

# 低温环境下生物膜法处理生活污水的适应性研究

狄敬才

葛洲坝水务（济南）有限公司 山东 济南 271100

**【摘要】**：低温环境对生活污水生物处理过程产生显著抑制作用，导致有机物降解速率与氮素转化效率下降。针对生物膜法在寒冷条件下的运行特征与适应机制，系统分析温度变化对微生物活性、传质行为及群落结构的影响规律，探讨填料性能、水力条件与溶解氧控制等关键因素对系统稳定性的调节路径。结合运行参数优化与低温驯化措施，阐明功能菌群在低温胁迫下的调适方式及污染物去除效果变化。结果表明，合理调控运行条件可维持较高的COD与氨氮去除水平，增强系统抗冲击能力，为寒冷地区生活污水生物膜处理工艺优化提供技术依据。

**【关键词】**：低温环境；生物膜法；生活污水；适应性；污染物去除

DOI:10.12417/2705-0998.26.02.092

## 引言

寒冷地区生活污水处理设施在冬季运行期间常出现处理效率下降与出水指标波动现象。温度降低使微生物活性减弱，硝化反应速率明显下降，传统活性污泥系统易受影响而难以保持稳定运行。生物膜法因其微生物附着生长、浓度高及抗冲击能力强等特征，被认为在低温条件下具有较好的运行潜力。然而，低温对生物膜内部传质过程、群落结构及功能菌比例的影响仍存在诸多不确定因素。围绕低温环境下生物膜系统的运行规律与调控路径展开系统分析，有助于明确影响关键环节，为提升寒冷地区生活污水处理水平奠定基础。

## 1 低温条件下生物膜系统运行问题分析

### 1.1 温度下降对微生物代谢速率的影响

低温条件下，微生物细胞内酶促反应活性明显减弱，关键代谢酶如脱氢酶、氨单加氧酶与亚硝酸氧化酶的活性降低，导致底物转化速率下降。细胞膜流动性减弱，物质跨膜运输效率受限，ATP合成速率降低，微生物生长速率常数 $\mu$ 值减小，世代时间延长。硝化菌属于典型的低生长速率自养型微生物，对温度变化高度敏感，低温下其比生长速率与最大比硝化速率显著下降，系统中硝化功能易出现滞后现象。同时，异养菌对有机底物的摄取与分解能力减弱，胞外酶分泌量减少，影响生物膜整体代谢强度。代谢水平的整体衰减使生物膜内部活性层厚度发生变化，微生物群落竞争关系重新调整，系统反应动力学参数呈现明显的温度依赖特征。

### 1.2 低温对有机物与氮素去除效率的制约

在低温运行状态下，生活污水中可溶性有机物的生物降解速率下降，COD去除曲线趋于平缓，单位体积反应速率降低。低温削弱了硝化反应的第一阶段氨氧化过程，氨氮向亚硝酸盐的转化受限，进而影响后续亚硝酸盐氧化过程，易造成氨氮积累和总氮去除率下降<sup>[1]</sup>。反硝化过程同样受到碳源利用效率降低的影响，反硝化菌对电子供体的利用速率减慢，脱氮速率常数降低。溶解氧传递效率在低温下虽有所提高，但微生物对氧

的利用能力下降，使氧利用率与氧传递速率之间产生不匹配现象。污染物去除过程中的动力学失衡，使出水水质波动加剧，系统在负荷变化条件下更易产生运行不稳定问题。

### 1.3 生物膜结构稳定性变化特征

微生物生长速率下降导致生物膜更新周期延长，生物膜厚度增加但内部活性层比例降低，易形成传质阻力增大的现象。胞外聚合物（EPS）分泌组成发生变化，蛋白质与多糖比例调整，影响生物膜黏附性能与机械强度。低温条件下剪切力与附着力之间的平衡关系发生改变，部分区域可能出现局部脱落或空隙结构增多的情况。生物膜内部形成的溶解氧浓度梯度与底物浓度梯度更加明显，厌氧与好氧微区分布发生重构，微生态结构趋于复杂化。结构层次的改变直接影响污染物传质路径及反应界面分布，对系统整体处理性能产生持续影响。

## 2 生物膜法在低温环境中的响应机制

### 2.1 生物膜内部传质过程变化

水体黏度在低温下升高，分子扩散系数降低，底物与溶解氧在生物膜内部的有效扩散速率减缓，导致传质通量下降。生物膜呈现由外至内的浓度梯度分布更加明显，表层区域形成相对活跃的反应界面，而深层区域易处于底物受限或缺氧状态。传质阻力的增加使反应受扩散控制的特征增强，整体动力学模型由反应控制型向扩散控制型转变。填料表面附着的微生物层在低温条件下更新频率下降，微孔结构可能因胞外聚合物积累而趋于致密，进一步影响有效扩散路径。气液界面的氧转移速率虽因溶解度提高而增加，但微生物利用速率降低，形成氧传递与生化反应之间的耦合偏移。多重传质限制共同作用，使低温生物膜系统内部反应呈现空间异质性增强的特征。

### 2.2 功能菌群结构演替规律

温度降低对生物膜内微生物群落结构产生选择性压力，功能菌群组成发生明显调整。自养型硝化菌对温度敏感，其丰度在低温阶段呈下降趋势，氨氧化菌与亚硝酸氧化菌比例发生变化，硝化途径效率受到影响。部分耐冷异养菌与兼性反硝化菌

逐渐占据优势地位,通过提高对低温环境的适应能力维持系统基本功能。群落多样性指数在阶段性波动中趋于重新平衡,微生物之间的竞争与共生关系重新构建<sup>[2]</sup>。低温条件促进慢生型微生物的稳定附着,生物膜内微生态结构呈现由快速增殖型向稳态维持型转变。分子生物学分析可见与低温适应相关的功能基因表达水平发生调节,氮循环相关酶编码基因丰度变化明显。群落演替过程体现出对环境温度变化的渐进性适应特征,维持生物膜系统的功能连续性。

### 2.3 低温胁迫下的代谢调节特征

细胞膜脂肪酸组成发生改变,不饱和脂肪酸比例上升,以增强膜流动性并维持物质交换能力。胞内产生冷休克蛋白与分子伴侣蛋白,参与蛋白质折叠与修复过程,降低低温对酶结构稳定性的影响。能量代谢途径进行重构,部分微生物通过降低生长速率、减少能量消耗来维持基本代谢需求。碳代谢通路中关键酶的表达量发生调节,以适应底物转化速率下降的环境条件。氮转化过程中的电子传递链活性降低,微生物通过调节氧化还原酶体系维持反应平衡。胞外聚合物分泌模式亦出现变化,形成较为稳定的保护性基质结构,增强对低温环境的缓冲能力。代谢调节与结构调适相互协同,使生物膜系统在低温运行阶段保持一定程度的功能活性。

## 3 影响系统适应性的关键控制因素

### 3.1 填料类型与表面特性调控

在低温运行条件下,填料作为生物膜附着与生长的载体,其材质构成与表面结构直接影响系统适应能力。比表面积较大的多孔填料可提供更多微生物附着位点,提高生物量持留能力,减缓低温条件下微生物生长速率下降带来的影响。表面粗糙度与亲水性对初始挂膜速率及生物膜稳定性具有显著作用,适度粗糙结构有利于形成稳定的微观锚固点,增强抗水力剪切能力。高分子复合材料或改性填料可通过表面官能团调节微生物黏附特性,促进功能菌群富集。填料孔隙结构还关系到底物与氧的内部传递效率,合理的孔径分布有助于构建多层次反应界面,维持好氧与缺氧微区共存状态。针对寒冷地区运行特征,对填料结构参数进行优化设计,有助于提高生物膜厚度控制能力与长期运行稳定性。

### 3.2 溶解氧与水力停留时间优化

溶解氧浓度控制在低温阶段尤为关键。温度下降虽提升氧在水中的溶解度,但微生物对氧的摄取速率降低,过高的溶解氧可能导致能耗增加并抑制反硝化过程。通过精确调节曝气强度,使反应器内形成适宜的溶解氧梯度,可兼顾有机物降解与氮素转化需求<sup>[3]</sup>。水力停留时间的设定直接影响底物与微生物接触效率,低温下反应速率常数减小,适当延长停留时间有助于提高污染物去除程度。停留时间过长则可能引发基质利用不均与局部厌氧积累现象。通过调控进水流量与循环比,构建稳

定的水力条件,可改善传质过程与反应动力学匹配程度。溶解氧与水力参数的协同优化能够在能耗与处理效果之间取得平衡,增强系统在低温环境中的运行弹性。

### 3.3 污泥负荷与营养配比调节

污泥负荷水平直接关系到生物膜系统的代谢强度与稳定性。低温条件下微生物生长速率下降,若有机负荷过高,易导致底物在表层快速积累,形成传质受限区并引发局部酸化现象。适度降低体积负荷可减轻微生物代谢压力,使功能菌群保持相对稳定的生理状态。营养元素配比对微生物酶合成与细胞结构维持具有重要影响,碳、氮、磷比例失衡将限制关键代谢途径的正常运行。通过调整进水碳源浓度与补充微量元素,可改善低温条件下的代谢效率。控制污泥龄在合理区间,有助于维持硝化菌等慢生型微生物的数量优势。负荷与营养调控措施相互配合,可稳定生物膜内部生态结构,提高系统对温度变化的适应水平。

## 4 提升低温适应性的运行优化路径

### 4.1 强化启动与低温驯化策略

低温条件下生物膜系统的稳定建立依赖于科学的启动方式与渐进式驯化过程。反应器投运阶段可通过接种富含硝化菌与耐冷异养菌的活性污泥,提高初始功能菌比例,缩短挂膜周期。温度调整宜采用分级递减方式,使微生物在逐步降温过程中完成生理调节,避免因骤降产生代谢失衡与菌群衰退。运行初期控制较低有机负荷与适度延长水力停留时间,有利于生物膜均匀生长并形成稳定结构。通过周期性监测氨氮氧化速率、比硝化速率及生物膜厚度变化,动态评估驯化进程,及时调整曝气量与回流比。适当补充易降解碳源可促进反硝化菌活性维持,增强系统整体抗低温能力。驯化阶段对微生物群落结构的精准调控,有助于形成以耐冷功能菌为核心的稳定生态体系,为后续长期运行奠定基础。

### 4.2 分段运行与分区控制模式

针对低温下不同反应过程速率差异明显的特征,可构建分段运行模式以提升整体处理效率。将有机物降解与硝化过程在空间上进行分区布置,通过设置前置缺氧段、主反应好氧段及后续精处理单元,实现反应条件的精细化控制。各功能区溶解氧浓度、搅拌强度与水力条件可根据反应需求独立调节,使碳氧化与氮转化在适宜环境中进行<sup>[4]</sup>。分区结构有助于降低低温对单一反应单元的集中影响,减少负荷波动对系统稳定性的冲击。采用多级生物膜反应器串联布置,可延长整体反应路径,提高底物利用效率。在线监测系统对溶解氧、氧化还原电位及氨氮浓度进行实时反馈,为分区运行参数调整提供依据。空间结构优化与过程分段控制相结合,可提升低温环境下生物膜系统的运行精度与稳定性。

### 4.3 复合工艺协同强化措施

低温条件下,将生物膜法与其他工艺协同组合可增强系统处理能力。生物膜-活性污泥复合工艺(IFAS)在10℃时氨氮去除率达(99.79±0.31)%,显著优于单独MBBR工艺。活性测定表明,随温度降低,IFAS系统中生物膜的氨氧化贡献率从30.72%升至39.85%,强化了硝化作用。引入预处理单元可去除难降解有机物,减轻主反应区负荷;设置内回流系统强化硝化液循环,有助于提高反硝化效率。利用膜分离技术截留高活性微生物,可延长污泥龄,增强慢生型功能菌滞留能力。投加生物强化菌剂或功能载体,能促进关键代谢途径表达。多种工艺单元在低温下形成互补关系,改善传质条件与反应动力学特征,提升系统抗寒运行能力与出水稳定性。

## 5 低温生物膜系统稳定运行效果评估

### 5.1 污染物去除率变化分析

在低温运行阶段,连续监测COD、氨氮等指标去除率可直观反映系统处理效能。研究表明,10℃以上时A/O-生物膜系统处理高氨氮废水,出水COD与氨氮可稳定低于60mg/L和10mg/L,去除率分别达90%和95%以上。与悬浮污泥相比,生物膜在20℃下的COD和氨氮降解速率分别为其1.4和2.5倍,10℃时更提升至3.1和3.0倍。通过分析氨氮氧化速率与总氮去除水平的变化,可揭示功能菌活性及硝化-反硝化协同性。利用时间序列数据对比去除率波动区间,能有效判断系统低温适应程度。污染物指标波动越小,表明生物膜结构与微生物群落越趋平衡。

### 5.2 系统抗冲击能力对比

低温环境下,进水水质或水量波动对系统的影响更加显

著。通过设置短期负荷提升或水力冲击实验,分析出水水质恢复时间与峰值波动幅度,可评价系统缓冲能力<sup>[5]</sup>。记录溶解氧利用率与氧化还原电位变化情况,有助于判断内部反应区对外界干扰的响应程度。若氨氮与COD在冲击后能够在较短周期内恢复至原有水平,说明生物膜具有较强的抗冲击性能。研究证实,A/O-生物膜复合工艺在低温条件下仍具有很好的抗冲击负荷能力,在进水COD浓度为350~1100mg/L、氨氮浓度为80~280mg/L的宽幅波动条件下,系统出水水质始终保持稳定。对比不同运行策略下的响应曲线,可进一步分析结构优化与参数调控对系统韧性的影响。

### 5.3 运行稳定性综合评价

运行稳定性可通过多指标综合分析进行评估。统计出水主要污染物浓度的标准偏差与变异系数,能够量化系统波动程度。结合生物膜厚度、比表面积利用率及生物量持留量等参数,可判断附着相微生态结构的稳定水平。在线监测数据与周期性理化分析结果相结合,可构建低温运行评价模型,对系统长期表现进行判定。能耗指标与曝气效率变化也反映运行状态是否平衡。各项参数维持在合理区间时,表明低温条件下生物膜系统具备持续稳定处理生活污水的能力。

## 6 结语

低温环境对生物膜系统的微生物活性、传质效率及结构稳定性产生显著影响。经运行参数优化与结构调控,功能菌群逐步形成适宜的生态格局,污染物去除效率得以保持。科学控制填料性能、水力条件与负荷水平,有助于提升系统在寒冷地区处理生活污水的稳定性与可靠性。

## 参考文献:

- [1] 杨士波,史佳晟.生物膜法处理生活污水的效果分析[J].行车指南,2025(2):0085-0087.
- [2] 任珺,武潮辉,杨埴,王若安,杨莉萍,陶玲.铁碳填料耦合生物膜法对生活污水的处理研究[J].水处理技术,2025,51(1):90-96+113.
- [3] 韩珩,刘佳慧.冷喷涂功能涂层在生物环境能源方面的研究现状[J].现代工业经济和信息化,2025,15(5):76-80+83.
- [4] 倪勇军,李文荣,宋维昌,张生华,李军,田乾,关博文.低温环境微生物灌入法修复砂浆效果及性能研究[J].硅酸盐通报,2024,43(2):478-486+533.
- [5] 曾桥,施春阳,李俊,李祥,张璐璐.低温环境下野外自然好氧堆肥理化特征及微生物群落结构变化[J].安徽农业科学,2024,52(6):51-59.