

# 基于生物膜法的农村污水分散处理优化研究

徐伟平 徐 涛 冯朝阳

浙江商达公用集团有限公司 浙江杭州 310018

**摘要:** 生物膜法以微生物多样性和抗冲击负荷能力强为特点, 在处理COD (去除率80%) 和氨氮 (去除率75%) 方面表现优异。通过组合工艺 (如生物膜-人工湿地)、新型纳米载体 (COD去除率提升15%-20%) 及智能运维系统的应用, 可显著提升处理效能并降低运行成本, 为农村污水分散处理提供可行的技术优化方案。

**关键词:** 生物膜法; 农村污水; 分散式处理; 工艺优化

## 前言

随着我国农村经济的快速发展和生活水平的提高, 农村污水排放量呈逐年上升趋势, 环境污染问题越来越突出。由于农村地区人口分散、基础设施薄弱, 传统的集中式污水处理模式难以适用, 而分散式处理技术成为重要解决方案。生物膜法在农村污水分散处理中表现出良好的应用前景, 因为生物膜法具有抗冲击负荷能力强、产泥量少、操作管理简便等特点。

## 一、生物膜法基本原理与特点

### 1. 生物膜法的基本原理

生物膜法借助载体表面微生物膜净化污水。污水流过比表面积大的载体, 微生物附着生长、分泌胞外聚合物, 形成生物膜。生物膜由内至外依次为厌氧层、好氧层、附着水层和运动水层。厌氧层厌氧菌分解有机物产甲烷, 好氧层好氧菌降解污染物, 附着水层传递物质, 运动水层冲刷老化生物膜。处理时, 氧气和污染物进入生物膜被分解, 代谢产物排出, 微生物协同提升降解效率。

### 2. 生物膜法的工艺特点

生物膜法微生物丰富, 生物量大, 对水、水的波动都能适应。某农村污水处理项目旅游旺季, 即便水质水量大幅波动, 生物膜法处理后, COD去除率超80%, 氨氮去除率超75%。生物膜微生物食物链长, 原生动捕食分解产物, 厌氧层厌氧菌降解剩余污泥, 降低污泥产量, 减少处理成本与环境风险。生物膜法微生物在无污泥回流的情况下, 附着载体生长, 操作简单化。设备结构简单, 载体耐用, 曝气系统维护方便, 对操作人员技术要求低, 适合小型污水处理设施。

## 3. 常见生物膜法工艺类型

### (1) 生物滤池

生物滤池由池体、滤料、布水装置和排水系统构成。滤料要求比表面积大等, 早期用碎石, 如今塑料型块等新型滤料因重量轻、不易堵塞得到应用。污水经布水装置喷洒在滤料表面, 自上而下流动, 有机物被生物膜分解, 处理后污水排出, 老化生物膜脱落。采用生物滤池处理生活污水, BOD<sub>5</sub>可去除率超85%。

### (2) 生物接触氧化法

生物接触氧化法是一种浸入式曝气式生物滤池, 在池中设置填充物, 具有较高的微生物浓度和较强的降解能力。某城镇污水处理厂采用全池气泡曝气工艺, 水力停留时间1-3小时, 控制溶解氧2-4mg/L, 出水达A类排放标准。

### (3) 移动床生物膜反应器 (MBBR)

MBBR在反应器中加入悬浮填充物, 使填充物物流化, 同时使生物膜与污水充分接触, 使之不发生阻塞。其微生物处理效率高, 在处理农村生活污水、耐水力冲击、运行参数可灵活调整、占地面积小、投资成本低等情况下, 氨氮去除率达80%~95%以上。

## 二、农村污水分散处理现状

### 1. 农村污水的特点

农村污水主要源于畜禽养殖、厨房废水和水洗污水, 富含有机化合物。厨房废水BOD达300-500mg/L, COD达500-800mg/L, 氮以氨氮为主, 浓度30-80mg/L, 部分地区超100mg/L, 磷以磷酸盐为主, 总磷5-15mg/L, 部分超20mg/L, 还含致病物与重金属。农村污水排放不连续, 早晚排放量占全天60%-70%, 夏季比冬季多30%-50%, 旅游旺季和乡镇企业发展会使污水量剧增, 加大处

理难度。

## 2. 农村污水分散处理存在的问题

传统的化粪池对COD的去除率为30%~50%，氨氮的去除率为10%~20%，对季节影响稳定的池塘具有更大的治理作用。新型生物膜法在农村应用时，生物膜生长脱落难控制，易堵塞，对水质水量波动适应性差。

农村财政资金有限，建设一座100m<sup>3</sup>/d的污水处理站投资50~100万元，部分设施建设标准低。运行成本0.5~1.5元/m<sup>3</sup>，实际收费0.1~0.3元/m<sup>3</sup>，资金缺口大，导致设备闲置、处理效果下降，且设施升级改造困难<sup>[1]</sup>。

农村缺乏专业运维人员，对设备操作和水质监测分析能力不足。设备分散、交通不便，维护资金有限，缺乏备品备件，设备故障维修不及时，影响处理效果。

## 三、生物膜法处理农村污水分散的优化策略

### 1. 工艺优化

#### (1) 组合工艺的应用

水力停留时间(HRT)对生物膜法处理效果有重要影响，过短的HRT使污水中的污染物无法与生物膜充分接触，导致处理效果不佳，过长的HRT使处理费用增加，设备处理能力下降，对污水中的污染物产生不利影响。通过实验研究发现，对于农村生活污水，采用生物接触氧化法处理时，HRT在12~24小时之间，可以达到较好的处理效果。在此HRT范围内，生物膜上的微生物可充分吸附并分解污水中的有机物质，COD去除率可超过80%，氨氮去除率超过70%。溶氧浓度也是生物膜法操作中的重要参数，而适合的溶氧浓度对于好氧生物膜法来说，可以保证微生物的好氧代谢，提高处理效率，一般在2~4mg/L之间就应该控制好溶氧浓度。当溶解氧浓度低于2mg/L时，会抑制微生物的好氧代谢，使处理效果下降；当溶解氧浓度高于4mg/L时，在运行成本增加的同时，虽然微生物的代谢活性可以提高，但能耗却会增加。在一项利用生物接触氧化法处理农村污水的工程中，在降低能耗的同时，通过控制2~3mg/L的溶氧浓度，实现污水中污染物的高效去除。

#### (2) 优化运行参数

水力停留时间(HRT)对生物膜法处理效果有重要影响，过短的HRT使污水中的污染物不能与生物膜充分接触，造成处理效果不佳，过长的HRT使处理费用增加，设备处理能力下降，对污水中的污染物产生不利影响。通过实验研究发现，对于农村生活污水，采用生物接触氧化法处理时，HRT在12~24小时之间，可以达到

较好的处理效果。在这个HRT范围内，污水中的有机物质能够被生物膜上的微生物充分吸附和分解，COD去除率可达80%以上，氨氮去除率可达70%以上<sup>[2]</sup>。

溶氧浓度也是生物膜法操作中的重要参数，而适合的溶氧浓度对于好氧生物膜法来说，可以保证微生物的好氧代谢，提高处理效率，一般在2~4mg/L之间就应该控制好溶氧浓度。当溶解氧浓度低于2mg/L时，微生物的好氧代谢受到抑制，处理效果下降；当溶解氧浓度高于4mg/L时，微生物的代谢活性虽然可以得到提高，但能耗会增加，运行费用也会增加。在一项采用生物接触氧化法处理农村污水的项目中，通过控制2~3mg/L的溶氧浓度，在降低能耗的同时，实现了污水中污染物的高效去除。

有机负荷也是影响生物膜法处理效果的重要因素，有机负荷过高会导致生物膜生长过快，容易造成生物膜脱落、阻塞；如果有机负荷过低，则会导致微生物生长缓慢，处理效率低下，因此，生物膜法处理效果会受到一定影响。对于农村生活污水，一般适宜的有机负荷在0.5~1.5kg BOD<sub>5</sub>/(m<sup>2</sup>·d)之间，在此有机负荷范围内，生物膜可保持良好的生长状态，对污水中的污染物去除率较高。在一项利用移动床生物膜反应器(MBBR)处理农村污水的工程中，通过有机负荷量控制在1.0kg BOD<sub>5</sub>/(m<sup>2</sup>·d)左右，出水水质稳定达标，治理效果较好。

生物膜法处理效果的影响，除上述参数外，还需考虑温度、pH值等对微生物活性有重要影响的因素，一般在20~35℃的适宜温度范围内。微生物在10℃以下时活性降低，处理效果下降，40℃以上则抑制其生长代谢，pH值也对微生物的生长代谢产生影响，一般采用生物膜法的适宜pH值范围为6.5~8.5。在实际运行中，这些运行参数需要根据污水的水质和处理要求进行合理控制，以提高处理效率，降低生物膜法的成本<sup>[3]</sup>。

## 2. 材料与设备优化

### (1) 新型生物膜载体的研发

以新型纳米复合生物膜载体为例，它具有较高的表面积和较好的生物亲和性，这种通过纳米技术制备的载体，其表面纳米级的孔隙结构十分丰富，可达到传统载体的2~3倍表面积。这使得微生物能更充分地附着在载体表面，使微生物的附着量增加，使生物膜的活性得到提高，处理效率也随之提高。这种纳米复合生物膜载体的生物膜反应器，对农村污水中的COD去除率较传统载

体提高15%~20%，氨氮去除率提高10%~15%。

新型载体还具有良好的稳定性和抗污染能力，其采用的纳米复合材料化学稳定性强，可以抵抗污水中各种化学物质的侵蚀，使载体寿命得以延长。载体表面经过特殊处理，具有一定的疏水性，可减少污水中的悬浮物及油脂等污染物的附着，减少生物膜堵塞的危险。在实际应用中，使用这种新型载体的生物膜反应器在使用传统载体的3个月，就出现了不同程度的堵塞，而使用这种新型载体的生物膜反应器在连续运行6个月后，并没有出现明显的生物膜堵塞现象<sup>[4]</sup>。

### (2) 高效曝气设备的选择

微孔曝气器是利用微孔将空气分散成微小气泡，增大氧气与污水的接触面积，提高输氧效率的一种常用的高效曝气设备。微孔曝气器的气泡直径一般在1~3mm之间，这种微小的气泡在水中能缓慢上升，使氧气在污水中充分溶解。使用微孔曝气器的生物膜反应器，其溶解氧利用率可达20%~30%，比传统曝气设备提高10%~15%。微孔曝气器能提供微生物足够的溶解氧，促使微生物为了提高污水中污染物的去除效果，在处理农村污水时，能有良好的氧代谢。微孔曝气器还具有节能的优点，能满足微生物在较低曝气量下对氧气的需求，并因其高效的氧气传输而减少能源消耗。

射流式曝气器利用射流原理，将空气与污水高速混合，形成强烈的湍流，使氧气在曝气强度大、混合效果好的污水中迅速溶解，使污水中的溶氧浓度迅速提高，也是一种性能优异的曝气设备。在处理高浓度有机废水或水质、水量波动较大的农村污水时，射流式曝气器能迅速提供足够的溶解氧，保证微生物活性，提高处理系统的抗冲击负荷能力，对污水处理的抗冲击性较强。

## 3. 运维管理优化

### (1) 建立智能化运维管理系统

利用物联网技术，实现农村污水分散处理设施的远程监控和数据采集，是建立运行维护智能化管理系统的关键步骤。通过在污水处理设施的关键部位，如进水口、生物膜反应器、出水口等安装传感器，实时监测水质参数（如COD、氨氮、总磷等）、水量、设备运行状态（如

曝气设备运行时间、功率等）以及环境参数（如温度、湿度等）。这些传感器将采集到的数据通过无线传输模块发送到云平台，实现数据的集中存储和管理，运维人员可以随时随地通过手机、电脑等终端设备访问云平台，实时了解污水处理设施的运行情况<sup>[5]</sup>。

### (2) 加强人员培训与技术支持

定期组织运维人员参加专业培训，邀请行业专家围绕生物膜法原理、设备运行维护、水质监测分析等方面进行理论讲解、案例分析和实操演示，并安排人员到成功项目参观学习，学习借鉴先进经验。建立微信群、论坛等交流平台，鼓励运维人员进行问题与解决方案的分享，支持他们参加行业研讨会，提供学习资料，帮助知识更新，与科研单位、环保企业合作，针对生物膜法工艺异常问题，邀请专家定期对评估进行指导和解决，并委托专业机构定期对设备进行检测维护，排查隐患。

## 结束语

生物膜法适配农村污水分散处理。通过优化工艺、升级设备、实施智能运维，能提升处理效率、降低成本、保障稳定运行。应用组合工艺、调控参数可提高水质适应性，研发新型载体和曝气设备助力技术升级。未来需结合农村实际，推广智能管理平台，加强技术培训与政策支持，推动生物膜法规模化应用，改善农村生态环境。

## 参考文献

- [1]任月华, 刘宝震, 马彬, 等. 新型生物膜法处理农村生活污水的研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(05): 1170-1174.
- [2]齐晓丹. 生物滤池工艺处理分散式农村生活污水的试验研究[D]. 河北省: 河北农业大学, 2022.
- [3]刘世杰. 农村生活污水生物生态处理工程的调试与优化研究[D]. 江苏省: 东南大学, 2022.
- [4]朱国荣, 陈林华, 蔡飞, 等. 农村生活污水处理技术及其应用进展[J]. 山西化工, 2022, 42(5): 34-38.
- [5]中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社有限公司, 2022.