矸石基活性炭(SCAC),并将其用于Anammox系统,研究其对Anammox脱氮性能与微生物胞外聚合物(EPS)含量的影响,并通过一系列表征探索其促进机制,旨在提升Anammox反应器的运行稳定性,缩短反应时间,同时为污泥与煤矸石的资源化共处置提供有效途径。

## 1 材料与方法

### 1.1 污泥-煤矸石基活性炭的制备

污泥取自晋中市正阳污水处理厂回流池,煤矸石取自太原市西山煤矿,将两者预处理后以6:4的质量比混合,先用 $\text{ZnCl}_2$ 活化,然后在管式炉中以550℃烧制60 min,经HCl和HF酸洗后用蒸馏水洗至中性,再经真空干燥(80℃,4 h)后制得成品。

### 1.2 实验装置与方法

2个ASBR反应装置由500 mL血清瓶制成,底

部直径为7 cm、高为17 cm,有效容积为450 mL。采用间歇模式进出水,由蠕动泵控制,反应器用铝箔包裹避光,并置于恒温振荡箱(30℃,120 r/min)中。2个反应器均接种300 mL絮状污泥,其MLSS为14 g/L、MLVSS/MLSS为0.54。实验进水采用人工配水, $\text{NH}_4^+$ -N: $\text{NO}_2^-$ -N约为1:1.32,在1~55 d,进水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度分别为50、70 mg/L,pH为7.5,HRT为24 h;在56~155 d,进水 $\text{NH}_4^+$ -N和 $\text{NO}_2^-$ -N浓度分别为75、100 mg/L,pH为7.7,HRT为12 h。连续运行55 d后,向其中一个反应器中加入1.0 g SCAC,记为 $R_{\text{SCAC}}$ ,对照组记为 $R_0$ 。

### 1.3 分析项目与方法

采用扫描电子显微镜(SEM)观察SCAC的结构,采用傅里叶红外光谱仪(FTIR)分析其表面官能团,采用比表面积和孔隙率分析仪测定其比表面积和孔径分布。 $\text{NH}_4^+$ -N采用纳氏试剂分光光度法测定, $\text{NO}_2^-$ -N采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定, $\text{NO}_3^-$ -N采用酚二磺酸分光光度法测定,微生物的蛋白质(PN)和多糖(PS)含量分别采用Bradford法和蒽酮-硫酸比色法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 反应器的脱氮性能

#### 2.1.1 未投加SCAC时反应器的脱氮性能

未投加SCAC时,两个反应器均采用低负荷运行方式,氮变化趋势相近,曲线基本重合。如图1(a)所示,第1天两个反应器的出水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度(73.65 mg/L)明显高于进水(50 mg/L),之后呈快速下降趋势,从第15天开始出水 $\text{NH}_4^+$ -N浓度低于进水并持续下降,这一现象同Araujo等<sup>[10]</sup>的研究结果一致。图1(b)显示,在1~55 d,出水 $\text{NO}_2^-$ -N浓度始终低于进水,前20 d出水 $\text{NO}_2^-$ -N浓度呈现先升高后降低的趋势;由图1(c)可知,出水 $\text{NO}_3^-$ -N浓度在前7 d呈急剧下降趋势,之后缓慢上升。在35~55 d,出水 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_2^-$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N浓度趋于稳定且去除率未再提升,分别为(24.9±0.8)、(3.4±1.8)、(14.5±

1.5)  $\text{mg/L}$ ,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率保持在  $(51 \pm 1)\%$ 。

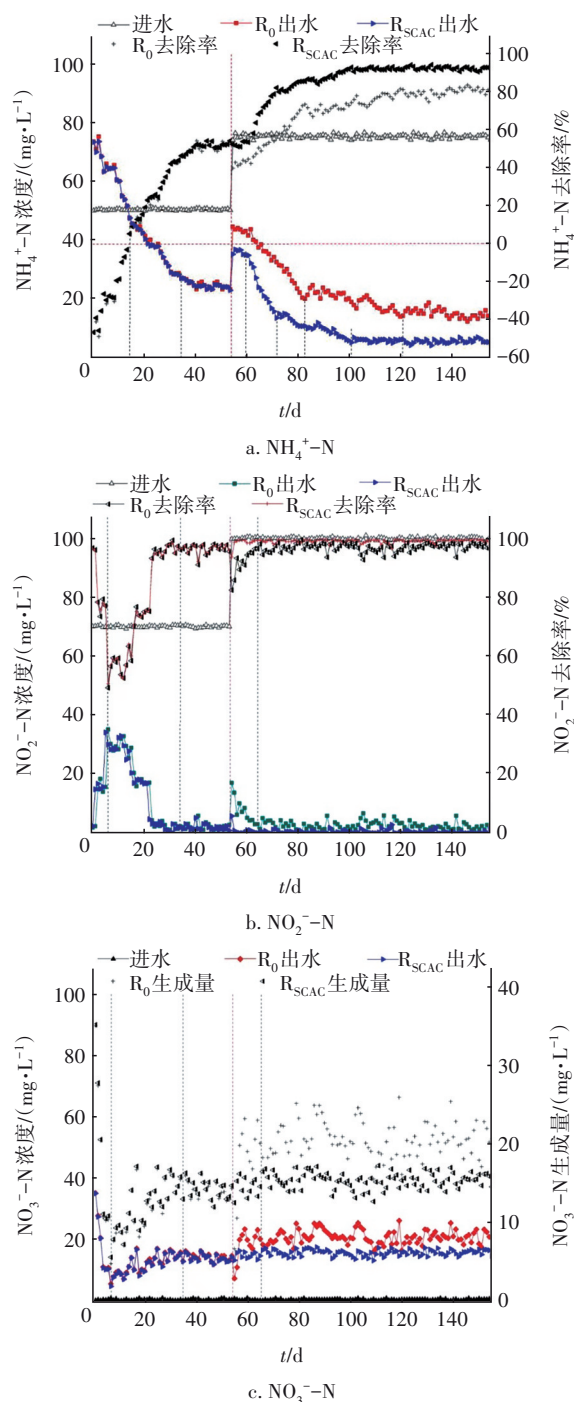


图1 两个反应器中氮浓度的变化

Fig.1 Change of nitrogen concentration in two reactors

反应初期,缺氧环境和亚硝酸盐的存在,有利于反硝化菌利用反应器内死亡微生物的裂解产物与生成的  $\text{NO}_3^--\text{N}$  进行异养反硝化,使得  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度下降,但  $\text{NO}_2^--\text{N}$  浓度快速上升;此时, AnAOB 活性受到抑制从而影响了 Anammox 的进行;同时,裂

解产物中的有机氮分解,导致  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度增加。之后随着有机物的减少,异养反硝化作用减弱,出水  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度上升,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度下降,说明反应器中 Anammox 逐渐占据主导,协同硝化、反硝化共同实现反应器中的脱氮及有机物去除过程,硝化作用消耗溶解氧,解除了溶解氧对 AnAOB 的抑制作用;反硝化产生  $\text{CO}_2$ ,为 Anammox 提供碳源;Anammox 产生  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,为反硝化提供电子受体。

### 2.1.2 SCAC对反应器脱氮性能的影响

第56天,向 R<sub>SCAC</sub> 中加入 1.0 g SCAC,同时提高两个反应器的进水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_2^--\text{N}$  浓度。此时, R<sub>SCAC</sub> 的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率为 52.4%,与提高负荷前基本一致,未受负荷冲击影响;但 R<sub>0</sub> 出水  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  浓度明显高于 R<sub>SCAC</sub>,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率降为 39.8% [见图 1(a)]; R<sub>0</sub> 和 R<sub>SCAC</sub> 出水  $\text{NO}_2^--\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度也受到影响,其中 R<sub>0</sub> 受到显著冲击,且恢复速率明显慢于 R<sub>SCAC</sub> [见图 1(b)和(c)]。之后, R<sub>SCAC</sub> 和 R<sub>0</sub> 的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率逐渐上升,且前者的上升速度显著高于后者;运行 101 d 后, R<sub>SCAC</sub> 的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率稳定在 94%, R<sub>0</sub> 的  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  去除率在 121 d 后稳定在  $(81 \pm 2)\%$ 。R<sub>SCAC</sub> 中的  $\text{NO}_2^--\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度在负荷改变后的前 2 d 受到冲击,之后  $\text{NO}_2^--\text{N}$  去除率很快恢复到 99%,  $\text{NO}_3^--\text{N}$  出水浓度稳定在  $(1 \pm 0.5) \text{ mg/L}$ ; R<sub>0</sub> 中的  $\text{NO}_2^--\text{N}$  和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  浓度在近 10 d 后才恢复到负荷改变前的水平,  $\text{NO}_2^--\text{N}$  去除率 (93%~98%) 和  $\text{NO}_3^--\text{N}$  生成量均有波动。

进水基质浓度升高后, R<sub>0</sub> 中的氨氮去除率下降明显且波动较大,上层漂浮有微生物死亡引起的白色与浅咖色絮状物质;而 R<sub>SCAC</sub> 中的氮素去除率变化不明显,  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\text{NO}_2^--\text{N}$  去除效果较高且稳定,明显优于 R<sub>0</sub>,说明 SCAC 的投加可增强 Anammox 反应器脱氮性能与抗负荷冲击能力。

### 2.1.3 Anammox的化学计量比

运行初期,由于反应器内菌种复杂以及菌体自溶, Anammox 的化学计量比 ( $\Delta \text{NH}_4^+-\text{N} : \Delta \text{NO}_2^--\text{N} : \Delta \text{NO}_3^--\text{N}$ ) 变化较大,故以第30天为节点,将图2(a)和(b)分为两部分。投加 SCAC 前 (1~55 d), 化学计量比在反应器运行至第14和15天时呈现偏差极大的两极点,之后,  $\Delta \text{NO}_2^--\text{N} / \Delta \text{NH}_4^+-\text{N}$  和  $\Delta \text{NO}_3^--\text{N} / \Delta \text{NH}_4^+-\text{N}$  逐渐减小,化学计量比在  $1 : (2.43 \sim 2.81) : (0.43 \sim 0.63)$  区间波动。

第56天投加 SCAC 后, R<sub>0</sub> 与 R<sub>SCAC</sub> 的化学计量比



因进水负荷增加而变化,之后,二者的 $\Delta\text{NO}_2^-/\text{N}$ / $\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和 $\Delta\text{NO}_3^-/\text{N}/\Delta\text{NH}_4^+-\text{N}$ 值都呈下降趋势,向理论值靠近。 $R_{\text{SCAC}}$ 的化学计量比在第98天趋于稳定,为1:1.40:0.25,接近理论值1:1.32:0.26;在此期间, $R_0$ 的化学计量比波动范围较大,为1:(1.53~1.78):(0.27~0.44)。化学计量比接近理论值,说明 $R_{\text{SCAC}}$ 和 $R_0$ 中的Anammox均已占据主导地位,且 $R_{\text{SCAC}}$ 的性能明显优于 $R_0$ 。

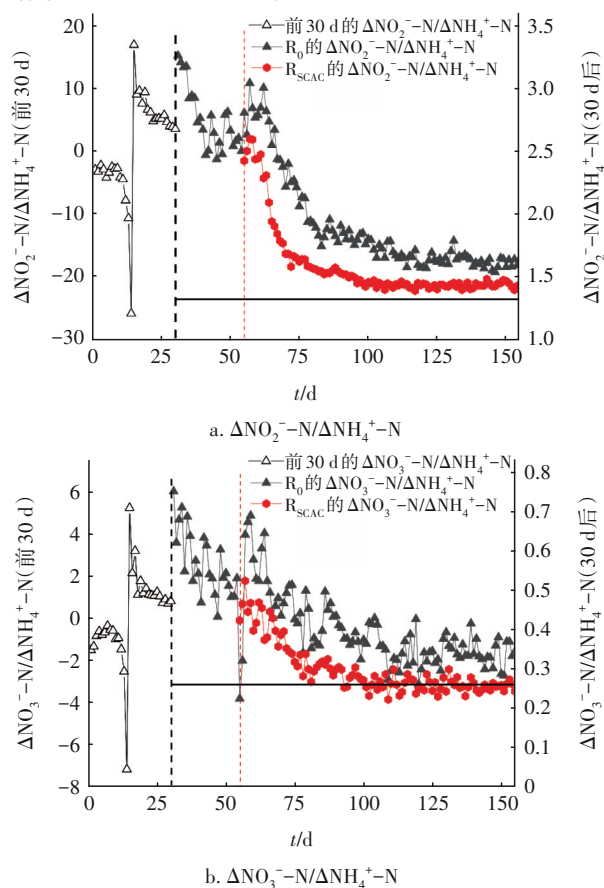


图2 两个反应器中Anammox的化学计量比变化

Fig.2 Change in stoichiometric ratio of Anammox in two reactors

## 2.2 EPS变化

接种污泥中的EPS含量为 $(39.04 \pm 0.97)$  mg/gVSS,投加SCAC后运行100 d,测得 $R_0$ 和 $R_{\text{SCAC}}$ 中活性污泥的EPS含量分别为 $(44.23 \pm 1.41)$ 、 $(69.41 \pm 2.13)$  mg/gVSS, $R_{\text{SCAC}}$ 中污泥的EPS增加量比 $R_0$ 高出约25 mg/gVSS。有研究表明,载体表面粗糙度、进水基质浓度、反应器污泥培养时间等都会影响EPS的分泌<sup>[11]</sup>。 $R_0$ 和 $R_{\text{SCAC}}$ 中污泥EPS含量的差异与SCAC的投加有关,SCAC提高了微生物富集能力,并增强了抗负荷冲击能力。

PN在接种污泥、 $R_0$ 和 $R_{\text{SCAC}}$ 污泥EPS中的占比分别为71%、75%、85%,是活性污泥EPS中的主要成分。 $R_0$ 中PN、PS含量分别为 $(33.52 \pm 1.31)$ 、 $(10.71 \pm 0.10)$  mg/gVSS, $R_{\text{SCAC}}$ 中PN、PS含量分别为 $(59.29 \pm 1.98)$ 、 $(10.12 \pm 0.15)$  mg/gVSS。相较于接种污泥[PN、PS含量分别为 $(28.08 \pm 0.86)$ 、 $(10.96 \pm 0.11)$  mg/gVSS], $R_0$ 和 $R_{\text{SCAC}}$ 中PS含量变化不大,但 $R_{\text{SCAC}}$ 中PN增加量是 $R_0$ 的近6倍。另外,接种污泥、 $R_0$ 和 $R_{\text{SCAC}}$ 污泥的PN/PS分别为2.56、3.16和5.86, $R_{\text{SCAC}}$ 中PN/PS是 $R_0$ 的近2倍。PN在Anammox污泥颗粒化过程中起关键作用,PN/PS值的升高可增强微生物的相对疏水性,促进Anammox颗粒污泥的形成<sup>[12]</sup>。SCAC的投加使得污泥EPS中的PN含量呈倍数增加,PS含量变化不大,PN/PS值也呈倍数上升,这与邓东坤等<sup>[13]</sup>的研究结果相似,但EPS的增长量与接种污泥及处理工艺有关。

## 2.3 机理分析

污泥、煤矸石及SCAC的SEM照片见图3。在20 000倍的放大倍数下观察到,污泥与煤矸石表面平整光滑,没有孔隙;而SCAC表面粗糙,呈现凹凸不平和不规则的孔隙结构。与污泥、煤矸石相比,SCAC发生钝化现象,有明显海绵状突起,具备良好的捕获和吸附性能,更利于微生物附着生长。

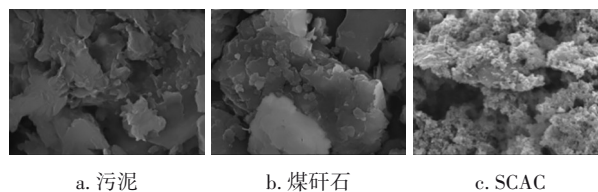


图3 污泥、煤矸石及SCAC的SEM照片

Fig.3 SEM pictures of sludge, coal gangue and SCAC

污泥、煤矸石和SCAC的比表面积与孔容积测定结果见表1。

表1 污泥、煤矸石与SCAC的比表面积与孔容积

Tab.1 Specific surface area and pore volume of sludge, coal gangue and SCAC

项目	BET/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	微孔比表面积/(m <sup>2</sup> ·g <sup>-1</sup> )	总孔容/(m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	微孔孔容/(m <sup>3</sup> ·g <sup>-1</sup> )	吸附平均孔径/nm
污泥	2.17	1.37	0.019	0.011	11.30
煤矸石	3.77	1.91	0.010	0.005	6.05
SCAC	146.25	16.19	0.084	0.064	2.75

由表1可知,相比污泥和煤矸石,SCAC的微孔比表面积、总孔容和微孔孔容均明显增加。SCAC

的BET为146.25 m<sup>2</sup>/g,分别是污泥与煤矸石的67和39倍。SCAC较大的比表面积和发达的孔隙结构有助于吸附溶质、富集微生物。

污泥、煤矸石与SCAC的孔径分布与红外光谱如图4所示。

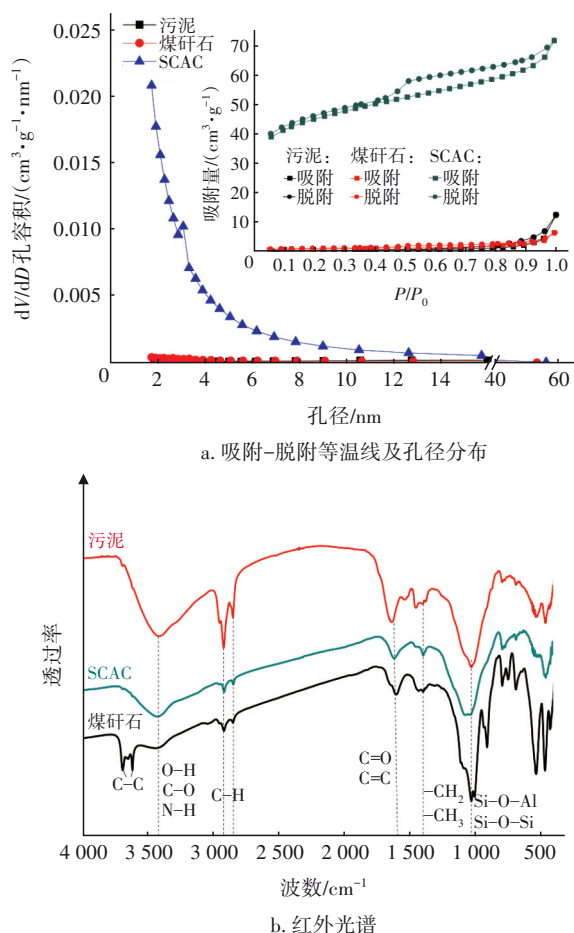


图4 污泥、煤矸石与SCAC的孔径分布与红外光谱  
Fig.4 Pore size distribution and FTIR spectrum of sludge, coal gangue and SCAC

由图4(a)可知,SCAC的吸附容量、孔容积结构明显优于原材料,是微介孔混合吸附剂。由图4(b)可知,煤矸石中的C—C(3 650~3 600 cm<sup>-1</sup>),污泥中的饱和C—H(2 922、2 852 cm<sup>-1</sup>)、—CH<sub>2</sub>和—CH<sub>3</sub>(1 457 cm<sup>-1</sup>)及C=O和C=C(1 623 cm<sup>-1</sup>),在SCAC的红外光谱图中大多消失。3 429 cm<sup>-1</sup>处为酚羟基、醇羟基、羧酸中O—H和C—O或N—H的多分子官能团<sup>[14]</sup>,SCAC在此处的峰型变弱。1 048 cm<sup>-1</sup>处代表Si—O—Al或Si—O—Si,其峰型的高低主要与样品中Si元素的含量有关<sup>[15]</sup>。红外光谱的变化说明,污泥与煤矸石中的部分有机质被分解或转化为SCAC中的其他形式,如SCAC中的C—N(1 400 cm<sup>-1</sup>

处附近)。经活化脱水后原材料中的水分得以去除,余下部分含氧官能团,含氧官能团可促进微生物分泌EPS,从而有效促进AnAOB的富集<sup>[16]</sup>,其中的微量有机物可促进Anammox反应。由于传统的Anammox是致碱反应,含氧官能团中的酸性物质还可起到缓冲作用,有效提高反应器的抗负荷冲击能力。SCAC以Si、C元素作为骨架支撑,为富集AnAOB,吸附NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N和NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N提供了有利条件。

### 3 结论

① 投加SCAC有利于Anammox反应器的稳定运行。投加SCAC后运行45 d,反应器中的化学计量比(ΔNH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:ΔNO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N:ΔNO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)为1:1.40:0.25,与理论值更接近,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N去除率明显提高,可达到94%,NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N去除率高达99%,脱氮性能显著增强。

② 投加SCAC后运行100 d,与未投加SCAC的反应器相比,污泥的EPS含量提高了近57%,其中PN含量为59.29 mg/gVSS,增加了近1倍,PS含量变化不大,PN/PS值提升了近1倍,说明微生物的疏水性增强,有利于减少微生物流失。

③ SCAC为海绵状的微孔结构,可为微生物提供大量附着空间;其表面的含氧官能团可促进EPS的分泌,并能有效提高反应器的抗冲击负荷能力;同时,其以Si、C元素作为骨架支撑,有利于富集微生物和吸附氮污染物。

### 参考文献:

- [1] 陈重军,冯宇,汪瑶琪,等.厌氧氨氧化反应影响因素研究进展[J].生态环境学报,2016,25(2):346-352.  
CHEN Chongjun, FENG Yu, WANG Yaoqi, et al. Research progress in influence factor of Anammox reaction [J]. Ecology and Environment Sciences, 2016, 25(2): 346-352 (in Chinese).
- [2] LIU X, WANG D, ZHANG W. Rapid start-up of anammox reactor using granular sludge supported on activated carbon [J]. Global Nest Journal, 2020, 22(3): 289-296.
- [3] FENG X H, WANG X J, CHEN Z G, et al. Nitrogen removal from iron oxide red wastewater via partial nitrification-Anammox based on two-stage zeolite biological aerated filter [J]. Bioresource Technology, 2019, 279(1): 17-24.

- [4] GU W C, WANG L S, LIU Y C, *et al.* Anammox bacteria enrichment and denitrification in moving bed biofilm reactors packed with different buoyant carriers: performances and mechanisms [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 719(1): 137277.
- [5] ZHANG Z Z, CHENG Y F, ZHOU Y H, *et al.* Roles of EDTA washing and  $\text{Ca}^{2+}$  regulation on the restoration of Anammox granules inhibited by copper (II) [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 301: 92–99.
- [6] RIOS-DEL TORO E E, CERVANTES F J. Anaerobic ammonium oxidation in marine environments: contribution to biogeochemical cycles and biotechnological developments for wastewater treatment [J]. *Reviews in Environmental Science & Biotechnology*, 2019, 18(1): 11–27.
- [7] 朱兰保, 盛蒂, 马莉, 等. 污泥活性炭去除废水 COD 工艺研究 [J]. *长春师范大学学报(自然科学版)*, 2020, 39(10): 113–116, 126.
- ZHU Lanbao, SHENG Di, MA Li, *et al.* Study on the process of removing COD from wastewater by sludge activated carbon [J]. *Journal of Changchun Normal University (Natural Science)*, 2020, 39(10): 113–116, 126 (in Chinese).
- [8] 崔明日, 甄强, 布乃敬. 富含石英煤矸石制备 13X 型分子筛-活性炭及其对  $\text{SO}_2$  的吸附性能 [J]. *功能材料*, 2015, 17: 17123–17126.
- CUI Mingri, ZHEN Qiang, BU Naijing. Preparation of 13X zeolite/activated carbon composite from quartz abundant coal gangue and their adsorption capability on  $\text{SO}_2$  [J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 17: 17123–17126 (in Chinese).
- [9] 李石, 邢亚彬, 孙慧, 等. 污泥基活性炭制备改性及其吸附甲苯性能 [J]. *化工进展*, 2020, 39(6): 2463–2471.
- LI Shi, XING Yabin, SUN Hui, *et al.* Preparation and modification of sludge based activated carbon and their performance of toluene adsorption [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(6): 2463–2471 (in Chinese).
- [10] ARAUJO J C, CAMPOS A C, CORREA M M, *et al.* Anammox bacteria enrichment and characterization from municipal activated sludge [J]. *Water Science and Technology*, 2011, 64(7): 1428–1434.
- [11] SHENG G P, YU H Q, LI X Y. Extracellular polymeric substances (EPS) of microbial aggregates in biological wastewater treatment systems: a review [J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(6): 882–894.
- [12] 杨明明, 刘子涵, 周杨, 等. 厌氧氨氧化颗粒污泥 EPS 及其对污泥表面特性的影响 [J]. *环境科学*, 2019, 40(5): 2341–2348.
- YANG Mingming, LIU Zihan, ZHOU Yang, *et al.* Extracellular polymeric substances of Anammox granular sludge and its effects on sludge surface characteristics [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5): 2341–2348 (in Chinese).
- [13] 邓东坤, 刘杰, 范奎. 厌氧氨氧化的启动特性研究 [J]. *节能*, 2020, 39(5): 71–73.
- DENG Dongkun, LIU Jie, FAN Kui. Study on the characteristic of the Anammox reactor starting up [J]. *Energy Conservation*, 2020, 39(5): 71–73 (in Chinese).
- [14] 朱红, 李虎林, 欧泽深, 等. 不同煤阶煤表面改性的 FTIR 谱研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2001, 30(4): 366–370.
- ZHU Hong, LI Hulin, OU Zeshen, *et al.* Study on surface modification of different rank coals by using FTIR [J]. *Journal of China University of Mining and Technology*, 2001, 30(4): 366–370 (in Chinese).
- [15] MERABTENE M, KACIMI L, CLASTRES P. Elaboration of geopolymer binders from poor kaolin and dam sludge waste [J]. *Heliyon*, 2019, 5(6): e01938.
- [16] SIMA X F, WANG Y Y, SHEN X C, *et al.* Robust biochar-assisted alleviation of membrane fouling in MBRs by indirect mechanism [J]. *Separation and Purification Technology*, 2017, 184: 195–204.

作者简介: 朱薇(1996–), 女, 山西太原人, 硕士研究生, 研究方向为污水处理技术。

E-mail: wei1996.wei@qq.com

收稿日期: 2022-05-13

修回日期: 2022-10-11

(编辑: 刘贵春)