

李文华, 程鹤来, 吕锡武. 农村生活污水处理的生物生态组合除臭工艺与机理[J]. 净水技术, 2022, 41(8):68-74.

LI W H, CHENG H L, LÜ X W. Deodorization process and mechanism of combined biological-ecological processes for rural domestic wastewater treatment[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(8):68-74.



扫我试试?

农村生活污水处理的生物生态组合除臭工艺与机理

李文华^{1,2}, 程鹤来^{1,2}, 吕锡武^{1,2,*}

(1. 东南大学能源与环境学院, 江苏南京 210096; 2. 无锡太湖水环境工程研究中心, 江苏无锡 214135)

摘要 在生物生态组合工艺处理农村生活污水过程中, 采用硝化液回流的方式控制臭味可进一步经济地提升农村人居环境。硫化物是生活污水处理过程中主要致臭物质之一, 文章通过小试规模试验对生物生态组合工艺生物单元中硫化物去除及脱氮除碳过程的影响因素和相关机理进行了探究。试验设置了温度、C/N 和 DO 这 3 个影响因素, 结果表明, 在较高环境温度下(25 ℃), 缺氧除臭单元内溶解性硫化物去除和脱氮除碳效能最佳; 体系中硫化物去除效率随 C/N 降低而显著提升, 当 C/N 为 2:1 时硫化物去除效率最高, 在 4 h 时可达 64.68%, 而此时硝酸盐和有机物的去除效率则相对稍低; 较高 DO 水平(质量浓度为 1.8~2.0 mg/L)可显著提高体系内硫化物去除效率, 有机物去除率也略有提升, 脱氮效率则会降低, 在 5 h 时, 硫化物、硝酸盐和 COD_{Cr} 的去除率分别达到 98.20%、60.13% 和 23.97%。

关键词 农村生活污水 生物生态工艺 硫化物 反硝化 除臭

中图分类号: X799.3 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)08-0068-07

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.08.010

Deodorization Process and Mechanism of Combined Biological-Ecological Processes for Rural Domestic Wastewater Treatment

LI Wenhua^{1,2}, CHENG Helai^{1,2}, LÜ Xiwu^{1,2,*}

(1. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Engineering Research Center of Taihu Lake Water Environment, Wuxi 214135, China)

Abstract In the process of rural domestic wastewater treatment by combined biological-ecological process, the use of nitrified liquid backflow to control the odor emission can further economically improve the quality of the ecological environment of rural human settlements. Sulfide is one of the main odor-causing substances in the domestic wastewater treatment process. In this paper, the influencing factors and related mechanisms of the sulfide, nitrogen and carbon removal process in the biological-ecological combination process were explored through a small-scale experiment. Three influencing factors of temperature, C/N and dissolved oxygen were set up in the test. The results showed that at a higher ambient temperature (25 ℃), the removal of dissolved sulfide, nitrogen and carbon in the anoxic deodorization unit was the highest. The sulfide removal efficiency increased significantly with the decrease of C/N. When the C/N was 2:1, the sulfide removal efficiency was the highest, which could reach 64.68% at 4 h, while the removal efficiency of nitrate and organic matter was relatively low. The removal efficiency of sulfide could be significantly improved at higher levels of DO (mass concentration of 1.8~2.0 mg/L), the removal rate of organic matter was also slightly improved, but the denitrification efficiency was reduced, in which condition, the removal rate of sulfide, nitrate and COD_{Cr} reached 98.20%, 60.13% and 23.97%, respectively at 5 h.

Keywords rural domestic sewage biological-ecological processes sulfide denitrification deodorization

[收稿日期] 2021-06-17

[基金项目] 国家水体污染控制与治理科技重大专项: 太湖运河高适应性村落生活污水处理技术集成与应用示范(2017ZX07202004-002)

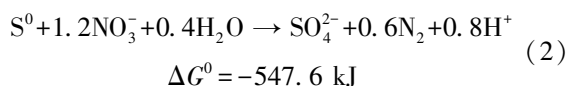
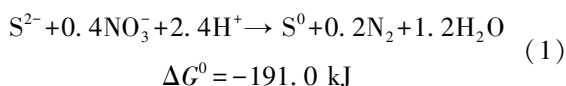
[作者简介] 李文华(1998—), 女, 硕士, 研究方向为农村污水处理, E-mail: 1085383864@qq.com。

[通信作者] 吕锡武(1954—), 男, 教授, 研究方向为水处理技术, E-mail: xiwulu@seu.edu.cn。

我国有超过 250 万个自然村和 8 亿农民^[1],且农村人口居住分散,排放面源大,加之农村目前缺少完善的排水渠和污水处理系统等设施,约 96% 的农村生活污水未经处理直接排放^[2-3],在很大程度上对附近的水系统造成严重的污染风险,进而对当地居民的健康产生负面影响^[4]。针对农村污水分布广泛、收集困难以及水质复杂多变的特点^[5],有学者提出了生物生态组合工艺处理农村分散式生活污水。采用生物生态组合工艺,是将污水中大部分有机污染物和难降解物质在生物处理单元进行去除,同时利用生态单元作为污染净化型农业实现氮、磷的去除和资源化利用^[6]。

目前,处理效果较好的有厌氧池-跌水充氧池-水生蔬菜型人工湿地等组合工艺,出水基本满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中的一级 A 标准^[7]。然而,该工艺存在生物单元地表构筑物散发臭味的问题,影响周围居民的生活环境,与当下农村人居环境整治行动的理念不符。因此,施丽君^[8]对其工艺进一步优化,提出了基于灰黑分离模式的厌氧-缺氧-水车驱动好氧生物转盘-人工湿地新型组合工艺,该工艺在原有的基础上增添缺氧池,采用硝化液回流的方式优化工艺来去除臭味,从而强化缺氧单元的除臭脱氮效果。

污水在厌氧条件下散发出的臭味物质主要由挥发性硫化物、氮化合物、挥发性有机化合物以及挥发性脂肪酸组成^[9]。臭气中的主要成分是 H₂S、NH₃ 和甲硫醇^[10],由于 NH₃ 易溶于水,很容易被吸收到水溶液体系中,可通过微生物硝化作用转化为亚硝酸盐和硝酸盐。H₂S 通常被认为是污水处理中臭气排放的主要贡献者^[11-12]。在农村污水处理过程中,H₂S 主要由有机硫化化合物的厌氧分解以及硫酸盐还原产生,且溶解态的硫化物会对下水道、生态系统和生物产生严重的腐蚀和毒害作用^[13]。近年来,在实际工程应用中采用反硝化工艺脱臭被认为是一种经济有效的 H₂S 控制方法。硝酸盐诱导脱除硫化物的生化相互作用及其机理涉及 N、S、C 元素的同步生物脱除,称为反硝化脱硫法 (DSR)。DSR 的生化途径如式 (1)~式 (2)^[14-15]。



通过 DSR 工艺实现同时脱氮、脱硫、脱碳的研究被广泛报道。郑美玲等^[16]通过调节回流比来提高缺氧池内除臭效果,当回流比为 200% 时,S²⁻ 的去除率可达 90.1%。徐峰等^[17]在温度为 10~15 °C 下采用生物生态组合工艺处理农村污水,取得了良好的脱氮除臭效果,生物单元对硫化物、臭阈值 (TON) 的去除率均高达 90% 以上,TN 去除率为 33.8%。

本文在新型生物生态组合工艺“厌氧-缺氧-水车驱动好氧生物转盘-人工湿地”的基础上,以组合工艺生物单元中的缺氧除臭池为主要研究对象,通过小试规模批次试验考察缺氧条件下硫化物的去除过程。并对去除过程的相关影响因素进一步探索,进而细化对反硝化脱臭工艺的理解,揭示反硝化脱氮除臭规律,为实现生物生态组合工艺地表构筑物处理农村污水无臭化提供理论参考。

1 试验材料和方法

1.1 试验装置

本缺氧反硝化移动床生物膜反应器 (MBBR) 小试装置采用有机玻璃材料制成,工艺流程如图 1 所示。反应器为圆柱结构,高为 40 cm,内径为 13 cm,总体积为 4.5 L,有效容积为 4.0 L。反应器中填料类型为立方体聚氨酯海绵,填充率为 30%,填料规格及相关参数如表 1 所示。顶部安装搅拌器使填料保持悬浮状态。反应器运行采用时间控制器进行控制,每天运行 3 个周期,每周期为 8 h,其中进水 10 min,运行 7 h 10 min,排水 10 min,闲置 30 min。反应器中溶解氧 (DO) 质量浓度控制在 0.5~1.0 mg/L,温度为 (25±2) °C。

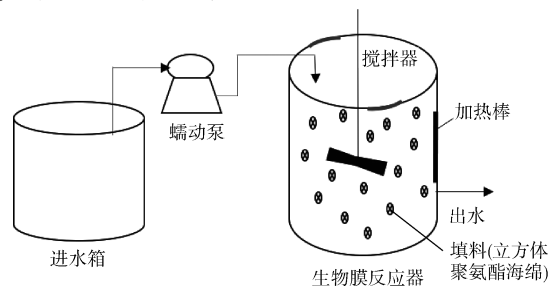


图 1 反硝化 MBBR 装置示意图
Fig. 1 Schematic Diagram of Denitrification MBBR Device

表 1 填料的性能参数

Tab. 1 Performance Parameters of Packings

名称	边长 /mm	孔隙率	密度 /(g·cm ⁻³)	比表面积 /(m ² ·m ⁻³)
立方体聚氨酯海绵	20	>90%	1	500

1.2 污泥接种和进水水质

反硝化 MBBR 接种污泥来自无锡市锡山污水处理厂 AAO 工艺缺氧池中的污泥,经驯化后混合液悬浮固体质量浓度 (MLSS) 为 4 g/L,采用快速排泥挂膜法启动挂膜。反应器进水采用人工模拟的合成废水,其中 COD_{Cr}(以醋酸钠为碳源)质量浓度为 180 mg/L,NO₃⁻-N、S²⁻、TP 质量浓度分别为 30、25、3 mg/L。微量元素配方如表 2 所示,每升配水添加 0.5 mL 微量元素浓缩液^[18],进水中适量补入 Na₂CO₃、NaHCO₃ 使废水 pH 值维持在 7.3 左右。在上述进水条件下,反硝化 MBBR 反应器经 20 d 成功启动,NO₃⁻-N 以及 COD_{Cr} 去除率均在 80% 以上,稳定运行后填料的挥发性固体 (VSS) 为 12.7 mg/cm³。

表 2 微量元素溶液组成

Tab. 2 Composition of Trace Element Solution

组成	质量浓度 /(g·L ⁻¹)	组成	质量浓度 /(g·L ⁻¹)
FeCl ₃ ·6H ₂ O	1.5	CuSO ₄ ·5H ₂ O	0.03
MnCl ₂ ·4H ₂ O	0.12	KI	0.18
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.15	ZnSO ₄ ·7H ₂ O	0.12
H ₃ BO ₃	0.15	EDTA	10
Na ₂ MoO ₄ ·2H ₂ O	0.06		

1.3 批次试验

在 250 mL 锥形瓶进行相关影响因素 (温度、C/N、DO) 的批次试验,进一步考察不同条件下硫化物去除过程。制备了初始质量浓度为 25 mg/L 的 Na₂S 溶液用于该批次试验,将 3 块填料与 215 mL 硫化物溶液在一定条件下 (搅拌速度为 120 r/min、pH 值为 7.2) 混合。试验组中不同影响因素的设立分别是温度 (5、15、25 °C)、C/N (2:1、3:1、4:1)、DO (0.2~0.4、1.8~2.0 mg/L)。试验过程中,锥形瓶内的 DO 含量通过小型气泵控制,使其维持在试验组所需 DO 水平,不同试验组中锥形瓶温度通过水浴加热的方式进行调控。最后,用注射器吸取不同

反应时间下的悬浮液,并通过 0.22 μm 滤膜 [混合纤维素 (MCE)] 过滤后进行测定。

1.4 硫化物溶液的制备及水质指标分析方法

Na₂S·9H₂O 因潮解而难以称量。将等份的 Na₂S·9H₂O 溶解在脱气的超纯水中,并用 1 mol/L 的 HCl 将 Na₂S 溶液的 pH 值调节至 7.2~7.3。最后,将 Na₂S 溶液稀释至合适的硫化物浓度,然后用作硫化物溶液。

水质指标采用文献^[19]中的方法进行测定。S²⁻ 含量测定采用亚甲基蓝分光光度法;COD 含量测定采用重铬酸钾法;NO₃⁻-N 含量测定采用紫外分光光度法;DO 含量采用 YSI-DO200 便携式溶氧仪测定。所用药品均为分析纯。试验数据采用 SPSS 18.0 软件进行统计分析。

2 结果和讨论

2.1 温度对除臭系统效能的影响

2.1.1 温度对硫化物去除的影响

温度作为污水处理过程中的重要影响因素,会对硫化物生物氧化过程产生一定影响^[8]。参考四季的实际温度,将批次试验的温度控制在 5、15、25 °C,DO 质量浓度控制在 0.5 mg/L 左右,研究缺氧条件下硫化物的具体去除过程,结果如图 2 所示。

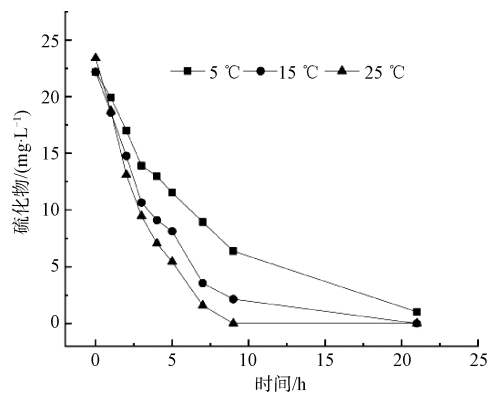


图 2 不同温度下硫化物的去除效果

Fig. 2 Sulfide Removal Efficiency under Different Temperatures

由图 2 可知,温度对硫化物的去除过程具有一定影响。在 3 种温度下,所有剂量的硫化物在 4 h 内被快速氧化,在温度为 5、15、25 °C 下达到的硫化物最低质量浓度分别为 12.98、9.11、7.06 mg/L。

此后硫化物去除速率开始减慢,25 °C 条件下,9 h 后硫化物得以完全去除,而在 5 °C 下反应 9 h 后的硫化物仍有一部分剩余,质量浓度为 6.38 mg/L。由此可见,缺氧条件下硫化物的去除过程受温度影响较大,造成这种影响的原因主要在于温度影响了生物膜的活性。研究表明,对于水处理微生物,温度越低,生物膜上微生物活性也会随之变差,进而影响污染物处理效果^[20]。温度对硫化物去除过程造成影响的主要原因可能是,水温降低,酶的催化作用减弱,硫化物氧化菌(SOB)的代谢能力下降,生化反应速率也随之降低。

2.1.2 温度对体系脱氮性能以及 COD_{Cr} 的影响

在 DSR 过程中,往往涉及 N、S、C 元素的同步去除。不同温度下体系内硝酸盐含量及 COD_{Cr} 变化趋势如图 3 所示。由图 3(a)可知,温度对体系中硝酸

盐去除有一定影响,硫化物在低温时消耗速率较慢,同样,5 °C 下硝酸盐的去除率低于 15 °C 和 25 °C 下硝酸盐的去除率。同时,在 1 h 内硝酸盐消耗速率较为缓慢,这可能是因为锥形瓶中仍具有一定的 DO,一些 SOB 优先利用 O₂ 为电子受体^[21]。待 O₂ 消耗一定程度后,体系内则主要进行以硝酸盐为电子受体的反应。

另外,由于自养型和异养型反硝化菌均积极参与 DSR 过程,故体系内的 COD_{Cr} 也有一定消耗。如图 3(b)所示,不同温度条件下 COD_{Cr} 的变化趋势与硝酸盐变化趋势相似。在温度为 25 °C 时,体系内微生物活性较好,4 h 后体系内 COD_{Cr} 质量浓度为 40 mg/L,去除率达到 60.26%。体系内 COD_{Cr} 的下降主要是因为异养反硝化菌利用乙酸盐为碳源,将其代谢成 CO₂。

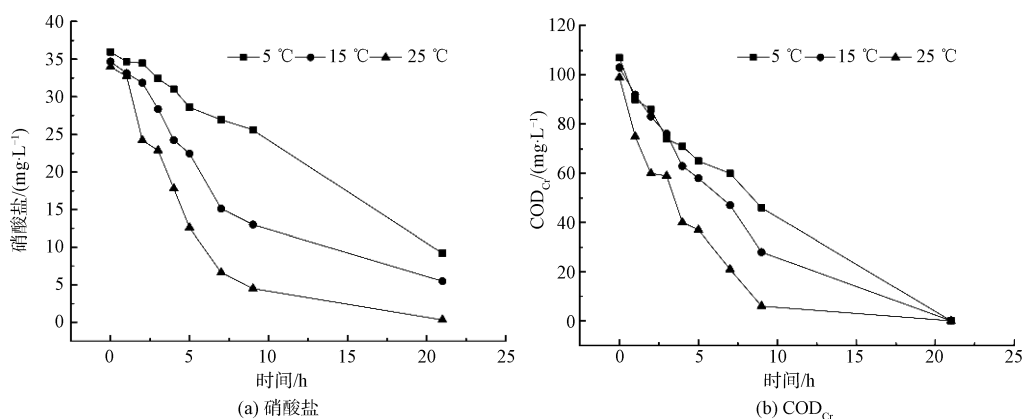


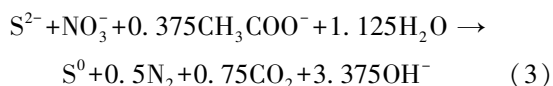
图 3 不同温度下体系内硝酸盐及 COD_{Cr} 去除效果

Fig. 3 Nitrate and COD_{Cr} Removal Efficiency in System under Different Temperatures

2.2 C/N 对除臭系统效能的影响

2.2.1 C/N 对硫化物去除的影响

影响 N、S 同步脱除的因素主要有 C/N、N/S 等。Chen 等^[22]采用 DSR 工艺强化硫化物去除性能时发现,在不同 N/S 条件下,硫化物去除过程时间演变相似,故批次试验选取不同 C/N 条件进行考察。DSR 的生物化学反应过程如式(3),该反应中 C 和 N 的化学计量比为 3:4,考虑乙酸的易分解特性和农村生活污水水质特征,试验设置了 C/N = 2:1、3:1、4:1 这三组高 C/N 作为影响因素。



由图 4 可知,在 C/N = 2:1 的情况下,硫化物去除速率在 0~4 h 阶段较快,在第 4 h 去除率达到 64.68%,此后硫化物去除速率逐渐减慢,9 h 后硫化物质量浓度为 0.77 mg/L,去除率达到 97.02%。在 C/N = 3:1、4:1 时,硫化物的去除率在 4 h 时分别达到 56.47%、43.02%,且随着 C/N 的增加,硫化物去除速率逐渐减慢。这可能是不同 C/N 条件下体系内的异养反硝化菌和自养脱硫反硝化菌的竞争导致的^[23],随着有机碳源供应的增加,异养反硝化菌的生长加速,自养脱硫反硝化菌生长减缓,体系内以碳源为电子供体还原 NO₃⁻ 为 N₂ 的反应占优势,以 S²⁻ 为电子供体还原 NO₃⁻ 的脱硫过程受到抑制,从而导致硫化物的去除效率下降。

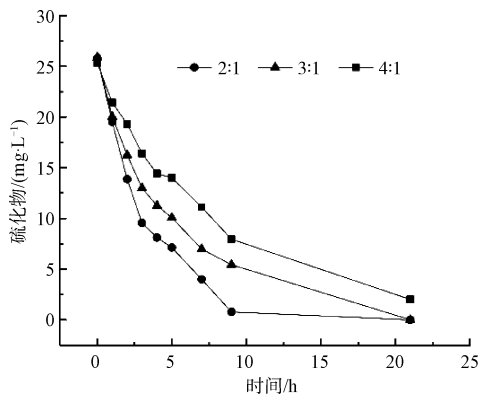
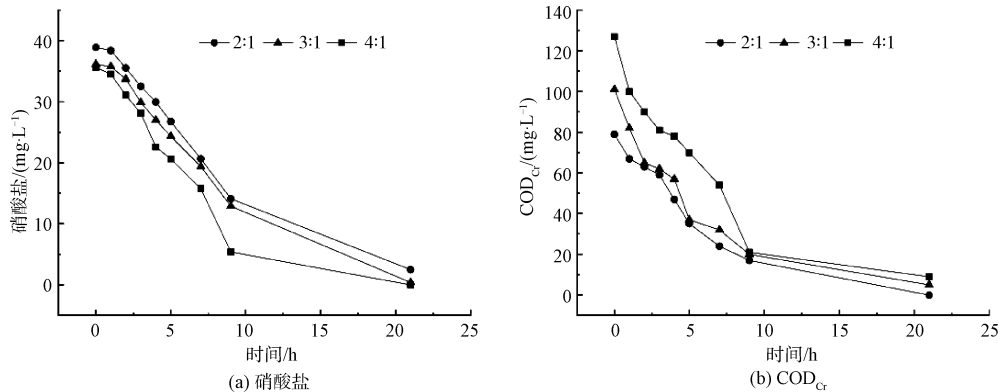


图4 不同C/N下硫化物的去除效果

Fig. 4 Sulfide Removal Efficiency under Different C/N

2.2.2 C/N对体系脱氮性能以及 COD_{Cr} 的影响

不同C/N下硫化物去除过程中体系内硝酸盐和 COD_{Cr} 浓度随时间变化趋势如图5所示。由图5(a)可知,不同C/N条件下,体系内硝酸盐浓度下降趋势亦有所不同。硝酸盐去除率随C/N增加而提高,且在前4h硝酸盐浓度下降速率较快,随后减缓,这与硫化物去除速率变化规律类似(图4);当

图5 不同C/N下体系内硝酸盐及 COD_{Cr} 去除效果Fig. 5 Nitrate and COD_{Cr} Removal Efficiency under Different C/N

2.3 DO对除臭系统效能的影响

实际工况下,缺氧池中DO水平会受气压、温度、回流液等多种因素影响,而DO会显著影响微生物的生长代谢,同时对硫化物具有氧化作用,故DO浓度也是影响体系脱氮除臭效能的重要因素之一。在生物生态组合工艺^[6]中,好氧单元产生的硝化液和剩余DO回流至缺氧池,使缺氧池DO浓度升高,故试验探究了0.2~0.4 mg/L和1.8~2.0 mg/L两个DO质量浓度对体系除臭效能的影响。

C/N=2:1、3:1、4:1时,4 h内硝酸盐去除率分别为22.99%、25.28%、35.63%;21 h后体系内硝酸盐去除率均达90.00%以上。该现象表明,在同等温度气压条件下,较高C/N时,碳源充足的情况下,体系内异养反硝化菌活性较强,式(3)的吉布斯自由能变增加,即 $\Delta G < 0$ 且 $|\Delta G|$ 较大,反应更易进行,故硝酸盐去除速率与去除率较高;而低C/N时,有机碳源不足,体系内异养反硝化菌活性较弱,自养SOB成为优势菌种,故硝酸盐去除速率和去除率均有所下降。

COD_{Cr} 浓度变化趋势如图5(b)所示,不同C/N条件下, COD_{Cr} 浓度下降速率相似,但体系 COD_{Cr} 去除率略有不同,C/N越高, COD_{Cr} 去除率越高,当C/N=2:1、3:1、4:1时,9 h内 COD_{Cr} 去除率分别为78.48%、80.2%、83.46%。这是由于高C/N时,体系有机碳源充足,异养反硝化菌活性较强,而异养菌更倾向于利用有机物进行生物代谢^[22],故此情况下 COD_{Cr} 去除率较高。这也可以解释高C/N条件下硫化物去除率与去除速率较低的现象。

2.3.1 DO对硫化物去除的影响

不同DO水平对硫化物去除趋势的影响如图6所示。较高DO水平下,硫化物去除效率明显高于缺氧环境,当体系DO质量浓度在1.8~2.0 mg/L时,硫化物浓度下降速率在前5h均保持在较高水平,硫化物去除率在3h时为76.7%,5h时达到98.20%;当体系DO质量浓度在0.2~0.4 mg/L时,硫化物浓度下降速率在前3h较快,随后减缓,硫化物去除率在3h时为54.25%,9h时为84.23%。这是因为SOB属于微好氧型化能自养菌,在DO水平

较高条件下活性增强^[24],需要大量还原态硫化物以获得自身细胞生长和代谢所需的能量。故在 DO 浓度较高的体系内,硫化物去除效能较好。

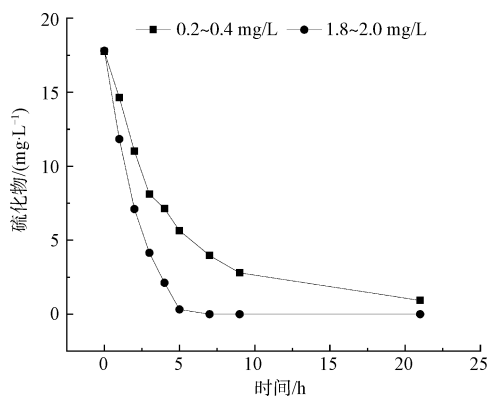


图 6 不同 DO 条件下硫化物的去除效果

Fig. 6 Sulfide Removal Efficiency under Different DO Conditions

2.3.2 DO 对体系脱氮性能以及 COD_{Cr} 的影响

不同 DO 条件下硫化物去除过程中体系内硝酸盐和 COD_{Cr} 浓度随时间变化趋势如图 7 所示。由图 7(a)可知,两种 DO 水平下,硝酸盐浓度在前 2 h 内下降趋势相似,随后出现差异。在较高 DO 水平下,硝酸盐去除速率在 3 h 后明显减缓,去除率在 5 h 达到 60.13%,9 h 时达到 87.82%;而在缺氧条件下,

硝酸盐去除速率前 5 h 内较快,其去除率在 5 h 时达到 84.58%,在 9 h 时达到 97.74%。该现象表明,前 2 h 内,缺氧环境中的微生物群落还未适应较高 DO 水平,体系内反硝化细菌活性较强,所以两种 DO 水平体系中硝酸盐浓度下降趋势在前 2 h 内相似。2 h 后,高 DO 水平逐渐使体系内 SOB 开始利用 O₂ 作为电子受体进行硫化物的氧化,活性增强,抑制了反硝化细菌的生长,故高 DO 水平体系中硝酸盐去除效率降低。这一过程为生物生态组合工艺中的脱臭提供了改进的思路,即适当加大好氧段硝化液回流至缺氧池的回流比,在提高缺氧池 DO 水平、增强脱臭效能的同时,尽可能多地保留生物段出水硝酸盐含量,从而加强后续生态单元氮、磷资源化利用效率。

体系 COD_{Cr} 浓度变化趋势如图 7(b)所示,不同 DO 浓度条件下,COD_{Cr} 浓度下降速率相似,但过程中 COD_{Cr} 去除率略有不同。高 DO 水平下,COD_{Cr} 在 5 h 时的去除率为 23.97%,21 h 时去除率达到 65.52%,低于在缺氧条件下 21 h 时去除率 (73.55%)。这是由于高 DO 水平下,体系内 SOB 活性较强,为优势菌种,抑制了反硝化菌(异养型兼性厌氧菌)的生长^[25],从而降低了有机物的消耗量,故在高 DO 水平下的 COD_{Cr} 去除率低于缺氧环境。

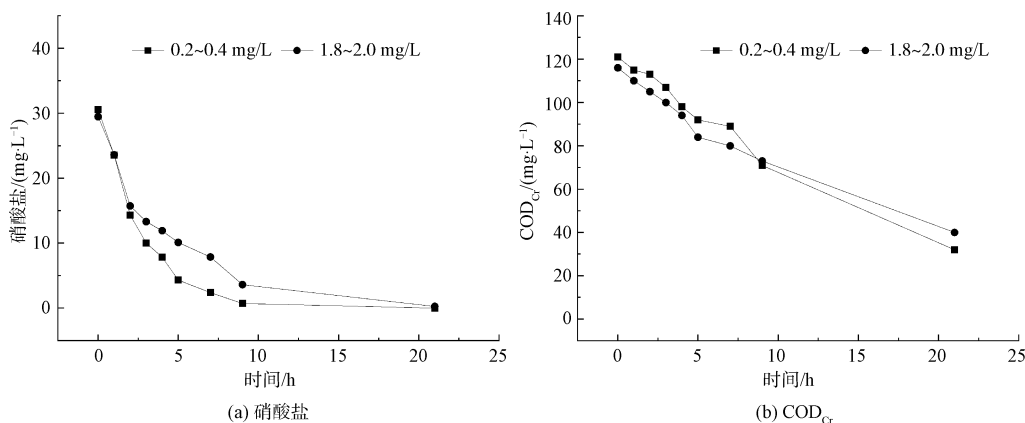


图 7 不同 DO 条件下体系内硝酸盐及 COD_{Cr} 去除效果

Fig. 7 Nitrate and COD_{Cr} Removal Efficiency in the System under Different DO_{Cr} Conditions

3 结论

(1)温度对体系效能影响显著,较高的环境温度会增强 SOB 活性,从而达到较好的除臭效能,温度越高,缺氧体系中硝酸盐和 COD_{Cr} 的去除效果也

越好。

(2)不同 C/N 会影响体系硫化物去除、脱氮和有机物降解效能,其主要原因是有机碳源的供应会改变体系内自养/异养微生物种群的结构。体系内

C/N 越低,硫化物去除效率越高,硝酸盐和有机物去除效率越低。

(3)DO 会影响体系内微生物的生长与代谢,同时对硫化物也有氧化作用,故对体系除臭效能影响较大,较高 DO 质量浓度下(1.8~2.0 mg/L)的硫化物去除效率明显高于缺氧条件(0.2~0.4 mg/L),硝酸盐去除效率在较高 DO 条件下则较低,而有机物去除效率区别不大。

参考文献

- [1] HAN Y P, MA J W, XIAO B Y, et al. New integrated self-refluxing rotating biological contactor for rural sewage treatment [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 217: 324–334. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.276.
- [2] 孙瑞敏. 我国农村生活污水排水现状分析[J]. *能源与环境*, 2010(5): 33–34, 42.
- [3] LI Y H, JIA L R, WU W H, et al. Urbanization for rural sustainability-Rethinking China's urbanization strategy [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 178: 580–586. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.12.273.
- [4] XIA D, GAO L R, ZHENG M H, et al. Health risks posed to infants in rural China by exposure to short- and medium-chain chlorinated paraffins in breast milk [J]. *Environment International*, 2017, 103: 1–7. DOI: 10.1016/j.envint.2017.03.013.
- [5] GUO X, LIU Z, CHEN M, et al. Decentralized wastewater treatment technologies and management in Chinese villages[J]. *Frontiers of Environmental Science & Engineering*, 2014, 8(6): 929–936.
- [6] 吕锡武. 可持续发展的农村生活污水生物生态组合治理技术[J]. *给水排水*, 2018, 54(12): 1–5.
- [7] 刘文涛, 吴磊, 吕锡武, 等. 生物生态耦合技术处理农村生活污水的应用研究 [J]. *环境监控与预警*, 2012, 4(1): 46–9.
- [8] 施丽君. 灰黑分离式生物生态组合工艺及脱氮性能优化研究 [D]. 南京: 东南大学, 2018.
- [9] BARBUSINSKI K, KALEMBA K, KASPERCZYK D, et al. Biological methods for odor treatment-A review [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 152: 223–241. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.093.
- [10] LIN S, MACKEY H R, HAO T W, et al. Biological sulfur oxidation in wastewater treatment: A review of emerging opportunities [J]. *Water Research*, 2018, 143: 399–415. DOI: 10.1016/j.watres.2018.06.051.
- [11] PANG B W, JIANG C H, YEUNG M, et al. Removal of dissolved sulfides in aqueous solution by activated sludge: Mechanism and characteristics [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 324: 732–738. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2016.11.048.
- [12] TIAN X M, SHEN Z Q, HAN Z F, et al. The effect of extracellular polymeric substances on exogenous highly toxic compounds in biological wastewater treatment: An overview [J]. *Bioresource Technology Reports*, 2019, 5: 28–42. DOI: 10.1016/j.biteb.2018.11.009.
- [13] REN B M, ZHAO Y Q, LYCZKO N, et al. Current status and outlook of odor removal technologies in wastewater treatment plant [J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2019(6): 1443–1458.
- [14] SHUANG L, LIANG Z, FENG J. Indirect sulfur reduction via polysulfide contributes to serious odor problem in a sewer receiving nitrate dosage [J]. *Water Research*, 2016, 100: 421–428. DOI: 10.1016/j.watres.2016.05.036.
- [15] GANG G, EKAMA G A, WANG Y Y, et al. Advances in sulfur conversion-associated enhanced biological phosphorus removal in sulfate-rich wastewater treatment: A review [J]. *Bioresource Technology*, 2019, 285: 121303. DOI: 10.1016/j.biortech.2019.03.142.
- [16] 郑美玲, 吕锡武, 王永谦. 硝化液回流比对生物生态组合工艺脱氮除臭效果的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(5): 630–634.
- [17] 徐峰, 吕锡武. 生物生态组合工艺处理生活污水同步脱氮除臭研究 [J]. *水处理技术*, 2015, 41(11): 74–78.
- [18] 李寒. 同步硝化反硝化与反硝化除磷耦合强化脱氮除磷微生物特性研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- [19] 魏友盛. 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: 139–282.
- [20] PAOLO M. A sludge biotic index (SBI) for the evaluation of the biological performance of activated sludge plants based on the microfauna analysis [J]. *Water Research*, 1994, 28(1): 67–75.
- [21] FUQIANG F, RONGHUA X, DEPENG W, et al. Application of activated sludge for odor control in wastewater treatment plants: Approaches, advances and outlooks [J]. *Water Research*, 2020, 181: 115915. DOI: 10.1016/j.watres.2020.115915.
- [22] CHEN C, ZHANG R C, XU X J, et al. Enhanced performance of denitrifying sulfide removal process at high carbon to nitrogen ratios under micro-aerobic condition [J]. *Bioresource Technology*, 2017, 232: 417–422. DOI: 10.1016/j.biortech.2017.02.031.
- [23] 史旋. 硫自养/异养反硝化协同脱氮运行效能及作用机制研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
- [24] LUCIE K, JAN B, NINA K, et al. Microaeration for hydrogen sulfide removal in UASB reactor [J]. *Bioresource Technology*, 2014, 172: 297–302. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.09.056.
- [25] RICARDO B C, TEXIER A C, ÁNGEL A S, et al. Phenol and sulfide oxidation in a denitrifying biofilm reactor and its microbial community analysis [J]. *Process Biochemistry*, 2008, 44(1): 23–28. DOI: 10.1016/j.procbio.2008.09.002.