

# 污水处理厂厌氧消化过程中甲烷产率提升及碳减排路径优化

苏加宏

泸州市兴合水环境治理有限公司 四川 泸州 646000

**摘要：**污水处理厂厌氧消化过程中，提升甲烷产率与优化碳减排路径是关键。通过原料预处理（如热处理、超声波处理）可破坏污泥结构，提高有机物水解速率，进而提升甲烷产率。调控工艺参数（如温度、pH值）和优化微生物群落结构，能增强产甲烷菌活性。同时，采用高效机电设备、加强负载管理、建立需求响应机制可降低能耗。结合沼气提纯、热电联产及污水源热泵等技术，可实现能源高效利用与碳减排，推动污水处理厂向“能源工厂”转型。

**关键词：**污水处理厂；厌氧消化过程；甲烷产率提升；碳减排路径优化

**引言：**随着环保要求的提升与能源结构的转型，污水处理厂正从单纯污染物处理向资源化与低碳化方向演进。厌氧消化技术作为污泥稳定化与能源回收的核心手段，其甲烷产率直接影响清洁能源产出与碳减排成效。然而，国内污水处理厂普遍面临甲烷产率低（ $0.3\text{-}0.5\text{m}^3/\text{kgVS}$ ）、沼气利用效率不足及温室气体泄漏等问题，制约了“负碳污水厂”建设进程。本文聚焦厌氧消化过程，从原料预处理、工艺优化、微生物调控及碳足迹管理等方面，系统探讨甲烷产率提升路径与碳减排策略，为行业绿色转型提供技术参考。

## 1 厌氧消化技术原理及现状分析

### 1.1 厌氧消化基本原理

(1) 四阶段理论：水解阶段，复杂有机物（如碳水化合物、蛋白质）在水解酶作用下分解为小分子单体（葡萄糖、氨基酸）；酸化阶段，产酸菌将单体转化为挥发性脂肪酸（乙酸、丙酸）及 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2$ ；产乙酸阶段，产乙酸菌把挥发性脂肪酸进一步转化为乙酸、 $\text{H}_2$ 和 $\text{CO}_2$ ；产甲烷阶段，产甲烷菌利用乙酸、 $\text{H}_2/\text{CO}_2$ 生成甲烷，完成有机物到清洁能源的转化。(2) 微生物群落结构与功能：群落含水解菌（如拟杆菌）、产酸菌（如梭菌）、产乙酸菌（如互营单胞菌）、产甲烷菌（如甲烷八叠球菌）。各菌群协同作用，水解菌为后续菌群供底物，产甲烷菌是关键，对环境敏感，其活性直接影响消化效率。

### 1.2 污水处理厂厌氧消化应用现状

(1) 工艺类型：国内以中温单相消化为主（ $35^\circ\text{C}$ 左右），设备简单、成本低，如北京高碑店污水厂；高温消化（ $55^\circ\text{C}$ 左右）因效率高在部分工业污水厂应用，如某石化污水厂。国外两相消化应用较广，将水解酸化与产甲烷分离，提升稳定性，如德国柏林污水厂。(2) 甲

烷产率及影响因素：国内产率多为 $0.3\text{-}0.5\text{m}^3/\text{kgVS}$ ，国外可达 $0.5\text{-}0.7\text{m}^3/\text{kgVS}$ 。污泥性质（VS含量）、温度（中温较稳定）、pH（7-8最佳）、C/N比（20-30适宜）均影响产率，如C/N过低易致氨抑制。(3) 碳减排措施及局限性：措施有沼气发电、供热，如上海白龙港污水厂沼气发电。但沼气利用效率低（仅60%-70%），且消化过程中甲烷泄漏（率约5%-10%），削弱碳减排效果，此外，碳捕集技术应用较少，进一步限制减排潜力。

## 2 污水处理厂厌氧消化过程中甲烷产率提升的关键影响因素与优化策略

### 2.1 原料预处理优化

(1) 预处理技术对污泥水解效率的影响：机械破碎通过剪切力破坏污泥絮体结构，使细胞壁破裂，释放胞内有机物，可将水解效率提升15%-25%，尤其适用于初沉污泥这类结构紧密的原料；热处理（ $80\text{-}120^\circ\text{C}$ ）能使污泥中蛋白质、多糖等大分子物质变性，降低黏度，促进后续微生物分解，水解速率可提高30%以上，但高温会消耗较多能源；超声波预处理利用空化效应产生微气泡，冲击污泥颗粒，破坏细胞壁，且无化学药剂残留，水解效率提升20%-30%，不过处理量较小，适合小规模污水厂。(2) 预处理参数与甲烷产率的量化关系：以热处理为例，温度控制在 $100^\circ\text{C}$ 、时间30min时，甲烷产率较未处理组提升28%，若温度超过 $130^\circ\text{C}$ 或时间超过60min，会产生抑制性物质（如腐殖酸），导致产率下降10%-15%；超声波处理中，能量输入为 $0.3\text{-}0.5\text{kWh/kgTS}$ 时，甲烷产率达峰值，若能量输入低于 $0.2\text{kWh/kgTS}$ ，预处理效果不明显，高于 $0.6\text{kWh/kgTS}$ 则会造成能源浪费，且产率无显著提升<sup>[1]</sup>。

### 2.2 工艺参数调控

(1) 温度优化对产甲烷菌活性的影响: 中温(35℃左右)环境下, 产甲烷菌(如甲烷丝菌)活性稳定, 代谢速率适中, 甲烷产率波动较小(±5%), 且设备保温成本低, 适合长期稳定运行; 高温(55℃左右)时, 产甲烷菌(如甲烷thermoautotrophicum)代谢加快, 有机物分解速率提高20%-30%, 甲烷产率可提升15%-20%, 但高温需持续加热, 能耗是中温的1.5-2倍, 且温度波动超过±3℃时, 产甲烷菌活性会骤降30%以上。(2) pH值动态调控策略: 当消化体系pH低于6.5时, 挥发性脂肪酸积累, 会抑制产甲烷菌活性, 此时可添加5%-10%的NaOH溶液或石灰乳, 将pH回调至7-7.5, 使甲烷产率恢复至正常水平的90%以上; 若pH高于8.5, 多因氨氮浓度过高, 可通过降低进料中含氮有机物比例(如减少剩余污泥占比, 增加初沉污泥比例), 将pH控制在适宜范围, 避免氨抑制导致产率下降<sup>[2]</sup>。(3) 有机负荷率(OLR)与水力停留时间(HRT)的协同优化: 对于中温单相消化, OLR控制在2-4kgVS/(m<sup>3</sup>·d)、HRT为20-30d时, 甲烷产率最高, 若OLR超过5kgVS/(m<sup>3</sup>·d), 易导致挥发性脂肪酸积累, HRT缩短至15d以下则会使有机物分解不充分, 两者协同失衡会使产率下降20%-25%; 两相消化中, 产酸相OLR可提高至6-8kgVS/(m<sup>3</sup>·d)、HRT5-10d, 产甲烷相OLR3-5kgVS/(m<sup>3</sup>·d)、HRT15-20d, 协同优化后甲烷产率较单相消化提升15%-20%。

### 2.3 微生物群落调控

(1) 共培养技术增强菌群协同作用: 将产甲烷菌(如甲烷八叠球菌)与产酸菌(如梭菌)按1:3的比例进行共培养, 可促进产酸菌产生的乙酸快速被产甲烷菌利用, 减少挥发性脂肪酸积累, 使菌群协同效率提升25%-30%, 甲烷产率提高18%-22%; 此外, 添加互营细菌(如互营杆菌), 可促进丙酸向乙酸转化, 进一步增强菌群间的物质传递, 避免丙酸抑制。(2) 外源添加剂对微生物活性的促进作用: 添加0.1%-0.3%的纳米Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>颗粒, 可作为电子传递载体, 加快产甲烷菌的代谢速率, 使甲烷产率提升15%-20%; 生物炭(添加量2%-5%)具有较大比表面积, 能吸附污泥中的有害物质(如重金属), 同时为微生物提供附着载体, 提高菌群丰度, 使产甲烷菌数量增加30%以上, 进而提升产率20%-25%。

### 2.4 混合污泥与协同消化

(1) 协同消化的可行性: 污水污泥(C/N比约6-10)与餐厨垃圾(C/N比约15-25)、农业废弃物(如秸秆, C/N比约50-80)混合后, 可通过调整比例实现物料互补, 且三者均含有易降解有机物, 无明显拮抗作用, 协同消化过程中未产生新的抑制性物质, 处理后的沼渣

还可作为有机肥原料, 实现资源循环利用, 在国内苏州、深圳等污水厂已开展试点应用。(2) 协同消化对甲烷产率的提升效果: 当污水污泥、餐厨垃圾、秸秆按6:3:1的比例混合时, C/N比平衡至22-25, 此时甲烷产率达0.65-0.75m<sup>3</sup>/kgVS, 较单一污水污泥消化(0.3-0.5m<sup>3</sup>/kgVS)提升70%-80%; 若调整比例为5:4:1, C/N比降至18-20, 产率略有下降(0.6-0.7m<sup>3</sup>/kgVS), 但仍高于单一消化, 说明合理的混合比例是提升产率的关键。

## 3 污水处理厂厌氧消化过程中碳减排路径优化与资源化利用

### 3.1 沼气高效利用与碳封存

(1) 沼气提纯为生物天然气(CNG/LNG)的技术路线: 沼气(含CH<sub>4</sub>50%-70%、CO<sub>2</sub>30%-45%)先经预处理(脱硫、脱水), 去除H<sub>2</sub>S(降至50ppm以下)和水分(露点低于-20℃); 再通过胺法吸收或膜分离技术脱除CO<sub>2</sub>, 胺法利用乙醇胺溶液选择性吸收CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>纯度可达95%-98%, 膜分离借助高分子膜的渗透差异, CH<sub>4</sub>纯度达90%-95%; 最后压缩(CNG, 压力20-25MPa)或液化(LNG, -162℃), 制成生物天然气。该路线可替代化石天然气, 每立方米生物天然气可减少CO<sub>2</sub>排放2.5-3kg, 国内上海某污水厂已实现规模化生产, 年减排CO<sub>2</sub>超1万吨。(2) 沼气发电与热电联产(CHP)系统的能效分析: 沼气发电采用内燃机或燃气轮机, 发电效率约35%-40%, 1m<sup>3</sup>沼气可发电1.5-2kWh; 热电联产系统在发电同时回收余热(如发动机冷却水、排气热量), 用于厌氧消化罐加热或厂区供暖, 总能效提升至80%-85%, 较单一发电节能30%-35%<sup>[3]</sup>。以某中型污水厂为例, 日处理污泥200吨, 沼气日产量1.2万m<sup>3</sup>, CHP系统日发电2.4万kWh、供热量1.8万MJ, 可满足厂区60%用电和80%用热需求, 年减少外购能源碳排放约8000吨。(3) 沼渣/沼液资源化利用的碳减排贡献: 沼渣含丰富有机质(30%-40%)和氮磷钾, 经脱水(含水率降至60%以下)、堆肥后制成土壤改良剂, 施用于农田可提升土壤碳固存能力, 每公顷农田施用5吨沼渣改良剂, 年固碳量达0.8-1.2吨; 沼液经固液分离后, 可直接作为液体肥料灌溉作物, 替代化学肥料, 每立方米沼液可减少化学氮肥使用0.5kg, 间接减少化肥生产过程中CO<sub>2</sub>排放1.2-1.5kg。国内杭州某污水厂年产生沼渣1.5万吨、沼液8万吨, 资源化利用后年碳减排超2000吨。

### 3.2 温室气体泄漏控制

(1) 厌氧反应器密封设计与沼气收集系统优化: 反应器采用双膜密封结构(内层丁基橡胶膜、外层PVC膜), 密封性能提升95%以上, 甲烷泄漏率从传统设计

的5%-10%降至1%-2%；沼气收集系统增设负压监测装置（压力控制在-50至-100Pa），搭配多点采样检测，实时排查泄漏点，同时在反应器顶部设置导流板，促进沼气均匀聚集，收集效率提升至98%以上。某北方污水厂改造后，甲烷年泄漏量减少800吨，相当于减少1.8万吨CO<sub>2</sub>当量排放。（2）氮氧化物（N<sub>2</sub>O）与二氧化碳（CO<sub>2</sub>）排放的源头抑制：针对N<sub>2</sub>O，通过控制消化后污泥的硝化-反硝化过程，将好氧区溶解氧浓度稳定在2-3mg/L，避免亚硝酸盐积累，同时添加0.1%-0.2%的抑制剂（如乙炔），可使N<sub>2</sub>O排放减少40%-50%；对于CO<sub>2</sub>，在沼气提纯过程中，将分离出的CO<sub>2</sub>通入藻类培养系统，藻类光合作用吸收CO<sub>2</sub>并转化为生物质，CO<sub>2</sub>捕获率达60%-70%，既减少排放，又可利用藻类生产生物燃料，实现碳循环利用<sup>[4]</sup>。某污水厂应用该技术后，N<sub>2</sub>O年排放量从50吨降至25吨，CO<sub>2</sub>年减排超3000吨。

### 3.3 碳足迹评估与全生命周期分析

（1）厌氧消化工艺的碳足迹核算方法（如IPCC指南）：依据IPCC2019年指南，核算边界涵盖污泥运输、预处理、厌氧消化、沼气利用、沼渣/沼液处置全流程，量化各环节碳排放：运输环节按柴油消耗计算（每升柴油排放2.63kgCO<sub>2</sub>），预处理环节按电能消耗计算（每kWh电排放0.6kgCO<sub>2</sub>），消化环节计入甲烷泄漏（1吨CH<sub>4</sub>相当于28吨CO<sub>2</sub>当量），沼气利用按替代化石能源的减排量抵扣。以某污水厂为例，年处理污泥1万吨，全流程碳排放2500吨，其中甲烷泄漏占比35%，电能消耗占比25%，通过优化后，碳足迹降至1200吨CO<sub>2</sub>当量。（2）不同处理路径的碳排放对比：与焚烧处理相比，厌氧消

化碳排放量显著更低——焚烧1吨污泥（含水率80%）产生CO<sub>2</sub>800-1000kg、二噁英0.1-0.3ngTEQ，且无能源回收；厌氧消化1吨污泥产生CO<sub>2</sub>300-400kg（含抵扣沼气减排量），同时回收沼气150-200m<sup>3</sup>。与填埋处理相比，填埋1吨污泥年产生甲烷50-80m<sup>3</sup>（泄漏率30%-50%），相当于1400-2240kgCO<sub>2</sub>当量，且占用土地资源；厌氧消化无土地占用，且沼渣/沼液可资源化，碳排放仅为填埋的1/5-1/4，是更低碳的处理路径。

### 结束语

污水处理厂厌氧消化实现甲烷产率提升与碳减排优化意义重大。通过原料预处理、工艺参数优化、微生物调控及协同消化等手段，可有效提高甲烷产量；同时，借助沼气高效利用、泄漏控制及碳足迹评估等技术，能大幅减少碳排放。未来，应持续探索创新技术，加强多技术耦合应用，构建更完善的低碳处理体系，推动污水处理行业向绿色、可持续方向高质量发展，为碳中和目标贡献力量。

### 参考文献

- [1]高海霞.污水处理厂污水污泥处理碳减排路径分析[J].清洗世界,2024,(02):15-16.
- [2]印辉阳.我国污泥处理处置路径中的碳排放分析[J].产业技术创新,2023,(03):29-31.
- [3]刘春霞,孙鹏飞,吴晓辉,等.“双碳”背景下污水处理行业降碳减排路径探析[J].环境工程,2023,(12):135-137.
- [4]王久龙.城镇污水处理厂碳中和路径及难点分析[J].中国科技期刊数据库工业A,2023,(04):49-50.