

反硝化聚磷菌菌剂强化 SBR 处理效果研究

李 微¹,朱心雨¹,刘 宁¹,孙慧智²

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;2. 中国市政工程东北设计研究总院有限公司,吉林 长春 130021)

摘 要 目的 研究不同反硝化聚磷菌菌剂投加量对 SBR 反应器脱氮除磷及有机物去除的强化效果。**方法** 采用 SBR 反应装置,以模拟污水为基质,分别向 5 个 SBR 反应器中投加不同质量反硝化聚磷菌菌剂 0 g、0.5 g、1.0 g、1.5 g 和 2.0 g,对反应器的脱氮除磷效果进行分析。**结果** 菌剂投加量 1.5 g/L 对 SBR 系统脱氮除磷的强化处理效果最好,COD、TP、NO₃⁻-N 的去除率分别为 97.26%、96.47% 和 100%,出水质量浓度达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)一级 A 标准。系统运行 30 d 后,除磷和脱氮效率分别提高了 8.38% 和 13.03%。**结论** 相较于传统 SBR 法而言,投加适量的微生物菌剂能够在节约碳源、不改变反应器构造的同时,显著改善污水处理效果。

关键词 反硝化聚磷菌;脱氮除磷;A²SBR;菌剂强化

中图分类号 TU99;X703.1 文献标志码 A

Effect of Denitrifying Phosphorus-accumulating Bacteria Agent on SBR Treatment

LI Wei¹, ZHU Xinyu¹, LIU Ning¹, SUN Huizhi²

(1. School of Municipal and Environmental Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168; 2. China Northeast Municipal Engineering Design and Research Institute, Changchun, China, 130021)

Abstract: The purpose of the experiment is to study the effect of denitrifying phosphorus accumulating bacteria agent dosage on removal of nitrogen, phosphorus and organic matter in sequencing batch reactor (SBR). The removal efficiency of nitrogen and phosphorus is analyzed in SBR reactor with denitrifying phosphorus accumulating bacteria agent added (0 g, 0.5 g, 1.0 g, 1.5 g, and 2.0 g). The results showed that the 1.5 g/L of bacteria agent was best for the denitrification and dephosphorization in the SBR reactor, with removal efficiency of 97.26% COD, 96.47% TP and 100% NO₃⁻-N. And water quality of its effluent reached the level 1A standard of "Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant"

(GB 18918—2002). After 30 days of operation, the phosphorus removal and nitrogen removal efficiencies were increased by 8.38% and 13.03%. So compared with the traditional SBR method, adding an appropriate amount of microbial agent can significantly improve the sewage treatment effect and save carbon resources while not changing the reactor structure.

Key words: denitrifying phosphorus accumulating bacteria; denitrification and dephosphorization; A²SBR; bacterium agent augmentation

污水处理的方法主要有物理法、化学法和生物法,其中生物法是通过微生物的代谢作用,吸附、分解或吸收污染物质,达到净化水质的效果,被广泛应用于城镇污水及工业废水的处理。随着生物脱氮除磷技术的不断发展,发现生物强化技术可以有效地提高系统对污染物的处理效果,而投加微生物菌剂就是其中的一项重要技术。微生物菌剂是由单一微生物或者复合微生物菌群制备而成,能够高效降解污染物,同时功能菌种会在系统中形成优势菌群抑制其他有害菌的生长繁殖^[1]。微生物菌剂中菌种的主要部分是活性污泥中的菌种,具有无需对现有设备进行改变、操作简单、对环境污染少等优点^[2-3],是一种具有可持续发展的工艺。国外最具代表性的菌剂为日本比嘉照夫教授于1983年研制的EM菌剂^[3]。王杰等^[4]以实际河水为对象,曝气条件下投加硝化菌菌剂,在120 h内可将河水的氨氮质量浓度降解至Ⅳ类水质,但对城镇污水处理的指导性不够。L. Guo等^[5]研究的反硝化菌菌剂为微生物菌剂脱氮提供了理论基础,但硝态氮的去除率还不够高。庄志刚等^[6]研究的聚磷菌菌剂最高去除率可达 $(81.02 \pm 2.27)\%$ 。邵啸等^[7]筛选驯化出聚磷菌株假单胞菌D3和D6,除磷效率分别为83.9%和93.0%。目前,反硝化聚磷菌菌剂在SBR法中的应用情况还不完善,脱氮除磷效率还有待提高。因此,笔者以降低SBR污染物出水质量浓度为目标,研究反硝化聚磷菌菌剂强化SBR脱氮除磷及有机物的去除效果,可以在节约碳源、不改变反应器构造的同时,显著改善污水处

理效果。

1 实 验

1.1 实验材料

采用5个有效容积1L的SBR为反应装置,取未经驯化的辽宁省抚顺市三宝屯污水处理厂二沉池污泥为基质,分别向5个SBR装置中投加250 mL的二沉池活性污泥,使反应器中泥水体积比为1:3,保持MLSS质量浓度在2 800~3 300 mg/L内波动。反硝化聚磷菌菌剂来源于孙慧智^[8]的实验成果,制备成功的微生物菌剂呈土黄色的固体粉末状,闻起来有发酵物的味道,菌剂所含有效活菌数为108 CFU/g左右,可直接投入反应器中使用。分别向反应器中投加不同量菌剂0 g、0.5 g、1.0 g、1.5 g和2.0 g,将SBR编号为A、B、C、D、E.5个反应器的进水水质和运行参数保持相同,进水COD质量浓度为212.62 mg/L、TP质量浓度为10.24 mg/L、在缺氧阶段投加质量浓度为35 mg/L的NaNO₃作为电子受体,pH为7.5,冬季水温10℃。SBR连续运行30 d,每天运行4个周期,每个周期反应300 min,运行方式:瞬时进水→厌氧120 min→缺氧150 min→沉淀30 min→瞬时排水。

1.2 实验水质

实验用水采用人工配制的模拟生活污水,外加碳源为CH₃COONa,氮源为NH₄Cl,磷源为KH₂PO₄,此外还添加了CaCl₂、MgSO₄·7H₂O和微量元素,各个微量元素的配比如表1和表2所示。加入碳酸氢钠将pH调节至7.5。

表 1 模拟废水成分

Table 1 Simulated waste-water composition						mg/L
$\rho(\text{COD})$	$\rho(\text{NH}_4^+-\text{N})$	$\rho(\text{TP})$	$\rho(\text{MgSO}_4)$	$\rho(\text{CaCl}_2)$	$\rho(\text{微量元素})$	
200	5	10	8	23	1.0	

表 2 微量元素组成

Table 2 Microelement composition								mg/L
$\rho(\text{三氯化铁})$	$\rho(\text{硼酸})$	$\rho(\text{氯化钴})$	$\rho(\text{硫酸铜})$	$\rho(\text{氯化锰})$	$\rho(\text{钼酸钠})$	$\rho(\text{硫酸锌})$	$\rho(\text{EDTA})$	
1.5	0.15	0.15	0.03	0.06	0.06	0.12	10	

1.3 分析方法

根据《水和废水监测分析法》(第四版)^[9],常规检测项目及分析方法如表 3 所示。

表 3 检测指标及方法

Table 3 Test index and method	
检测项目	检测方法
COD	快速密闭催化消解法
TP	钼锑抗分光光度法
NO_3^--N	紫外分光光度法
pH 值	PHS-25 型 pH 计

2 结果与分析

2.1 投加菌剂量对 SBR 反应器处理效果的影响

2.1.1 COD 去除效果

5 个 SBR 反应器对 COD 的去除效果如图 1 所示。

去除效果有明显差异,但 12~30 d 时投加量对 COD 去除效果的影响较小。2~12 d 时菌剂还未适应反应器内的运行环境。未投加菌剂系统在 8 d 的 COD 质量浓度为 45.27 mg/L,能够满足《城镇污水处理厂污染物排放标准》一级 A 标准,30 d 的 COD 出水质量浓度达到了 8.44 mg/L,COD 去除率为 96.03%。投加量为 1.5 g 的系统在 6 d 的出水 COD 质量浓度为 37.06 mg/L,达到一级 A 标准,COD 去除率为 97.26%。对比可知,投加微生物菌剂对 COD 去除率的增幅为 4.1%。12 d 的 COD 去除率为 91.23%,在 5 个反应器中最先超过 90%。系统运行的 12 d,去除曲线坡度明显变缓且趋于稳定,表明反应器中的活性污泥已经适应了环境,并开始利用废水中的有机物进行新陈代谢,从而降低 COD。COD 的去除主要发生在厌氧段,说明 COD 被 DPAO(反硝化聚磷菌)利用合成 PHA(聚羟基脂肪酸酯)^[10]。经过一段时间的富集,DPAO 成为优势菌种,因而各个系统的 COD 去除效果好。王越兴等的实验结果表明微生物菌剂投加后,至少 12 d 才有可能表现出明显的处理效果^[2]。代鹏飞等发现系统运行至 7 d 开始,COD 去除率呈逐渐增长趋势^[11]。

当投加量为 2.0 g 时,系统在 6 d 的出水 COD 质量浓度为 36.00 mg/L,达到一级 A 标准,COD 去除率为 96.84%,30 d 的去除率略低于投加量为 1.5 g 的系统。由于实验中 SBR 反应器的体积较小,水中营养物质数

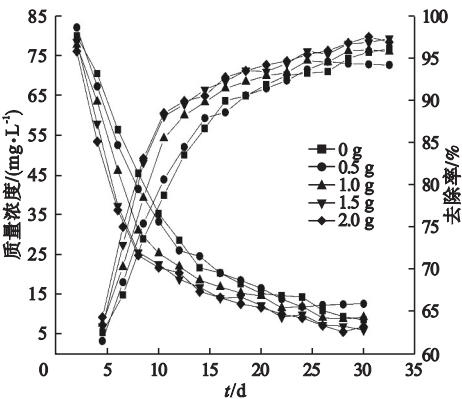


图 1 不同菌剂投加量对 COD 的去除效果

Fig.1 Effect of the agent dosage on COD removal efficiency

2~12 d 时不同菌剂投加量对 COD 的

量一定且微生物的生存空间有限,无法满足 DPAO 的正常生长。过多的 DPAO 产生竞争,可能导致部分微生物的死亡,从而导致处理效果略微下降。文娅等^[12]认为当菌剂投加量为 2.0 g 时,菌剂本身对水样的 COD 增加值可能大于其降解值而导致去除效果下降。投加量为 1.5 g 的系统对 COD 的去除效率最高。

2.2.2 TP 去除效果

5 个 SBR 反应器对 TP 的去除效果如图 2 所示。

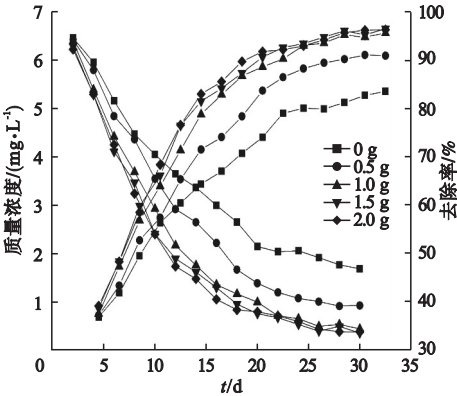


图2 不同菌剂投加量对 TP 的去除效果

Fig. 2 Effect of the agent dosage on TP removal efficiency

菌剂投加量对废水中 TP 的去除率具有一定影响。在运行的 30 d 中,未投加菌剂系统的 TP 处理效果总体低于投加菌剂的系统。说明投加的反硝化聚磷菌菌剂有较强的吸磷效果,且可以避免 DPAO 与系统内其他菌种的生存竞争,一方面抑制反硝化菌生长,另一方面加快了 DPAO 的繁殖使其成为优势菌种。

未投加菌剂的 SBR 系统经 30 d 运行后的出水 TP 质量浓度为 1.69 mg/L,未达到一级 A 标准。前 20 d 的 TP 去除率增长速率较快,经过 30 d 后去除率仍较低,仅为 83.52%。原因是传统聚磷菌在缺氧运行段缺少 O₂ 作为电子受体,导致无法将系统中的磷酸盐吸收并储存在体内,也就影响了下一厌氧运行段的释磷反应,导致处理效果不

佳。或者是因为系统中存在一部分反硝化菌及其他菌群跟 DPAO 争夺碳源和电子受体,导致除磷不高效。蔡勋江等认为由于没有排泥,反应器的去除效果受运行条件的影响而使吸附的磷重新释放到反应器内^[13]。而投加菌剂量为 1.5 g 的系统 26 d 的出水 TP 质量浓度为 0.4 mg/L,达到一级 A 标准,30 d 的出水 TP 质量浓度为 0.36 mg/L。TP 去除率在 30 d 高达 96.47%,何秋来等的实验 TP 去除率也高于 90%^[14]。当投菌量为 2.0 g 时,系统在 30 d 的出水 TP 质量浓度为 0.38 mg/L,TP 去除率为 96.26%,处理效果相较于投加量为 1.5 g 的系统反而下降。因此判断投加量为 1.5 g 的系统 TP 去除效果最好。

投加量为 1.5 g 时,系统对 COD 和 TP 的处理效果,6 d 时出水 COD 质量浓度为 37.06 mg/L,达到一级 A 标准,而出水 TP 质量浓度在 26 d 才达到一级 A 标准。原因是聚磷菌和系统中的其他异养菌产生协同作用,共同去除 COD^[15-16];而 TP 的去除只能依赖于聚磷菌,聚磷菌有好氧吸磷和厌氧释磷的过程,即使通过竞争成为优势菌种也需要一定时间,因而导致 TP 去除过程较慢。

2.2.3 NO₃⁻-N 去除效果

5 个 SBR 反应器对 NO₃⁻-N 的去除效果如图 3 所示。

从图 3 可知,NO₃⁻-N 的去除率受菌剂投加量影响较大。NO₃⁻-N 的投加量要能够满足反硝化聚磷菌对电子受体的需求,投加量过多会导致出水指标不符合一级 A 标准,而投加量过少又会使磷去除的不彻底,因此要对系统内的 NO₃⁻-N 指标进行监测。未投加菌剂的 SBR 系统经过 30 d 运行后 NO₃⁻-N 去除率相对于投加菌剂的系统而言较低,仅达到了 88.48%;投加量为 1.5 g 的系统在 16 d 时的 NO₃⁻-N 去除率达到了 90.77%,30 d 时的去除率甚至达到 100%。N. Kishida 等^[17]研究发现普通 SBR 工艺去除率一般约

为 90%,笔者投加菌剂的 SBR 系统在经过 30 d 的运行后对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除率均达到了 95% 以上。其中,投加菌剂量为 1.0 g、1.5 g、2.0 g 系统的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 去除率甚至达到了 100%。主要原因是传统的聚磷菌以氧分子为受体,而反硝化聚磷菌以硝态氮和亚硝态氮为受体,投加菌剂后,反硝化聚磷菌对电子受体进行了大量的消耗,而且 N 作为营养物质在微生物的新陈代谢作用中也得到消耗;其次是缺氧阶段投加了一定质量浓度的 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,补充了碳氮源,微生物新陈代谢作用所需的能量得到了补充,在厌氧阶段处理过程中,硝态氮质量浓度不能满足反硝化聚磷菌的需求,因此在缺氧阶段投加一定量的硝态氮可以增强反硝化聚磷菌的高效脱氮除磷效果;再次是随着系统内反应的进行和溶解氧的减少,反硝化菌渐渐成为优势菌种,异养菌与 DPAO 菌群产生协同作用,以及其他非聚磷菌的参与,因而去除效果显著提升^[18-19]。将 1.5 g 菌剂投入 1L 的系统进水中,可以使 DPAO 快速繁殖,从而令反应器具有最佳处理效果。

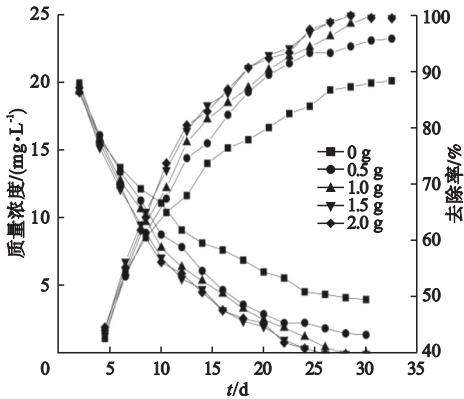


图3 不同菌剂投加量对 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的去除效果

Fig. 3 Effect of the agent dosage on $\text{NO}_3^- \text{-N}$ removal efficiency

2.3 典型周期内去除效果分析

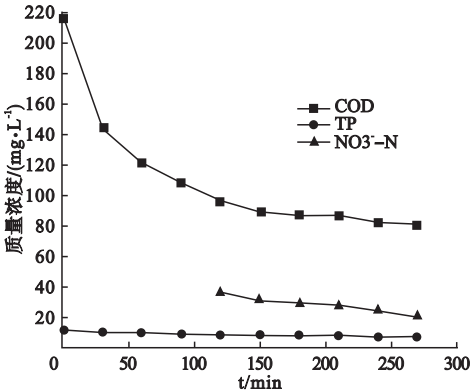
取未投加菌剂系统和菌剂投加量为 1.5 g 系统运行的 2 d 和 30 d 为典型周期,对 COD、TP 和 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的质量浓度进行检测分析,运行效果如图 4 所示。

由图 4(a)、(b) 可知,将未投加菌剂系统和菌剂投加量为 1.5 g 系统进行对比分析,取混合液静沉后的上清液进行检测。未投加菌剂系统运行 2 d,反应进行到 120 min 时的 TP 质量浓度为 8.61 mg/L,释磷率为 25.26%,单位质量浓度的污泥单位时间内的释磷速率是 0.024 mg/h。反应进行到 270 min 时的吸磷量为 4.25 mg/L,反应效率为 0.028 mg/(L·min)。菌剂投加量为 1.5 g 系统运行 2 d,反应进行到 120 min 时 TP 质量浓度为 8.25 mg/L,释磷率为 28.4%,单位质量浓度的污泥单位时间内的释磷速率是 0.027 mg/h。反应进行到 270 min 时吸磷量为 4.33 mg/L,反应效率为 0.029 mg/(L·min)。由数据分析可得,SBR 反应器在厌氧 2 h、缺氧 12 h 条件下运行 2 d 后两个系统均未表现出 DPAO 的高效除磷特性。两者的 COD 质量浓度分别为 81.14 mg/L、78.92 mg/L,TP 质量浓度分别为 7.27 mg/L、7.19 mg/L, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 质量浓度分别为 20.34 mg/L、19.7 mg/L。通过比较可看出,二者污水处理效果差别不大,因为投加的反硝化聚磷菌菌剂还未适应 SBR 系统内的运行环境,微生物生长繁殖速度缓慢。

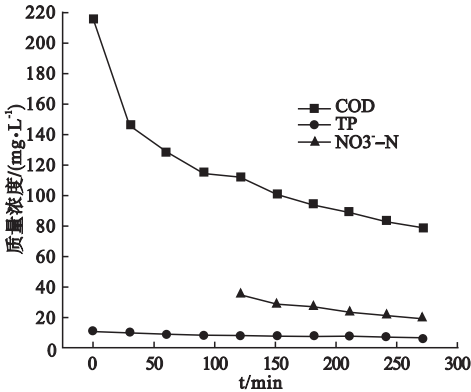
由图 4(c)、(d) 可知,系统运行 30 d,取混合液静沉后的上清液进行检测,厌氧阶段的出水 COD 质量浓度在未投加菌剂系统和菌剂投加量为 1.5 g 的系统中分别为 51.04 mg/L、76.6 mg/L。由于未投加菌剂的 SBR 系统因反应器内长期残留 $\text{NO}_3^- \text{-N}$,在有充足碳源的条件下,可能会使反硝化细菌在厌氧阶段进行反硝化反应而导致厌氧阶段 COD 去除效果较好,实验结果与陈晶等的实验结果一致^[20]。而菌剂投加量为 1.5 g 的系统中,投加反硝化聚磷菌菌剂免除了 DPAO 与反硝化细菌和其他异养菌在厌氧阶段对碳氮源和电子受体的竞争,抑制了反硝化细菌的生长,导致 COD 去除效果较差。缺氧阶段结束时菌剂投加量为 1.5 g 的系统

内 COD 质量浓度为15.68 mg/L,COD 去除率分别为 94.23% 和 92.72%。这说明虽然 DPAO 在系统内进行新陈代谢活动并富集,但并未彻底抑制反硝化细菌的生长^[21],且

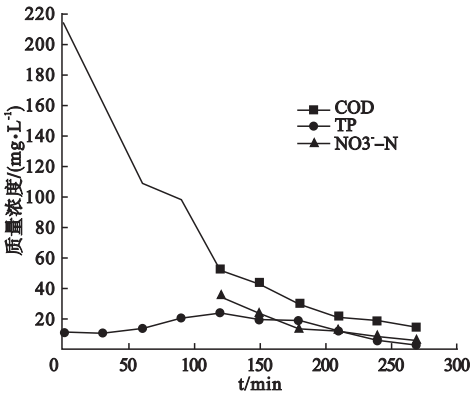
DPAO 没有将投加的确态氮全部用于除磷,还有一小部分的硝态氮被反硝化菌用于反硝化反应,因此 COD 去除效果良好。



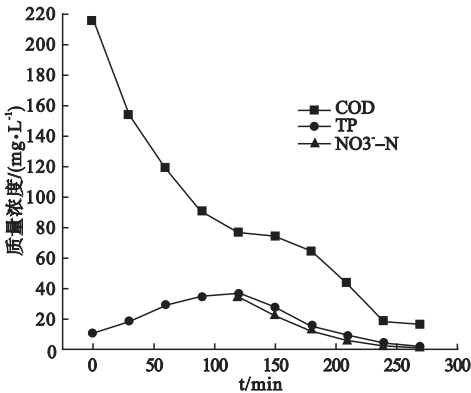
(a)未投加菌剂系统第2天运行效果



(b)菌剂投加量为1.5g系统第2天运行效果



(c)未投加菌剂系统第30天运行效果



(d)菌剂投加量为1.5g系统第30天运行效果

图4 典型周期内系统运行效果

Fig.4 System operation effect in typical period

未投加菌剂系统运行的30 d,厌氧阶段结束时 TP 质量浓度为 22.93 mg/L,释磷量为 13.09 mg/L,单位质量浓度的污泥单位时间内的释磷速率是 0.109 mg/h;缺氧阶段结束后的出水 TP 质量质量浓度为1.13 mg/L,吸磷量为 21.8 mg/L,吸磷反应效率为 0.145 mg/(L·min)。原因是 DPAO 长期与该系统内部长期存在的反硝化菌等异养菌争夺 C、N 源和电子受体,使其不能富集并成为优势菌种,进而导致对总磷的处理效果不佳^[22-23]。菌剂投加量为 1.5 g 的系统运行的 30 d,厌氧阶段结束时 TP 质量浓度为 36.03 mg/L,释磷量为 26.19 mg/L,单位质

量浓度的污泥单位时间内的释磷速率是 0.218 mg/h;缺氧阶段结束后出水 TP 质量浓度为 0.4 mg/L,吸磷量为 35.63 mg/L,吸磷反应效率为 0.238 mg/(L·min)。投加菌剂量为 1.5 g 系统的释磷和吸磷反应效率相较于未投加菌剂系统分别提升了 0.109 mg/(L·min)和 0.093 mg/(L·min)。由于反硝化聚磷菌菌剂的投加,系统对磷的吸附和去除能力都有大幅提升。

运行 30 d 后菌剂投加量为 1.5 g 的系统中 DPAO 代谢特性十分明显,系统出水 TP 质量浓度为 0.4 mg/L,出水 NO₃⁻-N 质量浓度为 0 mg/L;而未投加菌剂系统的 TP 质量

浓度为 1.13 mg/L,出水 NO_3^- -N 质量浓度为 3.91 mg/L。菌剂投加量为 1.5 g 的系统与未投加菌剂系统相比较,其脱氮除磷效率分别提高了 13.03% 和 8.38%。说明反硝化聚磷菌菌剂的投加大大增强了 SBR 系统的脱氮除磷能力,提升了处理效果,且出水能够满足一级 A 标准要求。

3 结 论

(1)在相同的反应条件下,菌剂投加量为 1.5 g 的 SBR 系统对污水处理效果最好。高效反硝化聚磷菌与 SBR 法相结合,经过 30 d 实验后系统对人工配制污水的 COD、TP、 NO_3^- -N 的去除率分别为 97.26%、96.47% 和 100%,出水质量浓度分别为 5.83 mg/L、0.36 mg/L 和 0 mg/L,能够达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)中一级 A 标准要求。

(2)菌剂投加量为 1.5 g 的系统对 SBR 系统的强化效果最好,经过 30 d 运行后相较于未投加菌剂系统的除磷和脱氮效率分别提高了 8.38% 和 13.03%。

(3)微生物菌剂的投加可以有效地发挥 DPAO 菌群的功效,生物强化可提高系统对污水的反硝化脱氮除磷效果。

参考文献

- [1] 唐伟,张远,王书平,等.微生物菌剂在水体修复中的应用进展[J].环境工程技术学报,2019,9(2):151-158.
(TANG Wei,ZHANG Yuan,WANG Shuping,et al. Application progress of microbial agents in water remediation [J]. Journal of environmental engineering technology,2019,9(2):151-158.)
- [2] 王越兴,林琳,张金松.投加微生物菌剂对污泥菌群的影响研究[J].环境科学与技术,2016,39(增刊2):87-93.
(WANG Yuexing,LIN Lin,ZHANG Jinsong. Effects of adding microbial agents on sludge flora [J]. Environmental science and technology,2016,39(S2):87-93.)
- [3] NAMSIVAYAM S K R, NARENDRAKUMAR G, KUMAR J A. Evaluation of effective microorganism (EM) for treatment of domestic sewage [J]. Journal of experimental sciences, 2011,2(7):30-32.
- [4] 王杰,刘磊.微生物菌剂对河流中低质量浓度 NH_3 -N 去除效果研究[J].环境科学与技术,2018,41(增刊1):37-40.
(WANG Jie,LIU Lei. Removal effect of microbial agent on low concentration of NH_3 -N in urban river [J]. Environmental science and technology,2008,41(S1):37-40.)
- [5] GUO L,CHEN Q,FANG F,et al. Application potential of a newly isolated indigenous aerobic denitrifier for nitrate and ammonium removal of eutrophic lake water [J]. Bioresource Technology,2013,142:45-51.
- [6] 庄志刚,韩永和,章文贤,等.高效聚磷菌 *Alcaligenes* sp. ED-12 菌株的分离鉴定及其除磷特性[J].环境科学学报,2014,34(3):678-687.
(ZHUANG Zhigang,HAN Yonghe,ZHANG Wenxian,et al. Isolation, identification and dephosphorization characteristics of an efficient phosphorus accumulating bacterium *Alcaligenes* sp. ed-12 [J]. Journal of environmental science,2014,34(3):678-687.)
- [7] 邵啸,毕潇,吴涓,等.巢湖低温高效聚磷菌的筛选及其特性[J].环境工程学报,2015,9(3):1027-1032.
(SHAO Xiao,BI Xiao,WU Juan,et al. Screening of efficient and low-temperature phosphorus-accumulating organisms in Chaohu Lake and their characteristics [J]. Chinese journal of environmental engineering,2015,9(3):1027-1032.)
- [8] 孙慧智. A^2 SBR 反硝化除磷系统稳定运行及菌剂处理效果研究[D].沈阳:沈阳建筑大学,2019.
(SUN Huizhi. Study on the stable operation of A^2 SBR denitrifying phosphorus removal system and the treatment effect of microorganism agent [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2019.)
- [9] 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,2009.
(State Environmental Protection Administration. The monitoring and analysis method on water and wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press,2009.)
- [10] 李冬,李晓莹,杨杰,等.后置缺氧 SBR 短程反硝化除磷[J].中国环境科学,2017,37(8):2994-3001.
(LI Dong,LI Xiaoying,YANG Jie,et al. Denitrification phosphorus removal by nitrite pathway in a post-anoxic SBR system [J]. China environmental science,2017,37(8):2994-3001.)
- [11] 代鹏飞,邵燕,张炜铭,等.微生物菌剂强化 SBR 工艺处理化工园区综合废水的研究[J].环境科技,2015,28(5):29-32.
(DAI Pengfei,SHAO Yan,ZHANG Weiming,et al. The research of chemical industry park wastewater by microorganism agent bioaugmentation SBR method [J].

- Environmental science and technology, 2015, 28(5):29-32.)
- [12] 文娅,赵国柱,周传斌,等.一种新型微生物菌剂处理生活污水[J].环境工程学报,2013,7(5):1729-1734.
(WEN Ya, ZHAO Guozhu, ZHOU Chuanbin, et al. Treatment of domestic sewage with a new microbial agent [J]. Chinese journal of environmental engineering, 2013, 7(5):1729-1734.)
- [13] 蔡勋江,李娟,黎晓微.不同微生物菌剂用于SBR处理校园生活污水的研究[J].工业用水与废水,2012,43(1):64-67.
(CAI Xunjiang, LI Xian, LI Xiaowei. Treatment of schoolyard domestic sewage by SBR added with different microbial agents [J]. Industrial water & wastewater, 2012, 43(1):64-67.)
- [14] 何秋来,王弘宇,杨小俊,等.SBR不同进水中反硝化除磷颗粒污泥的培养[J].环境科学学报,2016,36(1):137-144.
(HE Qiulai, WANG Hongyu, YANG Xiaojun, et al. Cultivation of denitrifying phosphorus removal granular sludge in sequencing batch reactor for treating different kinds of wastewater [J]. Acta scientiae circumstantiae, 2016, 36(1):137-144.)
- [15] KUBA T, SMOLDERS G, VAN LOOSDRECHT MCM, et al. Biological phosphorus removal from wastewater by anaerobic-anoxic sequencing batch reactor [J]. Water science & technology, 1993, 27(5/6):241-252.
- [16] TSUNEDA S, OHNO T, SOEJIMA K, et al. Simultaneous nitrogen and phosphorus removal using denitrifying phosphate-accumulating organisms in a sequencing batch reactor [J]. Biochemical engineering journal, 2006, 27(3):191-196.
- [17] KISHIDA N, KIM J, TSUNEDA S, et al. Anaerobic/oxic/anoxic granular sludge process as an effective nutrient removal process utilizing denitrifying polyphosphate-accumulating organisms [J]. Water research, 2006, 40(12):2303-2310.
- [18] 张兰河,田宇,郭静波,等.微生物菌剂的构建及其在城市污水处理中的应用[J].化工进展,2013(8):1943-1948.
(ZHANG Lanhe, TIAN Yu, GUO Jingbo, et al. Construction of microbial agent and its application in municipal wastewater treatment [J]. Chemical progress and engineering progress, 2013(8):1943-1948.)
- [19] 朱红萍.生物絮凝吸附强化处理工艺在城市污水处理中的应用[J].四川建材,2007(6):64-65.
(ZHU Hongping. Application of biofloculant adsorption enhanced treatment process in urban sewage treatment [J]. Sichuan building materials, 2007(6):64-65.)
- [20] 陈晶,周新程,陈萍,等.投菌强化序批式反应器(SBR)脱氮除磷效果及微生物种属分析[J].环境化学,2016,35(10):2183-2190.
(CHEN Jing, ZHOU Xincheng, CHEN Ping, et al. Enhanced nitrogen and phosphorus removal with addition of microbes in sequencing batch reactor and analysis of microbial specie [J]. Environmental chemistry, 2016, 35(10):2183-2190.)
- [21] 余鸿婷,李敏.反硝化聚磷菌的脱氮除磷机制及其在废水处理中的应用[J].微生物学报,2015,55(3):264-272.
(YU Hongting, LI Min. Denitrifying and phosphorus accumulating mechanisms of denitrifying phosphorus accumulating organisms(DPAOs) for wastewater treatment-a review [J]. Acta microbiologica sinica, 2015, 55(3):264-272.)
- [22] 李微,曾飞,由昆,等.SBR工艺处理大蒜废水及污泥菌群结构研究[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2021,37(2):370-377.
(LI Wei, ZENG Fei, YOU Kun, et al. The treatment of garlic wastewater and sludge microbial structure in SBR process [J]. Journal of Shenyang jianzhu university(natural science), 2021, 37(2):370-377.)
- [23] 黄靓,郭海燕,刘小芳.反硝化聚磷菌的培养及其脱氮除磷特性[J].化工环保,2019,39(2):158-162.
(HUANG Liang, GUO Haiyan, LIU Xiaofang. Cultivation of denitrifying phosphorus accumulating organisms and their characteristics of nitrogen and phosphorus removal [J]. Environmental protection of chemical industry, 2019, 39(2):158-162.)
- (责任编辑:王国业 英文审校:唐玉兰)