



沸石联合生物工艺在污水脱氮领域的最新研究进展

张天意^{1,2}, 康鹏飞^{2,3}, 万俊锋^{1,2}

(1. 郑州大学生态与环境学院, 河南郑州 450001;

2. 河南省环境与资源国际联合实验室, 河南郑州 450001;

3. 郑州大学化工学院, 河南郑州 450001)

[摘要] 沸石作为良好的吸附材料, 被广泛用于污水脱氮处理领域。最新研究表明, 沸石联合微生物工艺具有低能耗和高效脱氮的特点。在沸石联合微生物处理工艺中, 沸石作为氨氮存储介质和微生物载体可增加系统脱氮功能菌生物量, 提升脱氮效率; 沸石生物可再生性与疏松多孔的结构特点易于实现氨氧化菌的富集和对亚硝态氮氧化菌的抑制, 从而实现反应器内的短程硝化; 将沸石运用至厌氧氨氧化工艺之中, 可促进厌氧氨氧化反应的稳定运行与其功能细菌的富集。基于此, 总结了沸石在硝化、短程硝化、厌氧氨氧化以及反硝化过程中的作用及其主要作用机理, 综述了沸石在不同生物脱氮工艺中的应用研究进展, 最后对沸石联合微生物工艺应用的发展方向进行了展望。

[关键词] 沸石; 短程硝化; 厌氧氨氧化; 反硝化; 生物再生

[中图分类号] X17; X703 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1005-829X(2022)03-0009-07

Latest research progress of zeolite coupled with biological process in wastewater denitrification

ZHANG Tianyi^{1,2}, KANG Pengfei^{2,3}, WAN Junfeng^{1,2}

(1. School of Ecology and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;

2. Henan International Joint Laboratory of Environment and Resources, Zhengzhou 450001, China;

3. School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Zeolite, as the ideal adsorptive materials, has been widely used in the treatment of nitrogen polluted wastewater. Recent studies show that zeolite coupled with biological process can efficiently remove nitrogen with low energy consumption. Zeolite, as an ammonia nitrogen storage medium and biomass carrier, can increase the biomass of functional bacteria and improve the nitrogen removal efficiency in the combined zeolite microbial process. The bio-regeneration and porous structure of zeolite are easy to realize the enrichment of ammonia oxidizing bacteria and the inhibition of nitrite nitrogen oxidizing bacteria, so as to achieve the formation of partial nitrification reaction in the reactor. The application of zeolite in anammox process can promote the stable operation of anammox reaction and the enrichment of functional bacteria. Based on these, it was firstly summarized that the function and the main mechanisms of zeolite in nitrification, partial nitrification, anammox and denitrification in biological processes. Furthermore, the application and research progress of zeolite in different biological denitrification processes was reviewed. Finally, The development direction of zeolite combined microbial process was prospected.

Key words: zeolite; partial-nitrification; anammox; denitrification; bio-regeneration

随着我国社会经济的不断发展, 工业废水与生物之一, 因此, 对水体中氨氮的去除成为水处理领域活污水产生量逐年增加。由于氨氮是水体主要污染研究的重点与热点^[1]。沸石是一种具有独特多孔结

[基金项目] 国家自然科学基金项目(21107100); 河南省科技攻关项目(212102110030)

构的天然材料,其三维骨架中存在的大量孔隙和空穴决定了沸石具有较强的吸附性能和离子交换能力^[2]。因沸石价格低廉、易于取材,其常作为氨氮吸附剂,在污水处理领域广泛应用。有研究表明,沸石可以与活性污泥等生物处理工艺相结合,实现系统脱氮效率的提升与功能细菌的富集^[3-4]。因此,沸石作为天然材料在强化生物脱氮工艺方面具有极大的应用前景。

1 沸石对脱氮功能微生物的作用

传统的生物脱氮反应主要通过好氧环境中的氨氧化菌(Ammonia Oxidizing Bacteria, AOB)、硝化菌(Nitrite Oxidizing Bacteria, NOB)以及缺氧环境中的反硝化菌(Denitrifying Bacteria, DNB)完成,而厌氧氨氧化菌(Anaerobic Ammonium Oxidation Bacteria, Anammox Bacteria)可在厌氧条件下使亚硝态氮与氨氮直接反应生成氮气。在沸石与微生物联合脱氮工艺中,投加沸石会改变脱氮功能菌的丰度,如表1所示。

表1 沸石对生物脱氮功能菌的影响

Table 1 The effect of zeolite on biological denitrification functional bacteria

功能菌	微生物(属水平)	丰度趋势	作用机理	参考文献
AOB	<i>Nitrosomonas</i>	+	离子交换与生物富集	[5-7]
	<i>Nitrosococcus</i>	+	离子交换与生物富集	[5]
	<i>Nitrosovibrio</i>	+	离子交换与生物富集	[5]
NOB	<i>Nitrospira</i>	+	离子交换与生物富集	[6,8]
	<i>Nitrospira</i>	-	游离氨(FA)抑制	[4,9]
	<i>Nitrospina</i>	+	离子交换与生物富集	[6]
	<i>Nitrobacter</i>	+	离子交换与生物富集	[10]
	<i>Nitrobacter</i>	-	FA抑制	[4,9]
DNB	<i>Thauera</i>	+	生物富集	[11-13]
	<i>Flavobacterium</i>	+	生物富集	[12,14]
	<i>Acinetobacter</i>	+	生物富集	[13-14]
	<i>Gemmibacter</i>	+	生物富集	[14]
	<i>Acidovorax</i>	+	生物富集	[14]
	<i>Hydrogenophaga</i>	+	生物富集	[14]
Anammox bacteria	<i>Candidatus Jettenia</i>	+	离子交换与生物富集	[15]
	<i>Candidatus Kuenenia</i>	+	离子交换	[16]

注:“+”表示菌种丰度增加,“-”表示菌种丰度降低。

Yongyuan YANG等^[4]以沸石作为生物曝气滤池反应器填料,长期运行结果表明,反应器内AOB富集效果显著,Nitrosomoadaceae(科水平)丰度由1.5%升至61.6%。Peng XU等^[6]研究发现,以沸石为基质的人工湿地系统中,NOB的丰度高于其他材料搭建

的湿地系统。将沸石应用于序批式反应器并长期运行,结果证明,沸石促进了反硝化菌 *Thauera* 等丰度的升高^[11]。Zhenfeng HAN等^[13]采用沸石作为人工湿地基质填料,检测结果表明, *Thauera*、*Acinetobacter* 丰度显著提升。Zi SONG等^[12]将沸石复合聚氨酯海绵作为移动床生物膜反应器反硝化工艺填料,结果表明,相比于单一聚氨酯海绵填料系统,沸石复合填料系统中反硝化菌 *Thermomonas*、*Thauera*、*Brevundimonas* 以及 *Flavobacterium* 的丰度明显上升。Yuan-sheng PEI等^[15]研究发现,以沸石作为填料的人工湿地系统中,厌氧氨氧化反应得到增强;进一步检测发现,其厌氧氨氧化菌丰度高于其他填料系统。沸石联合厌氧氨氧化工艺长期运行结果显示,厌氧氨氧化系统中 Planctomycetes、Proteobacteria(门水平)等菌属被富集,在属水平方面 *Candidatus Kuenenia* 菌属被富集^[16]。

沸石对不同菌属微生物将产生不同的影响。部分菌种在投加沸石后存在被抑制的现象。Yongyuan YANG等^[4,9]的研究表明,以沸石为填料的生物曝气滤池长期运行后,菌种 *Nitrospira* 与 *Nitrobacter* 丰度降低。

2 沸石在生物脱氮工艺中的作用机理

沸石在生物脱氮工艺中的作用机理包含以下几种途径:(1)沸石作为离子交换剂可与氨氮发生离子交换反应;(2)沸石具有的多孔结构使其成为良好的生物载体;(3)沸石可改善脱氮工艺的反应条件。

沸石作为离子交换剂,具有储存氨氮的特性。在低浓度氨氮条件下,沸石可将自身结构中的Na⁺置换为水体中的NH₄⁺,形成局部富氮微环境,为硝化菌提供反应底物;体系中的硝化菌氧化沸石表面的氨氮,促使沸石形成新的吸附位点,完成沸石的生物再生,并最终实现硝化菌的富集^[17]。相较于天然沸石,将单位氨氮吸附量更高的改性沸石作为序批式反应器中的填料会使 *Nitrosomonas* 丰度更高(从15.04%提升至18.26%)^[5],这也证实了沸石吸附氨氮形成的富氮环境是沸石能够富集AOB与NOB的重要条件^[7]。

沸石与氨氮发生离子交换反应是形成短程硝化的主要原因。通过控制沸石系统的进水氨氮负荷,改变沸石与氨氮反应动态平衡,使系统FA浓度始终

处于对 NOB 的抑制范围,即可实现短程硝化工艺的稳定运行^[4]。Yongyuan YANG 等^[4]的研究证实,采用沸石为填料的生物曝气滤池反应器内的 FA 质量浓度始终高于 0.1 mg/L,长期运行将导致 NOB 丰度的下降。

沸石易被微生物附着是其能够强化脱氮的又一主要原因。由于沸石具有疏松多孔的结构特性,沸石联合微生物工艺系统的污泥浓度大大增长,极大地解决了脱氮功能菌由于水流与气流冲刷而流失的问题,达到强化生物脱氮的目的^[18]。

沸石对反应条件的改善有利于提高脱氮效率。在沸石体系中,沸石对重金属离子等有害物质的吸附,可以减轻重金属离子等有害物质对脱氮功能菌的毒性。具有储存氨氮特性的沸石在高氨氮水体中可改善硝化菌反应条件,降低 FA 对硝化菌的抑制作用^[10],实现系统脱氮性能的提升。

3 沸石在传统硝化反硝化工艺中的应用

3.1 沸石在硝化工艺中的应用

投加沸石至活性污泥中,可以使活性污泥拥有更高的硝化反应速率。Yunxia WEI 等^[3]向序批式反应器内投加粉状沸石,活性污泥附着在沸石表面形成沸石生物絮体,使得反应器内亚硝态氮与硝态氮的生成速率由 10.0 mg/(L·h) 提升至 13.5 mg/(L·h)。沸石在厌氧阶段对氨氮的快速吸附与好氧阶段污泥絮体氧化被沸石富集的氨氮是系统拥有更高硝化速率的原因。

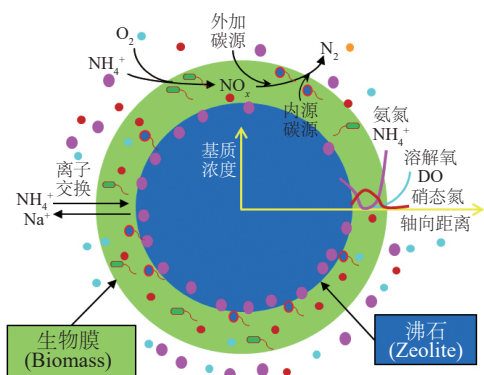
沸石可提升生物硝化反应性能。A. A. FORBIS-STOKES 等^[19]分别采用生物炭、活性炭、沸石、鲍尔环以及砾石作为滴滤床介质对氨氮废水进行处理,实验结果表明,沸石滴滤床去除氨氮效果最优,其氨氮去除率可达 85%。W. S. CHANG 等^[20]研究了以沸石、砂粒和活性炭为填料的生物曝气滤池系统的硝化性能。经氮元素质量守恒分析表明,沸石介质中同时存在离子交换、硝化和细胞合成等不同的去除氨氮途径,以沸石为填料的生物曝气滤池系统的脱氮性能最优。B. HUNTER 等^[21]在利用不同填充材料搭建硝化滴滤池实验中发现,沸石填料的脱氮性能最优;随着系统的运行,沸石滴滤床的出水硝态氮浓度高于其他材料,证实投加沸石有利于强化硝化反应。

投加沸石后系统污泥浓度得到提升。Mengzi WANG 等^[22]将沸石投加至生物反应器中,发现系统的悬浮生物量被提升;体系的污泥质量浓度可达到 1 577.2 mg/L,增加了 34.2%。Zi SONG 等^[12]的研究表明,同单一聚氨酯海绵相比,沸石复合聚氨酯海绵填料的系统生物量更高,在接种期能够更好地防止污泥絮体被冲刷;且沸石粉末提升了复合生物载体的比表面积,有利于污泥絮体的固定。Jinlan XU 等^[23]通过将沸石投加至硝化菌菌种液制备生物沸石,实验结果证实,硝化细菌能够在沸石表面大量富集,沸石作为生物载体表现出富集硝化菌的优越性能。

3.2 沸石在反硝化工艺中的应用

投加沸石可以提升反硝化系统的污泥浓度。S. MONTALVO 等^[24]研究发现,沸石可提升反硝化系统的微生物多样性以及污泥浓度,投加沸石后,上流式厌氧污泥床反应器反硝化速率得到提升,运行稳定性增强。S. J. PARK 等^[25]的研究证实,投加沸石粉末可提升缺氧活性污泥系统中的混合液悬浮物浓度 (MLVSS),即使在低碳氮比条件下,有机物自溶作用也会使反应器存在大量潜在的反硝化碳源,可被反硝化菌有效利用。Zi SONG 等^[12]将沸石粉末联合聚氨酯海绵复合材料应用于同时硝化反硝化工艺中,并研究了该复合材料对系统反硝化性能的影响。结果表明,沸石的加入增大了聚氨酯海绵的比表面积,使反硝化菌更易附着在复合材料表面;沸石阻断了聚氨酯海绵的孔道,加之生物膜厚度的增加,共同阻碍了溶解氧的扩散,而不断增大的氧气浓度梯度最终促使反硝化菌不断快速增殖;由于复合填料系统具有较多的悬浮生物量,致使复合填料系统中反硝化菌的代谢速率快于传统海绵载体,最终实现反硝化反应性能的提升。沸石良好的微生物载体功能与其生物可再生特性实现了同时硝化反硝化反应的进行,其反应机理如图 1 所示。由于氧气无法完全穿透以沸石为载体所形成的生物膜系统,膜内部的反硝化菌利用反硝化聚糖微生物细胞内储存的有机碳实现氮元素的去除^[26-27]。

沸石可以改善反硝化反应条件。S. MONTALVO 等^[28]将沸石与上流式厌氧污泥床反应器联合应用于含氮废水的处理,并对反应器内自养反硝化工艺的启动进行了研究。研究表明,相较于未投加沸石



图例: 硝化菌(AOB, NOB) 反硝化菌(DNB)
氨氮 氧气 硝态氮 氮气

图1 同时硝化反硝化工艺生物膜结构示意图

Fig. 1 Biofilm structure diagram of simultaneous nitrification and denitrification process

的反应器,相同条件下投加沸石的反应器中未发生亚硝态氮积累的反应环境,减轻了亚硝态氮对反硝化菌的抑制作用,从而使反硝化系统启动速率和脱氮率得以提升。

4 沸石在短程硝化-厌氧氨氧化工艺中的应用

4.1 沸石在短程硝化工艺中的应用

短程硝化反应通过抑制 NOB 并利用 AOB 氧化氨氮,达到亚硝态氮积累的目的^[29]。短程硝化反应是在投入低能耗与低碳源条件下完成污水脱氮的关键步骤。

采用沸石可成功实现系统短程硝化。Yongyuan YANG 等^[4]采用沸石作为生物曝气滤床填料,成功实现了系统短程硝化反应。沸石颗粒与 NH_4^+ 发生离子交换反应,解决了由于反应曝气阶段的吹脱作用以及 AOB 对氨氮的氧化作用所导致的 FA 浓度难以控制的难题,通过沸石对溶液中 FA 的动态调控实现了对 NOB 的抑制和短程硝化反应的稳定运行。

以沸石作为填料,系统更易形成短程硝化反应。Zhenguo CHEN 等^[30]的研究表明,沸石作为生物固定床填料在低浓度氨氮条件下仍可形成短程硝化反应。沸石填料吸附氨氮提供的富氨微环境与沸石的生物再生特性是实现系统短程硝化反应快速启动与稳定运行的主要原因。

具有较强离子交换能力的沸石可改善反应条

件,从而强化短程硝化反应。Qiang LI 等^[31]采用质量分数为 5% 的 NaCl 溶液对沸石进行改性,并在对含氮废水的处理中用其作为生物曝气滤池的填料。经检测发现,生物膜上的 AOB 占总菌落数的 47.9%, *Nitrosomonas* 在 AOB 和总菌落中占据主导地位,亚硝态氮积累率进一步得到提升。Jing CHEN 等^[32]利用粉煤灰合成沸石,由此强化了沸石对氨氮的吸附能力。该合成沸石在满足抑制 NOB 浓度的条件下,通过降低水体中 FA 的浓度为 AOB 提供了更为优越的反应条件。

将部分研究者的研究成果进行了归纳比较,见表 2。

表 2 投加沸石的不同生物脱氮反应器的短程硝化性能

Table 2 Partial nitrification performance of different biological denitrification reactors in the presence of zeolite

反应器类型	氨氮去除率/%	亚硝态氮积累率/%	氨氮负荷/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$)	参考文献
序批式反应器	95	90	—	[33]
生物曝气滤池	91~96	>90	1.67~2.19	[7]
序批式反应器	66~80	95	—	[5]
生物固定床	90~94	95	—	[9]
生物曝气滤池	40~85	98	0.10~1.02	[4]
生物曝气滤池	50~90	94	1.23~1.46	[16]
序批式反应器	35~55	96	1.20	[11]
序批式反应器	—	98	0.23~1.86	[34]
序批式反应器	40~100	90	—	[35]

4.2 沸石在厌氧氨氧化工艺中的应用

厌氧氨氧化是在厌氧条件下,以亚硝态氮为电子受体,将氨氧化成氮气的一种新型脱氮工艺^[36]。

沸石与 NH_4^+ 发生离子交换反应,并与生物反应相结合,使出水亚硝态氮与氨氮的化学计量数比值稳定为 1.15,从而实现厌氧氨氧化工艺的稳定运行^[36]。采用沸石-厌氧氨氧化系统处理污水厂二级出水,由于沸石对氨氮的吸附作用和生物氧化氨氮的循环效应为系统提供了自我再生能力,实现了厌氧氨氧化工艺的长期运行^[37]。

沸石作为良好的生物载体,可富集厌氧氨氧化菌。R. COLLISON 等^[37]选取沸石作为滴滤池填料去除水中氨氮。滴滤池在第 6 周出现厌氧氨氧化现象,表明在脱氮反应过程中沸石有利于厌氧氨氧化菌的富集。

沸石可优化厌氧氨氧化工艺的反应条件。Xinghui FENG 等^[38]搭建曝气沸石床前置于全程自养脱

氮系统,旨在提升厌氧氨氧化工艺对废水的处理效果。在进水溶解氧质量浓度为 6.5 mg/L 时,利用生物曝气滤池的硝化作用,系统仍发生厌氧氨氧化反应,且沸石与微生物结合系统所具有的吸附-解吸作用组成有效的铵缓冲体系,减轻了高浓度氨氮与

高强度曝气对厌氧氨氧化菌的冲击。

5 沸石联合微生物组合工艺的应用

沸石联合微生物工艺可应用于多种类型废水的处理,见表 3。

表 3 沸石联合微生物工艺在不同污水处理中的应用
Table 3 Application of zeolite combined microbial process in different wastewater treatment

反应器类型	污水来源	COD 负荷/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	氨氮负荷/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{d}^{-1}$)	水力停留 时间/h	COD 去除率/%	氨氮 去除率/%	总氮 去除率/%	参考 文献
生物曝气滤池	垃圾渗滤液	9.63~16.84	1.67~2.19	5.36~8.85	50~56	91~95	65~84	[7]
生物滤池联合膜生物反应器	焦化废水	0.41~0.44	0.04	73.60	83~89	88~99	—	[10]
生物曝气滤池	低浓度氨氮模拟废水	0.09	0.13	0.41	12.64	64.56	—	[39]
生物固定床联合陶粒滤床	低浓度氨氮模拟废水	0.03	—	24.00	—	91~96	—	[8]
生态浮床	受污染自然水体	—	—	—	—	—	71	[40]

沸石联合微生物系统在高浓度有机废水处理中可实现稳定脱氮。Zhenguo CHEN 等^[7]利用沸石生物曝气滤池处理具有高 COD 的垃圾渗滤液,结果表明,沸石填料对进水氨氮可起到良好的缓冲作用,可有效维持适宜的 FA 范围,实现系统稳定脱氮。Xiaobiao ZHU^[10]等采用沸石生物滤池与膜生物反应器的组合工艺对焦化废水进行处理,其稳定的氨氮去除率表明,沸石提升了系统抗氨氮负荷的能力;第 58 天和第 389 天的取样测试结果显示,AOB 和 NOB 产生积累,这表明沸石生物滤床在处理高浓度有机废水时仍可稳定脱氮。

沸石联合微生物系统可提升低浓度氨氮条件下反应器的脱氮效率。J. S. KIM 等^[39]对比研究了沸石与聚丙烯材料为基质的生物曝气滤池在低氨氮浓度下的硝化性能。结果表明,当进水氨氮为 3 mg/L 时,以沸石为载体的反应器的氨氮去除率可达 $(63.38\pm 4.08)\%$,而采用聚丙烯为载体的反应器的氨氮去除率为 $(3.79\pm 3.13)\%$,且未发现硝态氮生成。

利用沸石耦合微生物系统可增强硝化反应对低温条件的抵抗能力。Jing CHEN 等^[8]的研究表明,在 8℃条件下,氨氮质量浓度为 30~37 mg/L 的进水经沸石生物固定床—陶粒生物好氧过滤联合工艺处理后,出水氨氮质量浓度为 1.5~2.5 mg/L。该联合工艺可作为低温条件下氨氮废水的处理工艺。Shengbin HE 等^[41]的研究表明,在温度为 7~10℃时,以沸石作为填料的生物滤池的氨氮去除率可达到 81.06%,高于采用膨润土作为填料的生物滤池的氨氮去除率 (65.42%) 。

反应器长期稳定运行情况下,沸石能够提升系统内微生物抗进水氨氮冲击负荷的能力。Mengzi WANG 等^[22]的研究表明,在系统长期稳定运行后,改变进水氨氮浓度,沸石联合微生物工艺系统能够快速恢复至原有运行性能。取出沸石后的系统抗进水氨氮冲击负荷能力仍高于未投加沸石的对照系统。

6 结语与展望

沸石的多孔结构和生物相容性可实现生物反应系统内部微生物的富集,能够很好地解决脱氮功能菌富集难、容易流失的问题。沸石表面形成的富氮微环境是生物反应系统硝化菌丰度提升的重要原因。通过沸石调控系统中游离氨浓度可以保证短程硝化工艺的稳定运行,为后续的厌氧氨氧化工艺提供保障。

有关沸石在生物脱氮领域的应用,未来仍需在沸石与生物膜之间的相互影响、沸石对功能微生物的代谢途径影响等方面开展研究,开发基于沸石的新型脱氮工艺,从而更好地促进沸石在污水脱氮领域中的应用。

参考文献

[1] HUANG Haiming, XIAO Xianming, YAN Bo, et al, Ammonium removal from aqueous solutions by using natural Chinese (Chende) zeolite as adsorbent[J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175 (1/2/3): 247~252.
[2] JI Zhiyong, YUAN Junsheng, LI Xingang. Removal of ammonium from wastewater using calcium form clinoptilolite[J]. Journal of Haz-

- ardous Materials, 2007, 141(3):483-488.
- [3] WEI Yunxia, LI Yanfeng, YE Zhengfang. Enhancement of removal efficiency of ammonia nitrogen in sequencing batch reactor using natural zeolite [J]. Environmental Earth Sciences, 2009, 60(7): 1407-1413.
- [4] YANG Yongyuan, CHEN Zhenguo, WANG Xiaojun, et al. Partial nitrification performance and mechanism of zeolite biological aerated filter for ammonium wastewater treatment [J]. Bioresource Technology, 2017, 241:473-481.
- [5] CHEN Jing, WANG Ruixin, WANG Xiaojun, et al. Response of nitrification performance and microbial community structure in sequencing biofilm batch reactors filled with different zeolite and alkalinity ratio[J]. Bioresource Technology, 2019, 273:487-495.
- [6] XU Peng, XIAO Enrong, HE Feng, et al. High performance of integrated vertical-flow constructed wetland for polishing low C/N ratio river based on a pilot-scale study in Hangzhou, China[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(22):22431-22449.
- [7] CHEN Zhenguo, WANG Xiaojun, CHEN Xiaokun, et al. Pilot study of nitrogen removal from landfill leachate by stable nitrification-denitrification based on zeolite biological aerated filter [J]. Waste Management, 2019, 100:161-170.
- [8] CHEN Jing, WANG Xiaojun, ZHOU Songwei, et al. Effect of alkalinity on bio-zeolite regeneration in treating cold low-strength ammonium wastewater via adsorption and enhanced regeneration [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2019, 26(27):28040-28051.
- [9] CHEN Zhenguo, ZHENG Xuwen, CHEN Yongxing, et al. Nitrite accumulation stability evaluation for low-strength ammonium wastewater by adsorption and biological desorption of zeolite under different operational temperature [J]. Science of the Total Environment, 2020, 704:135260.
- [10] ZHU Xiaobiao, TIAN Jinping, LIU Cong, et al. Composition and dynamics of microbial community in a zeolite biofilter-membrane bioreactor treating coking wastewater [J]. Applied Microbiology Biotechnology, 2013, 97(19):8767-8775.
- [11] WANG Ruixin, WANG Xiaojun, DENG Cuilan, et al. Partial nitrification performance and microbial community in sequencing batch biofilm reactor filled with zeolite under organics oppression and its recovery strategy [J]. Bioresource Technology, 2020, 305: 123031.
- [12] SONG Zi, ZHANG Xinbo, NGO H H, et al. Zeolite powder based polyurethane sponges as biocarriers in moving bed biofilm reactor for improving nitrogen removal of municipal wastewater [J]. Science of the Total Environment, 2019, 651:1078-1086.
- [13] HAN Zhenfeng, DONG Jing, SHEN Zhiqiang, et al. Nitrogen removal of anaerobically digested swine wastewater by pilot-scale tidal flow constructed wetland based on in-situ biological regeneration of zeolite [J]. Chemosphere, 2019, 217:364-373.
- [14] LIU Lina, LI Na, ZHAO Yubo, et al. Nitrogen removal performance and bacterial communities in zeolite trickling filter under different influent C/N ratios [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2021, 28:15909-15922.
- [15] PEI Yuansheng, WANG Jun, WANG Ziyuan, et al. Anammox bacteria community and nitrogen removal in a strip-like wetland in the riparian zone [J]. Journal of Environmental Science and Health: Part A, 2011, 46(7):715-722.
- [16] FENG Xinghui, WANG Xiaojun, CHEN Zhenguo, 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, 279:17-24.
- [17] SKLENIČKOVÁ K, KOLOUSEK D, PEČENKA M, et al. Application of zeolite filters in fish breeding recirculation systems and their effect on nitrifying bacteria [J]. Aquaculture, 2020, 516: 734605.
- [18] MONTALVO S, HUILIÑIR C, BORJA R, et al. Application of zeolites for biological treatment processes of solid wastes and wastewaters: A review [J]. Bioresource Technology, 2020, 301:122808.
- [19] FORBIS-STOKES A A, ROCHA-MELOGNO L, DESHUSSES M A. Nitrifying trickling filters and denitrifying bioreactors for nitrogen management of high-strength anaerobic digestion effluent [J]. Chemosphere, 2018, 204:119-129.
- [20] CHANG W S, TRAN H T, PARK D H, et al. Ammonium nitrogen removal characteristics of zeolite media in a biological aerated filter (BAF) for the treatment of textile wastewater [J]. Journal of Industrial and Engineer Chemistry, 2009, 15(4):524-528.
- [21] HUNTER B, DESHUSSES M A. Resources recovery from high-strength human waste anaerobic digestate using simple nitrification and denitrification filters [J]. Science of the Total Environment, 2020, 712:135509.
- [22] WANG Mengzi, SCHIDEMAN L, LU Haifeng, et al. Zeolite-amended microalgal-bacterial system in a membrane photobioreactor for promoting system stability, biomass production, and wastewater treatment efficiency to realize environmental-enhancing energy paradigm [J]. Journal of Applied Phycology, 2018, 31(1): 335-344.
- [23] XU Jinlan, ZHANG Haiyang, ZHAO Rong, et al. Enhanced bacterial quorum aggregation on a zeolite capping layer for sustainable inhibition of ammonium release from contaminated sediment [J]. Water Science and Technology, 2017, 76(11/12):3428-3440.
- [24] MONTALVO S, GUERRERO L, ROBLES M, et al. Start-up and performance of UASB reactors using zeolite for improvement of nitrate removal process [J]. Ecological Engineering, 2014, 70:437-445.
- [25] PARK S J, KIM C G, YOON T I, et al. Evaluation of increased denitrification in an anoxic activated sludge using zeolite [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2003, 20(3):492-495.
- [26] CHENG Liang, FLAVIGNY R M G, HOSSAIN M L, 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.
- [27] HOSSAIN M I, CHENG Liang, CORD-RUWISCH R. Energy efficient COD and N-removal from high-strength wastewater by a passively aerated GAO dominated biofilm [J]. Bioresource Technology, 2019, 283: 148-158.
- [28] MONTALVO S, HUILIÑIR C, GÁLVEZ D, et al. Autotrophic denitrification with sulfide as electron donor: Effect of zeolite, organic matter and temperature in batch and continuous UASB reactors [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2016, 108: 158-165.
- [29] BROCKMANN D, MORGENROTH E. Evaluating operating conditions for outcompeting nitrite oxidizers and maintaining partial nitrification in biofilm systems using biofilm modeling and Monte Carlo filtering [J]. Water Research, 2010, 44(6): 1995-2009.
- [30] CHEN Zhenguo, WANG Xiaojun, CHEN Xiaozhen, et al. Nitrogen removal via nitrification pathway for low-strength ammonium wastewater by adsorption, biological desorption and denitrification [J]. Bioresource Technology, 2018, 267: 541-549.
- [31] LI Qiang, SUN Shifang, GUO Tingfeng, et al. Short-cut nitrification in biological aerated filters with modified zeolite and nitrifying sludge [J]. Bioresource Technology, 2013, 136: 148-154.
- [32] CHEN Jing, WANG Xiaojun, CHEN Zhenguo, et al. Application of a synthetic zeolite as a storage medium in SBRs to achieve the stable partial nitrification of ammonium [J]. Environmental Science: Water Research and Technology, 2019, 5(2): 287-295.
- [33] CHEN Zhenguo, WANG Xiaojun, YANG Yongyuan, et al. Partial nitrification and denitrification of mature landfill leachate using a pilot-scale continuous activated sludge process at low dissolved oxygen [J]. Bioresource Technology, 2016, 218: 580-588.
- [34] HU Haolin, DENG Cuilan, WANG Xiaojun, et al. Performance and mechanism of urea hydrolysis in partial nitrification system based on SBR [J]. Chemosphere, 2020, 258: 127228.
- [35] LV Yufeng, PAN Juejun, HUO Tangran, et al. Enhanced microbial metabolism in one stage partial nitrification-anammox system treating low strength wastewater by novel composite carrier [J]. Water Research, 2019, 163: 114872.
- [36] YAPSAKLI K, AKTAN C K, MERTOGLU B. Anammox-zeolite system acting as buffer to achieve stable effluent nitrogen values [J]. Biodegradation, 2017, 28(1): 69-79.
- [37] COLLISON R, GRISMER M. Upscaling the zeolite-anammox process: Treatment of anaerobic digester filtrate [J]. Water, 2018, 10(11): 1553.
- [38] FENG Xinghui, WANG Xiaojun, WANG Ruixin, et al. Zeolite biofilm aeration filter plays a pre-nitrification role in autotrophic nitrogen removal from iron oxide red wastewater [J]. Journal of Chemical Technology and Biotechnology, 2020, 95(12): 3261-3269.
- [39] KIM J S, LEE J Y, CHOI S K, et al. Nitrification of low concentration ammonia nitrogen using zeolite biological aerated filter (ZBAF) [J]. Environmental Engineering Research, 2019, 25(4): 554-560.
- [40] SONG Jia, LI Qian, WANG Xiaochang. Superposition effect of floating and fixed beds in series for enhancing nitrogen and phosphorus removal in a multistage pond system [J]. Science of the Total Environment, 2019, 695: 133678.
- [41] HE Shengbin, XUE Gang, KONG Hainan. The performance of BAF using natural zeolite as filter media under conditions of low temperature and ammonium shock load [J]. Journal of Hazardous Materials, 2007, 143(11/12): 291-295.
- 【作者简介】 张天意(1996—), 硕士研究生。E-mail: Zhangtyzzu@163.com。 通讯作者: 万俊锋, 博士, 副教授。E-mail: wanjunfeng@zzu.edu.cn。
- 【收稿日期】 2021-12-22(修改稿)

• 水处理知识讲座 •

同时具有缓蚀阻垢功能的共聚物有哪些?

冷却水系统中腐蚀和结垢都是同时存在,具有缓蚀阻垢两种功能的共聚物,无疑是有很大实用意义。主要的共聚物有:

(1) 不饱和多元酚/不饱和磺酸和(或)不饱和羧酸。

不饱和多元酚与不饱和磺酸和(或)不饱和羧酸单体所制得的共聚物是一种具有抑制水系统产生腐蚀、结垢和污垢的多功能单一药剂,给管理和操作带来很多方便。

(2) 缩水甘油醚(脂)和 α 、 β -不饱和羧酸的加成物/其他烯类单体。

这2种类型的单体共聚而成的共聚物,是一种具有抑制循环冷却水系统腐蚀、结垢和污垢的共聚物,它克服了过去冷却水系统的缓蚀阻垢配方所造成的环境二次污染问题。

(摘自《工业水处理技术问答及常用数据》)