

低温 EBPR 工艺脱氮除磷性能及微生物研究

王健 王旭 盖卓群 崔丽平 程元 姜雨彤 王建辉*

吉林建筑大学 市政与环境工程学院

DOI:10.32629/eep.v9i6.3245

[摘要] 为探究12℃条件下低温EBPR系统的运行特征及微生物群落结构,利用SBR反应器构建EBPR系统驯化活性污泥,并结合16S rRNA测序和KEGG功能预测分析微生物群落。结果表明,运行60 d后系统趋于稳定,TP、COD和 NH_4^+-N 平均去除率分别为93.2%、95.4%和93.2%;优势菌属为*Dechloromonas*、*Zoogloea*和*Gemmobacter*。KEGG功能预测显示,微生物群落潜在功能主要集中于物质代谢、环境信息处理和遗传信息处理。

[关键词] 低温; 强化生物除磷; 微生物群落; 功能预测

中图分类号: X703.1 **文献标识码:** A

Microbial Community Structure of a Low-Temperature EBPR System

Jian Wang Xu Wang Zhuoqun Gai Liping Cui Yuan Cheng Yutong Jiang Jianhun Wang*

School of Municipal and Environmental Engineering, Jilin Jianzhu University

[Abstract] To explore the operational characteristics and microbial community structure of a low-temperature EBPR system at 12 °C, an EBPR system was established in a SBR for activated sludge acclimation, and the microbial community was analyzed using 16S rRNA sequencing and KEGG functional prediction. Results showed that the system reached a stable state after 60 d, with average removal rates of 93.2% for TP, 95.4% for COD, and 93.2% for NH_4^+-N . The dominant genera were *Dechloromonas*, *Zoogloea*, and *Gemmobacter*. KEGG functional prediction showed that the potential functions of the microbial community were mainly involved in metabolism, environmental information processing, and genetic information processing.

[Key words] Low temperature; Enhanced biological phosphorus removal; Microbial community; Functional prediction

引言

强化生物除磷(EBPR)具有运行成本较低、便于与脱氮工艺耦合等优势,在城镇污水处理厂中受到广泛关注^[1]。EBPR系统中,聚磷菌在厌氧阶段分解胞内聚磷酸盐并释放正磷酸盐,同时吸收外部易降解有机物并转化为聚羟基脂肪酸酯等储能物质^[2]。在好氧阶段,聚磷菌利用储能物质进行生长和过量吸磷,从而实现磷的去除^[3]。温度是影响EBPR系统运行效能的关键因素之一^[4]。我国北方地区冬季污水温度常处于10℃左右甚至更低。低温一方面会降低微生物的酶促反应速率和效率,另一方面还会改变污泥群落组成,影响系统的脱氮除磷稳定性^[5]。有研究表明,部分聚磷菌和耐冷异养菌在低温下仍具有一定竞争优势,但不同系统中优势菌群及其功能表现仍存在显著差异^[6]。因此,围绕低温条件下EBPR系统污染物去除规律、微生物演替特征及潜在功能开展研究,对于寒冷地区污水处理厂冬季工况优化具有现实意义。

本研究构建实验室规模需序批式反应器(SBR),在12℃条件

下考察低温EBPR系统的运行特征。分析运行周期内COD、 NH_4^+-N 、TP变化,评价系统脱氮除磷效能;结合16S rRNA高通量测序和PICRUSt2功能预测,揭示低温条件下微生物群落结构及潜在功能特征,以期为寒冷地区EBPR工艺运行调控提供参考。

1 材料与方法

1.1 反应器装置与运行条件

试验采用有机玻璃序批式反应器,总有效容积为40 L。反应器外部设置恒温水浴夹套,通过循环低温冷却液将系统水温稳定在12℃。每天运行2个周期。单周期总时长为8 h。排水比为75%,即每周期处理废水30 L,试验装置示意图见图1。

1.2 进水水质、接种污泥与样品采集

试验采用人工配制模拟污水,主要成分为乙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾和必要微量元素。进水水质见表1。接种污泥取自长春市某污水处理厂好氧池,投入反应器时MLSS约为4500 mg/L。待系统连续运行约60 d并保持出水稳定后,于好氧末期采集代表性活性污泥样品。

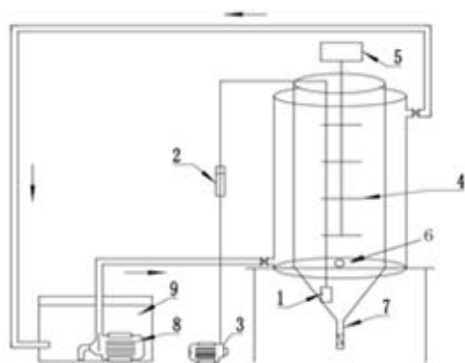


图1 试验装置示意图

注: (1)微孔曝气器(2)转子流量计(3)空气泵(4)搅拌叶(5)搅拌器(6)排水口(7)排泥口(8)提升泵(9)冷水水池

表1 污泥培养试验用水水质

物质种类	COD(mg/L)	NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	TP(mg/L)
参数	350	25	10
运行条件	温度(℃)	pH	好氧段 DO(mg/L)
参数	12	7.5	6

1.3 指标测定与微生物分析

系统稳定运行后, 在一个周期内按预定时间点取样, 测定COD、NH₄⁺-N、TP指标, 分析方法参照《水和废水监测分析方法(第四版)》进行。在微生物分析方面, 对16S rRNA基因进行高通量测序。在此基础上, 利用PICRUST2对群落潜在功能进行预测, 获得KO通路的相对丰度。

2 结果与讨论

2.1 低温EBPR系统污染物去除效能

待系统运行约60 d后,整体污染物去除效能趋于稳定,测定一周期内污染物浓度变化情况。如图2所示,出水TP稳定维持在0.5 mg/L以下,TP、COD和 NH_4^+-N 平均去除率分别达到93.2%、95.4%和93.2%,表明低温EBPR系统可在较长驯化后保持较高的脱氮除磷水平。

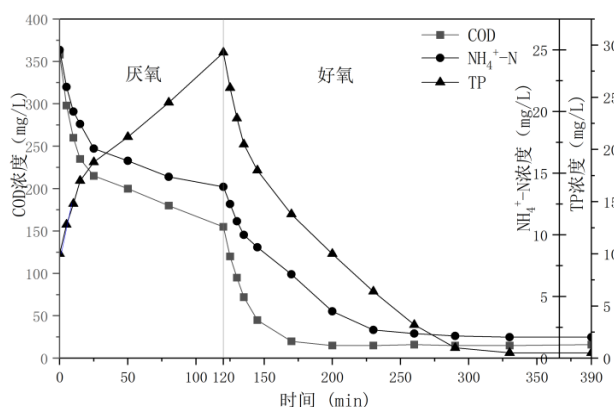


图2 一个周期内EBPR系统COD、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和TP变化

由图2可知,厌氧阶段COD由358 mg/L降至155 mg/L,去除率约为56.7%,说明乙酸盐等易降解有机物被快速吸收并转化为胞

内储能物质；与此同时，TP由约10 mg/L升高至29.37 mg/L，表现出明显的厌氧释磷特征。厌氧阶段 NH_4^+-N 由25 mg/L降至13.87 mg/L，即与部分同化吸收有关，也提示低温驯化后污泥体系具有较强的底物吸附与转化能力。进入好氧阶段后，COD、 NH_4^+-N 和TP均迅速下降，约在290 min时硝化与吸磷过程基本完成。

低温条件下系统仍获得较高去除率,说明单纯温度下降并未破坏EBPR的核心代谢,而是使反应过程更加依赖稳定的运行周期与群落适应。

2.2微生物群落结构分析

见图3, 样品的主要优势菌门为*Pseudomonadota*和*Bacteroidota*。其中*Pseudomonadota*占比最高, 为63.31%。*Pseudomonadota*包含大量与有机物降解、反硝化及生物除磷相关的功能菌, 是活性污泥系统中常见代谢类型核心菌门; *Bacteroidota*通常参与大分子有机物的水解和发酵, 可为聚磷菌及其他异养菌提供小分子底物; 上述菌门共同构成了低温条件下系统稳定运行的群落骨架。

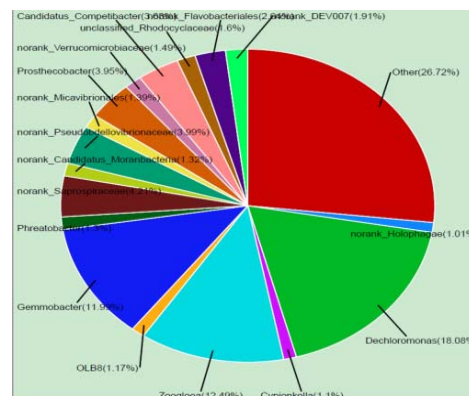


图3 门水平微生物群落组成

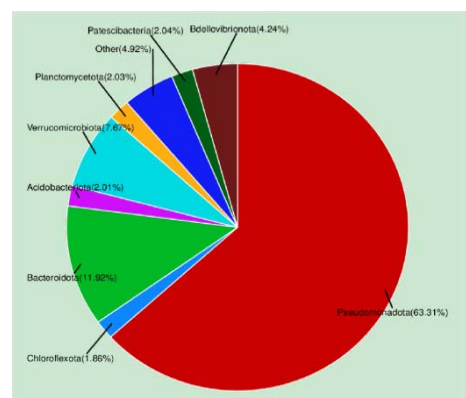


图4 属水平微生物群落组成

见图4, 样品中的优势菌属主要包括*Dechloromonas*、*Zoogloea*和*Gemmobacter*。其中*Dechloromonas*占比18.08%, 是系统中的主要优势菌属。*Dechloromonas*与反硝化除磷过程密切相关, 在低温环境下可展现较好的适应性。本研究中该菌属的富集, 说明低温系统通过反硝化除磷菌与聚磷菌协同作用维持较高TP

去除率。*Zoogloea*占比12.49%,其典型特征是分泌胞外聚合物并促进菌胶团形成,这有助于维持污泥良好的絮凝与沉降性能,为不同功能菌聚集创造稳定环境。*Gemmobacter*占比11.99%,该菌群与有机物降解和氮素转化具有一定关联,在系统碳氮协同去除中发挥作用。

低温EBPR系统的高效运行并不意味着单一聚磷菌占绝对优势,而是体现为多类功能菌共同构成的协同网络。不同功能菌在时间和空间尺度上的耦合,使系统在低温条件下仍能保持较高的处理效能。

2.3 微生物潜在功能分析

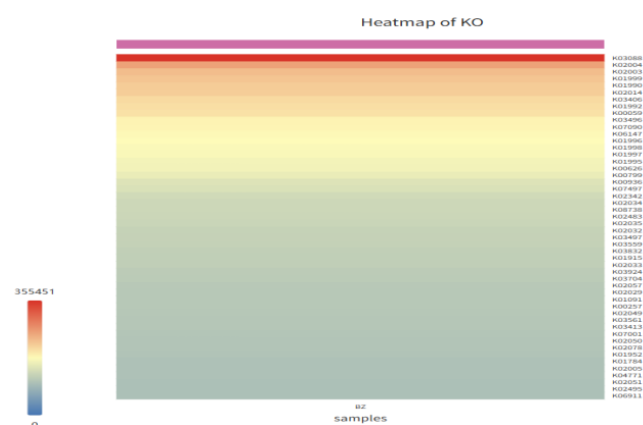


图5 KEGG功能注释热图

基于16S rRNA测序结果的PICRUST2功能预测表明,样品的潜在功能主要集中于物质代谢和环境信息处理等类别。见图5,在KO丰度排名中, *rpoE*及多类ABC转运系统相关条目占据前列,说明微生物群落可能通过增强环境应激响应、膜蛋白表达和跨膜物质运输来维持细胞活性。低温条件下,底物扩散和酶促反应速率均会下降,强化跨膜运输能力有助于提高基质摄取效率,提高对外界环境变化的敏感响应。

结合污染物去除结果可以看出,低温EBPR系统的稳定运行依赖于群落结构适应、功能通路强化及工艺条件匹配的共同作用。一方面,耐低温和适于反硝化除磷的优势菌属被逐步富集;另一方面,转运、应激与碳氮代谢相关通路丰度较高,使系统能够在较低温度下保持底物利用和功能表达。

3 结语

(1)在12℃低温条件下,由SBR反应器构建的低温EBPR系统

经过60d驯化后可实现稳定运行,TP、COD和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均去除率分别达到93.2%、95.4%和93.2%,典型周期内仍表现出明显的厌氧释磷、好氧吸磷及协同去除有机物和氨氮特征。

(2)低温条件下系统仍保持较好的群落丰富度和均匀度。*Pseudomonadota*和*Bacteroidota*为主要优势菌门, *Dechloromonas*、*Zoogloea*和*Gemmobacter*为主要优势菌属,其中*Dechloromonas*可能是维持系统低温除磷功能的重要菌群。

(3)功能预测结果显示,群落潜在功能主要集中于物质代谢和环境信息处理,高丰度功能与跨膜转运、应激响应及碳氮代谢密切相关。

【参考文献】

[1]AOX,LIJ,VAN LOOSDRECHT M C M,et al.Energy recovery from wastewater:heat over organics[J].Water Research,2019,161:74-77.

[2]AO X,WANG X,LIU R,et al.Environmental impacts of resource recovery from wastewater treatment plants[J].Water Research,2019,160:268-277.

[3]祝贵兵,彭永臻.生物除磷设计与运行手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2005.

[4]于嵘,苏相琴,步秀芹,等.镍对活性污泥生物除磷的影响及其机理[J].化工环保,2018,38(1):57-61.

[5]ZHOU Q,SUN H M,JIA L X,et al.Simultaneous biological removal of nitrogen and phosphorus from secondary effluent of wastewater treatment plants by advanced treatment:a review[J].Chemosphere,2022,296:134054.

[6]BRDJANOVIC D,Logemann S,van Loosdrecht M C M,et al.Influence of temperature on biological phosphorus removal:process and molecular ecological studies[J].Water Research,1998,32(4):1035-1048.

作者简介:

王健(2001--),男,汉族,吉林长春人,吉林建筑大学硕士研究生,主要从事水污染控制与污水资源化方向研究。

*通讯作者:

王建辉(1980--),男,汉族,吉林长春人,吉林建筑大学教授,博士,主要从事水污染控制与污水资源化方向研究。