



文章栏目：环境生物技术

DOI 10.12030/j.cjee.202109084 中图分类号 X703.1 文献标识码 A

汪晨晨, 程方奎, 吕锡武. 侧向回流一体化生物膜反应器处理分散式生活污水[J]. 环境工程学报, 2022, 16(2): 621-629. [WANG Chenchen, CHENG Fangkui, LU Xiwu. Treatment of decentralized domestic sewage by lateral reflux integrated biofilm reactor[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(2): 621-629.]

侧向回流一体化生物膜反应器处理分散式生活污水

汪晨晨^{1,2}, 程方奎^{1,2}, 吕锡武^{1,2,✉}

1. 东南大学能源与环境学院, 南京 210096; 2. 东南大学无锡太湖水环境工程研究中心, 无锡 214000

摘要 针对农村分散式生活污水的处理, 设计了侧向回流一体化生物膜反应器, 缩短了污水处理工艺流程, 减小了设施占地面积, 可以实现污水的就地就近处理, 有利于提高农村污水处理的覆盖率。为了寻求反应器的最佳运行条件, 在填料填充率为 35% 的条件下, 依次调节反应器运行的水力停留时间和气水比, 对 COD、氨氮、总氮和总磷的处理效果进行监测。研究表明, 在反应器填料填充率为 35%, 水力停留时间为 6.5 h, 气水比为 7.5 时, 对 COD、氨氮、总氮和总磷的去除率分别为 94.04%、98.25%、47.89% 和 35.08%。侧向回流一体化生物膜反应器出水 COD 和氨氮的水质可以满足江苏省农村生活污水排放的地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020) 中的一级 A 水质标准的要求; 利用该设备对总氮和总磷的处理则需要结合反应器的实际日处理能力选择是否增加生态处理设施。

关键词 农村卫生; 分散式污水; 就地就近处理; 一体化反应器; 生物膜法

以行政村计, 2017 年我国农村生活污水治理率仅为 22%; 以自然村计, 2019 年我国有 250 万个自然村、6.7 亿农村人口, 但污水治理率不足 10%^[1]。为提高我国农村生活污水的治理率, 2018 年 9 月, 住房和城乡建设部和生态环境部联合发布了《关于加快制定地方农村生活污水处理排放标准的通知》。江苏省制定的《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 32/3462-2020) 已于 2020 年 11 月 13 日开始施行, 该标准适用于日处理能力 <500 m³ 的农村生活污水处理设施的水污染物排放。随着各地农村生活污水处理标准的相继颁布, 农村生活污水处理技术与模式的选择应结合当地实际情况, 因地制宜地进行选择。

在许多发展中国家的农村地区, 由于缺乏污水收集系统, 导致未经处理的分散污水直接排入水环境系统, 污染了生态环境并且对农村地区的居民健康构成威胁^[2-4]。传统的集中式污水处理系统通常是在远离污水产生源头的地方进行处理, 需要铺设污水收集管网。但由于农村的聚落分散, 聚落内部密度低, 造成采用集中式污水处理系统需要负担的管道铺设成本较高。分散式污水处理系统是在污水产生源头或附近收集和污水处理, 可以大大减少污水处理系统的建设成本和泵送成本^[5]。因此, 对于人口密度低的农村地区, 分散式污水处理系统更为可取^[6]。目前应用于农村地区的分散式污水处理方法包括化粪池、生物膜法、人工湿地、氧化塘和土地处理等^[7]。其中微生

收稿日期: 2021-09-14; 录用日期: 2021-12-24

基金项目: 水体污染控制与治理科技重大专项 (2018ZX07701001-016)

第一作者: 汪晨晨 (1997—), 女, 硕士研究生, 1120228514@qq.com; ✉通信作者: 吕锡武 (1954—), 男, 博士, 教授, xiwulu@seu.edu.cn

物附着生长的生物膜法,具有占地面积小,操作灵活,处理效果好的优势而被认为适合应用于分散式污水处理^[8]。一方面是因为微生物在载体上的附着生长可以降低功能菌群的流失,适用于小型污水处理设施^[9];另一方面是由于生物膜中含有的丰富胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)可以保护微生物免受进水水质波动和极端条件的影响而失活,具有一定的抗冲击负荷能力^[10]。

对于分散式生活污水的处理,紧凑的处理流程是推荐选用的方案^[11]。一体化处理设施由于其污水处理工艺流程短、占地面积小,可以实现对污水的就地就近处理而具有其独特的优势^[12]。目前应用于分散式污水处理的一体化反应器主要有膜生物反应器(membrane bio-reactor, MBR)和移动床生物膜反应器(moving bed biofilm reactor, MBBR)。其中MBR以膜组件替代传统工艺中的二沉池,可以实现对微生物的有效截留,但膜组件的费用较高并且容易产生膜污染问题。MBBR则兼具传统流化床和生物接触氧化法的优点,具有较强的抗冲击负荷能力^[13]。本研究基于单户或相邻连户的模式,设计了侧向回流一体化生物膜反应器,以为农村分散式生活污水的处理提供新的思路。与传统活性污泥法需要二沉池和再循环系统不同,侧向回流一体化生物膜反应器将污染物去除、污泥沉淀和出水回流集成在一个反应器内,可以大大简化污水处理流程和节约占地面积。侧向回流通道的设置可以稀释进水,提高反应器的抗冲击负荷能力和强化对污染物的去除效果。反应器内填充的是改性聚氨酯海绵悬浮填料,在气流和水流的作用下呈流化状态,有利于基质渗入填料内部,可增强传质作用,提高微生物代谢能力。此外,反应器内部的水流剪切力可以有效控制填料区的生物膜厚度,稳定反应器的污染物去除能力。

为了评估侧向回流一体化生物膜反应器的运行性能,本研究通过调节水力停留时间和气水比,根据反应器在不同运行条件下对COD、氨氮、总氮和总磷的去除效果,综合考虑反应器的建设成本、运行成本和处理水量优化其运行条件,力求在满足处理要求的同时尽可能节约能耗。

1 材料与方法

1.1 实验用水水质

实验设计以农村单户或相邻农户排放的黑水经化粪池厌氧处理后与灰水混合作为反应器的进水。采用人工配水的方法,以葡萄糖作为碳源,氯化铵作为氮源,磷酸二氢钾作为磷源,添加一定的碳酸氢钠补充硝化反应所消耗的碱度以维持正常的反应速率,同时添加适量的微量元素维持微生物的正常新陈代谢^[14]。反应器进水相关水质参数如表1所示。

1.2 实验装置

采用自主设计的侧向回流一体化生物膜反应器,结构如图1所示。与其他一体化生物膜反应器相比,本研究设计的侧向回流通道的强化了反应器内部的水流混合效果;采用悬浮填料,填料在反应器填料填充区内可以自由移动,有利于填料上生物膜的生长与传质;反应器上部分为气升区和出水沉淀区两部分,气升区提供了气体排出的通道,防止气体对出水产生紊动影响,以实现出水沉淀区较好的泥水分

表1 进水水质
Table 1 Influent water quality mg·L⁻¹

统计值	COD	NH ₄ ⁺ -N	TN	TP
范围	220~280	35~40	40~45	2.7~3.5
均值	250	37	42	2.9

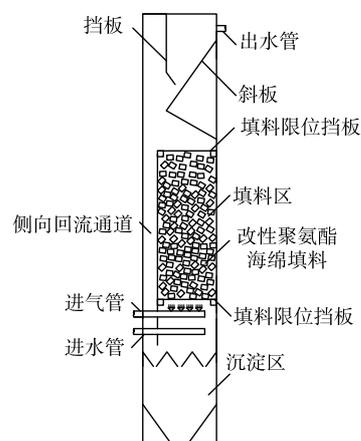


图1 侧向回流一体化生物膜反应器

Fig. 1 Lateral reflux integrated biofilm reactor

离效果;反应器下部为污泥沉淀区,污泥收集斜板的设置避免了上方曝气气流对下方污泥沉淀区产生的搅动作用。

反应器采用亚克力材质,有效容积为6.5 L。填料区装填品名为AQ-30的改性聚氨酯海绵填料,填料的空孔率为95%,气孔数为 $0.8 \text{ 个} \cdot \text{mm}^{-1}$,气孔径为1.5 mm,比表面积为 $91\,000 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$,真比重为 $1.1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。设计待处理污水从反应器底部进入,在气流的推动下污水向上流动经过填料区^[15],污水中的污染物被填料上生长的生物膜吸附转化降解,从而污水得到净化^[16-17]。由于侧向回流通道的存在,填料区出水一部分回流至反应器底端,与进水充分混合。设计的侧向回流通道能够起到稀释进水,提高一体化反应器的抗冲击负荷能力的作用。填料区上部设置的挡板起到泥水分离的作用,并且使出水不易受气流紊动。反应器下部设置的泥斗收集填料上脱落下沉的生物膜,通过排泥管定期排放。

1.3 实验方法

侧向回流一体化生物膜反应器在连续进出水和连续曝气的条件下运行,采用快速排泥法进行挂膜。挂膜成功后,为探究反应器在不同运行参数下对分散式生活污水中污染物的去除效果,在填料填充率为35%的条件下,依次调节反应器运行的水力停留时间和气水比,监测反应器对COD、氨氮、总氮和总磷处理效果,以优化反应器的运行条件。

1.4 水质检测指标及方法

采用哈希快速消解法测定COD(哈希消解器DRB200,哈希可见分光光度计DR3900);采用纳氏试剂分光光度法测定氨氮含量(HJ535-2009);采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法测定总氮含量(HJ636-2012);采用钼酸铵分光光度法测定总磷含量(GB11893-89);使用便携式YSI-100pH测定仪测定pH含量;使用YSI550A溶解氧测量仪测定DO含量。

2 结果与讨论

2.1 水力停留时间对侧向回流一体化生物膜反应器处理效果的影响

水力停留时间对侧向回流一体化生物膜反应器的处理效果有着重要的影响。水力停留时间过短时,污水中的污染物还未完全去除就已被排出,导致对污染物的去除效果差;水力停留时间过长,在相同的日处理能力下,反应器的体积增大,会增加反应器的建设成本^[18]。因此,选择适宜的水力停留时间对反应器的处理效果和节约成本是至关重要的。本实验在反应器填充率为35%,气水比为7.5的条件下,考察了反应器在不同水力停留时间下对各污染物的去除效果,以确定最优的水力停留时间。

1)水力停留时间对COD去除效果的影响。由图2可以看出,侧向回流一体化生物膜反应器对COD在不同水力停留时间下的平均去除率随水力停留时间的延长而升高,COD平均去除率由91.36%升至98.78%,出水COD平均值逐渐下降,由 $21.33 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 降低至 $3 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。水力停留时间的延长,一方面缓解了水流对生物膜的冲击和洗刷效应,使附着在填料上的生物膜能够稳定生长;另一方面使微生物与污水中污染物的反应时长增加。两方面均可提升反应器对COD的处理效果。侧向回流一体化生物膜反应器在不同的水力停留时间

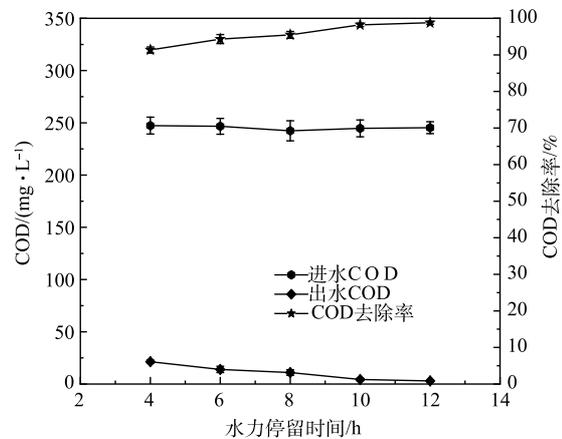


图2 水力停留时间对COD去除效果的影响

Fig. 2 Influence of hydraulic retention time on COD removal effect

下对 COD 均有较好的去除效果,这说明反应器在不同的水力停留时间下填料上的生物膜均能生长稳定,水流的剪切作用能将生物膜厚度控制在合适的范围内。反应器出水 COD 平均值均小于 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,能够满足江苏省农村生活污水排放的地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020)中的一级 A 水质标准的要求。

2) 水力停留时间对氨氮去除效果的影响。

由图3可以看出,侧向回流一体化生物膜反应器对氨氮的平均去除率随水力停留时间的延长先升高后略微下降。当水力停留时间为 4 h 时,反应器对氨氮的平均去除率仅为 64.55%。这表明水力停留时间过短不利于世代时间长的硝化菌生长繁殖^[19],从而引起出水氨氮平均质量浓度较高。当水力停留时间在 6 h 以上时,氨氮的平均去除率稳定在 98% 以上;此时再延长水力停留时间,氨氮的平均去除率略微下降。这表明反应器对氨氮的去除效果并不是随着水力停留时间的延长而增强。NOGUEIRA R 等^[20]通过研究在 2 种不同水力停留时间下运行的同一种生物膜反应器内的微生物种群动态和反应器运行性能发现:在水力停留时间较短时,反应器可以同时实现较好的硝化效果和有机碳的去除;而延长水力停留时间则不能够同时改善生物膜反应器的硝化效果和有机碳的去除,在水力停留时间较长时,异养菌的过度繁殖会在硝化生物膜顶部会形成较厚的异养微生物层,限制了硝化菌的氧气供应,从而引起硝化效率的下降。侧向回流一体化生物膜反应器在水力停留时间为 6~8 h 内对氨氮的去除效果最好,出水氨氮平均质量浓度低于 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,能够满足江苏省农村生活污水排放的地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020)中的一级 A 水质标准的要求。

3) 水力停留时间对总氮去除效果的影响。

由图4可以看出,随着水力停留时间的延长,侧向回流一体化生物膜反应器对总氮的平均去除率先升高后降低,总氮平均去除率为 33.02%~58.87%。当水力停留时间为 8 h 时,反应器对总氮的平均去除率达到最大值 58.87%,此时出水总氮平均质量浓度为 $16.53 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。当反应器的水力停留时间分别为 4、6、8、10 和 12 h 时,反应器内的溶解氧平均质量浓度分别为 3.93、4.07、4.18、4.21 和 4.54 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。在一定范围内延长水力停留时间,反应器内溶解氧质量浓度的提升有利于促进硝化,同时又不削弱因填料内部存在的缺氧微环境而发生的反硝化,因此,能够提高反应器对总氮的去除效果。然而,当水力停留时间过长时,会使反应器内能够进行反硝化过程的缺氧区域缩小,从而降低反应器对总氮的去除效果。王鸿远^[21]采用 MBR 处理农村生活污水,研究了不同混合液回流比(40%、80%、120%、160% 和 200%)对 MBR 处理农村生活污水效果的影响,当混合液回流比为

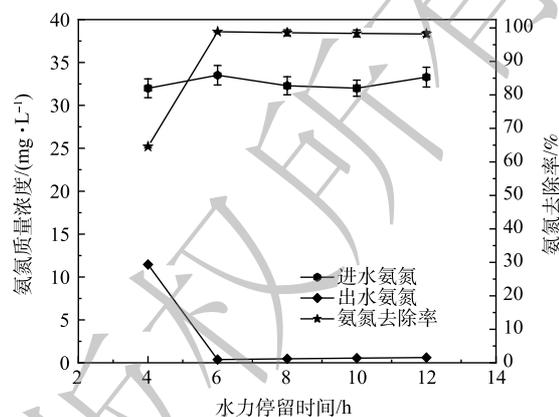


图3 水力停留时间对氨氮去除效果的影响

Fig. 3 Influence of hydraulic retention time on ammonia nitrogen removal

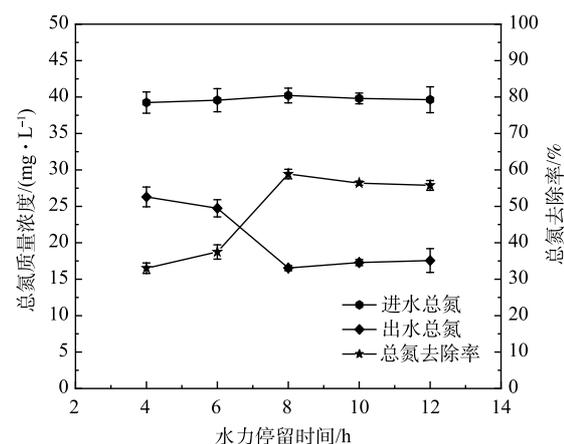


图4 水力停留时间对总氮去除效果的影响

Fig. 4 Influence of hydraulic retention time on the removal effect of total nitrogen

200%时,总氮的去除率最高为44.37%。而本文设计的侧向回流一体化生物膜反应器在不额外设置混合液回流系统的条件下,依靠侧向回流通道实现出水的部分回流,在较好去除总氮的同时也能够节约能耗和占地面积。

4)水力停留时间对总磷去除效果的影响。由图5可以看出,随着水力停留时间的延长,侧向回流一体化生物膜反应器对总磷的平均去除率先升高后降低。水力停留时间为6h时,反应器对总磷的平均去除率达到最大值36.53%,此时总磷的平均出水质量浓度为 $1.78\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。唐舒雯^[2]运用陶瓷膜生物反应器处理农村分散式生活污水,在常规运行下,陶瓷膜生物反应器对TP的平均去除率为12.32%。本研究中的侧向回流一体化生物膜反应器内微生物生长的载体为改性聚氨酯海绵填料,具有很大的比表面积和孔隙率,能够同时实现多种微生物的富集生长和对污染物的拦截,故反应器对总磷的去除效果优于常规生物膜反应器。综上所述,为了较好地兼顾污水处理效果与污水处理量,侧向回流一体化生物膜反应器运行的水力停留时间选择6.5h较为适合。

2.2 气水比对侧向回流一体化生物膜反应器处理效果的影响

气水比影响着侧向回流一体化生物膜反应器内部的溶解氧质量浓度。在不同的气水比下,反应器内部的溶解氧质量浓度也不同,从而影响反应器内部的微生物种群丰度。气水比的增加可以提高反应器内部的溶解氧质量浓度,促进硝化细菌的生长繁殖,进而促进硝化作用。但反应器内部的氧传递效率并不能随着气水比的增大而一直升高,当气水比过大时,气流对填料的冲刷作用也会更加强烈,容易引起生物膜的脱落。并且,反应器的气水比越大,相应的运行成本也就越高。因此,探究反应器运行时较合适的气水比对提高反应器的处理效能和降低能耗都是十分有意义的。本实验在反应器填充率为35%,水力停留时间为6.5h的条件下,考察了反应器在不同气水比下对各污染物的去除效果,以确定反应器运行时最优的气水比。

1)气水比对COD去除效果的影响。由图6可以看出,随着气水比的增大,侧向回流一体化生物膜反应器对COD的平均去除率逐渐升高,升高趋势逐渐趋于平缓。当气水比为2.5时,COD的平均去除率最低,为85.66%;当气水比为15.0时,COD的平均去除率最高,为98.19%。当气水比较低时,增大气水比,反应器内部溶解氧质量浓度增加,促进异养好氧菌的生长繁殖,COD的去除率升高较快。但由于氧传质速率和污染物在生物膜内外的传质都是有一定限度的,且当气水比较大时,生物膜容易受到曝气的冲刷作用而脱落,所以COD的去除率在气水比较高时升高幅度越来越小。侧向回流一体化生物膜反应器在不同气水比下对COD的去除效果较好。在气水比为

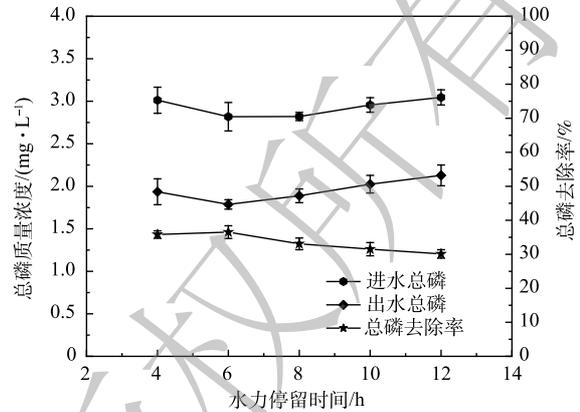


图5 水力停留时间对总磷去除效果的影响

Fig. 5 Influence of hydraulic retention time on the removal of total phosphorus

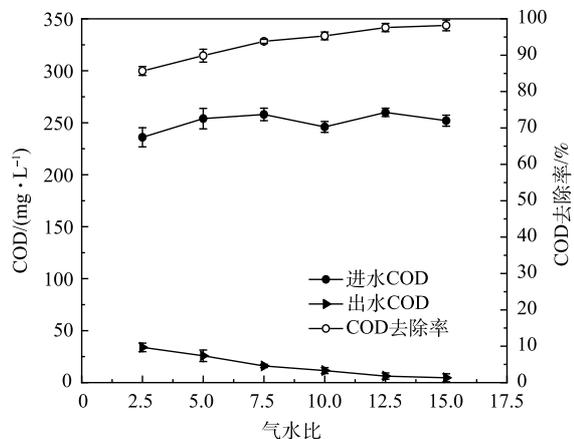


图6 气水比对COD去除效果的影响

Fig. 6 Influence of gas-water ratio on COD removal effect

2.5、5.0、7.5、10.0、12.5和15.0的条件下,出水COD平均值分别为33.91、25.85、16.01、11.57、6.28和4.62 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,均能够满足江苏省农村生活污水排放的地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020)中的一级A水质标准的要求。潘伟亮等^[23]利用MBBR探究其对农村污水的处理效果,结果表明,当水力停留时间为8 h,气水比为3:1,硝化液回流比为150%时,MBBR对COD的平均去除率为75.40%。侧向回流一体化生物膜反应器表现出的对COD较优去除效果归因于侧向回流通道的部分出水回流提高了反应器内的水力混合效果,微生物与污水中的污染物接触充分。

2) 气水比对氨氮去除效果的影响。由图7可以看出,侧向回流一体化生物膜反应器对氨氮的平均去除率随着气水比的增大而升高。当气水比由2.5升高至10.0时,氨氮平均去除率由54.12%升高到97.34%,升高幅度较大;当气水比由10.0升高至15.0时,氨氮平均去除率仅由97.34%升至98.21%,升高幅度较小。在气水比较低时,异养菌在与硝化菌对溶解氧的竞争中占优势地位,硝化菌所能利用的溶解氧量很少,反应器对氨氮去除效果不理想。此时增大气水比能够营造较好的好氧环境,促进硝化过程的进行,故氨氮的出水平均质量浓度迅速下降。当反应器内部的溶解氧质量浓度增加到一定程度时,再增大气水比,反应器内部的溶解氧质量浓度增加幅度并不大,氨氮的出水平均质量浓度趋于稳定。当气水比为7.5时,氨氮的平均出水质量浓度为 $5.50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($<8\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),能够满足江苏省农村生活污水排放的地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020)中的一级A水质标准的要求。温凯茵^[24]采用一体化膨胀生物滤池处理农村生活污水,稳定运行期间对氨氮的平均去除率为94.20%。侧向回流一体化生物膜反应器对氨氮的去除效果与温凯茵报道的结果相当。

3) 气水比对总氮去除效果的影响。由图8可以看出,随着气水比的增大,侧向回流一体化生物膜反应器对总氮的平均去除率逐渐上升,总氮平均去除率为39.26%~68.12%。当反应器的气水比分别为2.5、5.0、7.5、10.0、12.5和15.0时,反应器内的溶解氧平均质量浓度分别为3.81、3.89、4.14、4.19、4.24和4.38 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反应器内溶解氧质量浓度随着气水比的增大而逐渐增加。当气水比较低时,反应器内部溶解氧质量浓度较低,硝化作用较弱,出水中的氨氮质量浓度增加,则经过侧向回流通道的流经填料区底部中的硝态氮质量浓度减少,也就使填料内部形成的缺氧微环境反硝化可以利用的硝态氮质量浓度下降,从而使总氮的去除率下降^[25]。当气水比较高时,一方面填料区好氧部分的生物膜外侧溶解氧质量浓度充足,不仅能够满足生长在生物膜外侧的异养菌去除COD的需求,也能够满足硝化菌进行硝化作用对溶解氧的需求,此

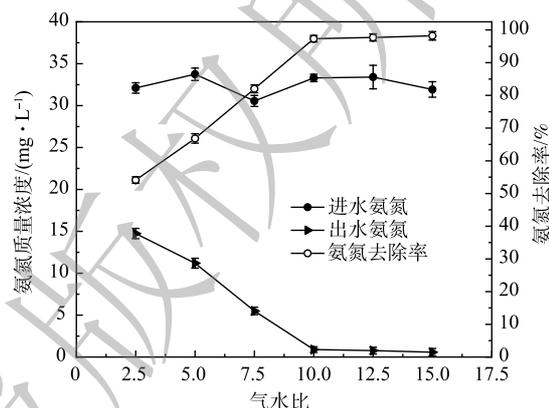


图7 气水比对氨氮去除效果的影响

Fig. 7 Influence of gas-water ratio on ammonia nitrogen removal

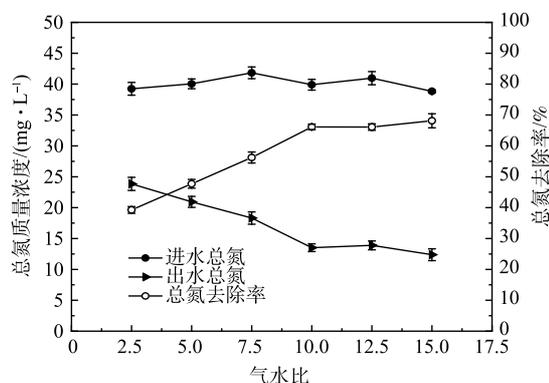


图8 气水比对总氮去除效果的影响

Fig. 8 Influence of gas-water ratio on total nitrogen removal

时硝化作用进行的彻底,使经过侧向回流通流道流至填料区底部进而流至缺氧区的硝态氮质量浓度增加,反硝化速率上升,总氮的去除率上升^[26];另一方面,较高的气水比会导致异养菌的增殖加快,加快利用污水中的氮物质合成细胞组成成分,因而会进一步降低出水总氮质量浓度。当气水比为7.5时,总氮的平均出水质量浓度为 $18.31\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ($<20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),能够满足江苏省农村生活污水排放的地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020)中的一级A水质标准的要求。

4) 气水比对总磷去除效果的影响。由图9可以看出,侧向回流一体化生物膜反应器对总磷的去除效果较为一般。随着气水比的增大,侧向回流一体化生物膜反应器对总磷的平均去除率先较快升高后缓慢下降。当气水比为2.5时,总磷的平均去除率最低,仅为17.16%。当气水比为7.5时,总磷的平均去除率最高为36.15%。污水中磷的去除是依靠聚磷菌在厌氧环境下释放磷和在好氧环境下过量吸收磷,并通过剩余污泥的排放来实现的^[27]。反应器内填充的改性聚氨酯海绵填料,粒径为2 mm,填料气孔径为1.5 mm。在填料生物膜外侧固然是好氧环境,但填料内部由于氧分子不易进入导致溶解氧质量浓度较低,呈现缺氧状态甚至厌氧状态。当气水比较低时,反应器内部的溶解氧质量浓度较低,聚磷菌的好氧过量吸磷能力减弱,此时增大气水比,总磷的去除率会升高;并且,此时气水比的增大促进了反应器内异养菌的增殖,异养菌利用进水中的磷合成细胞组成物质,共同引起出水磷质量浓度的下降。但若溶解氧质量浓度过高,则会引起聚磷菌的胞内聚- β -羟基丁酸减少,从而抑制聚磷菌的过量吸磷过程^[28]。当气水比大于7.5时,总磷的平均去除率出现缓慢下降的趋势。综合考虑侧向回流一体化生物膜反应器在不同气水比下对各污染物的处理效果和能耗大小,气水比选择7.5较合适,此时既能够实现对污染物的较好去除,又能够节约能耗和降低成本。

3 结论

1) 侧向回流一体化生物膜反应器内填充的改性聚氨酯海绵填料可以在填料区有限范围内移动,强化了传质效果,反应器对COD和氨氮表现出很好的去除效果。在填料填充率为35%,水力停留时间为6.5 h,气水比为7.5的条件下,反应器对COD和氨氮的平均去除率分别为94.04%和98.25%。此时,出水COD平均值为 $14.42\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水氨氮平均质量浓度为 $0.64\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

2) 侧向回流一体化生物膜反应器内部设置的侧向回流通道能使部分出水回流至底端,从宏观上改善了整个反应器的水力混合效果,提高了反应器的脱氮能力。改性聚氨酯海绵填料巨大的比表面积和孔隙率改善了填料对磷的拦截作用。在填料填充率为35%,水力停留时间为6.5 h,气水比为7.5的条件下,反应器对总氮和总磷的平均去除率分别为47.89%和35.08%。此时,出水总氮平均质量浓度为 $21.88\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,出水总磷平均质量浓度为 $1.87\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

3) 当侧向回流一体化生物膜反应器的处理规模 $<5\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 时,出水水质可以满足江苏省农村生活污水排放的地方标准《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB32/3462-2020)中的一级A水质标准的要求;当侧向回流一体化生物膜反应器处理规模 $\geq 5\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$ 时,对于总氮和总磷的去除,需要增加生态处理设施以保障出水水质达标。

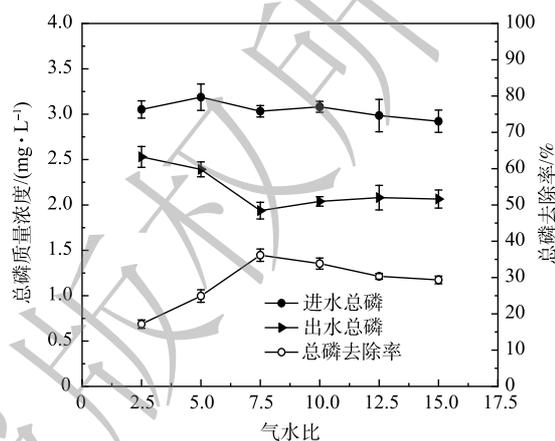


图9 气水比对总磷去除效果的影响

Fig. 9 Influence of gas-water ratio on total phosphorus removal

参考文献

- [1] 李昀婷, 石玉敏, 王俭. 农村生活污水一体化处理技术研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2021, 11(3): 499-506.
- [2] SINGH N K, KAZMI A A, et al. Performance and cost analysis of decentralized wastewater treatment plants in northern India: Case study[J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2018, 144(3): 5017024.1.
- [3] 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.
- [4] ZHANG H, LIN Y, MEN Z, et al. Evaluation of pharmaceutical activities of G-protein coupled receptor targeted pharmaceuticals in Chinese wastewater effluent[J]. *Chinese Chemical Letters*, 2020, 31(10): 2859-2863.
- [5] LI Z H. Evaluation of decentralized treatment of sewage employing bio-contact oxidation reactor integrated with filter bed[J]. *Process Safety & Environmental Protection*, 2013, 91(4): 295-303.
- [6] KUNST S, KRUSE T, BURMESTER A, et al. Decentralised wastewater treatment: Wastewater treatment in rural areas[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2002.
- [7] MASSOUD M A, TARHINI A, NASR J A J J O E M, et al. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries[J]. *Journal of Environmental Management*, 2009, 90(1): 652-659.
- [8] GUO W, NGO H H, DHARMAWAN F, et al. Roles of polyurethane foam in aerobic moving and fixed bed bioreactors[J]. *Bioresource Technology*, 2010, 101(5): 1435-1439.
- [9] SINGH N K, KAZMI A A, STARKL M J W S, et al. A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: Techno-economical approach[J]. *Water Science & Technology*, 2015, 71(4): 468-478.
- [10] SIPMA J, OSUNA M B, EMANUELSSON M A E, et al. Biotreatment of industrial wastewaters under transient-state conditions: Process stability with fluctuations of organic load, substrates, toxicants, and environmental parameters[J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2010, 40(2): 147-197.
- [11] RODRIGUEZ-HERNÁNDEZ L, GONZÁLEZ-VIAR M, DE FLORIO L, et al. Hybrid membrane bioreactor application for decentralized treatment and reuse[J]. *Desalination and Water Treatment*, 2013, 51(10/11/12): 2467-2473.
- [12] 靳宇辉. 生物强化型一体化污水处理技术研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2020.
- [13] 付颖, 姜成亮, 彭玲. 关于农村生活污水处理方法简述与一体化生物反应器应用[J]. *农村实用技术*, 2021(5): 156-157.
- [14] 邵宇琪. Fe(II)对低C/N污水的生物脱氮性能及种群影响研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2018.
- [15] 毛勇. ABR+A/O工艺处理方便面调料生产污水的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [16] 黄亮, 赵子玲. 湖水净化处理工艺[J]. *广东化工*, 2012, 39(10): 195-197.
- [17] 卢乐. 曝气生物滤池处理含硝氮污水工艺及其过程控制研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2011.
- [18] 黄山, 杨凡, 黄启华, 李秋玮, 等. 一种新型一体化生物反应器对城市污水的处理效果研究[J]. *水处理技术*, 2019, 45(11): 107-111.
- [19] 刘德永, 杨春梅. 分散式生活污水一体化处理装置的性能研究[J]. *中国给水排水*, 2015, 31(7): 69-72.
- [20] NOGUEIRA R, MELO L F, PURKHOLD U, et al. Nitrifying and heterotrophic population dynamics in biofilm reactors: effects of hydraulic retention time and the presence of organic carbon[J]. *Water Research*, 2002, 36(2): 469-481.
- [21] 王鸿远. 膜生物反应器处理农村生活污水效果研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- [22] 唐舒雯. 陶瓷膜生物反应器处理农村生活污水研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [23] 潘伟亮, 吴齐叶, 王清钰, 等. 移动床生物膜反应器处理农村污水中试研究[J]. *水处理技术*, 2020, 46(10): 103-107.
- [24] 温凯茵. 一体化膨胀床生物滤池处理农村生活污水的试验研究[D]. 广州: 广州大学, 2019.
- [25] 赵远哲, 董伟羊, 王海燕, 等. 气水比对A/O-BF处理低碳氮比农村生活污水脱氮的影响[J]. *环境科学学报*, 2021, 41(2): 451-459.
- [26] F F P, E M, M A U, S V, P A G, et al. Spatial distribution of heterotrophs and nitrifiers in a submerged biofilter for nitrification[J]. *Water Research*, 2000, 34(16): 4081-4089.
- [27] JIANG T, HE J, YANG X, et al. Effects of COD to phosphorus ratios on the metabolism of PAOs in enhanced biological phosphorus removal with different carbon sources[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 22(4): 87-91.
- [28] SINGH A, SAWANT M, KAMBLE S J, et al. Performance evaluation of a decentralized wastewater treatment system in India[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, 26(1): 172-188.

(责任编辑: 曲娜)

Treatment of decentralized domestic sewage by lateral reflux integrated biofilm reactor

WANG Chenchen^{1,2}, CHENG Fangkui^{1,2}, LU Xiwu^{1,2,*}

1. School of Energy and Environment, Nanjing 210096, China; 2. Engineering Research Center of Taihu Lake Water Environment, Wuxi 214000, China

*Corresponding author, E-mail: xiwulu@seu.edu.cn

Abstract For the treatment of decentralized domestic sewage in rural areas, a lateral reflux integrated biofilm reactor was designed, which shortens the sewage treatment process, reduces the floor space of the facility, realizes the local and nearby treatment of sewage, and is conducive to improving the coverage of rural sewage treatment. In order to find the optimum operating conditions of the reactor, the hydraulic retention time and gas-water ratio of the reactor were adjusted successively when the filler filling rate was 35%, and the treatment performances of COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus were evaluated. The results showed that when the filler filling rate was 35%, the hydraulic retention time was 6.5h, and the ratio of air to water was 7.5, the removal efficiencies of the COD, ammonia nitrogen, total nitrogen and total phosphorus were 94.04%, 98.25%, 47.89% and 35.08%, respectively. The effluent water quality of COD and ammonia nitrogen in the lateral reflux integrated biofilm reactor can meet the level A of the local standard for rural domestic sewage discharge in Jiangsu Province "Water Pollutant Discharge Standard for Rural Domestic Sewage Treatment Facilities" (DB32/3462-2020), and for the treatment of total nitrogen and total phosphorus, it is necessary to choose whether to add ecological treatment facilities in combination with the actual daily treatment capacity of the reactor when it is used to remove total nitrogen and total phosphorus.

Keywords rural sanitation; decentralized sewage; local and nearby treatment; integrated reactor; biofilm method