

# 市政污水处理与回用中的生物膜技术实践应用

任明森<sup>1</sup> 李新<sup>2</sup>

1 洛阳宇泉环保科技有限公司, 河南洛阳, 471000;

2 三门峡市生态环境局第二分局, 河南三门峡, 472000;

**摘要:**城市化和工业化快速推进带动了水资源消耗与污水排放的显著增长, 市政污水处理面临前所未有的技术与管理挑战。当前污水排放结构中市政污水占比较高, 处理体系整体趋于成熟, 但在污染源复杂、设施滞后与排放标准不统一等方面仍存技术瓶颈与制度短板。本文围绕生物膜法与活性污泥法两种典型处理路径, 分析其原理、运行优势与局限, 并结合某地试验案例, 探讨生物膜工艺在市政污水处理与回用中的应用效果及工程意义, 旨在为推动市政污水系统绿色高效运行提供技术借鉴与实践启示。

**关键词:** 市政污水; 生物膜法; 活性污泥法; 回用技术; 污染控制

**DOI:** 10. 69979/3060-8767. 25. 08. 006

## 引言

水资源安全与城市可持续发展紧密相关, 随着人口密度增长和用水结构多样化, 市政污水的处理与回用已成为生态环境治理中的关键环节。虽然当前市政污水处理水平整体趋于稳定, 但由于污染源多样、系统负荷上升及城乡管理机制差异等因素, 处理过程在技术适应性与标准协同性方面仍存诸多障碍。尤其在城乡统筹与设施配置层面, 区域不均衡问题制约了污水治理成效的整体提升。在此背景下, 以生物膜法为代表的生物处理工艺被广泛研究与实践应用。

## 1 市政污水现状

### 1.1 排放概况

随着工业体系持续不断地扩展以及城市化进程不断加快, 水资源需求呈现出了显著增长的态势, 这就导致污水排放量也在不断地攀升<sup>[1]</sup>。根据近五年相关统计方面的数据, 全国污水排放总量一直处于持续上升状态, 截至 2022 年排放总量已经达到 582474 万立方米, 相比五年之前增长幅度超过了 24.53%<sup>[2]</sup>。其中, 市政污水在整体中所占的比例比较大, 日均处理量能够高达 20378 万立方米, 城市污水整体处理率达到了 98.42%。这体现出市政污水处理体系具有相对的成熟性, 区域性差异表现得也较为明显, 污水处理率排名比较靠前的省份有广东、山东以及江苏等地。这些地区在排水管网和污水处理设施建设方面不断取得新的进展, 为污水处理能力的提升提供了坚实有力的保障。伴随市政污水处理与回用技术持续开展研发并广泛应用, 该领域已逐步演变成推动绿色城市发展战略里的关键支点。

### 1.2 处理难点

#### 1.2.1 污染源复杂

在社会经济和科技水平都显著提升的大背景下, 城镇化的步伐不断加快且城市人口逐年上升, 这带动了水资源需求持续不断地增加。部分水资源相对比较紧张的地区出现了短时性断水问题, 这对区域农业的发展造成了一定程度的影响。在农业灌溉的过程当中, 部分地区选择用生活污水来替代灌溉用水, 这导致农田土壤和作物受到了不同程度的污染, 进而影响到农业生态系统的稳定性。固体废弃物处理体系的不健全进一步加剧了市政污水处理的难度, 垃圾分类在多数地区尚未实现有效的普及推广, 生活垃圾与有毒有害垃圾混合处置的情况普遍存在着。垃圾渗滤液里的高浓度污染成分一旦进入市政排水系统, 会大幅增加处理系统负荷并提升市政污水处理与回用的技术复杂度和成本压力。

#### 1.2.2 设施建设滞后

因为地区之间经济发展水平存在差异, 部分区域在市政污水收集、排放及处理设施方面有明显短板, 这就对整体污水处理效率产生了不利影响。设施不完备不但限制了污水处理能力, 还可能使污水排放的水质难以达到标准, 进而影响环境管理的实际成效。目前, 现行的法律法规以及配套制度在污水处理与管理方面仍存在不足, 特别是在市政污水处理这个领域, 制度体系还没有形成全面的衔接。法律机制不健全不仅削弱了监管工作的力度, 还影响了基础设施建设的系统性和规范性, 对污水处理全过程的有序推进构成潜在障碍。

#### 1.2.3 排放标准不统一

目前, 生态文明建设和绿色发展理念正持续深入推

进, 市政工程及其关联产业运行中产生的污水问题愈发受重视。虽然部分城市区域已建立起统一的污水排放标准, 但农村地区标准化体系还未完全建立起来, 城乡在污水排放管控方面存在着显著差异。现阶段农村市政污水排放大多参考《污水综合排放标准》来管理, 然而农村污水中碳、磷等物质超标问题比较突出, 现有规范在适用性和针对性方面仍显不够<sup>[3]</sup>。所以, 在制度建设过程中要结合农村污水特征对标准体系进行差异化优化, 以此推动城乡污水处理规范一体化与制度联动机制的构建。

## 2 市政污水处理技术分析

### 2.1 生物膜法

生物膜法在市政污水处理里的应用依靠生物膜反应器, 这是一种由膜分离单元和生物处理单元组成的新型污水处理技术。此方法通过往反应器中添加多种填料, 为微生物提供附着以及繁殖的空间, 进而在填料表面慢慢形成由微生物构成的膜状结构。和膜生物反应器不一样, 生物膜反应器并非完全依靠膜分离装置, 而是借助自然形成的微生物群落达成污染物的分解与去除。生物膜法的技术基础能追溯到土壤自净机制, 其处理过程依靠附着生长的微生物对溶解性和胶体状有机污染物的分解, 所以被归为一种好氧生物处理技术。该方法首要特点体现在微生物群落具有多样性。特别是生物膜系统中存在大量硝化菌, 其拥有将污水中的氨氮转化为硝酸盐氮的能力, 有助于实现氮元素的有效脱除。生物膜内生物种类较为丰富, 包含细菌、真菌、藻类等, 形成复杂且稳定的微生态系统, 提升了系统整体抗冲击能力与处理效率。生物膜法还有个明显优势是运行管理十分简便, 这项技术不依靠污泥回流系统, 所以污泥产生量和排放量都比较低, 这样有利于降低运行时管理强度和运维成本。

### 2.2 活性污泥法

活性污泥法是市政污水处理里广泛应用的好氧生物处理技术, 主要靠把厌氧段 (也就是 A 段) 和好氧段 (也就是 O 段) 串联运行来构建反应系统。厌氧段主要作用是将污水中复杂大分子有机物和纤维素类物质做初步分解, 转化成可生物降解的有机物以提高污水可生化性。进入好氧段后, 在充足溶解氧环境下, 污水中铵态氮通过硝化作用转化成硝酸盐氮, 含硝酸盐氮的污水再次回流到厌氧段时, 能通过反硝化作用把硝酸盐还原成氮气释放到空气, 实现氮元素有效去除。这种方法具备良好处理效果和运行稳定性, 操作过程相对来说比较

简洁, 适合大多数城市污水处理厂实际需求。在反硝化过程中不需要额外投加外源碳源, 从而降低了运行成本。该工艺能够同时实现有机物降解与脱氮操作, 提高了处理系统整体效率, 对污水回用也有一定推动作用。

## 3 市政污水生物膜法处理与回用案例

### 3.1 试验背景

根据环境卫生监督部门所发布的数据来看, 近年来全国市政污水排放量已接近 1575 亿立方米了。为实现节约用水以及提升污水资源化利用效率, 推动生物膜技术在市政污水处理及回用中的应用成为重要课题。下面分析以某省市市政污水处理与回用试验作为案例, 重点针对污水处理前后关键水质指标进行了对比, 目的是评估生物膜工艺对典型污染因子的处理效果。表 1 展示出试验前后主要水质参数的变化状况, 数据显示该地区市政污水里化学需氧量、生化需氧量、悬浮物、氨氮、总氮、总磷、总溶解性固体、色度及石油类物质含量大幅升高, 特别是氨氮和总磷的浓度水平远超常规处理系统负荷。pH 值从近中性状态下降到强酸性, 粪大肠菌群数也有显著增长, 这进一步表明污水污染程度很严重。

表 1 水质污染前后参数对比

| 参数                                                | 污染前   | 污染后     |
|---------------------------------------------------|-------|---------|
| COD/(mg · L-1)                                    | 50~60 | 400~600 |
| BOD/(mg · L-1)                                    | ≤25   | ≥200    |
| SS/(mg · L-1)                                     | ≤30   | ≥400    |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N(以 N 计)/(mg · L-1) | ≤10   | ≥350    |
| 总氮(以 N 计)/(mg · L-1)                              | ≤15   | ≥60     |
| 总磷(以 P 计)/(mg · L-1)                              | ≤0.8  | ≥5      |
| TDS/(mg · L-1)                                    | ≤800  | ≥1000   |
| pH                                                | 7.9   | 3       |
| 色度(稀释倍数)                                          | ≤40   | ≥110    |
| 石油类/(mg · L-1)                                    | ≤1    | ≥20     |
| 粪大肠菌群数/(个 · L-1)                                  | ≤900  | ≥2500   |

这次试验用常规生物膜反应器来开展工艺运行, 把反应周期设定成 8 个小时的时长, 其中好氧阶段和缺氧阶段各持续 4 个小时, 通过阶段性交替的方式实现对污染物多重处理。在好氧阶段当中, 污水依靠重力作用流入流化床生物膜反应器 (FBBR), 在充氧的条件下活性微生物对有机污染物氧化降解, 以此提高有机负荷的去除效率。到了缺氧阶段, 则借助空压机推动处理液进入热阻隔沉淀装置, 此阶段水体碳、磷浓度处于较高水平, 在缺氧环境里有利于异养反硝化菌及聚磷菌活性表达,

进而提高碳源与磷资源的回收效率。

### 3.2 装置设计与水样来源

试验里所采用的核心装置涵盖药泵、干燥箱、挂膜池以及隔油器等单元，构建起完整的生物膜形成和污水处理系统（见图1）。药泵作为主要的储料装置，主要作用是存储并且输送覆膜材料，由孔径调控部件、金属传导杆和蒸馏箱等构成，承担着覆膜剂的调制与均匀供给任务。干燥箱作为覆膜处理的核心设备，结构集成了400W微波加热与90°角热气流系统，有助于均匀烘干膜丝表面的涂层。膜材料主要由聚偏氟乙烯（PVDF）制成，通过调控膜丝长度及分布均匀性，能够有效提升挂膜成功率并降低设备运行成本。挂膜池作为生物膜形成的核心模拟环境，用于接触并吸附污水中的微生物群体，当膜丝表面出现钟虫、丝状菌及菌胶团且呈现黄褐色外观时，说明挂膜过程已顺利完成。隔油器用作中试规模的挂膜与驯化平台，在其中完成生物膜的初步成熟和微生物投加量的优化调控。试验所用水源主要分为两类：一类是从当地污水处理厂实际采集的市政污水，另一类是采用人工挂膜方式模拟配置的污水。后者的制备需借助活性污泥、碳酸氢钠（ $\text{NaHCO}_3$ ）、氯化铵（ $\text{NH}_4\text{Cl}$ ）等组分，在空气湿度控制于10%以下的无纺布密封空间内完成膜挂载过程。模拟污水的质量参数需尽可能贴近真实水体，以增强处理结果的代表性和工程适应性。

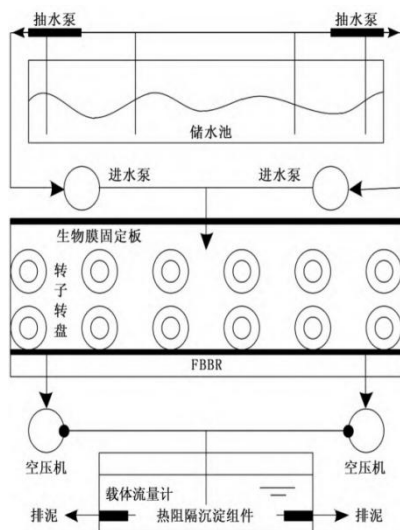


图1 常规生物膜反应器结构示意图

### 3.3 技术效果评估

#### 3.3.1 膜通量

膜通量作为评价生物膜系统运行性能的关键参数，能反映单位时间与膜表面积下的处理能力，具有较高实际指导价值。在连续运行条件时，不管是实际采集的市

政污水还是模拟水体，膜通量均呈现明显提升趋势。此结果表明，在设定循环周期作用之下，膜表生物膜结构趋于稳定，过滤效率逐步增强。膜通量的变化和膜两端的跨膜压差存在双向耦合关系：一方面，污染物溶质浓度越高，渗透驱动力越强，有助于提高通量；另一方面，适度增加跨膜压差可在膜耐压范围内促进处理量增加，从而提升整体运行效率。若膜通量过高导致膜面压差失衡，可能引发膜结构破坏或堵塞风险，所以在实际工程运行中需通过实时调控保持压力与流量的动态平衡。

#### 3.3.2 碳、磷回收率

市政污水里面富含能够回收的碳源和磷素，在污水资源化处理整个过程当中，碳源与磷素的回收效率会直接影响工艺的经济性与环境效益。实验结果显示，生物膜法在设定循环条件之下，能够实现对碳、磷元素90%以上的回收率，展现出良好的资源回用潜力。该现象可以归因于缺氧段微生物群体结构的调整，聚磷菌在断氧状态下释放磷酸盐，并且在随后好氧阶段重新吸收过量磷素，形成“释磷—吸磷”循环过程来实现对磷的富集回收。同时，富碳环境促使异养菌代谢活跃，进而有助于促进碳源的有效转化与回收，显著提升了生物膜系统的综合利用价值。

### 4 结语

综上所述，市政污水处理体系正处于由规范性向高效性转型的关键阶段。在处理对象日益复杂、设施建设与排放标准尚未完全匹配的背景下，传统处理路径亟需融合创新工艺以提升系统韧性与资源化水平。生物膜法凭借微生态系统稳定性与低污泥排放优势，在应对高污染负荷与多组分污水中展现出良好适配能力；活性污泥法则以其工艺成熟度与成本控制优势维系了主流地位。

#### 参考文献

- [1] 谭艳平. 市政污水处理工艺与污水回用技术探讨[J]. 黑龙江环境通报, 2024, 37(10): 157-159.
- [2] 艾热古力·拍孜拉. 污水处理过程中生物膜形成机制及其优化策略[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2024, (11): 130-132.
- [3] 鲁烨超. 医院污水处理中生物膜分离技术的应用分析[J]. 中国新技术新产品, 2024, (21): 114-116.

作者简介：任明森（1983—），男，汉族，河南省洛阳市人，本科学历，研究方向为污水处理、环境保护、大气废气治理。