

李亚娇,蒋小雨,池玉蕾,等.农村污水间歇断流下滴滤池效能维持及微生物胞外应激机制[J].中国环境科学,2025,45(5):2434-2442.

Li Y J, Jiang X Y, Chi Y L, et al. Sustaining bioreactor efficacy in rural wastewater treatment under intermittent flow interruption: Elucidating microbial EPS-mediated stress adaptation mechanisms [J]. China Environmental Science, 2025,45(5):2434-2442.

农村污水间歇断流下滴滤池效能维持及微生物胞外应激机制

李亚娇¹,蒋小雨¹,池玉蕾¹,张彬鸿²,任武昂^{1*},丁晓倩¹,鞠 恺¹,金鹏康³ (1.西安科技大学建筑与土木工程学院,陕西 西安 710054;2.中联西北工程设计研究院有限公司,陕西 西安 710076;3.西安交通大学人居环境与建筑工程学院,陕西 西安 710049)

摘要: 间歇断流下微生物的适应恢复能力是滴滤池稳定运行的关键,该过程与微生物以 EPS 形式储存的活性物质紧密联系.基于此,对比分析滴滤池稳定运行周期内生物膜结构、EPS 组分及其官能团的变化特征,探讨了 EPS 的应激机制同微生物活性维持与恢复的关联.结果表明,间歇断流下滴滤池的 COD、NH₄⁺-N 去除率分别达 95.56%±1.10%、87.06%±2.08%;受 EPS 影响,生物膜呈松散孔隙/紧密堆积的形貌结构;微生物在断流期转化 SB-EPS 内吸附的碳源与 LB-EPS 内储存的多糖为营养物质,并依靠 EPS 内疏水基团与架桥作用维护稳定结构,形成了 EPS 适应饥饿交替的应激机制,进而维持了滴滤池的稳定运行.

关键词: 生物滴滤池; 间歇断流; 生物膜结构; 胞外聚合物; 应激机制

中图分类号: X703.1 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2025)05-2434-09

Sustaining bioreactor efficacy in rural wastewater treatment under intermittent flow interruption: Elucidating microbial EPS-mediated stress adaptation mechanisms. LI Ya-jiao¹, JIANG Xiao-yu¹, CHI Yu-lei¹, ZHANG Bin-hong², REN Wu-ang^{1*}, DING Xiao-qian¹, JU Kai¹, JIN Peng-kang³ (School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China; 2.Zhonglian Northwest Engineering Design and Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710076, China; 3.School of Human Settlements and Civil Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China). *China Environmental Science*, 2025,45(5): 2434-2442

Abstract: The adaptive resilience of microorganisms is crucial for maintaining the stable operation of Biotrickling filters under intermittent flow interruption. This process is intrinsically related to the ability of microorganism to store active substances as Extracellular Polymeric Substances (EPS). To elucidate this mechanism, a comparative analysis was conducted on biofilm structural characteristics, EPS compositional variations, and functional group transformations during an operation cycle of Biotrickling filters. The correlation between EPS-mediated stress response mechanisms and microbial activity maintenance/recovery was investigated. The results revealed that the removal of COD and NH₄⁺-N reached (95.56±1.10)% and (87.06±2.08)% respectively in the biotrickling filter operated under intermittent flow. Under the regulation of EPS, the biofilm showed a loose and porous structure. During flow interruption phases, microorganisms activated starvation adaptation strategies by converting carbon sources adsorbed in SB-EPS and metabolizing polysaccharides stored in SB-EPS. The structure integrity of microorganisms was maintained via synergistic effects of hydrophobic functional groups within EPS and polymer bridging interactions. Accordingly, an EPS-mediated stress adaptation system responsive to starvation-recovery alternations was established, enabling sustainable operation of Biotrickling filters.

Key words: biotrickling filter; intermittent flow interruption; biofilm structure; extracellular polymeric substances; stress mechanism

现有农村污水处理设施多是参考城市污水处理厂的活性污泥法及其变种的 AO、AAO 工艺^[1-2],其稳定运行的关键是系统内活性污泥数量.农村污水具有非连续排放特征^[3],导致活性污泥法系统受到冲击造成污泥流失甚至影响二沉池出水^[4-5],为活性污泥法工艺处理农村污水带来了困难.滴滤池的抗冲击负荷性能与自然通风方式使其能较好适应农村污水排放特征,同时满足方便运维需求^[6-7].但由于

农村污水在夜间常处于断流状态^[8],采用滴滤池处理时,其内部微生物往往处于饥饿交替环境^[9].滴滤池内微生物对环境变化的适应能力,能够缓解间歇断流对其造成的负面冲击^[10-11].因此,在间歇断流

收稿日期: 2024-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52370101);中国联合工程有限公司青年基金项目(QNJJ-PY-2022-27)

* 责任作者, 副教授, WuangRen004479@xust.edu.cn

生物膜内微生物固定生长^[12],大量胞外聚合物(EPS)包裹在微生物表面^[13],EPS 由微生物代谢和吸附环境有机物产生,是微生物聚集体的重要组成部分^[14].EPS 为微生物生长代谢提供稳定的微环境^[15],有助于微生物聚集生长、适应环境变化.因此,间歇断流状态下微生物活性的维持与快速恢复机制与EPS 的响应特征息息相关.

EPS 结构上分为紧密附着层(TB-EPS)、外层疏松层(LB-EPS)和粘液层 EPS(SB-EPS)^[16-17],其组分构成丰富^[18],同时具有吸附特性^[19-20],可以吸附外界碳源;EPS 内多种官能团使其具有亲疏水两性特征^[21],进而影响微生物结构稳定性.间歇断流对微生物聚集体产生明显冲击,使其形貌结构发生变化,同时对 EPS 的组分功能产生影响.但饥饿交替下微生物对于 EPS 转化利用途径及 EPS 的应激机制同微生物活性维持与结构稳定的关联还不明确.

为探明间歇断流下滴滤池微生物活性维持与快速恢复机制,本研究建立滴滤池反应器,以水质指标考察滴滤池污染物去除特征;利用扫描电镜(SEM)解析其内部生物膜表观特性;对比分析滴滤池运行周期内 EPS 组分变化特征,以此探明饥饿交替下EPS 应激响应机制;采用 X 射线光电子能谱(XPS)分析生物膜亲疏水性,考量微生物结构稳定性.综合分析间歇断流下 EPS 应激响应特征,探明生物膜内微生物活性维持与快速恢复机制.

1 材料与方法

1.1 实验装置

结合自然通风特点构建滴滤池装置反应器如图 1 所示,反应器主体为圆柱形,直径 10cm,总高度 135cm,内部共 9 层,每层层高 15cm.反应器内共设置 6 层填料,有效容积为 7.07L.污水经顶端布水进入反应器,依次经过布水层、4 层填料层、2 层通风层、2 层填料层,最终由底部出水.反应器进水过程中,填料 1、5 层为好氧层,2、3、4、6 层为缺氧层.填料层采用生物陶粒填充,通风层采用塑料空心球填充.

1.2 实验用水与反应器启动

实验用水模拟农村生活污水,碳源由无水乙酸钠及尿素提供,磷源由磷酸二氢钾提供,氮源由硫酸铵及尿素提供.主要污染物指标浓度为:化学需氧量

(COD):250~320mg/L,总磷(TP):2.5~3.5mg/L,总氮(TN):28~35mg/L,氨氮(NH₄⁺-N):17~22mg/L.

滴滤池采用接种活性污泥的方法^[22-23],接种污泥取自西安科技大学污水处理站中 AAO 好氧池,污泥浓度为 6000mg/L,污泥接种量为 4gVSS/kg 填料,进水阶段流量为 4.93mL/min.

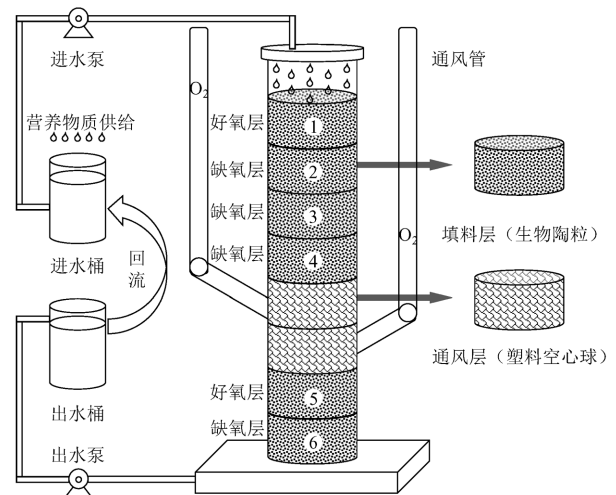


图 1 实验装置示意

Fig.1 Experimental device

1.3 水质与生物膜形态分析方法

污水水样取自滴滤池反应器进水及底部出水,在运行阶段进行 1d/次采样测定.实验中 COD、NH₄⁺-N、TP、TN、硝酸盐氮(NO₃⁻-N)、亚硝酸盐氮(NO₂⁻-N)等常规指标均采用《水和废水监测分析方法》(第四版)测定^[24].MLSS、VSS 采用烘干重量法测定.

生物膜形貌采用 JSM-7000F 场发射扫描电镜进行观测,样品预处理过程如下:将附着生物膜的陶粒用蒸馏水反复冲洗,清除表面杂质,加入 2.5%戊二醛(pH 值 7.4)浸没陶粒并在 4℃冰箱固定过夜,陶粒用 PBS 缓冲溶液冲洗 3 次,10min/次,再依次采用 30%、50%、70%、85%、95%、100%的乙醇进行脱水处理,15min/次,待样品干燥后喷金镀膜观察.

1.4 EPS 分析方法

EPS 样品按照设定的时间节点对填料层进行分层采样分析,时间节点为进水 2h(进水初期)、进水 12h(进水末端)、断流 2h(断流初期)、断流 12h(断流末端).EPS 样品采集自系统调试运行稳定后.

EPS 提取采用加热法^[25-26],具体过程如下:在反

反应器内取陶粒 50mL,采用蒸馏水浸泡冲洗杂质,超声 20min,制得生物膜溶液.将生物膜溶液定容 50mL,超声 5min,离心 4000r/min,15min,取上清液过 0.45 μ m 滤膜得到 SB-EPS;剩余物质加入 70 $^{\circ}$ C 蒸馏水定容 50mL,超声 1min,离心 6000r/min,15min,取上清液过 0.45 μ m 滤膜得到 LB-EPS;剩余物质加入蒸馏水定容 50mL 后放入离心机 9000r/min,20min,取上清液经 0.45 μ m 滤膜过滤得到 TB-EPS.实验对 EPS 中的多糖、蛋白质、腐殖质进行检测分析.多糖含量采用硫酸-萘酚法定量,蛋白质和腐殖质采用修正的 Folin-Lowry 法测定.

EPS 官能团检测采用 X 射线光电子能谱仪(美国 Thermo Fisher Scientific K-Alpha)进行测试,测试

前将 EPS 样品置于-80 $^{\circ}$ C 冰箱冷冻 48h,使用冷冻干燥机冷干处理,测试结果采用使用 Thermo advantage 软件分析.

2 结果与讨论

2.1 间歇断流下污染物去除特征

滴滤池反应器共经历 3 个阶段调整:阶段一(1~10d,连续进水 24h),连续流下反应器成功挂膜启动并稳定运行;阶段二(11~20d,进水 12h 断流 12h),间歇断流下反应器适应恢复并稳定运行;阶段三:间歇进水+回流(21~38d,进水 12h 断流 12h,回流比:1:1),间歇断流下反应器达到良好的运行状态及处理效果.其运行效果如图 2 所示.

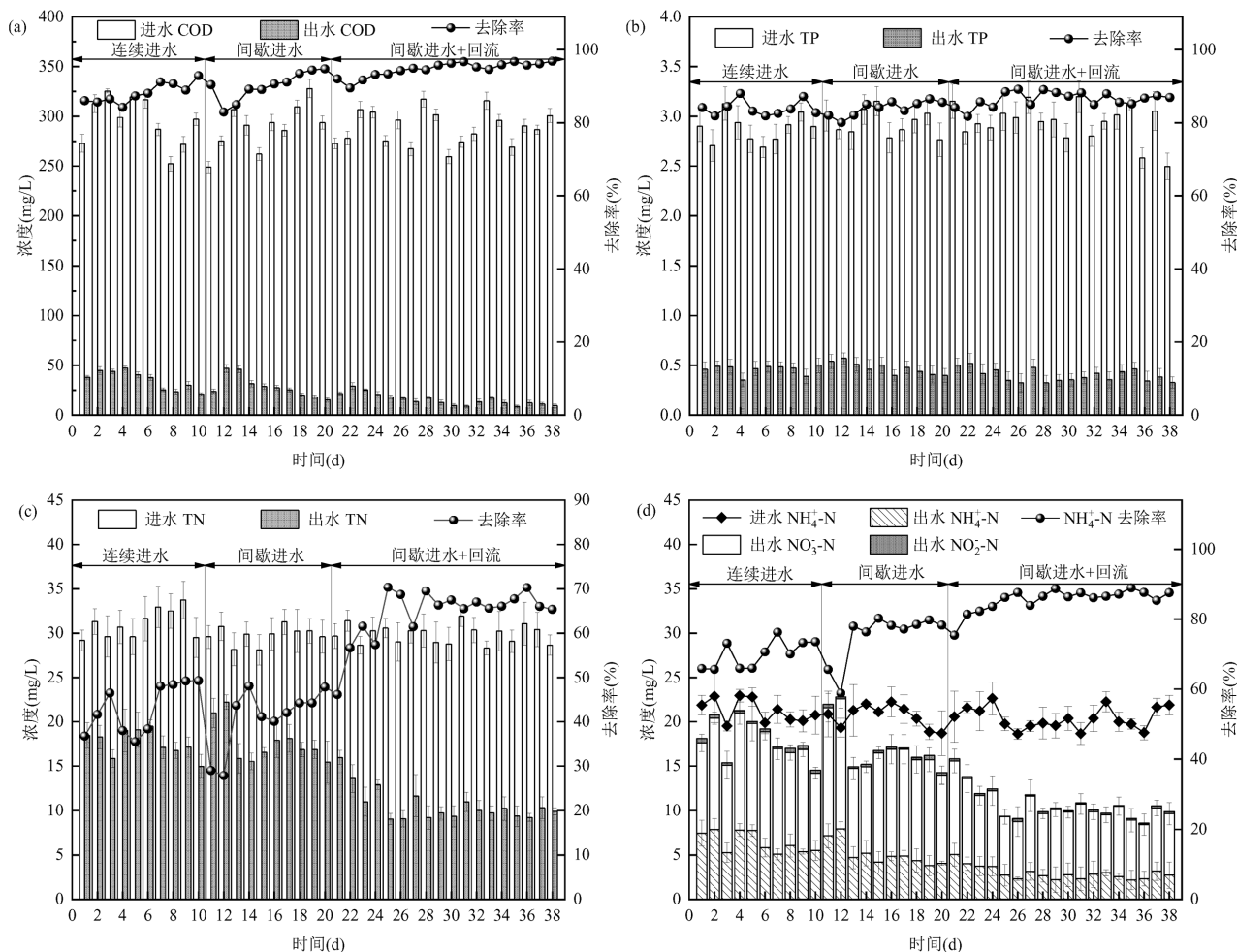


图2 反应器出水 COD(a)、TP(b)、TN(c)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N(d)的去除效果

Fig.2 Removal efficiency of COD(a)、TP(b)、TN(c)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N(d) in the effluent of the reactor

总体而言,运行后期反应器 COD 与 TP 出水浓度能够分别稳定在 18 和 0.5mg/L 以下,去除率达到 95.56%

±1.10%、87.06%±2.08%.针对氮的去除效果而言,随反应器运行调整,TN 出水浓度逐渐降至(10.98±

1.92)mg/L, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率由 65% 以上提升至 85% 以上, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 出水浓度由 15mg/L 以下稳定至 8mg/L 左右。

分析系统总氮去除效果变化原因, 第一阶段连续进水下, 进水溶氧使反应器内好氧空间较大, 硝化反应正常进行, 但反硝化过程不充分, 造成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 去除效果不理想; 第二阶段间歇进水下, 周期内反应器进水总负荷降低, 同时断流使缺氧菌生存环境扩大, 有利于反硝化, 但反应器内微生物需要适应恢复, 氮的去除效果仍需优化; 第三阶段增加回流后, 一方面反应器进水冲击负荷降低, 同时加快了反应器内生物膜的更新^[27], 有利于维持生物膜较好的活性, 这使得反应器运行效能更加稳定; 另一方面, 回流液的硝酸盐氮具有更长的填料流经时间, 这增加了水中

硝酸盐氮与缺氧段填料的接触机会, 强化了反硝化脱氮过程^[28]。

综上滴滤池对污水水量波动的适应性良好, 即使在持续断流下也能稳定维持污染物去除效果, 这可能是因为微生物 EPS 的变化对其活性维持有影响。因此, 本研究进一步对生物膜形貌及其 EPS 组分解析, 以期揭示滴滤池系统在间歇断流状态下的稳定运行机理。

2.2 间歇断流对生物膜表观特征的影响

间歇断流对微生物聚集生长的生物膜有明显冲击, 实验对系统第三阶段运行稳定后进水/断流期填料生物膜进行 SEM 检测。滴滤池内填料生物膜形貌结构如图 3 所示。

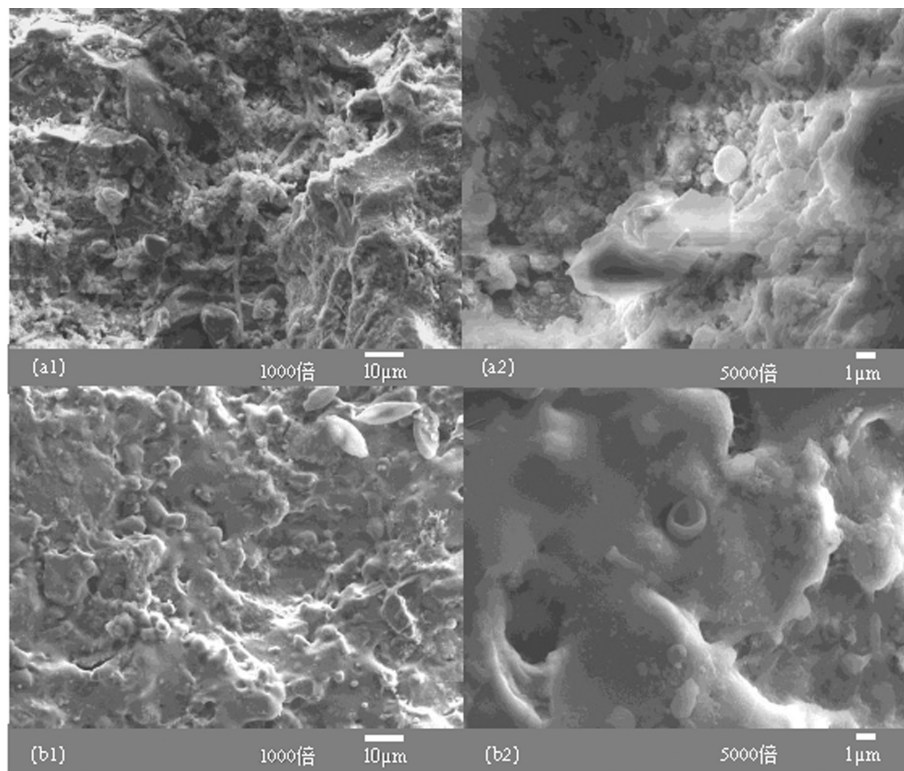


图 3 进水(a)、断流(b)阶段填料生物膜形貌结构

Fig.3 Filler biofilm morphology structure during the inflow (a) off-flow (b) stage

在进水阶段, 生物膜表面呈现出明显的孔隙结构, 内部交错相连, 形貌松散复杂, 生物膜内存在大量的 EPS, 少量菌群暴露在生物膜表面, 相对于进水阶段, 断流阶段生物膜呈现较为光滑的表面结构, 内部呈现堆积状, 形貌紧密平实, 其内仍然可以观察到 EPS 的存在, 但有明显菌群暴露在生物膜表面; 进水阶段时, 基质充足下微生物生长活跃, 其新陈代谢产

生大量 EPS, 生物膜内 EPS 的复杂结构为微生物形成聚集体提供了稳定微环境, 但受进水冲击影响, 生物膜表面较为疏松, 断流阶段微生物进入饥饿状态, 大量低活性微生物死亡, EPS 发生改变使得微生物聚集能力降低^[29], 出现菌群明显暴露情况, 为度过饥饿时期, 生物膜结构变得紧密平实。

综上, 滴滤池生物膜的稳定存在保证了系统的

运行效能,其形貌结构随运行周期呈现为进水期松散复杂的孔隙结构,断流期紧密光滑的堆积结构,这一变化与其内部 EPS 相关。

2.3 微生物 EPS 对间歇断流的应激响应特征

2.3.1 微生物对 EPS 内碳源的转化特征

为解析微生物对 SB-EPS 中碳源的转化利用机制,本研究选取典型周期内进水初期(进水 2h)、进水末端(进水 12h)、断流初期(断流 2h)、断流末端(断流 12h)4 个时段,对微生物胞外 SB-EPS 中有机物的浓度进行对比。滴滤池内微生物 SB-EPS 的 COD 浓度变化如图 4 所示。

进水/断流期间,SB-EPS 内 COD 浓度均呈现初期上升,末端下降趋势。进水使反应器内碳源充足,进水初期 SB-EPS 吸附大量碳源作为微生物营养,EPS 形成缓冲带^[30]帮助微生物适应环境变化,随进水时间增加,微生物逐渐适应外部环境,并大量消耗 SB-EPS 吸附碳源进行生长繁殖,微生物活性逐渐恢复并维持稳定。断流初期基质减少使 EPS 出现应激效应,微生物大量吸收剩余基质将其储存在 EPS 内,伴随细胞裂解,微生物胞内物质流失到 EPS 内,SB-EPS 内再次吸附大量碳源,而随断流时间增加,内源呼吸期的微生物通过大量利用 SB-EPS 内的碳源维持自身活性,SB-EPS 内碳源被微生物消耗至较低水平。

综上,断流期间饥饿状态的微生物通过转化 SB-EPS 内赋存的碳源以维持其生长活性,这一反应会同步引起其 EPS 的组分变化进而影响微生物活性及结构稳定性。

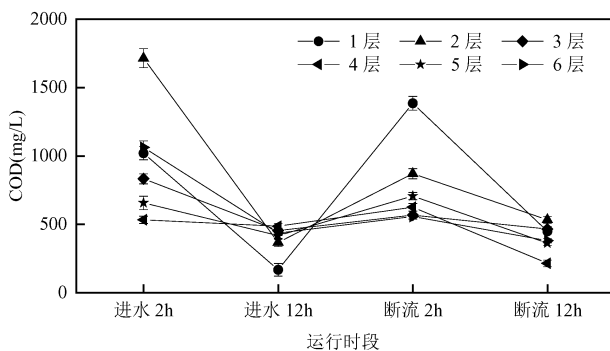


图 4 不同时段反应器内 SB-EPS 的 COD 浓度变化

Fig.4 The COD concentration change of SB-EPS in the reactor in different operating hours

2.3.2 间歇断流下 EPS 组分变化特征

EPS 总含量变化如图 5(a)所示。在进水阶段, LB-EPS 含量保持稳定, TB-EPS 含量明显上升,微生物通过吸收进水基质大量产生 TB-EPS 为其储能并搭建稳定环境;断流阶段 LB-EPS 含量大幅上升, TB-EPS 总含量减少,微生物在基质逐渐匮乏的环境中产生应激响应,断流初期微生物大量死亡,但裂解物质仍然被包裹在 EPS 内,供微生物在饥饿状态下维持活性,同时断流下的 TB-EPS 的稳定维持也为微生物提供了生长的稳定空间。

EPS 由多种组分构成,多糖与蛋白质是其主要成分,其中多糖可以作为微生物的营养物质,而蛋白质对微生物的聚集稳定性具有重要作用。EPS 内多糖(EPS-PS)变化如图 5(b)所示。在进水期间,好氧层(1、5 层)EPS-PS 含量少于缺氧层(2、3、4、6 层),缺氧层 TB-EPS 内多糖(TB-PS)含量大幅增加;进水携氧气与基质的进入反应器内,微生物大量繁殖,其中好氧菌生长活跃,多糖作为营养物质被大量消耗,多糖储存少,而缺氧反应受环境抑制,兼性菌对多糖的消耗少,储存多。在断流初期,好氧层 EPS-PS 含量稳定,缺氧层 LB-PS 含量明显上升、TB-PS 含量大量减少;进水溶氧消失利于缺氧菌生长,微生物大量吸收剩余基质进行储存,但随基质减少微生物大量死亡,TB-EPS 随细胞裂解减少,胞内物质流失储存于 LB-EPS 内。在断流末期,反应器 LB-PS 含量呈现 1~4 层减少,5~6 层大幅增加, TB-PS 含量维持稳定;基质匮乏后微生物仅能通过利用 LB-PS 作为维持活性的营养来源,而反应器推流式运行特点使其随层位产生物质积累,末端多糖含量上升^[31]。

不同时段 EPS 内蛋白质变化如图 5(b)所示,在进水/断流期间, LB-EPS 内蛋白质(LB-PN)含量均呈初期上升,末端下降趋势, TB-EPS 蛋白质(TB-PN)含量变化则与之相反。初期进水冲击使部分微生物裂解造成物质流失, TB-EPS 随之减少,蛋白质随细胞裂解由胞内扩散至胞外储存于 LB-EPS 内,持续进水使微生物逐渐适应并大量繁殖,微生物分泌大量蛋白质至胞外 TB-EPS,利用蛋白质的疏水性^[32]帮助微生物大量聚集,形成稳定生长结构;断流初期基质骤减,大量微生物裂解,胞内物质流散存储于 LB-EPS 内, TB-EPS 也随之减少,随断流时间增加,饥饿状态下微生物转化胞外物质作为营养维持基本活性, LB-PN 被微生物大量利用,同时微生物为保

证持续存活并减少物质流失,分泌大量蛋白运输至 TB-EPS 内,形成相对疏水的微环境。

微生物在进水阶段囤积物质储存于 EPS 内,随

后在断流期间依靠 EPS 继续生长,断流期间 LB-PS 为微生物提供了维持活性的营养条件,进水期间 TB-PN 帮助微生物稳定了结构。

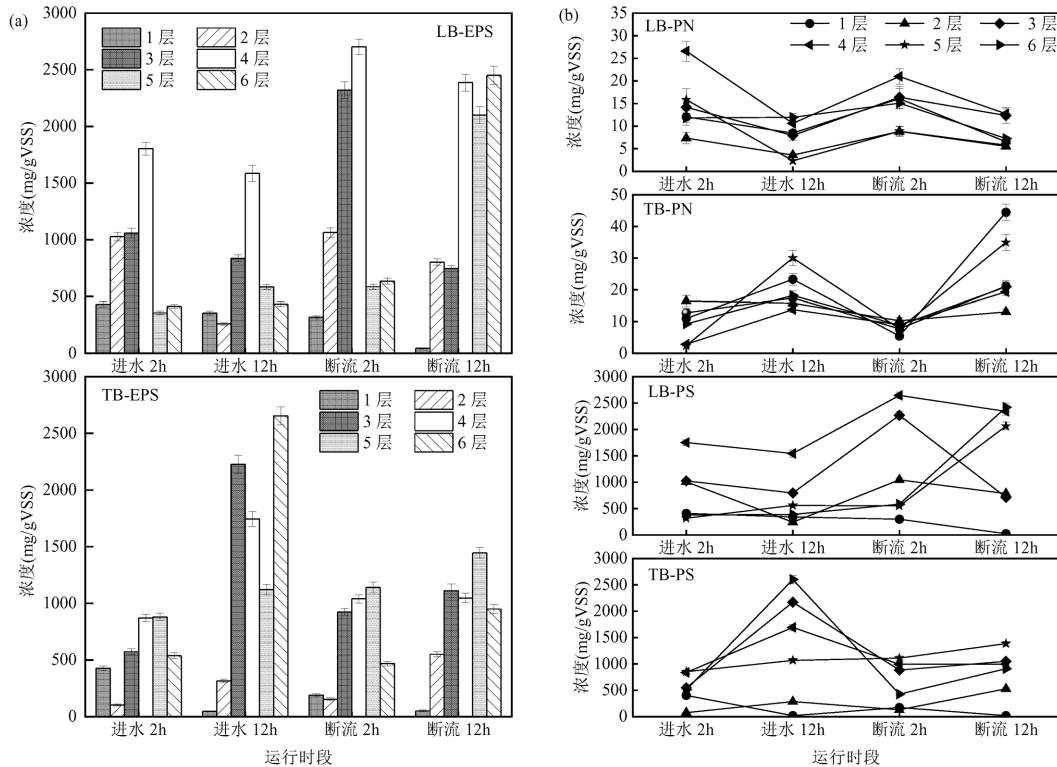


图 5 不同时段 EPS 总含量(a)、PS 和 PN 含量(b)的变化

Fig.5 Changes of the EPS content (a), EPS-PS and EPS-PN content (b) in different operating hours

2.4 间歇断流下微生物结构稳定性的维持机制

EPS 内多种功能性官能团对微生物聚集体的形成有促进或抑制效果^[33-34],是微生物结构稳定的重要保障, EPS 内 C、O 元素的分峰结果如图 6 所示。在各时段内, LB-EPS 与 TB-EPS 中与 C 结合的主要官能团包括:C-(C/H),其主要来源于脂类、蛋白质等大分子物质的侧链烃基类;C-(O/N),主要来自蛋白质和多糖中醇类、酰胺键等;O-C-O(C=O),主要出现在酰胺键、羧基、羰基和半缩醛等化合物中;O-C=O;其包括 O-C=OH 和 O-C=OR,主要分布于羧化物和糖醛酸等物质的羧基与脂键中。与 O 结合的主要官能团包括:来自于羧酸盐、羰基或酰胺等物质内的 O=C,源于醇类、缩醛或半缩醛内的 HOC(C-O-C)。

EPS 内与 C、O 结合的主要官能团占比如表 1 所示。与 C 结合的官能团中进水与断流阶段均呈现出 C-(C/H)占比最高,占比在 44%~59%之间,具有疏水性,是 EPS 内主要的疏水性 C,存在于 EPS 蛋白质

中的长链疏水基团可以与微生物细胞形成疏水作用,有利于微生物聚集^[35];与 O 结合的官能团中 HOC/C-O-C 占比最高,占比在 70%以上,且与 C 结合官能团中来自蛋白质和多糖 C-(O/N)占比仅次于 C-(C/H),因此 EPS 内可能存在大量-OH,带负电的-OH 与 O-C=O 基团可以为金属离子提供架桥结合位点^[36],形成离子架桥作用,增强细菌的聚集能力;同时胞外多糖分布于聚集体整个空间内,为多糖支链上多种基团增大了结合位点的暴露空间^[37],加快了微生物细胞粘附聚集。

XPS 测试结果显示间歇断流下反应器呈现出疏水基团为主离子架桥为辅的聚集作用,而这一机理与污泥性状稳定的活性污泥不同。Qiang 等^[38]发现在食物充足条件下,活性污泥 EPS 中 C-(C/H)与 C-(O/N)占比分别为 42.90%,37.20%,含量相当,说明维持活性污泥聚集形态的主要原因是 EPS 的疏水基团与离子架桥共同作用; Feng^[39]等对处于内源呼吸阶段的活性

污泥 EPS 进行 XPS 检测,结果显示 EPS 中 C-(O/N)占比高达 58.70%,C-(C/H)仅占 21.2%,明显少于饱食条件下 C-(C/H)占比,表明该阶段疏水基团作用微弱,离子架桥作用在活性污泥聚集中占主导地位.然而,饥饿

状态下活性污泥 EPS 大量的亲水基团的存在会造成活性污泥工艺泥水分离困难,不利于其系统稳定运行,这也是活性污泥法在应对农村污水水量波动大时处理效果不稳定的原因.

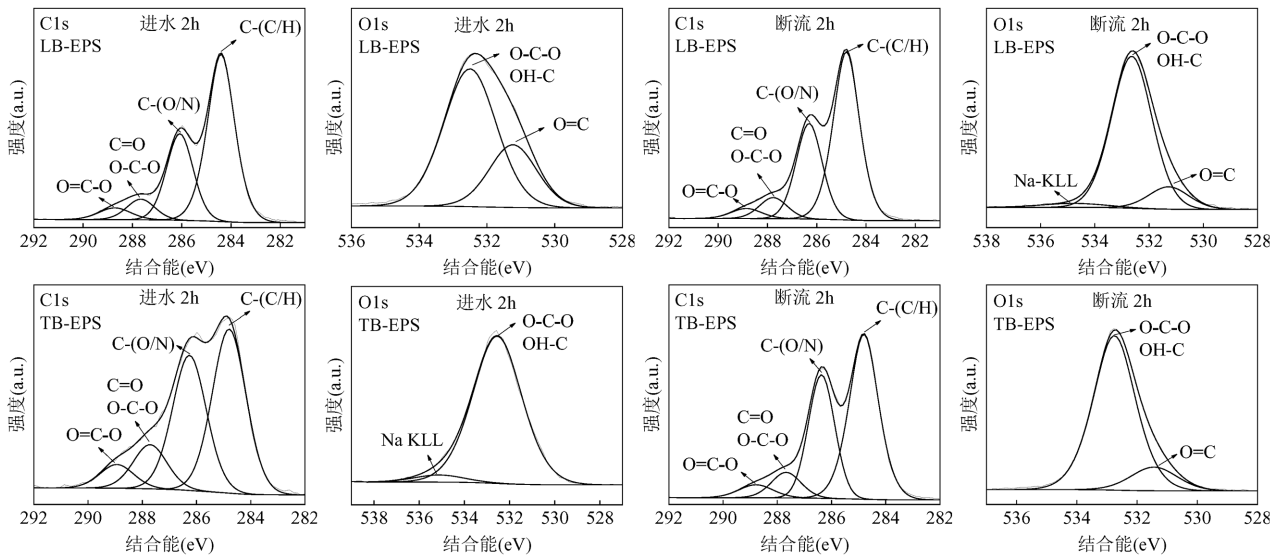


图 6 EPS 中与 C、O 元素的分峰结果

Fig.6 The peak separation results of C and O elements in EPS

表 1 EPS 中与 C、O 结合的主要官能团的占比(%)

Table 1 The proportion of main functional groups combined with C and O in EPS (%)

处理技术	EPS 类型	运行时段(条件)	C 结合的主要官能团(结合能)				O 结合的主要官能团(结合能)	
			C-(C/H) 284.8eV	C-(O/N) 286.2eV	O-C-O/C=O 287.8eV	O-C=O 289.2eV	O=C 531.3eV	HOC/C-O-C 532.7eV
生物膜法	LB-EPS	进水 2h	58.81	29.14	7.30	4.75	29.02	70.98
		断流 2h	57.20	31.54	7.40	3.86	12.38	84.09
	TB-EPS	进水 2h	44.61	36.88	12.04	6.47	-	95.41
		断流 2h	52.73	34.38	8.13	4.76	14.10	85.90
活性污泥法	TB-EPS ^[38]	饱食阶段	42.90	37.20	11.90	3.30	35.40	64.60
	EPS ^[39]	内源呼吸	21.20	58.70	13.60	6.50	67.90	32.10

相对于活性污泥法,滴滤池生物膜 EPS 在进水/断流下均展现出较高的 C-(C/H)占比,其在间断断流条件下依然存在大量疏水官能团,促使其聚集状态保持稳定,这为微生物生长提供了稳定环境,有利于其结构稳定性,使滴滤池能更好的适应进水冲击与持续断流,保证了系统运行的稳定性和高效性.

3 结论

3.1 滴滤池在间歇断流工况下能够稳定运行, COD 与 TP 去除率分别稳定为 95.56%±1.10%和 87.06%±2.08%, NH₄⁺-N 与 TN 出水浓度分别维持

在(2.94±0.76)和(10.98±1.92) mg/L,反应器内微生物能够适应并恢复;系统内生物膜进水期间呈现疏松的孔隙结构,断流期间呈现紧密的堆积结构,生物膜形貌结构变化与 EPS 相关.

3.2 断流和恢复进水对生物膜产生冲击时, EPS 组分的赋存和转化利用对微生物活性与生物膜结构影响显著;断流期间以 EPS 中多糖为营养基质的生化活动,以及进水期间利用胞外蛋白质维持生物膜稳定结构,是 EPS 产生应激响应机制的关键.

3.3 进水/断流交替下, EPS 内官能团的疏水性及离子架桥作用促进生物膜稳定结构的维持,滴滤池

生物膜 EPS 比活性污泥 EPS 具有更益于稳定污水处理效果的微生物聚集能力。

参考文献:

- [1] Xie Y, Zhang Q, Wu Q, et al. Novel adaptive activated sludge process leverages flow fluctuations for simultaneous nitrification and denitrification in rural sewage treatment [J]. *Water Research*, 2024,255: 121535.
- [2] Cheng J, Chen Y, He Y, et al. Research of rural domestic sewage treatment processes in Ningbo [J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2019,358(2):022072.
- [3] 杨亮,马军,陈志强.我国农村污水处理现状综述 [J]. *中国给水排水*, 2024,40(10):28-35.
Yang L, Ma J, Chen Z G. Current situation of rural sewage treatment in China: a review [J]. *China Water & Wastewater*, 2024,40(10):28-35.
- [4] 李冬,曹思雨,王琪,等.低表观气速间歇曝气 AGS-SBR 系统处理实际生活污水 [J]. *中国环境科学*, 2021,41(10):4588-4596.
Li D, Cao S Y, Wang Q, et al. Low superficial gas velocity intermittent aeration AGS (aerobic granular sludge) SBR system of treating domestic wastewater [J]. *China Environmental Science*, 2021,41(10): 4588-4596.
- [5] 邵劲博,荣懿,刘星,等.基于污水排放特性的陕南村镇污水处理厂优化运行与节能降耗研究 [J]. *给水排水*, 2022,58(8):24-30.
Shao J B, Rong Y, Liu X, et al. Study on rural wastewater discharge characteristics and optimal operation of typical township wastewater treatment plants in Southern Shaanxi [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2022,58(8):24-30.
- [6] 王睿,张亮,谭映宇,等.自充氧层叠生物滤床在农村生活污水处理中的应用研究 [J]. *环境与可持续发展*, 2021,46(3):134-139.
Wang R, Zhang L, Tan Y Y, et al. Research on application of self-oxygenation laminated biological filter bed in rural domestic sewage treatment [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2021, 46(3):134-139.
- [7] Shen S, Meng J, Zhang T, et al. Purification effect and microbial community structure of bio filter on rural dispersed sewage [J]. *Heliyon*, 2024,10(3):e25301.
- [8] Chen P, Zhao W, Chen D, et al. Research progress on integrated treatment technologies of rural domestic sewage: A review [J]. *Water*, 2022,14(15):2439.
- [9] Peng X, Yang W, Jin Q, et al. Biofilter-constructed wetland-trophic pond system: a new strategy for effective sewage treatment and agricultural irrigation in rural area [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023,332:117436.
- [10] Huang Y, Hu T, Lin B, et al. Microplastics-biofilm interactions in biofilm-based wastewater treatment processes: A review [J]. *Environmental Pollution*, 2024,361:124836.
- [11] Wu Y, Wan A, Zhao B, et al. Single-stage MBBR using novel carriers to remove nitrogen in rural domestic sewage: The effect of carrier structure on biofilm morphology and SND [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2022,10(5):108267.
- [12] Mpongwana N, Rathilal S. Exploiting biofilm characteristics to enhance biological nutrient removal in wastewater treatment plants [J]. *Applied Sciences*, 2022,12(15):7561.
- [13] Characterization of stratified EPS and their role in the initial adhesion of anammox consortia [J]. *Water Research*, 2020,169:115223.
- [14] He S, Zhao L, Feng L, et al. Mechanistic insight into the aggregation ability of anammox microorganisms: Roles of polarity, composition and molecular structure of extracellular polymeric substances [J]. *Water Research*, 2024,254:121438.
- [15] Izadi P, Izadi P, Eldyasti A. Holistic insights into extracellular polymeric substance (EPS) in anammox bacterial matrix and the potential sustainable biopolymer recovery: A review [J]. *Chemosphere*, 2021,274:129703.
- [16] Zhao K, Wang J, Peng G, et al. Influence of composite fillers on sludge characteristics and extracellular polymeric substance composition and structure in the sequencing batch reactor [J]. *Chemical Papers*, 2022, 76(7):4147-4158.
- [17] Yu G, He P, Shao L. Breakage and regrowth of sludge flocs by removal and readdition of extracellular polymeric substances fractions [J]. *Environmental Engineering Science*, 2009,26(10):1533-1540.
- [18] Pan M, Li H, Han X, et al. Impact of hydrodynamic conditions on the production and distribution of extracellular polymeric substance in river biofilms [J]. *Water*, 2023,15(21):3821.
- [19] Sheng G P, Zhang M L, Yu H Q. Characterization of adsorption properties of extracellular polymeric substances (EPS) extracted from sludge [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2008,62(1):83-90.
- [20] Su X, Zhang Z. Structural characteristics of extracellular polymeric substances (EPS) in membrane bioreactor and their adsorptive fouling [J]. *Water Science and Technology*, 2018,77(6):1537-1546.
- [21] Yu W, Wen Q, Yang J, et al. Novel insights into extracellular polymeric substance degradation, hydrophilic/hydrophobic characteristics, and dewaterability of waste activated sludge pretreated by hydroxylamine enhanced fenton oxidation [J]. *ACS ES&T Engineering*, 2021,1(3):385-392.
- [22] Gong X, Zhang L, Gong Q, et al. Rapid cultivation and enrichment of anammox bacteria solely using traditional activated sludge as inoculum and biocarrier in low-strength real sewage treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2022,358:127354.
- [23] Li Q, Abdelfattah A, Yu Y Y, et al. Assessment of the start-up of the passive aeration simultaneous nitrification and denitrification (PASND) process using activated sludge as a sole seed for low-energy C and N removal [J]. *Environmental Science: Water Research & Technology*, 2022,8(8):1731-1740.
- [24] 魏复盛,齐文启.水和废水检测分析方法 [M]. 北京:中国环境科学出版社, 2002:88-284.
Wei F S, Qi W Q. Methods for monitoring and analysis of water and wastewater (fourth edition) [M]. Beijing: Chinese environmental science press, 2002:88-284.
- [25] 顾超超,郭彦海,孙许超,等.曝气生物滤池生物膜胞外聚合物提取方法对比研究 [J]. *东华大学学报(自然科学版)*, 2017,43(5):720-726.
Gu C C, Guo Y H, Sun X C, et al. Comparative study on extracellular polymeric substance extraction method for biofilms in biological aerated filters [J]. *Journal of Donghua University (Natural Science)*, 2017,43(5):720-726.
- [26] Lim K, Parameswaran P. Critical evaluation of heat extraction

- temperature on soluble microbial products (SMP) and extracellular polymeric substances (EPS) quantification in wastewater processes [J]. *Water Science and Technology*, 2022,85(8):2318–2331.
- [27] Hu Z, Liu J, Zheng W, et al. Highly-efficient nitrogen removal from domestic wastewater based on enriched aerobic/anoxic biological filters and functional microbial community characteristics [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019,238:117867.
- [28] Li X, Huang Y, Guo Y, et al. Full-scale application and performance of a new multi-self-reflow decentralized wastewater treatment device: impact of hydraulic and pollutant loads [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2023,131:37–47.
- [29] Yang F. Differences in exopolysaccharides of three microbial aggregates [J]. *Environmental Technology*, 2022,3(19):2909–2921.
- [30] Tan Z, Abdouh M H, Yang X, et al. Carbon source type can affect tetracycline removal by *Pseudomonas* sp. TC952 through regulation of extracellular polymeric substances composition and production [J]. *Science of the Total Environment*, 2022,804:149907.
- [31] Zhao X, Yang Y, Feng K, et al. Self-regulating microbiome networks ensure functional resilience of biofilms in sand biofilters during manganese load fluctuations [J]. *Water Research*, 2021,188:116473.
- [32] Shi H X, Wang J, Liu S Y, et al. New insight into filamentous sludge bulking: potential role of AHL-mediated quorum sensing in deteriorating sludge floc stability and structure [J]. *Water Research*, 2022,212:118096.
- [33] He S, Zhao L, Feng L, et al. Mechanistic insight into the aggregation ability of anammox microorganisms: roles of polarity, composition and molecular structure of extracellular polymeric substances [J]. *Water Research*, 2024,254:121438.
- [34] Deng Z, Chen Y, Zhang C, et al. Improving nitrogen removal performance from rare earth wastewater via partial denitrification and anammox process with Fe(II) amendment [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2024,60:105131.
- [35] 许炜怡,黄凯文,刘 崇,等.高氮负荷下硫自养反硝化菌群的胞外聚合物和信号分子特征 [J]. *中国环境科学*, 2024,44(8):4314–4325.
- Xu Y Y, Huang K W, Liu C, et al. Characterization of extracellular polymer substances and acyl-homoserine lactones of sulfur-based autotrophic denitrification microbial community under high nitrate loading [J]. *China Environmental Science*, 2024,44(8):4314–4325.
- [36] He S, Feng L, Zhao W, et al. Composition and molecular structure analysis of hydrophilic/hydrophobic extracellular polymeric substances (EPS) with impacts on sludge dewaterability [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023,462:142234.
- [37] He S, Zhao L, Liu Y, et al. Multiple drivers and mechanisms of solid-water interfacial interactions in sludge dewatering: roles of polarity and molecular structure of extracellular polymeric substances [J]. *Water Research*, 2024,263:122180.
- [38] Qiang A, Chen Y, Tang M, et al. The mechanism of extracellular polymeric substances in the formation of activated sludge flocs [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023,663:131009.
- [39] Feng L J, Wang J J, Liu S C, et al. Role of extracellular polymeric substances in the acute inhibition of activated sludge by polystyrene nanoparticles [J]. *Environmental Pollution*, 2018,238:859–865.

作者简介: 李亚娇(1978-),女,辽宁大石桥人,副教授,博士,主要研究方向为水污染控制与防治.65942271@qq.com.