

多介质膜复合人工湿地技术处理冬季农村生活污水

陈建¹, 汪军^{1*}, 潘成荣² (1. 安徽省通源环境节能股份有限公司, 安徽合肥 230031; 2. 安徽省生态环境监测中心, 安徽合肥 230001)

摘要 采用多介质膜复合人工湿地技术解决冬季农村生活污水处理效率低的难题, 并探究其实际处理效果。结果表明: 此工艺在冬季仍有较好的处理效果, 在多介质膜池水力停留时间(HRT)0.30 d、曝气量5.0 L/min及聚合氯化铝(PAC)用量8.40 g/d的条件下, TN、NH₄⁺-N、COD_{Cr}和TP的去除率分别为41.24%、67.20%、86.55%和87.56%, 出水浓度分别为18.39、9.06、15.50和0.43 mg/L, 出水水质远优于安徽省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 34/3527—2019)一级A标准。

关键词 多介质生物膜; 人工湿地; 低温; 农村生活污水; 处理效果

中图分类号 X 799.3 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)03-0205-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.03.047



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Treatment of Rural Domestic Sewage in Winter by Multi-media Membrane Composite Artificial Wetland Technology

CHEN Jian¹, WANG Jun¹, PAN Cheng-rong² (1. Anhui Tongyuan Environment Energy Saving Co., Ltd., Hefei, Anhui 230031; 2. Ecological Environment Monitoring Center of Anhui Province, Hefei, Anhui 230001)

Abstract The multi-media membrane composite artificial wetland technology was used to solve the problem of low efficiency of rural domestic sewage treatment in winter, and its actual treatment effect was explored. The results showed that this process had a good treatment effect in winter. Under the conditions of HRT 0.30 d, aeration 5.0 L/min, PAC dosage 8.40 g/d in the multi-media membrane tank, the removal rates of TN, NH₄⁺-N, COD_{Cr} and TP were 41.24%, 67.20%, 86.55% and 87.56%, and their effluent concentrations were 18.39, 9.06, 15.50 and 0.43 mg/L, respectively. The effluent water quality was better than Class A standards of DB 34/3527—2019.

Key words Multi-media biofilm; Artificial wetland; Low-temperature; Rural domestic sewage; Treatment effect

目前,我国农村地区生活污水处理大多采用生物法^[1], 污水处理设施运行受季节性温差的影响显著,特别是冬季低温易导致出水水质超标^[2-3]。因为冬季低温使得污水处理设施中微生物的活性极大地降低,污水处理效率降低,致使出水水质波动^[4-6]。此外,低温环境下污泥比阻将增加,使得活性污泥的沉降性能降低,从而影响污水处理效果^[7]。钱程等^[8]研究表明,当水温低于5.6℃时,活性污泥中的微生物基本处于休眠状态,因此微生物对有机物的降解以及脱氮除磷均受到较大限制,并且低温状态下活性污泥中的菌群数量也会锐减,进一步降低污水处理效果。当水温低于13℃时,微生物处理效果开始加速降低;当水温低于4℃时,微生物开始死亡,此时几乎无处理效果^[9]。综上所述,冬季低温导致污水处理设施非正常运行,污水处理效率降低,出水水质波动大,对周边水环境产生影响。为防止冬季农村地区因污水处理不达标而引起的水生生态系统破坏,急需研究适合冬季农村地区生活污水处理的新技术,提高冬季污水处理效果,为乡村环境质量的提升贡献力量。

生物膜法因其生物质浓度高、耐受性强、占地面积小、污泥龄长、出水水质好及抗冲击负荷能力强等优点得到广泛应用^[10-13]。笔者以多种介质悬浮填料强化的膜技术与潜流人工湿地技术为核心,针对冬季低温农村生活污水处理需求,应用多介质悬浮填料与高效纳米曝气等技术,结合化学除磷与管道式紫外消毒等技术的优点,设计了多介质膜复合人工湿地技术,处理冬季农村生活污水,通过小试试验探讨此技

术在冬季低温条件下的污水处理效果及机理,以期为实际农村生活污水处理工程提供数据支撑与技术参考。

1 试验装置及方法

1.1 试验装置 多介质膜复合人工湿地试验处理装置室外露天放置,其工艺包括厌氧—缺氧—好氧多介质膜—沉淀—管道式紫外消毒—潜流人工湿地,试验装置间串联。缺氧池设有硝化液回流系统;好氧池分隔3个反应区,上层为2个完全分隔的MBBR反应区,下层为不完全分隔的BAF反应区;沉淀池进水管设有聚合氯化铝(PAC)加药装置。为调控试验装置水力负荷,进水管设置了水量调节阀。试验装置流程图见图1。

1.2 装置及运行参数 多介质膜复合人工湿地试验装置由8 mm厚的聚丙烯(PP)板构成。好氧多介质膜池底部设有曝气盘及进水管。BAF反应区填有粒径15 mm的石灰石,高度20 cm。上层2个MBBR反应区分别填有粒径20 mm的蜂窝状悬浮填料及粒径50 mm的球形悬浮填料,填充空间比约25%。潜流人工湿地填充粒径15 mm的石灰石,混合栽种鸢尾、再力花及美人蕉。污水日处理量500 L,硝化液回流比150%,好氧多介质膜池曝气量2.5~7.5 L/min, PAC(Al₂O₃含量28%)用量为8.40 g/d。试验装置水力运行方式为重力自流,沉淀池中间设有折流挡板,出水经管道式紫外消毒器消毒后自流至潜流人工湿地。紫外消毒器为一级出水,潜流人工湿地为二级出水。试验装置尺寸及运行参数见表1。

1.3 试验方法

1.3.1 试验水质。多介质膜复合人工湿地装置试验期间用水为合肥市某村镇污水处理厂原水。通过定期取装置进、出水水样,检测水质变化,探究其在冬季的处理效果。采样时间为09:00,当天检测完所有水样。试验时间为2021年8月至2022年3月。装置进、水质指标及出水一级A标准详

基金项目 安徽省现代农业产业技术体系建设专项;典型村镇污水一体化处理工艺集成与装备研发项目。

作者简介 陈建(1993—),男,安徽合肥人,助理工程师,硕士,从事水污染控制研究。*通信作者,正高级工程师,博士,从事环境修复与污染控制研究。

收稿日期 2022-03-18

见表2。

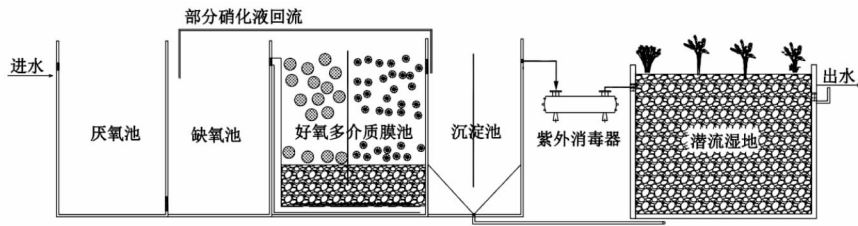


图1 多介质膜复合人工湿地技术工艺流程

Fig. 1 The process flow of multi-media membrane composite artificial wetland technology

表1 装置各单元参数

Table 1 Parameters of each unit in the device

| 单元 Unit | 池体尺寸 Pool size (m×m×m) | 运行水深 Running water depth//m | 水力停留 时间 HRT d |
|--|------------------------------|-----------------------------------|---------------------|
| 厌氧池 Anaerobic tank | 0.4×0.3×0.7 | 0.60 | 0.14 |
| 缺氧池 Anoxic tank | 0.4×0.4×0.7 | 0.60 | 0.19 |
| 好氧多介质膜池 Aerobic multi-media membrane pool | 0.5×0.5×0.7 | 0.60 | 0.30 |
| 沉淀池 Sedimentation tank | 0.5×0.4×0.7 | 0.60 | 0.24 |
| 潜流人工湿地 Subsurface flow artificial wetland | 0.7×0.6×0.5 | 0.60 | 0.36 |

表2 装置进、出水水质变化

Table 2 The changes of water quality in the influent and effluent of the device

| 项目 Item | 总氮 TN | 硝态氮 NO ₃ ⁻ -N | 氨氮 NH ₄ ⁺ -N | 化学 需氧量 COD _{Cr} | 总磷 TP |
|--|----------|--|---------------------------------------|--------------------------------|----------|
| 进水 Influent | 31.30 | 0.14 | 27.63 | 115.25 | 3.43 |
| 一级出水 First-level effluent | 19.06 | 6.49 | 10.10 | 19.07 | 0.47 |
| 二级出水 Second-level effluent | 18.39 | 6.40 | 9.06 | 15.50 | 0.43 |
| 出水一级A标准 First-level A standards of effluent | ≤20 | — | ≤15 | ≤50 | ≤1 |

1.3.2 水质监测及方法。水温采用温度计测量;总氮(TN)、总磷(TP)浓度采用过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636—

2012/GB 11893—1989)检测;NO₃⁻-N浓度采用紫外分光光度法(HJ/T 346—2007)检测;NH₄⁺-N浓度采用纳氏试剂分光光度法(HJ 535—2009)检测;COD_{Cr}浓度采用重铬酸盐法(HJ 828—2017)检测。

2 结果与分析

2.1 氨氮去除效果 由图2a可知,随着水温的降低,进水NH₄⁺-N浓度逐渐升高,出水NH₄⁺-N浓度呈现波动升高的状态;由图2b可知,NH₄⁺-N的去除率受进水浓度及温度的共同影响呈现出波动下降的状态,其中水温是主要影响因素。当水温为26℃时,适合硝化菌生长促进硝化反应的进行^[14],NH₄⁺-N去除率最高。当水温高于16℃时,NH₄⁺-N去除率超过85.00%。当水温低于12℃时,低水温抑制了硝化及亚硝化细菌的活性^[15],导致NH₄⁺-N去除率明显下降。由图2a可知,当水温低于12℃时,一级出水与二级出水NH₄⁺-N浓度基本相同,潜流人工湿地对NH₄⁺-N几乎无去除效果,主要原因是潜流人工湿地内部绝大部分处于厌氧状态,硝化能力不足,加之水温较低,硝化细菌活性受到抑制,导致潜流人工湿地几乎丧失NH₄⁺-N去除能力^[16]。试验期间进水NH₄⁺-N平均浓度为27.63 mg/L,出水NH₄⁺-N平均浓度为9.06 mg/L,出水水质远优于安徽省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 34/3527—2019)的一级A标准,平均去除率达67.20%。

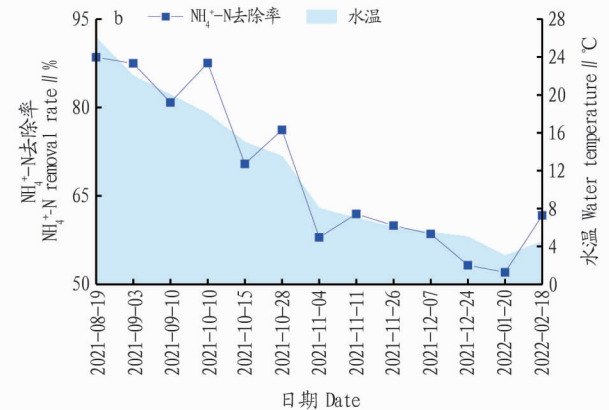
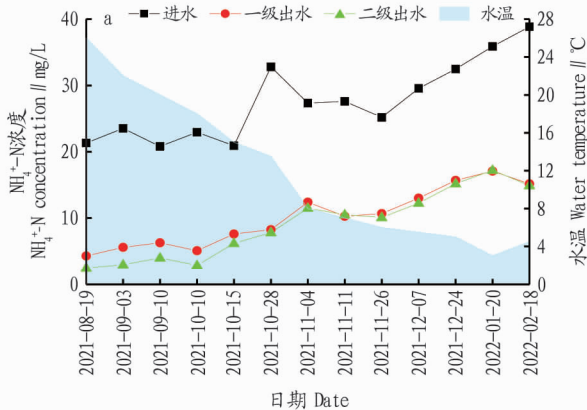


图2 不同水温下NH₄⁺-N的去除效果

Fig. 2 The removal effect of NH₄⁺-N at different water temperatures

2.2 总氮去除效果 由图3a可知,随着水温的降低,出水总氮(TN)浓度逐渐升高;由图3b可知,TN去除率也随着水温的降低呈现波动降低的状态。由图4可知,系统进水硝态

氮(NO₃⁻-N)浓度接近0 mg/L,NO₃⁻-N出水浓度随水温的降低呈现上升的趋势,但出水浓度波动较大,主要与进水NH₄⁺-N浓度波动有关。冬季水温较低,反硝化菌不仅增长

速率受到影响,而且其活性也受到抑制,加上试验用水碳氮比较低,可利用的碳源不足,导致反硝化脱氮过程受限, NO_3^- -N 去除率低, NH_4^+ -N 硝化转为 NO_3^- -N 积累,使得出水 NO_3^- -N 浓度最高时超过 9.00 mg/L,最终导致 TN 去除率低^[17]。由图 3b 可知,当水温高于 20 °C 时, TN 去除率较高,此时水温适宜硝化菌、反硝化菌生存繁殖;当水温低于 12 °C 时, TN 去除率低于 42.00%,因为 12 °C 水温远低于反硝化细

菌适宜生存的温度,且随着水温的降低,反硝化菌的增殖及代谢速率也将降低^[18]。该工艺试验期间进水 TN 平均浓度为 31.30 mg/L,出水 TN 平均浓度为 18.39 mg/L,出水水质优于安徽省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 34/3527—2019)的一级 A 标准,冬季 TN 平均去除率可达 41.24%。

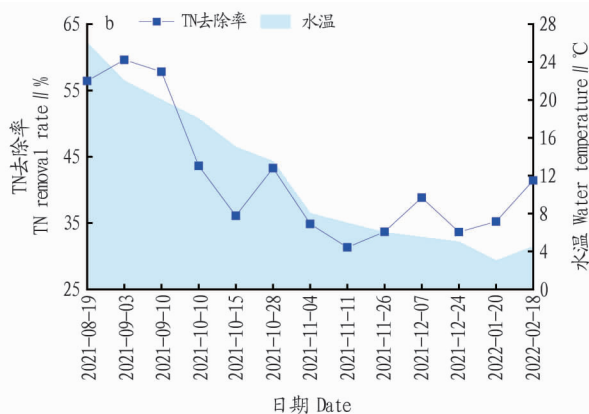
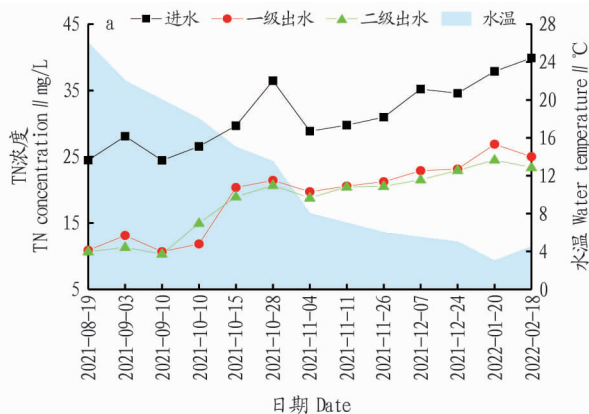


图 3 不同水温下 TN 的去除效果

Fig. 3 The removal effect of TN at different water temperatures

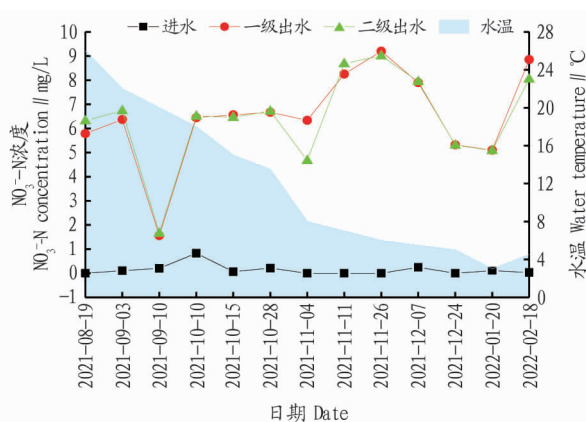


图 4 不同水温下 NO_3^- -N 进出水浓度的变化

Fig. 4 Variation of NO_3^- -N influent and effluent concentrations at different temperatures

2.3 总磷去除效果 由图5a可知,随着水温的降低,进水TP

浓度呈现波动状态,但出水 TP 浓度基本保持在 0.50 mg/L 左右;由图 5b 可知,TP 去除率呈现上下波动状态,水温的降低基本不影响 TP 去除率,这主要是因为该工艺同时采用生物和化学除磷方法^[19],污水中 TP 的去除受水温的影响较小。其中,生物除磷是由厌氧池中聚磷菌释磷与好氧多介质生物膜池聚磷菌吸磷完成,使磷得以去除,但聚磷菌活性会随着水温的降低而降低,出水 TP 浓度基本不随水温的变化而变化,主要是因为系统采用化学除磷方法^[20-21]。当水温过低时,生物除磷效果锐减,系统需要投加化学除磷药剂维持除磷效果,采用 PAC(Al_2O_3 含量 28%) 8.40 g/d 辅助除磷,形成沉淀物以剩余污泥的方式排出,保证了系统在冬季低水温情况下出水 TP 浓度稳定达标。试验期间进水 TP 平均浓度为 3.43 mg/L,出水 TP 平均浓度为 0.43 mg/L,出水水质远优于安徽省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 34/3527—2019)一级 A 标准,平均去除率高达 87.56%。

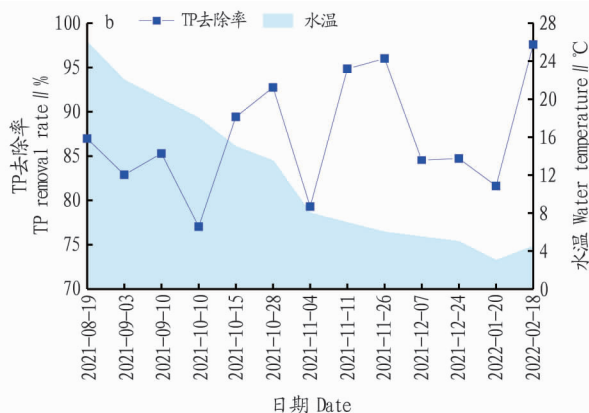
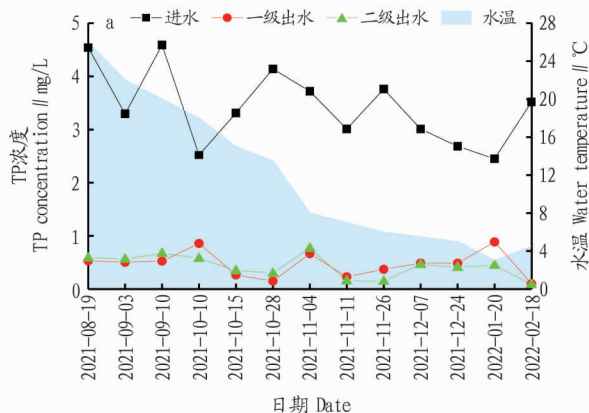


图 5 不同水温下 TP 的去除效果

Fig. 5 The removal effect of TP at different water temperatures

2.4 COD_{Cr} 去除效果 由图 6a 可知,进水 COD_{Cr} 浓度在 60.00~200.00 mg/L 内波动变化,随着水温的逐渐降低,出水 COD_{Cr} 浓度基本维持不变,波动幅度较小。由图 6b 可知,COD_{Cr} 去除率随水温的下降整体上呈降低趋势。农村生活污水中的有机物主要通过微生物好氧呼吸作用、同化作用以及定期排泥等途径去除^[22]。因为悬浮颗粒物可吸附有机物形成沉淀,定期排泥去除,但仅占有机物小部分^[23]。试验期间,随着水温的降低,并未出现剩余污泥增多的现象,因此该

系统主要是通过好氧多介质生物膜池中生长的大量异养型微生物的降解和吸收作用去除有机物^[24],证实了其在低温情况下仍可高效降解有机物。试验期间系统进水 COD_{Cr} 平均浓度为 115.25 mg/L,出水 COD_{Cr} 平均浓度为 15.50 mg/L,出水水质远优于安徽省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 34/3527—2019)一级 A 标准,冬季低水温情况下 COD_{Cr} 平均去除率可达 86.55%。

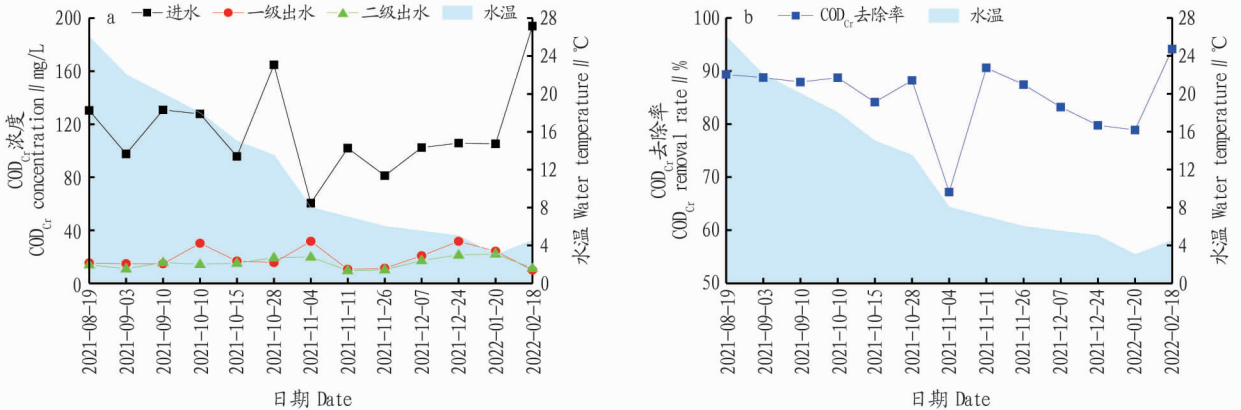


图 6 不同水温下 COD_{Cr} 的去除效果

Fig. 6 The removal effect of COD_{Cr} at different water temperatures

3 结论

通过多介质膜复合人工湿地技术处理冬季低水温农村生活污水,得出以下结论:此工艺在冬季能有效处理农村生活污水,运行持久稳定,可高效去除污水中的有机物,且脱氮除磷效果较好,冬季对 TN、NH₄⁺-N、COD_{Cr} 和 TP 去除率分别为 41.24%、67.20%、86.55% 和 87.56%,出水水质均优于安徽省《农村生活污水处理设施水污染物排放标准》(DB 34/3527—2019)一级 A 标准。

多介质膜复合人工湿地技术绿色低碳,PAC 药剂费损耗约 0.03 元/t,不需要添加外源性碳源,运行维护费用低。此工艺有效解决了农村生活污水冬季出水水质波动大、处理效率低和生物量浓度低等问题。此工艺在水温低于 5 °C 条件下出水 COD_{Cr} 平均浓度为 15.50 mg/L,好氧多介质生物膜中的微生物作用是高效去除有机物的关键因素,其高效降解有机物的作用机理仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 李云,夏训峰,陈盛,等.我国农村生活污水处理地方标准现状、问题及对策建议[J].环境工程技术学报,2022,12(1):293-300.
- [2] 高晨晨,郑兴灿,游佳,等.城市污水脱氮除磷系统的活性污泥菌群结构特征[J].中国给水排水,2015,31(23):37-42.
- [3] 王衫允,马斌,贾方旭,等.AAO 污水处理工艺中厌氧氨氧化效能及微生物交互作用[J].中国环境科学,2016,36(7):1988-1996.
- [4] 张玲,彭党聪,常蝶.温度对聚磷菌活性及基质竞争的影响[J].环境科学,2017,38(6):2429-2434.
- [5] 姜体胜,杨琦,尚海涛,等.温度和 pH 值对活性污泥法脱氮除磷的影响[J].环境工程学报,2007,1(9):10-14.
- [6] MATAMOROS V, MUJERIEGO R, BAYONA J M. Trihalomethane occurrence in chlorinated reclaimed water at full-scale wastewater treatment plants in NE Spain [J]. Water research, 2007, 41(15): 3337-3344.
- [7] 艾胜书,徐辉,张雪花,等.我国寒冷地区城市污水生物处理工艺的研究与应用现状[J].长春工程学院学报(自然科学版),2014,15(3):50-52,57.

- [8] 钱程,任丽波,姚瑶.寒冷地区冬季低温对污水处理厂运行效率的影响研究[J].环境科学与管理,2008,35(5):84-86.
- [9] 任南琪,马放,杨基先,等.污染控制微生物学[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002:91-95.
- [10] KARADAG D, KÖROĞLU O E, OZKAYA B, et al. A review on anaerobic biofilm reactors for the treatment of dairy industry wastewater [J]. Process biochemistry, 2015, 50(2): 262-271.
- [11] 路晖,辛涛,吴迪,等.MBBR 工艺在污水处理厂提量增效中的应用[J].中国给水排水,2019,35(4):100-105.
- [12] YUAN L M, ZHANG C Y, XU J Y, et al. Performance of an innovative step-feed An-M(A/O)-MBR process for nutrients removal [J]. Desalination & water treatment, 2015, 55(10): 2728-2733.
- [13] LI M, LI P, DU C Y, et al. Pilot-scale study of an integrated membrane-aerated biofilm reactor system on urban river remediation [J]. Industrial & engineering chemistry research, 2016, 55(30): 8373-8382.
- [14] 徐敏,牛越,晶晶,等.几种理化因子对海洋硝化细菌去除氨氮效果的影响[J].微生物学杂志,2007,27(5):65-69.
- [15] 崔萌,马瑞芬.污水处理厂冬季运行中生物脱氮除磷效果的分析[J].中国给水排水,2016,32(4):72-76.
- [16] 苏功平,张小凤,陈文清.复合生物滤池+潜流人工湿地组合工艺处理农村生活污水[J].环境工程学报,2016,10(2):775-780.
- [17] 张智,李柏林,相欣奕,等.处理低温低碳源城市污水的 A/A/O 氧化沟工艺脱氮运行工况优化[J].环境工程学报,2012,6(8):2565-2570.
- [18] 马娟,彭永臻,王丽,等.温度对反硝化过程的影响以及 pH 值变化规律[J].中国环境科学,2008,28(11):1004-1008.
- [19] 康梦远,韩墨菲,押玉荣,等.改良 A²O-MBR 工艺深度生物脱氮除磷中试研究[J].水处理技术,2021,47(5):98-101,110.
- [20] 吕亮,尤雯,张敏,等.硝化液回流比对 ABR-MBR 工艺反硝化除磷效能的影响[J].环境科学,2018,39(3):1309-1315.
- [21] GE S J, ZHU Y P, LU C C, et al. Full-scale demonstration of step feed concept for improving an anaerobic/anoxic/aerobic nutrient removal process [J]. Bioresource technology, 2012, 120: 305-313.
- [22] 张荣新,焦玉恩,傅金祥,等.不同水力负荷率对潜流人工湿地内部污染物迁移转化的影响[J].环境污染与防治,2018,40(7):748-754.
- [23] 唐娜,张强,黄玉明.潜流人工湿地中有机物的去除[J].西南师范大学学报(自然科学版),2009,34(3):71-74.
- [24] DOONAN C J, MORRIS W, FURUKAWA H, et al. Isorecticular metalation of metal-organic frameworks [J]. Journal of the American chemical society, 2009, 131(27): 9492-9493.