

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.05.012

重力驱动生物生态耦合工艺处理村寨污水中试

武 韩¹, 傅慧敏², 雍星宇¹, 许小伟¹, 陈猷鹏¹

(1. 重庆大学 环境与生态学院, 重庆 400045; 2. 重庆工商大学 国家智能制造服务国际
科技合作基地, 重庆 400067)

摘 要: 针对我国山地村寨地区生活污水治理存在技术繁琐复杂、运行成本过高及维护管理不当等问题,结合山地村寨地区地势高差大的地理特质,设计并稳定运行了一套重力驱动生物转笼耦合多级水平潜流人工湿地中试装置。该装置对村寨实际生活污水中污染物的去除效果较好,COD、NH₄⁺-N、TN、TP平均去除率分别为73.3%、66.4%、67.8%、81.7%,出水水质均达到当地排放标准。通过对比污染物去除效果发现,生物绳填料富集藻类能够加强系统去除污染物能力和抗冲击负荷能力,且其细菌和藻类的生物量及活性均更优,设有填料的系统中*Flavobacterium*、*Rhodobacter*、*Rhodobacteraceae*等拥有反硝化和除磷能力的菌群丰度更高。此外,由于该装置依靠重力势能运行,未使用提升泵等外部动力,运行能耗大幅下降,具有经济适用性。

关键词: 村寨污水; 重力驱动生物转笼; 水平潜流人工湿地; 微生物群落

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)05-0085-08

Pilot-scale Study on Gravity-driven Bio-ecological Coupling Process for Village Wastewater Treatment

WU Han¹, FU Huimin², YONG Xingyu¹, XU Xiaowei¹, CHEN Youpeng¹

(1. College of Environment and Ecology, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. National Research Base of Intelligent Manufacturing Service, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China)

Abstract: In response to issues such as overly complex technology, high operational costs, and inadequate maintenance and management in domestic wastewater treatment in mountain villages of China, a pilot-scale system integrating a gravity-driven rotating biological contactor with a multi-stage horizontal subsurface flow constructed wetland was designed and stably operated, leveraging the local geographical characteristic of significant elevation differences. This combined process effectively removed pollutants from the actual wastewater, achieving average removal rates of 73.3%, 66.4%, 67.8%, and 81.7% for COD, NH₄⁺-N, TN, and TP, respectively. The effluent quality met local discharge standards. Comparative analysis of pollutant removal performance revealed that the bio-rope fillers, enriched with algae, enhanced the system's pollutant removal capacity and resilience to shock loads. Furthermore, biomass and activity of bacterial and algal were better. The system with the fillers showed a higher abundance of bacteria such as *Flavobacterium*, *Rhodobacter*, and *Rhodobacteraceae*, which possessed denitrification and phosphorus removal capabilities. Additionally, as the system operated solely by

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(21876016)

通信作者: 陈猷鹏 E-mail: ypchen@cqu.edu.cn

gravitational potential energy without any feed pumps or other external power inputs, its energy demand was drastically reduced, making the process economically attractive.

Keywords: village sewage; gravity-driven rotating biological contactor; horizontal subsurface flow constructed wetland; microbial community

我国村寨生活污水类型复杂,且规模小、水质变化大、排放分散。在对其进行处理时存在诸多难题,如现有处理技术大多不具备自适性,实际应用时普遍存在难以持续运行或工作效率低等问题,且好氧单元曝气能耗高,山地村寨无法长期承担由此带来的高处理成本^[1]。

山地村寨地区地势高差大,可利用重力势能实现污水处理设施的无动力运行。当前应用广泛的人工湿地、土地处理、稳定塘等生态处理技术以及化粪池、沼气池、厌氧生物滤池等厌氧生物处理技术在一定条件下均能实现无动力运行^[2]。但单一的生态处理难以去除多种污染物且易受环境因素的影响,而较常使用的厌氧生物处理技术对有机物及氮磷去除效果较差,因此近年来生物生态耦合工艺在农村的应用愈加广泛。其中,由于人工湿地的环境友好性较高、运维方式简单且成本低,同时还能适应村寨规模增长及污水处理要求的变化,扩展性较好,常作为生物生态耦合工艺中的生态处理部分^[3]。另外,在生物转盘基础上改进制成的生物转笼,不仅具有生物转盘特有的充氧与混合方式,可实现同步脱氮除磷,而且生物转笼的生物膜附着面积更大,处理效率更高,耐冲击负荷更强,更加适用于处理农村污水^[4]。

笔者将生物与生态处理技术进行耦合来处理山地村寨生活污水。其中,生物处理采用重力驱动生物转笼(GRBC)装置,生态处理为多级水平潜流人工湿地。通过实际污水的中试运行,分析其对有机物和氮磷的去除效果,并对装置内细菌、藻类的生物量和活性以及微生物群落结构等进行探讨,同时进一步研究系统内污染物降解机制,旨在为山地村寨生活污水治理提供一项实用性强、能耗成本低及处理效果好的工艺选择。

1 材料与方法

1.1 水质和水量

中试地点位于重庆市某乡镇,其海拔在128~1 218 m之间,地势高差较大。试验期间系统进水

COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP的平均浓度分别为(199.82 ± 12.72)、(20.99 ± 2.04)、(29.44 ± 2.06)、(5.01 ± 0.67) mg/L,进水量为20 m³/d。

1.2 工艺设计及尺寸

工艺的核心装置为重力驱动生物转笼,由生物转盘净水原理结合传统水车外形构造研发而成。通过小试阶段对GRBC氧传质模型的建立发现,即使在有生物膜消耗溶解氧的情况下,GRBC也拥有较好的复氧性能,当跌落高度大于0.5 m时,其复氧量可达4 mg/L以上,故在其后接人工湿地,不仅能发挥人工湿地环境友好性高、运行简单及成本低等优势,还能继续保持整个工艺无动力运行。更为重要的是,GRBC良好的复氧性能可以为湿地微生物创造较好的生长环境,有利于湿地对污染物的降解,有效强化脱氮除磷。故总体工艺流程为:村寨生活污水经厌氧调节池调节后,先由GRBC进行生物处理,而后经人工湿地进行生态处理,最终排入河流。

为分析GRBC在实际工程中的运行性能以及藻类繁殖生长对GRBC的影响,中试期间加工两台尺寸及运行参数完全相同的GRBC并联运行,互不干扰。GRBC-1是在营养物质及光照充足的情况下,反应池中藻类自然繁殖生长与GRBC形成的菌藻共生体系;GRBC-2则是在GRBC-1的基础上,向反应池中加入BZ-80S3型生物绳填料,使反应池中的藻类富集生长,构建菌藻共生系统。具体工艺流程如图1所示。

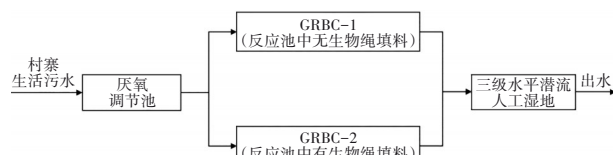


图1 工艺流程示意

Fig.1 Flow chart of treatment process

厌氧调节池采用折流板式,尺寸为长×宽×高=3.5 m×3.5 m×2.5 m。GRBC外圆壳直径为2.0 m、内圆壳直径为1.7 m、转盘宽度为0.3 m。两台

GRBC均加入好氧聚氨酯多孔凝胶(PPC)载体,活化接种污泥后,采用快速排泥法对GRBC进行挂膜,GRBC装置如图2所示。

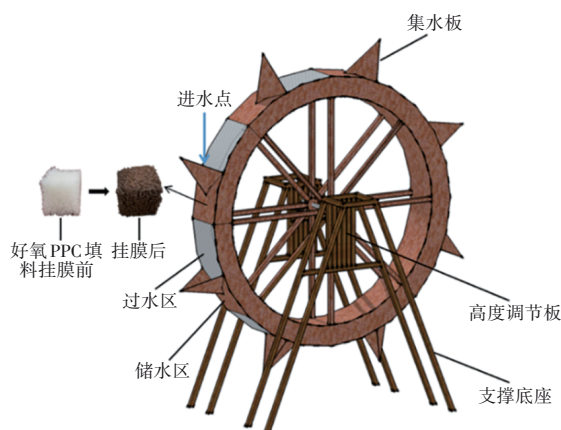


图2 GRBC装置示意

Fig.2 Schematic diagram of GRBC device

GRBC反应池尺寸均为长×宽×高=5.0 m×2.5 m×1.0 m。人工湿地流态为水平潜流,根据《人工湿地水质净化技术指南》,中试采用的表面负荷为 $0.08 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,总占地面积为 250 m^2 ,池深为1.3 m。考虑到村寨生活污水水量变化较大,为防止短路流和死区的发生,经实地勘测,共设置三级人工湿地,且每级进水设置穿孔花墙,出水设置单排穿孔墙,以不断实现均匀布水。为各级湿地选择能适应不同气候条件的植物种类,尽可能减少气候对湿地运行及功能的影响。其中,第一级湿地面积为 110 m^2 ,种植西伯利亚鸢尾;第二级面积为 100 m^2 ,种植美人蕉;第三级面积为 40 m^2 ,种植芦竹。调节池与GRBC高程差为1.82 m,GRBC与人工湿地高程差为0.70 m,耦合工艺总高程差达5.33 m,充分利用当地地势高差。

1.3 试验方法

1.3.1 装置运行

装置从2022年5月运行至2023年1月,共包含2个阶段:装置启动阶段,将菌种活化后投加到厌氧调节池及GRBC反应池,先关闭出水阀门,利用水泵使含有菌种的生活污水在装置中循环运行2 d,促进菌种与填料充分接触并成功接种,再关闭水泵并打开出水阀门,排出含菌种的生活污水,输入新的生活污水,微生物在填料上繁殖积累,最终形成生物膜;第27天装置启动成功并进入稳定运行阶段,该阶段的第1个月每日取样,之后每周取样。

1.3.2 分析项目及方法

水质测定:取样后送往当地生态环境监测站,采用国标法测定COD、 NH_4^+-N 、TN、TP浓度。

细菌及藻类活性分析:细菌活性主要通过生物膜生物量和活性污泥比耗氧速率(SOUR)来表征,检测方法参考文献[5]和[6]。叶绿素a(Chl-a)含量可以反映水体中藻类的生物量;采用Chl-a与脱镁叶绿素a(Pheo-a)的比值(Chl-a/Pheo-a)来表征藻类活性。定期采集稳定运行阶段两个GRBC反应池中的藻类样品,然后利用丙酮法提取样品中的Chl-a与Pheo-a,并采用分光光度法中的单色法测定二者含量。

微生物群落分析:在运行第116天的GRBC-1和GRBC-2中,以多点采样的方法取好氧PPC填料及GRBC-2反应池中的生物绳填料。利用E. Z. N. A.® Soil DNA Kit试剂盒对样品中的DNA进行提取,之后使用引物338F_806R进行扩增,然后利用NEXTFLEX Rapid DNA-Seq Kit进行建库,再使用Illumina公司的MiSeq PE300平台进行测序,最后通过美吉云平台对试验数据进行分析,完成对生物膜样品中微生物的检测及分析。

2 结果与讨论

2.1 稳定运行阶段对污染物的去除效果

2.1.1 GRBC对污染物的去除效果

在第28~158天的稳定运行过程中,GRBC-1对COD、 NH_4^+-N 、TN和TP的平均去除率分别为63.3%、55.8%、47.9%和42.9%,平均出水浓度分别为72.8、9.5、14.4和2.7 mg/L,其中,TN平均去除率较近期新研发的一种与单级膜集成的新型旋转生物转盘更高^[7]。GRBC-2对COD、 NH_4^+-N 、TN和TP的平均去除率分别为72.1%、64.0%、56.9%和67.1%,平均出水浓度分别为55.2、7.0、12.3和1.6 mg/L,出水水质满足《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),并且,在中试出水排放至长江支流而未排入湖泊、水库等密闭水体或磷不达标水体的条件下,出水水质能达到重庆市《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》(DB 50/848—2021)的一级标准。

随着装置运行,生物绳填料的存在使藻类能够在反应池内富集。Tang等^[8]利用SBR新型藻菌共生系统证明了填料对藻类的富集潜力;Zhuang等^[9]将

棉纤维绳打结成绒球状使微藻附着生长。生物绳填料促进了藻类附着生长,使其不易流失且受环境因素影响较小。运行过程中,反应池中添加生物绳填料装置的TN去除率比未添加填料的更稳定,其受暴雨冲击后各污染物去除率虽有所下降,但在1~3 d后基本恢复,较未添加填料的GRBC-1恢复更迅速。同时,藻类的光合作用能提高系统溶解氧浓度,强化好氧环境,促进细菌的硝化反应。故GRBC-2对COD的去除率上升并在42 d左右达到稳定,平均COD去除率比GRBC-1提高了8.8个百分点, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TN去除率分别比GRBC-1提高了8.2个百分点和9.0个百分点。上述分析表明,添加生物绳填料富集藻类既能增强系统抗冲击负荷的能力,还能提高污染物去除效果。

2.1.2 整体耦合工艺对污染物的去除效果

装置稳定运行期间,生物生态耦合污水处理系统对COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN和TP的平均去除率分别为73.3%、66.4%、67.8%和81.7%,平均出水浓度分别为53.1、7.2、9.6和0.9 mg/L。出水水质不仅能够稳定达到重庆市《农村生活污水集中处理设施水污染物排放标准》(DB 50/848—2021)的一级标准及《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2021),还能达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准。对比之前单一GRBC的TP去除率可知,人工湿地对TP的去除效果提升明显。与传统处理系统相比,人工湿地在去除有机物和悬浮物方面非常有效,且具有维护成本和能耗低的优势,故将其与其他污水处理技术相结合以提高处理效果^[10]。例如,Satyendra等^[11]将厌氧折流板反应器与升流式人工湿地相结合来处理城市污水,取得了较好的效果。

2.2 整体耦合工艺成本分析

工艺成本主要由建设成本与运行成本构成,生物生态耦合污水处理工艺建设成本见表1。工艺完全依靠重力势能驱动,未消耗电能,故运行成本仅涉及GRBC填料更换及人工湿地维护,中试期间该项费用暂未产生,按0计算。若单独采用GRBC进行处理,成本约为1.10元/ m^3 ,而采用生物生态耦合工艺的成本约为1.78元/ m^3 ,且能够得到更好的出水水质。在实际工程应用中,可以根据当地的生态环境情况、污染物排放要求以及经济状况进行选择。根据龙凤等^[12]对全国333个城镇污水处理厂的

全成本核算结果发现,长江经济带地区污水处理平均成本约为0.85~1.98元/ m^3 。可见,采用GRBC-2系统或耦合工艺目前均已在平均成本范围内,但本研究计算平均成本时采用的时间为运行半年,而上述研究所采用的333个样本运行时间远超本研究,凭借本研究极低运行成本的优势,平均成本可随运行时间的增加而继续下降。

表1 中试建设成本

Tab.1 Construction cost of pilot-scale project

项 目		数量	总成本/ 万元	单位成本/ (元/ m^3)
场地平整			5.000	0.34
厌氧调节池	混凝土	1.5 m^3	0.090	0.07
	水泥	1.2 t	0.096	
	砖块	17 t	0.440	
	钢筋	0.3 t	0.120	
	其他		0.300	
反应池	混凝土	3 m^3	0.150	0.07
	砖块	36 t	0.450	
	水泥	2.5 t	0.192	
	其他		0.300	
多级水平潜流 人工湿地系统	湿地填料	156 m^3	3.300	0.68
	砖块	230 t	3.000	
	水泥	8.5 t	0.670	
	防渗膜		1.320	
	湿地植物	3 600 株	1.050	
	其他		0.600	
GRBC	GRBC	2 个	7.200	0.50
	填料	0.5 m^3	0.170	
管网系统	管道	110 m	1.040	0.12
	配件		0.470	
	其他		0.200	

2.3 微生物活性分析

2.3.1 细菌活性分析

对稳定运行阶段不同时期GRBC-1和GRBC-2中好氧PPC填料生物膜进行取样,并测定生物量及微生物SOUR,结果如图3所示。在GRBC转动过程中,内部生物填料交替暴露在空气和污水中,实现溶解氧的补充和污染物的去除。当装置转动到进水点时,经曝气充氧后的污水与生物填料上的细菌接触,并在装置转动下充分混合,此时污水在生物填料表面形成一层附着水层,污水中的氧气及污染物通过附着水层进入生物填料内部,在细菌作用下实现有机物降解及氨氮硝化。且生物膜外部好氧、

内部缺氧,为脱氮除磷创造了良好条件,代谢产物也通过附着水层扩散到污水中,实现污水净化。从图 3 可以看出,GRBC-2 好氧 PPC 填料上的生物量随着运行时间的增加先升后降,最高升至 1.24 g/g,而 GRBC-1 则基本稳定在 0.85 g/g 左右。稳定运行阶段 GRBC-1 的 SOUR 值(以 O_2 计)约为 6.53 mg/(gMLVSS·h),GRBC-2 的 SOUR 值约为 GRBC-1 的 1.59 倍。稳定运行阶段 GRBC-2 填料上的生物量及 SOUR 值均高于 GRBC-1,故 GRBC-2 对污染物的去除效果更显著。

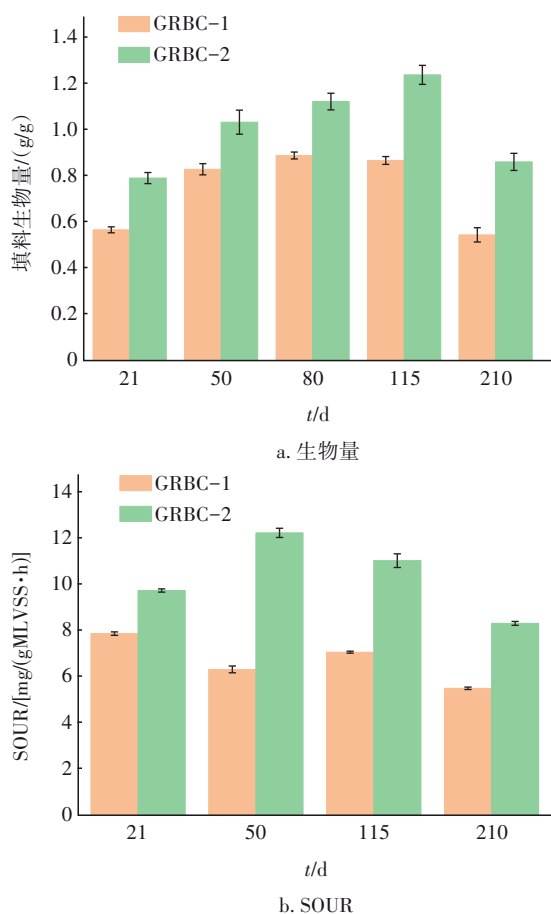


图 3 GRBC 中好氧 PPC 填料生物量及微生物 SOUR

Fig.3 Biomass and microbial SOUR of aerobic PPC fillers in GRBC

2.3.2 藻类活性分析

通过分析 GRBC-1 和 GRBC-2 的藻类生物量和活性,探究加入生物绳填料人工构建的 GRBC-2 相较于藻类自然生长的 GRBC-1 所具有的优势,结果如图 4 所示。稳定运行阶段,GRBC-1 内 Chl-a 主要来源于反应池中自然繁殖生长的藻类,而 GRBC-2 主要为生物绳填料上附着生长的藻类。

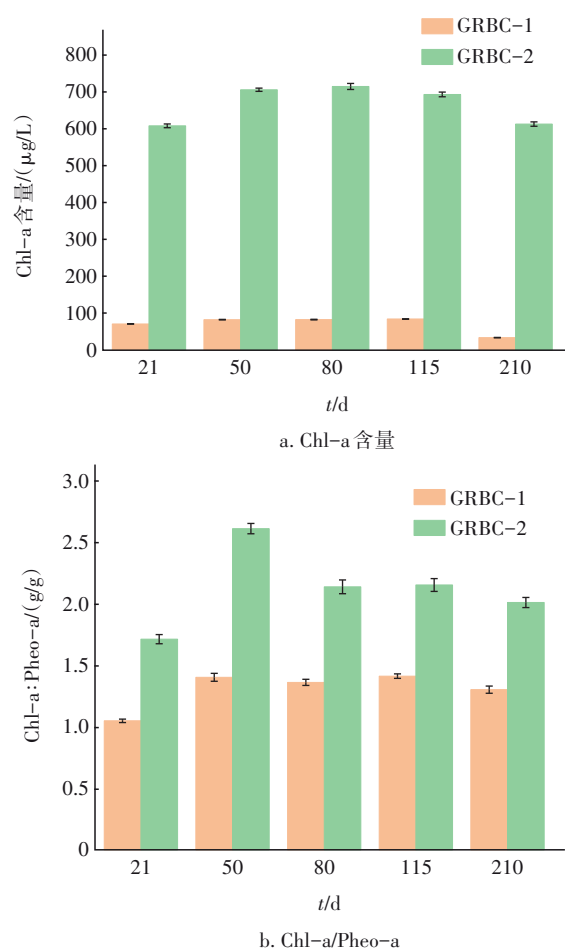


图 4 GRBC 中 Chl-a 含量及 Chl-a/Pheo-a

Fig.4 Chl-a content and Chl-a/Pheo-a of GRBC

由图 4 可知,GRBC-2 的 Chl-a 含量远高于 GRBC-1,最高可达 715.65 $\mu\text{g/L}$,约为 GRBC-1 的 8.63 倍;Chl-a/Pheo-a 最高可达 2.61 g/g,约为 GRBC-1 的 1.86 倍。说明通过人工加入生物绳填料富集藻类而构建的 GRBC-2,在藻类生物量及活性上远高于 GRBC-1。藻类能利用污水中含氮化合物作为氮源,以二氧化碳和碳酸盐为碳源进行光能自养生长,同时还能直接吸收污水中的磷用于合成三磷酸腺苷、磷脂等。此外,藻类的光合作用会导致水体 pH 升高,使正磷酸盐和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 分别以沉淀和挥发的形式被间接去除。将藻类与细菌结合是废水处理过程中常用的改进手段。Lei 等^[13]曾将细菌与藻类结合处理浓缩废水;Manser 等^[14]将藻类和氨氧化细菌共同培养再与厌氧氨氧化进行耦合。藻类的光合作用使系统内溶解氧浓度提高,促进了 GRBC-2 中好氧细菌的生长代谢,进而提高了系统生物膜厚度和微生物的整体活性,具有更高的稳定

性和活性。运行至第210天时,由于此时为冬季,气温较低,光照相对不足,藻类生长受到一定程度的抑制,活性降低,无法促进细菌代谢,这也是细菌生物量及SOUR值在第210天时降低的原因。

2.4 微生物群落分析

2.4.1 微生物群落多样性分析

Alpha多样性指数可以用来评价样品的群落多样性、丰富度等信息,Sobs、Chao、Ace均是反映微生物群落丰富度的指标,其数值越大说明样本中物种数量越多,群落组成越丰富;而Shannon、Simpson指数则是对群落多样性的体现,Shannon指数越大,Simpson指数越小,说明群落多样性越高。样品的Alpha多样性指数见表2,其中,A1、A2分别为第20天及第116天GRBC-1好氧PPC填料生物膜样品;B1、B2分别为第20天及第116天GRBC-2好氧PPC填料生物膜样品;C1、C2分别为第20天及第116天GRBC-2生物绳填料生物膜样品。

表2 各样品Alpha多样性指数

Tab.2 Alpha diversity index for each sample

样品	Sobs 指数	Chao 指数	Ace 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖率
A1	672	672	672	5.09	0.015 1	1.000 0
A2	965	973	980	5.52	0.011 5	0.998 7
B1	1 077	1 077	1 079	5.56	0.012 5	0.999 8
B2	1 139	1 140	1 143	5.92	0.007 4	0.999 5
C1	1 180	1 199	1 216	5.52	0.014 5	0.997 3
C2	1 019	1 021	1 030	5.26	0.014 7	0.999 1

对比各样品的Sobs、Ace、Chao指数可以发现,A、B两组样品的群落丰富度均随时间有所增加,而C组略有减少。待装置稳定运行后,生物膜厚度增加,内部环境更加丰富,故物种也随之增多,群落丰富度增加。同时由于藻类的富集使GRBC-2的菌藻共生体系更加稳定,微生物物种增加,组成更加丰富,故B、C两组的群落丰富度远高于A组。生物绳填料的加入使得GRBC-2中藻类能够附着生长,藻类生物量更大,同时GRBC-2中的藻类受环境因素影响相比GRBC-1要小,不易随出水流失,故菌藻共生体系具有更好的稳定性,抗冲击负荷能力更强,这与中试运行结果相吻合。C组样品的Shannon指数和Simpson指数变化不大,但数值均较高,说明GRBC-2反应池中微生物群落组成多样性较高且稳定。

2.4.2 微生物群落结构分析

图5为门及属水平上的微生物群落组成。

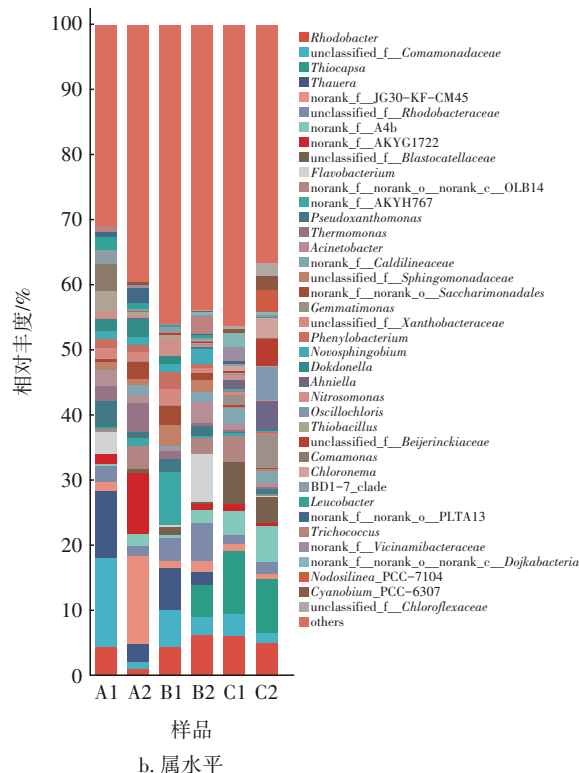
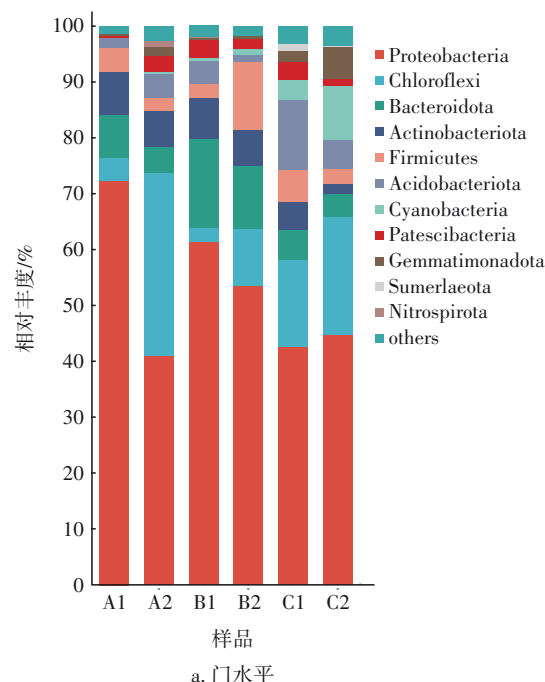


图5 门及属水平上的微生物群落组成

Fig.5 Microbial community composition at phylum and genus levels

从图5(a)可知,6个样品中相对丰度大于1.0%的细菌门共有11个。对三组样品在门水平上的群

落组成进行比较发现,在稳定运行116 d的样品中,相比A2、B2中变形菌门(Proteobacteria)、拟杆菌门(Bacteroidota)、厚壁菌门(Firmicutes)丰度更高。在C组样品中,这三个菌门的相对丰度均较A、B两组更低。变形菌门包含多种硝化菌与反硝化菌,拟杆菌门、厚壁菌门在去除复杂难降解有机物、蛋白质方面有着较强的代谢能力,可以将大分子有机物分解为简单的小分子物质,这三个菌门在B2中相对丰度更高进一步解释了GRBC-2对污染物的去除效果比GRBC-1更好的原因。同时,在B2、C2样品中分别出现了1.1%和9.7%的蓝藻门(Cyanobacteria),说明藻类的富集对GRBC-2的微生物群落结构影响较大,藻类的引入改善了系统中微生物的组成,提高了系统对污染物的去除能力。

从图5(b)可知,在3组样品中共检测出39种相对丰度大于2%的菌属,其中丰度较高的有红杆菌属(*Rhodobacter*)、丛毛单胞菌科(*Comamonadaceae*)、索氏菌属(*Thauera*)、norank_f_JG30-KF-CM45、norank_f_AKYG1722及黄杆菌属(*Flavobacterium*)等。与运行初期的A1相比,运行稳定阶段的A2中*Rhodobacter*、*Comamonadaceae*、*Thauera*等菌属的相对丰度大幅降低,分别从4.5%、13.6%、10.3%降到1.1%、1.1%、2.7%,而norank_f_JG30-KF-CM45、norank_f_AKYG1722等菌属分别从1.4%、1.5%增加到13.6%、9.5%。*Rhodobacter*是一种光合细菌,有机物降解能力较强,*Comamonadaceae*、*Thauera*是异养反硝化菌,它们作为优势菌属获得了大部分营养和能量,可促进反硝化作用^[15],其在A2中减少说明系统的反硝化能力有所降低;norank_f_JG30-KF-CM45、norank_f_AKYG1722主要与有机物降解和硝化作用有关。A组样品中群落的变化进一步解释了GRBC-1对COD及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除效果较好但对TN、TP去除效果不佳的原因。B组和C组样品的物种组成相对稳定,其中*Rhodobacter*、*Comamonadaceae*、norank_f_A4b等菌属在两组样品中丰度均较高。已知*Rhodobacter*、*Comamonadaceae*分别能够降解有机物和促进反硝化,norank_f_A4b能够还原亚硝酸盐^[16],故这三种菌属对有机物的去除和脱氮除磷均有促进作用,因此GRBC-2对污染物的去除效果比GRBC-1更好。Tang等^[8]研究的一种基于SBR的新型藻菌共生系统中*Comamonadaceae*丰度也较传统SBR中的更高。

对比A2、B2发现,GRBC-1中norank_f_JG30-KF-CM45、norank_f_AKYG1722及*Thermomonas*的相对丰度较GRBC-2分别提高了11.9%、8.6%、4.0%,前两种菌属主要对有机物降解和氨氮硝化具有重要作用,而*Thermomonas*是反硝化菌,缺氧时能够将硝酸盐和亚硝酸盐还原为氮气,具有脱氮作用。在GRBC-2中,*Flavobacterium*、*Rhodobacter*、*Rhodobacteraceae*、*Thiocapsa*及*Acinetobacter*更具优势,相对丰度分别比GRBC-1提高了7.4%、5.3%、4.5%、4.9%、2.0%。*Flavobacterium*不仅是一种反硝化菌,还对复杂有机物的水解具有重要作用^[15]。*Rhodobacter*、*Thiocapsa*均属于光合细菌,且*Rhodobacter*还与反硝化有关,二者对有机物及 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 等都有较强的降解作用。*Acinetobacter*与反硝化有关,能去除TN,同时还具有较强的除磷能力。以上微生物群落结构的差异变化进一步表明,相比GRBC-1,GRBC-2具有更好的有机物降解和脱氮除磷能力。

3 结论

① 在反应池中设置生物绳填料富集藻类,能够强化装置和整个系统的污染物去除及抗冲击负荷能力,耦合工艺的COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN、TP平均出水浓度均能达到GB 18918—2002一级B标准。

② 重力驱动生物转笼及其生物生态耦合工艺的能耗较低,且无需专人运行维护。在成本方面,单独使用重力驱动生物转笼处理生活污水时约为1.10元/ m^3 ,耦合工艺约为1.78元/ m^3 ,在半年中试时间内的平均成本就已在长江经济带地区污水处理平均成本范围内,未来凭借其极低的运行成本优势,平均成本可随运行时间增加而不断下降,具有经济适用性。

③ 在反应池中设置生物绳填料增加了细菌及藻类的生物量与活性,同时提高了系统微生物群落丰富度及多样性。藻类的富集及活性的增强不仅促进了生物膜生长并强化了细菌活性,还有利于系统群落结构趋向*Flavobacterium*、*Rhodobacter*、*Acinetobacter*等脱氮功能菌转变,拥有更好的污染物去除效果,丰富了微生物群落的多样性,进而增强了系统的稳定性。

参考文献:

- [1] YANG B, WANG W. Treatment and technology of domestic sewage for improvement of rural environment in

- China [J]. Journal of King Saud University – Science, 2022, 34(7): 102181.
- [2] SINGH N K, KAZMI A A, STARKL M. A review on full-scale decentralized wastewater treatment systems: techno-economical approach [J]. Water Science and Technology, 2015, 71(4): 468–478.
- [3] YI X S, LIN D X, LI J H, 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.
- [4] ZANG L Y, YANG H, WANG J W, et al. Performance of rotating cage biological contactors based on the partial nitrification of immobilized bioactive fillers [J]. Journal of Water Process Engineering, 2023, 53: 103671.
- [5] FONSECA D L, BASSIN J P. Investigating the most appropriate methods for attached solids determination in moving-bed biofilm reactors [J]. Bioprocess and Biosystems Engineering, 2019, 42(11): 1867–1878.
- [6] 王竞茵, 蔡海振, 荣宏伟, 等. 不同PPCPs浓度对活性污泥系统微生物毒性的影响 [J]. 中国给水排水, 2023, 39(23): 104–110.
- WANG J Y, CAI H Z, RONG H W, et al. Effect of different concentrations of PPCPs on microbial toxicity in activated sludge system [J]. China Water & Wastewater, 2023, 39 (23): 104–110 (in Chinese).
- [7] WAQAS S, HARUN N Y, LOCK S S M, et al. Energy-efficient single-stage membrane rotating biological contactor for wastewater treatment [J]. Bioresource Technology Reports, 2024, 25: 101776.
- [8] TANG C C, TIAN Y, HE Z W, et al. Performance and mechanism of a novel algal-bacterial symbiosis system based on sequencing batch suspended biofilm reactor treating domestic wastewater [J]. Bioresource Technology, 2018, 265: 422–431.
- [9] ZHUANG L L, AZIMI Y, YU D H, et al. Effects of nitrogen and phosphorus concentrations on the growth of microalgae *Scenedesmus*. LX1 in suspended-solid phase photobioreactors (ssPBR) [J]. Biomass and Bioenergy, 2018, 109: 47–53.
- [10] ALMUKTAR S N, ABED S N, SCHOLZ M. Wetlands for wastewater treatment and subsequent recycling of treated effluent: a review [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25(24): 23595–23623.
- [11] SATYENDRA, VIJAY R. Anaerobic baffled reactor followed by up-flow constructed wetland for treatment of municipal wastewater [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 58: 104810.
- [12] 龙凤, 毕粉粉, 董战峰, 等. 城镇污水处理全成本核算和分担机制研究: 基于中国333个城镇污水处理厂样本估算 [J]. 环境污染与防治, 2021, 43(10): 1333–1339.
- LONG F, BI F F, DONG Z F, et al. Study on the total cost accounting and sharing mechanism of municipal sewage treatment: an empirical research of 333 samples in China [J]. Environmental Pollution & Control, 2021, 43(10): 1333–1339 (in Chinese).
- [13] LEI Y J, TIAN Y, ZHANG J, et al. Microalgae cultivation and nutrients removal from sewage sludge after ozonizing in algal-bacteria system [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 165: 107–114.
- [14] MANSER N D, WANG M, ERGAS S J, et al. Biological nitrogen removal in a photosequencing batch reactor with an algal-nitrifying bacterial consortium and Anammox granules [J]. Environmental Science & Technology Letters, 2016, 3(4): 175–179.
- [15] CHEN S, YANG D, WANG Q, et al. Study on the advanced nitrogen removal under low temperature by biofilm on weak magnetic carriers [J]. Bioresource Technology, 2022, 360: 127580.
- [16] SHI S H, LIN Z Y, ZHOU J, et al. Enhanced thermophilic denitrification performance and potential microbial mechanism in denitrifying granular sludge system [J]. Bioresource Technology, 2022, 344: 126190.

作者简介: 武韩(2000—), 女, 四川德阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为厌氧氨氧化颗粒污泥技术应用与微观机制。

E-mail: wuhan_x@163.com

收稿日期: 2025-06-25

修回日期: 2025-09-06

(编辑: 任莹莹)