

论述与研究

DOI: 10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.03.001

基于重力势能驱动的新型旋转移动床梯级净化工艺

朱晗霄¹, 王 静², 陈雨喆³, 陈猷鹏¹, 郭劲松¹, 方 芳¹,
晏 鹏¹

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆建筑工程职业学院 山地海绵城市建设研究与应用中心, 重庆 400072; 3. 中国建筑西南设计研究院有限公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 结合山地村镇地势高差大的特点,根据水车的运行原理,构建了一套适用于山地村镇生活污水处理的新型旋转移动床梯级净化工艺。通过对复合式双旋转生物移动床进行清水复氧试验,发现其具有良好的曝气性能,跌水高度越高、跌水流量变化范围越小,复氧效果越好。稳定运行期间,对COD、NH₄⁺-N、TN和TP的平均去除率分别为96.5%、91.7%、56.5%和17.5%,COD、NH₄⁺-N和TN的出水浓度达到了重庆市《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》(DB 50/848—2021)中的一级标准。由于工艺依托生物膜法实现营养物去除,TP去除效果较差。取复合式双旋转生物移动床中的填料进行硝化性能测试,硝化速率为6.058 mg/(gMLVSS·h),硝化活性较高。高通量测序结果显示,属水平上相对丰度排名前7的微生物均为好氧菌,说明复合式双旋转生物移动床良好的曝气效果对微生物群落起到了选择作用;与去除COD相关的菌属相对丰度之和为32.7%,与硝化有关的菌属相对丰度之和为21.5%。因该工艺整体不需要电能驱动,大大降低了运行成本。

关键词: 山地村镇生活污水; 旋转移动床; 复氧效率; 营养物去除; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)03-0001-08

A New Rotary Moving Bed Cascade Purification Process Driven by Gravity Potential Energy for Treatment of Domestic Sewage in Mountain Villages and Towns

ZHU Han-xiao¹, WANG Jing², CHEN Yu-zhe³, CHEN You-peng¹, GUO Jin-song¹,
FANG Fang¹, YAN Peng¹

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;
2. Mountain Sponge City Construction Research and Application Center, Chongqing Jianzhu College, Chongqing 400072, China; 3. China Southwest Architectural Design and Research Institute Co. Ltd., Chengdu 610041, China)

Abstract: Combined with the characteristics of large elevation difference in mountain villages and towns, according to the operation principle of waterwheels, a new rotary moving bed cascade purification process suitable for domestic sewage treatment in mountain villages and towns was constructed. Through

基金项目: 国家重点研发计划项目(2019YFD1100201); 重庆市教育委员会科学技术研究项目(KJQN202004308)

通信作者: 晏鹏 E-mail: pyan@cqu.edu.cn

the clean water reaeration test on the compound double rotating biological moving bed (cdr-BMB), it was found that cdr-BMB had good aeration performance. And when the drop height was higher and the drop flow varied in a small range, the reaeration effect was better. During the stable operation, the average removal rates of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$, TN and TP were 96.5%, 91.7%, 56.5% and 17.5% respectively, and the concentration of COD, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and TN in the effluent could reach the *Discharge Standard of Water Pollutants for Rural Wastewater Treatment Facilities* (DB 50/848-2021) in Chongqing. Since the process relied on biofilm to achieve nutrient removal, the removal effect of TP was poor. The nitrification performance test of the filler in cdr-BMB showed that the nitrification rate of the filler was 6.058 mg/(gMLVSS·h), and the nitrification activity was high. The results of high-throughput sequencing showed that the microorganisms in the top 7 relative abundance at the genus level were all aerobic bacteria, indicating that the good aeration effect of the cdr-BMB played a selective role in the microbial community. Besides, the sum of relative abundance of genera related to COD removal was the highest at 32.7%, and the sum of the relative abundance of genera associated with nitrification reached 21.5%. Because the whole process does not require electric power to drive, it can save a lot of operating costs.

Key words: domestic sewage in mountain villages and towns; rotary moving bed; reaeration efficiency; nutrient removal; microbial community

我国大多数山地村镇的排水系统不完备,大量生活污水未经处理就随意排放,容易引发严重水环境问题^[1-2]。山地村镇因地处山区,村民居住以散居为主,集中式污水处理工艺难以适应其污水收集特征,不能满足其处理要求。现有山地村镇污水处理设施少且普适性不强,污水处理装置仍存在好氧单元曝气能耗大、维护强度高、脱氮性能差等缺点^[3-4]。

山地村镇具有较大的地形高差,因而使污水蕴含着丰富的重力势能。如果通过挖掘重力势能代替传统污水处理所需能耗,则可避免外部电能的输入,降低污水处理碳排放,助力国家“双碳”战略。水车在中国农业史上占有重要地位,它能够将水的重力势能有效转化为机械能从而提供各种动力。因此,结合山地村镇的地形地势特点,研发了基于重力势能驱动的新型旋转移动床梯级净化工艺及装置。该工艺具有能耗低、占地面积小、易维护、成本低等优点,能够满足山地村镇生活污水低成本处理需求。

1 实验材料与方法

1.1 实验装置

结合山地村镇地势高差大的特点,根据水车的动力驱动原理,设计出如图1所示的新型旋转移动床梯级净化工艺及装置,该装置主要由复合式双旋转生物移动床(cdr-BMB)和新型分区式移动床反应

器(nz-MBBR)两部分构成,其中nz-MBBR内含辅助电机,仅流量较小无法带动nz-MBBR和需要稳定转速挂膜时运行。

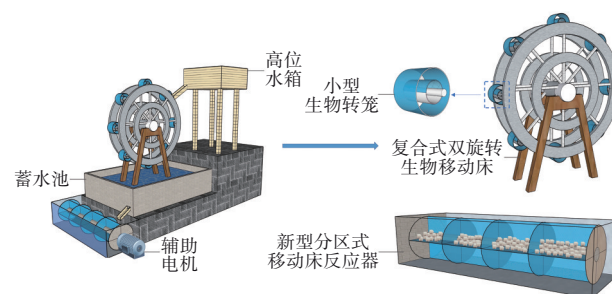


图1 新型旋转移动床梯级净化工艺

Fig.1 A novel rotating moving bed cascade purification process

1.1.1 复合式双旋转生物移动床反应器

水从高处跌下,冲击cdr-BMB上方的小型生物移动床,在此过程中实现对污水的初次跌水曝气。污水在小型生物移动床(直径为120 mm,长度为130 mm)中不断富集,与其中的亲水性聚氨酯生物海绵填料上的生物膜进行充分接触,在此过程中能对污水进行初步处理。当小型生物移动床内的污水积累到一定程度时(累积过程保证污水停留时间),因cdr-BMB受力不平衡,从而实现其转动。反应器转动过程中,生物膜可与空气直接接触进行氧传质。转动过程中污水跌入下方蓄水池,实现对污

水的二次跌水曝气,上述两次跌水曝气均不需要能量。在蓄水池中,同样放置有生物海绵填料。污染物在小型生物移动床和蓄水池生物海绵填料上的生物膜作用下得到了充分降解,又因生物膜具有外层好氧、内层缺氧和厌氧的特点,还能通过同步硝化反硝化实现脱氮^[5]。

1.1.2 新型分区式移动床反应器

蓄水池中污水会继续流向下一级nz-MBBR,反应器长度为2 100 mm,通过三个盘圈(盘圈直径为300 mm,盘圈间隔为500 mm)将笼体分为四个区,每个区又分为四格,每格内按填充率为30%填充生物填料。在该反应器不断转动过程中流体将呈现出纵向流+横向循环流的复杂流态,加速填料中污染物的传质过程,故反应器前段、中段和后段的污染物负荷不断降低,形成动态的“厌氧-缺氧-好氧”微环境,使反应器具有良好的COD、氨氮和总氮去除性能。

1.2 污泥来源与原水水质

实验原水参照西南地区山地村镇生活污水水质^[6]配制,其COD、NH₄⁺-N、TN、TP平均浓度分别为244、37、41、3.97 mg/L。接种污泥取自重庆市某污水处理厂。

1.3 实验方法

1.3.1 挂膜方法

相较于自然挂膜法等,快速排泥法更适合于本实验装置挂膜^[7]。cdr-BMB上的每个小型生物移动床均按20%填充率填装海绵填料,在跌水高度为0.7 m、跌水流量为6.6 mL/s的运行条件下进行挂膜。新型分区式移动床反应器中同样填装有海绵填料,填充率为30%,低转速(约1.5 r/min)运行24 h之后将转速调整为3 r/min进行挂膜。

1.3.2 清水复氧实验

为考察cdr-BMB的跌水复氧性能,需对其进行清水复氧实验。实验前,先在高位水箱中注满清水,然后将耗氧剂Na₂SO₃投入水中以消耗水中的溶解氧,同时为了加快耗氧速率,需要往水中投加CoCl₂·6H₂O作为催化剂,投加量按照Co²⁺的浓度为0.3~0.5 mg/L计算^[8]。通过分别改变跌水高度(0.1、0.3、0.5、0.7、0.9、1.1 m)、跌水流量(3.3、4、5、6.6、10、20 mL/s)来研究参数变化对反应器跌水复氧性能的影响。以氧传质系数K_{La}与复氧效率R来表征反应器的复氧效果^[9]。

1.3.3 硝化性能测试

为探究挂膜成功后cdr-BMB中填料的硝化性能,通过序批实验进行了硝化速率测试,方法如下:在装有配水的250 mL锥形瓶中放入适量填料,并充分曝气,而后将锥形瓶密封,放入温度为25℃、转速为120 r/min的水浴摇床中,分别在第0、10、20、40、60、80、110、150分钟取样测定氨氮浓度,每个时间点取三个样,取其平均值作为该点氨氮浓度值,通过分析氨氮浓度与时间的关系,进而计算出硝化速率。

1.4 检测方法

COD、NH₄⁺-N、TN、TP等污水常规生化指标参考《水和废水监测分析方法》(第4版)进行测定;微生物群落通过基于16S rRNA基因扩增的高通量测序技术进行分析。

2 结果与讨论

2.1 cdr-BMB跌水复氧性能

控制高位水箱溶解氧浓度低于0.2 mg/L,小型生物移动床转动到水体中最大浸没量为其体积的50%,分别考察在不同跌水流量和跌水高度下反应器的氧传质系数K_{La(20)}的变化,结果如图2所示。

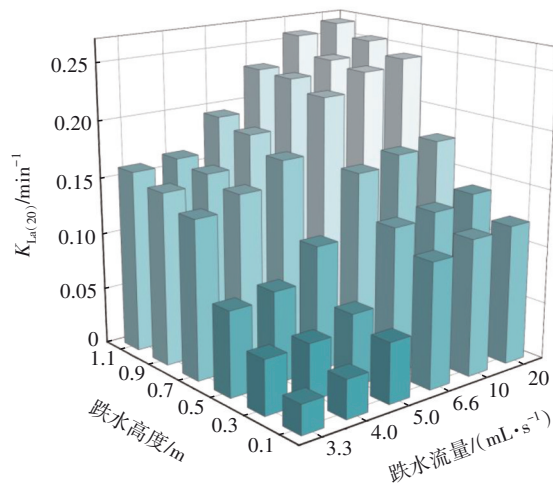


图2 不同跌水流量和高度对K_{La(20)}的影响

Fig.2 Effects of different water drop flow and height on

K_{La(20)}

当跌水流量从3.3 mL/s向20 mL/s不断增加时,K_{La(20)}不断增长。其中,跌水流量从3.3 mL/s向6.6 mL/s不断增加的过程中,因水流量较小,跌落过程中所遇空气阻力较大,故水流以小水滴状跌落,水流和空气接触的比表面积逐渐变大,K_{La(20)}增加得较快,当跌水流量达到6.6 mL/s时,K_{La(20)}增长速度达

到最大,为 0.23 min^{-1} (对应跌水高度为 0.7 m)。冯静娴^[9]研究的跌水转笼装置在相似条件下 $K_{\text{La}(20)}$ 为 0.21 min^{-1} ,这表明cdr-BMB复氧效果较好。当跌水流量 $>6.6 \text{ mL/s}$ 时,水流从高位水箱跌落至小型生物移动床的过程中,水流形态从水滴状逐渐聚合成圆柱状,这是因为在此过程中空气阻力相对于水流总体的重力可忽略不计,水与空气接触的比表面积变小,液膜厚度变大,故传质阻力变大,氧传质系数增速变缓,这与李杰等人^[10]的研究结果一致。

当跌水高度从 0.1 m 向 0.7 m 变化时,随着跌落高度的增加,污水与空气的接触时间逐渐变长, $K_{\text{La}(20)}$ 不断增大,污水因空气阻力而被打散变成液滴状,且高度越大,形成的小水珠越多,因此与空气的接触面积逐渐增加。结合上述两种因素,导致 $K_{\text{La}(20)}$ 的增速也不断增长。当跌落高度达到 0.7 m 时,二者的增幅均达到最大值。当跌落高度大于 0.7 m 时, $K_{\text{La}(20)}$ 基本趋于稳定,最高达到了 0.26 min^{-1} (对应跌水流量为 20 mL/s),部分有小幅度的增加,这是因为当跌水高度足够的情况下,污水在空中基本已经完成了复氧,污水中的溶解氧趋近于饱和,故 $K_{\text{La}(20)}$ 趋向于稳定。在跌水流量为 20 mL/s 的情况下, $K_{\text{La}(20)}$ 甚至出现了下跌的现象,说明在这种情况下,水在跌落过程中与空气接触的比表面积基本不变,复氧效果达到稳定,跌落高度对于复氧效果的影响作用变小。

图3所示为不同跌水流量和高度下反应器复氧效率 $R_{(20)}$ 的变化。

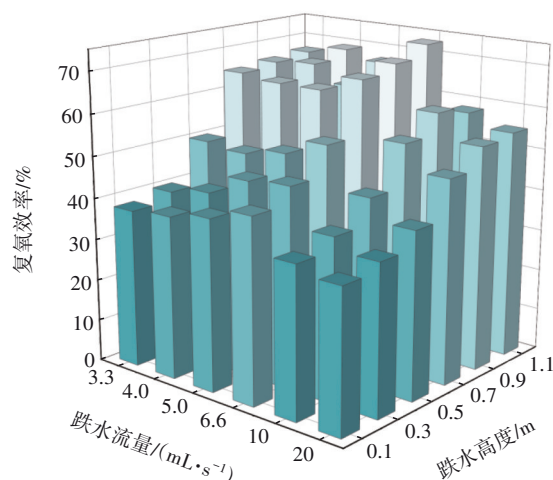


图3 不同跌水流量和高度对 $R_{(20)}$ 的影响

Fig.3 Effects of water drop flow and height on $R_{(20)}$

从图3不难看出,当跌水流量在 3.3 mL/s 向 6.6 mL/s 变化时,复氧效率有所增加,在跌水流量为 6.6 mL/s 时不同跌水高度下的复氧效率均达到最大值,最高为 72.5% ,复氧效果与某跌水装置^[9]相当。同时,无论在何种跌水流量下,随着跌水高度的增加,复氧效率也增加。在跌水高度从 0.1 m 增加至 0.7 m 的过程中,复氧效率从 38.4% 开始不断增长,且增长幅度不断加大,尤其当跌水高度从 0.5 m 向 0.7 m 增加时,各跌水流量对应的复氧效率增幅最大。当跌水高度大于 0.7 m 时,水中的溶解氧浓度较高,故氧传质推动力减小,复氧效率增幅减缓,最终趋于稳定,这与王左良^[11]的研究结果相吻合。

2.2 整体工艺对污染物的去除性能

工艺稳定运行参数:跌水高度为 0.7 m ,跌水流量为 6.6 mL/s ,cdr-BMB的HRT为 4.4 h ,nz-MBBR的HRT为 8.3 h 。

2.2.1 cdr-BMB对污染物的去除效果

在 60 d 的运行监测中,系统对各指标的去除效果相对比较稳定,在进水COD、 NH_4^+-N 、TN、TP平均浓度分别为 244 、 37 、 41 、 3.97 mg/L 的条件下,相应出水平均浓度分别为 114 、 18 、 32.9 、 3.74 mg/L ,平均去除率分别为 53.3% 、 51.9% 、 21.3% 、 5.7% 。得益于cdr-BMB良好的曝气性能,其对COD和 NH_4^+-N 有着较好的去除效果。因为采用生物膜来处理污水,故对TP的去除效果不佳。

2.2.2 工艺整体去除效果

工艺整体对COD、 NH_4^+-N 和TN的平均去除率分别达到了 96.5% 、 91.7% 和 56.5% ,出水平均浓度分别降至 8.6 、 3.8 和 18.1 mg/L ,出水指标均达到了重庆市《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》(DB 50/848—2021)中的一级标准,揭示整个工艺体系具有良好的脱氮性能。因工艺整体处在好氧-缺氧环境下,且没有厌氧处理单元,系统中聚磷菌数量较少,故出水TP平均浓度为 3.3 mg/L ,平均去除率为 17.5% ,仅满足上述排放标准中的三级标准。熊仁等人^[12]所采用的厌氧+跌水曝气+人工湿地组合工艺对农村生活污水中的TP具有很好的去除效果,若将新型旋转移动床梯级净化工艺应用于山地村镇生活污水处理,可在其后增加人工湿地以起到强化除磷的作用。

2.3 小型生物移动床中微生物硝化性能

稳定运行后,从小型生物移动床中取适量填料

测试其脱氮性能,得到氨氮浓度与时间的关系如图4所示。经线性拟合得到拟合方程为 $y = -0.1103x + 30.255$, R^2 为 0.921, 计算得填料硝化速率为 $6.058 \text{ mg}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$ 。冯静娴等^[13]发现,跌水生物转盘上海绵的硝化速率为 $4.0 \text{ mg}/(\text{gMLVSS} \cdot \text{h})$, 对比之下本装置的硝化速率较高,且硝化活性与反应器曝气性能密切相关^[14-15],这也说明本装置的跌水曝气能力较好,能为硝化菌正常的生长代谢提供充足的溶解氧。

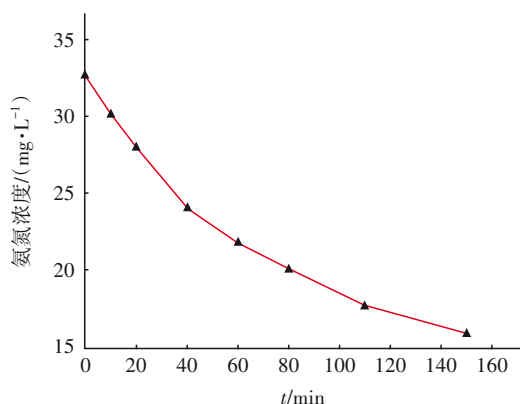


图4 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度随时间的变化

Fig.4 Variation of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ concentration with time

2.4 小型生物移动床中生物膜微生物群落分析

稳定运行后,分别在第0、5、15、30、50、80天从小型生物移动床中同一位置取样,用Z1、Z2、Z3、Z4、Z5和Z6来分别表示6个样品。图5所示为门水平下各生物膜菌属的相对丰度分布。在所有样品中,变形菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、绿弯菌门和放线菌门的相对丰度分别为54.1%~64.3%、15.7%~19.7%、2.5%~8.6%、3.7%~5.1%和2.5%~4.2%,合计为84.3%~90.9%。可以看出,变形菌门是系统中的优势菌群。硝化菌、反硝化菌以及具有去除COD功能的微生物大多数都是变形菌门和拟杆菌门,其中以变形菌门为主^[16]。另外,有研究表明,绿弯菌门的主要功能是去除污水中的COD^[17],厚壁菌门中的部分菌纲对一些难降解大分子有机物具有降解作用^[18],这些细菌具有较高的丰度解释了cdr-BMB具有较好去除COD、脱氮效果的原因。厚壁菌门中大多数细菌为兼性厌氧或专性厌氧菌,放线菌门细菌一般以好氧细菌为主,可以看出,从Z1到Z6厚壁菌门的相对丰度不断减少,放线菌门的相对丰度呈上升趋势,这反映了cdr-BMB具有的良好曝气效果对其所负载的微生物起到了选择作用。

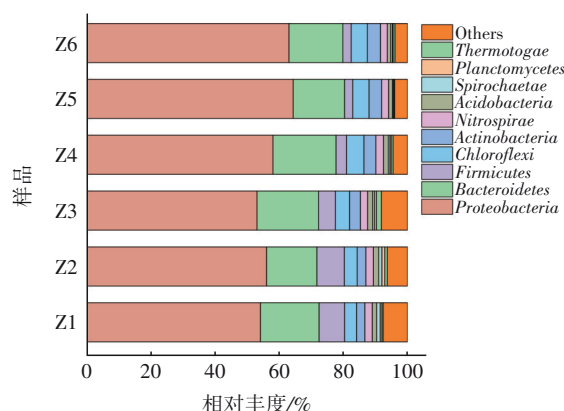


图5 门水平下生物膜中菌属的相对丰度

Fig.5 Bacterial communities of biofilm at phylum level

图6所示为6个样品在属水平上的微生物相对丰度,其中相对丰度不到1%的被归为Others。在相对丰度>1%的菌属中,前7种菌属均为好氧菌,而且均与有机物降解有关^[19],其所占比例呈增长的趋势,这进一步证明了cdr-BMB具有的良好曝气效果为这7种好氧菌创造了良好的生长环境。*Bacillus*、*Sulfobacillus*、*Nakamura*和*Solomycetes*与COD降解有关^[20],随着系统的不断运行,四者的平均相对丰度之和从27.4%增长到32.7%,因此cdr-BMB具有良好的COD去除效果。同时*Bacillus*还与硝化过程有关^[21]。

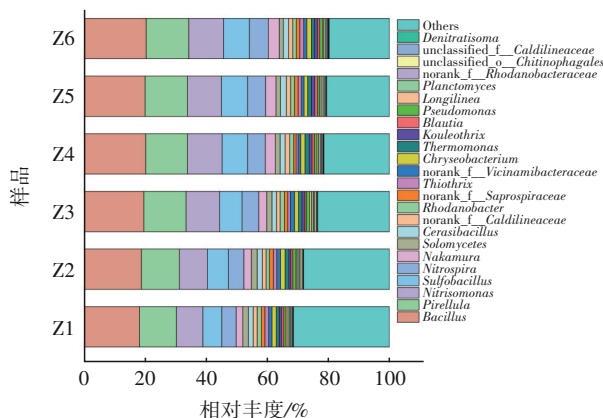


图6 属水平下生物膜中菌属的相对丰度

Fig.6 Bacterial communities of biofilm at phylum level

Nitrosomonas 为主要的氨氧化细菌(AOB),能将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 转化为亚硝酸盐,属于变形菌门,在初始其相对丰度为8.6%,到第80天为13.3%。*Nitrospira* 为主要的亚硝酸盐氧化菌(NOB),属硝化螺旋菌门,主要作用是将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 氧化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,在初始其相对丰度为4.7%,随着时间的推移,其相对丰度不断增加,最终在第80天达到8.2%,与硝化有关的属菌之

和达到了21.5%。*Thermomonas*、*Pseudomonas* 为主要的反硝化菌^[22],能够在缺氧条件下将亚硝酸盐和硝酸盐还原为氮气继而从污水中逸出,从而达到除氮的目的,随着运行时间的不断增加,反硝化菌的相对丰度之和从1.3%增长到了2.1%,总体变化不大。

3 示范工程

3.1 示范工程设计与建设

依托小试结果进行了示范工程的设计与建设。为了解决工艺TP去除效果较差的问题,示范工程采用“cdr-BMB+人工湿地”工艺。示范工程选址在某山地村镇,地势高差大于5 m。cdr-BMB设计参数:小型生物移动床长为300 mm,直径为400 mm;外圈固定圆环宽为150 mm,直径为1 600 mm;支撑骨架长为790 mm,宽为800 mm;支架长为1 500 mm,直径为200 mm;底座长为2 200 mm,宽为600 mm。

3.2 cdr-BMB启动与运行

cdr-BMB搭建完成后,开始进行挂膜启动。通过污水管网将该村镇生活污水收集进厌氧池,污水从厌氧池顶部流出,继而从高空跌入小型生物转笼内,在此过程中完成污水的曝气。污水与其中的生物海绵填料不断接触,同时,随着小型生物移动床内的污水不断蓄积,引起cdr-BMB的转动,生物填料与蓄水池中的污水进行接触,起到处理污水的作用。经过60 d的运行,cdr-BMB对氨氮的去除率逐渐稳定,挂膜完成。图7所示为cdr-BMB挂膜完成后的状态。

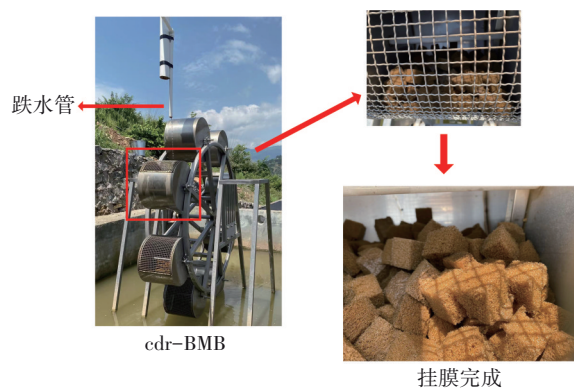


图7 cdr-BMB挂膜启动完成示意

Fig.7 Diagram of cdr-BMB biofilm formation

挂膜阶段cdr-BMB对COD和氨氮的去除效果如图8所示。

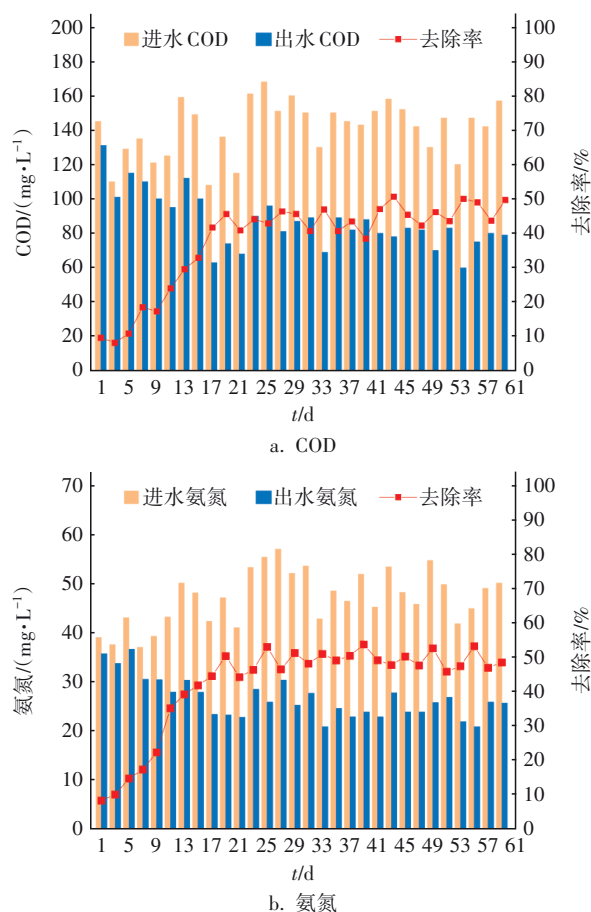


图8 cdr-BMB在挂膜阶段对COD和氨氮的去除效果

Fig.8 Removal of COD and ammonia nitrogen by cdr-BMB in biofilm formation stage

前17 d为挂膜启动阶段,进水COD为108~169 mg/L,氨氮为36.1~57.2 mg/L。当挂膜进行到第17天时,COD去除率达到41.7%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率达到43.5%,而后趋向稳定。在第17~60天,COD去除率在42.3%~50.6%之间变化,平均去除率为45.8%, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率在45.6%~53.9%之间波动,平均去除率为49.2%,COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除率较为稳定,判断挂膜成熟。从以上挂膜过程能够看出,氨氮去除率较高,证明cdr-BMB具有良好的曝气性能。

在运行过程中,cdr-BMB仅依靠较大的重力势能即可驱动工艺运行,不需要单独配备电气设备,运行简单,能节约大量能源。示范工程整体工艺“cdr-BMB+人工湿地”出水水质能够达到重庆市《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》(DB 50/848—2021)中的一级排放标准。

4 结论

① 随跌水高度增加,复氧效果变好,因此,当

在山地村镇使用复合式双旋转生物移动床时,尽量选在地势高差较大的地方,同时控制跌水流量在较小的范围内变化,以获得更好的曝气效果。

② 稳定运行后,新型旋转移动床梯级净化工艺整体对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的平均去除率分别达到96.5%、91.7%、56.5%和17.5%,出水COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的平均浓度分别为8.6、3.8、18.1和3.3 mg/L,其中COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN达到了重庆市《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》(DB 50/848—2021)中的一级排放标准,由于工艺依托生物膜实现营养物去除,TP去除效果较差。

③ 在稳定运行阶段,填料硝化速率为6.058 mg/(gMLVSS·h)。相较于其他跌水装置,其硝化速率较高,说明装置的跌水曝气性能较好。

④ 对cdr-BMB在不同运行阶段的生物膜进行高通量测序发现,变形菌门、拟杆菌门、厚壁菌门、绿弯菌门和放线菌门为系统的优势菌门;从属水平上来看,相对丰度排名前7位的均为好氧菌,说明cdr-BMB良好的曝气效果对微生物群落起到了选择作用。

⑤ 相较于已有的一些农村污水处理工艺,新型旋转移动床梯级净化工艺占地面积小,COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN去除效果好,处理过程不需要能耗,可节省大量运行成本。

参考文献:

- [1] YI X, LIN D, LI J, *et al.* Ecological treatment technology for agricultural non-point source pollution in remote rural areas of China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, 28(30): 40075–40087.
- [2] 程庆松,徐骄阳,葛军,等. 对农村污水收集处理设计中几个问题的探讨[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(6): 29–32.
CHENG Qingsong, XU Jiaoyang, GE Jun, *et al.* Discussion on several problems in the design of rural sewage collection and treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(6): 29–32 (in Chinese).
- [3] ANDERSON J C, JOUDAN S, SHOICHET E, *et al.* Reducing nutrients, organic micropollutants, antibiotic resistance, and toxicity in rural wastewater effluent with subsurface filtration treatment technology [J]. *Ecological Engineering*, 2015, 84: 375–385.
- [4] 陈娟,王超,王沛芳,等. 基于人口分散度的农村生活污水处理模式选择[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(23): 81–88.
CHEN Juan, WANG Chao, WANG Peifang, *et al.* Choice of rural domestic sewage treatment mode based on dispersion degree of rural resident [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(23): 81–88 (in Chinese).
- [5] MA Y, SUNDAR S, PARK H, *et al.* The effect of inorganic carbon on microbial interactions in a biofilm nitrification-anammox process [J]. *Water Research*, 2015, 70: 246–254.
- [6] 谢燕华,刘壮,勾曦,等. 西南地区农村生活污水水质分析及村民意愿调查[J]. *环境工程*, 2018, 36(8): 165–169.
XIE Yanhua, LIU Zhuang, GOU Xi, *et al.* Analysis of the quality of rural domestic sewage in Southwest China and survey of villagers' willingness [J]. *Environmental Engineering*, 2018, 36(8): 165–169 (in Chinese).
- [7] 王建辉,陈猷鹏,郭劲松,等. 生物转盘与生物转笼处理榨菜废水效能对比[J]. *水处理技术*, 2018, 44(2): 84–87.
WANG Jianhui, CHEN Youpeng, GUO Jinsong, *et al.* Comparison on effectiveness of rotating biological contactor and rotating biological cage used for mustard tuber [J]. *Technology of Water Treatment*, 2018, 44(2): 84–87 (in Chinese).
- [8] 住房和城乡建设部. 曝气器清水充氧性能测定: CJ/T 3015.2—1993 [S]. 北京:中国标准出版社, 1993.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development. Determination of the Oxygenation Performance of Aerators for Clean Water: CJ/T 3015.2–1993 [S]. Beijing: China Standard Press, 1993 (in Chinese).
- [9] 冯静娴. 分散式生活污水生物—生态组合工艺填料型跌水转笼优化研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
FENG Jingxian. Study on the Falling Water Driving Packing-type Rotating-cage Optimization in Bioecological Combination Process of the Decentralized Wastewater [D]. Nanjing: Southeast University, 2017 (in Chinese).
- [10] 李杰,钟成华,邓春光. 跌水曝气高度、流量与复氧量关系研究[J]. *环境保护科学*, 2008, 34(5): 39–41.
LI Jie, ZHONG Chenghua, DENG Chunguang. Study on relationship among waterfall aeration height, flux and reoxygenation content [J]. *Environmental Protection Science*, 2008, 34(5): 39–41 (in Chinese).
- [11] 王左良. 跌水曝气(充氧)效果的影响因素试验研究

- [D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- WANG Zuoliang. Experimental Study on Factors Influencing the Effect of Falling Water Aeration (Providing Oxygen) [D]. Chongqing: Chongqing University, 2006 (in Chinese).
- [12] 熊仁, 谢敏, 冯传禄, 等. 厌氧+跌水曝气+人工湿地组合工艺处理农村生活污水 [J]. 环境工程学报, 2019, 13(2): 327-331.
- XIONG Ren, XIE Min, FENG Chuanlu, *et al.* Rural domestic wastewater treatment by a combined process of anaerobic tank, drop aeration and constructed wetland [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(2): 327-331 (in Chinese).
- [13] 冯静娴, 吕锡武, 杨子萱. 跌水生物转盘不同填料的挂膜性能及特征比较 [J]. 水处理技术, 2017, 43(10): 80-84.
- FENG Jingxian, LÜ Xiwu, YANG Zixuan. Comparison of biofilm forming performance and feature with different carriers in falling water driving rotating biological contactor [J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(10): 80-84 (in Chinese).
- [14] LIN Z, ZHOU J, HE L, *et al.* High-temperature biofilm system based on heterotrophic nitrification and aerobic denitrification treating high-strength ammonia wastewater: nitrogen removal performances and temperature-regulated metabolic pathways [J]. Bioresource Technology, 2022, 344: 126184.
- [15] WEN J, LECHEVALLIER M W, TAO W. Nitrification kinetics and microbial communities of activated sludge as a full-scale membrane bioreactor plant transitioned to low dissolved oxygen operation [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 252: 119872.
- [16] MIAO Y, LIAO R, ZHANG X X, *et al.* Metagenomic insights into salinity effect on diversity and abundance of denitrifying bacteria and genes in an expanded granular sludge bed reactor treating high-nitrate wastewater [J]. Chemical Engineering Journal, 2015, 277: 116-123.
- [17] SHU D, HE Y, YUE H, *et al.* Microbial structures and community functions of anaerobic sludge in six full-scale wastewater treatment plants as revealed by 454 high-throughput pyrosequencing [J]. Bioresource Technology, 2015, 186: 163-172.
- [18] RAJENDRAN R, SOORA M, DANANJEYAN B, *et al.* Microbial community diversity of organically rich cassava sago factory waste waters and their ability to use nitrate and N_2O added as external N-sources for enhancing biomethanation and the purification efficiency [J]. Journal of Biotechnology, 2013, 164(2): 266-275.
- [19] HE L, LIN Z, ZHU K, *et al.* Mesophilic condition favors simultaneous partial nitrification and denitrification (SPND) and anammox for carbon and nitrogen removal from anaerobic digestate food waste effluent [J]. Science of the Total Environment, 2022, 816: 151498.
- [20] MEI J, SHEN X, GANG L, *et al.* A novel lignin degradation bacteria-*Bacillus amyloliquefaciens* SL-7 used to degrade straw lignin efficiently [J]. Bioresource Technology, 2020, 310: 123445.
- [21] ZHANG X, LIU Y, REN L Z, *et al.* Impact of COD/N on anammox granular sludge with different biological carriers [J]. Science of the Total Environment, 2020, 728: 138557.
- [22] BARKA E A, VATSA P, SANCHEZ L, *et al.* Taxonomy, physiology, and natural products of *Actinobacteria* [J]. Microbiology and Molecular Biology Reviews, 2016, 80(1): 1-43.

作者简介: 朱晗霄(1996-), 男, 安徽潜山人, 硕士研究生, 主要研究方向为农村生活污水处理。

E-mail: clbfc@cqu.edu.cn

收稿日期: 2022-10-12

修回日期: 2022-10-26

(编辑: 李德强)