

污水处理过程中温室气体排放特征及减排途径分析

陈林 陈培莹

宁波市城市排水有限公司 浙江 宁波 315100

摘要: 随着全球气候变化问题日益严峻, 温室气体 (GHGs) 排放控制已成为各国环境治理的重点。污水处理作为城市基础设施的重要组成部分, 在保障水环境安全的同时, 也成为不可忽视的温室气体排放源。本文系统梳理了污水处理过程中主要温室气体 (包括二氧化碳 CO_2 、甲烷 CH_4 和氧化亚氮 N_2O) 的产生机理、排放特征及其影响因素, 重点分析了不同处理工艺 (如活性污泥法、厌氧消化、人工湿地等) 下的排放差异。在此基础上, 从工艺优化、能源回收、智能控制与管理策略等方面, 提出了一系列具有可行性的温室气体减排路径。研究表明, 通过技术升级与系统集成, 污水处理厂有望从“碳源”向“碳汇”或“近零碳”设施转型, 为实现“双碳”目标提供重要支撑。

关键词: 污水处理; 温室气体; 甲烷; 氧化亚氮; 碳减排; 低碳技术

引言

全球气候变化是21世纪人类面临的最严峻挑战之一。根据政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告, 人为活动导致大气中温室气体浓度持续上升, 其中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是最主要的三种长寿命温室气体。为应对气候危机, 中国提出“2030年前碳达峰、2060年前碳中和”的战略目标 (简称“双碳”目标), 要求各行业深度减排。污水处理行业虽以净化水质、保护生态环境为核心使命, 但其运行过程涉及复杂的生物化学反应, 不可避免地产生温室气体。尤其在发展中国家, 随着城镇化进程加快, 污水处理规模迅速扩张, 若不加以控制, 该行业的碳排放将呈显著增长趋势^[1]。因此, 深入研究污水处理过程中温室气体的排放特征, 并探索有效的减排路径, 不仅有助于提升污水处理系统的环境友好性, 也为实现国家“双碳”战略提供技术支撑。

1 污水处理中温室气体的种类与产生机理

污水处理过程中主要排放的温室气体包括二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 和氧化亚氮 (N_2O)。其中, CO_2 多为生物代谢的直接产物, 部分来源于化石能源消耗; 而 CH_4 和 N_2O 则主要由微生物在特定条件下通过厌氧或缺氧代谢产生, 具有更高的全球增温潜势 (GWP)。

1.1 二氧化碳 (CO_2)

CO_2 在污水处理中主要来源于两方面: 一是微生物对有机物的好氧降解过程 ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6\text{O}_2 \rightarrow 6\text{CO}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$); 二是处理厂运行所需的电力消耗 (如曝气、泵送等) 间接产生的排放。虽然 CO_2 本身GWP为1 (基准值), 但由于排放量大, 仍需关注。值得注意的是, 污水中的有机碳若被完全矿化为 CO_2 , 其碳源属于生物源碳, 通常不计入人为排放清单 (如IPCC指南), 但能源消耗相关的间

接排放必须核算。

1.2 甲烷 (CH_4)

CH_4 主要在厌氧条件下由产甲烷菌 (Methanogens) 通过乙酸裂解或 CO_2 还原途径生成, 其GWP在100年尺度上为28–36 (IPCCAR6)。在污水处理系统中, CH_4 的主要产生场所包括: (1) 初沉池与污泥浓缩池: 污水在停留时间较长的构筑物中发生厌氧发酵; (2) 厌氧消化池: 用于污泥稳定化处理, 虽设计为收集沼气, 但存在泄漏风险; (3) 管网系统: 老旧或高负荷污水管网中易形成厌氧微环境, 产生 CH_4 并通过检查井逸散。 CH_4 的排放强度受温度、pH、有机负荷率 (OLR) 及混合程度等因素影响显著。

1.3 氧化亚氮 (N_2O)

N_2O 是污水处理中最值得关注的温室气体, 其GWP高达273 (100年尺度), 且在大气中寿命长达114年。 N_2O 主要由硝化与反硝化过程中的微生物代谢副产物产生, 具体路径包括: (1) 硝化过程中的羟胺氧化: 氨氧化细菌 (AOB) 在低溶解氧 (DO) 或高氨氮条件下, 将中间产物羟胺 (NH_2OH) 不完全氧化为 N_2O ; (2) 反硝化过程中的不完全还原: 反硝化菌在碳源不足、DO波动或pH异常时, 将 NO_2^- 或 NO 还原为 N_2O 而非 N_2 ; (3) 异养硝化与好氧反硝化: 某些特殊菌群可在好氧条件下同步完成硝化与反硝化, 并释放 N_2O 。

2 不同处理工艺下的温室气体排放特征

2.1 传统活性污泥法 (CAS)

作为应用最广泛的二级处理工艺, 传统活性污泥法依赖持续曝气实现有机物降解和部分氮去除。该工艺的温室气体排放以 N_2O 为主, 主要源于脱氮过程中的硝化与反硝化副反应。尽管好氧条件抑制了 CH_4 生成, 但初沉

池和污泥处理单元仍存在少量CH₄排放。CO₂虽大量产生于曝气池，但多属生物源碳，通常不计入人为排放^[2]。然而，N₂O的排放因子波动极大，范围从进水总氮的0.1%到10%不等，高度依赖于溶解氧控制精度、碳氮比及污泥龄等运行条件。总体而言，CAS工艺在保障出水水质的同时，隐含较高的N₂O排放风险，亟需通过精细化控制予以抑制。

2.2 厌氧-缺氧-好氧(A²O)工艺

A²O工艺通过空间分区实现同步脱氮除磷，广泛应用于我国市政污水处理。其温室气体排放特征较CAS更为复杂。一方面，缺氧区反硝化过程若碳源不足或混合不均，易导致N₂O积累；另一方面，好氧区前端常因氨氮浓度高而形成“硝化热点”，在低溶解氧条件下促进AOB产生N₂O。此外，内回流携带的硝酸盐进入厌氧区虽有助于强化反硝化，但也可抑制聚磷菌释磷，间接影响系统稳定性，进而扰动氮代谢路径。尽管A²O在污染物去除效率上具有优势，但其N₂O排放强度通常高于传统活性污泥法，成为该工艺低碳化改造的重点对象。

2.3 序批式反应器(SBR)

SBR工艺通过时间序列实现多功能集成，其温室气体排放呈现明显的周期性特征。在曝气初期，溶解氧快速上升阶段易引发AOB应激，导致N₂O瞬时峰值；而在反硝化末期，若外加碳源耗尽，反硝化菌无法将N₂O进一步还原为N₂，造成排放累积。然而，SBR的灵活性也为其减排提供了独特优势。通过优化曝气策略，如采用间歇曝气、梯度溶解氧控制或延长缺氧时间，可有效调控微生物代谢路径，显著降低N₂O生成。此外，SBR系统封闭性较好，CH₄逸散风险较低，整体碳足迹可控，适用于中小规模污水处理场景。

2.4 厌氧膜生物反应器(AnMBR)

AnMBR代表了污水处理向资源回收方向发展的前沿技术。该工艺在无曝气条件下高效降解有机物，同时产生高浓度沼气，理论上可实现“零曝气能耗”和“负碳运行”。由于缺乏好氧硝化过程，AnMBR几乎不产生N₂O；而生成的CH₄可通过膜组件高效截留并收集利用，大幅减少逸散^[3]。然而，AnMBR对进水水质要求较高，且出水氮含量通常超标，需耦合后续脱氮工艺（如厌氧氨氧化）才能满足排放标准。尽管如此，AnMBR在能源自给和碳减排方面的潜力已得到广泛认可，被视为未来低碳污水处理的重要技术路径。

2.5 人工湿地(CW)

人工湿地作为一种生态型处理技术，依靠植物、微生物与填料基质的协同作用净化污水。其温室气体排放

具有显著的空间异质性和季节波动性。表面流湿地因水面覆盖形成强还原环境，CH₄排放较高；而潜流湿地因基质中存在好氧-厌氧交错微区，更易产生N₂O。总体而言，人工湿地的单位水量碳足迹低于机械处理工艺，且无需外部能源输入，环境效益突出。但其占地面积大、处理效率受气候影响显著，更适合用于农村分散式污水处理或深度净化回用场景。在合理设计与管理下，人工湿地可实现水质净化与碳减排的双重目标。

3 温室气体排放的影响因素

除工艺类型外，运行与环境因素也决定着污水处理中温室气体排放水平。（1）进水水质：是基础变量。高COD/TN比利于反硝化菌获得电子供体，促进N₂O还原为N₂，降低排放；低碳氮比则使反硝化不完全，N₂O积累风险上升。工业废水混入会抑制关键微生物活性，干扰氮代谢，诱发异常N₂O释放。悬浮物过高会加剧厌氧发酵，增加CH₄生成潜力。故源头分流、工业预处理及水质在线监测对控制排放意义重大。（2）运行参数：是调控排放的直接手段。溶解氧浓度关键，过低促使AOB生成N₂O，过高增加能耗与CO₂排放。污泥龄影响微生物群落，长SRT可能增加N₂O产率，短SRT降低脱氮效率。低温抑制N₂O还原酶，使反硝化末端产物以N₂O为主。外加碳源过量会增加运行成本与CO₂排放，需权衡。（3）设施老化与管理：影响不可忽视。老旧管网存在渗漏等问题，CH₄逸散率高。污泥处理单元密封不佳会使CH₄直接排放。缺乏监测与反馈机制，运行人员采取保守策略，加剧N₂O和间接CO₂排放。推进设施改造、强化运维、建立智能监控平台是减排关键。

4 温室气体减排途径分析

基于上述排放特征与影响因素，可从技术、管理与系统层面构建多维度减排体系。

4.1 工艺优化与技术创新

工艺优化是减排的根本路径。针对N₂O这一核心排放源，可采用短程硝化-厌氧氨氧化(PN/A)工艺，通过跳过亚硝酸盐向硝酸盐的转化步骤，从根本上削减N₂O生成的生化路径。同时，实施精准曝气控制，将好氧区溶解氧维持在1.0–1.5mg/L的最优区间，既能满足硝化需求，又避免AOB应激产N₂O。此外，强化内碳源利用（如通过初沉发酵获取挥发性脂肪酸）可减少对外加碳源的依赖，提升反硝化效率，降低N₂O积累风险^[4]。对于CH₄排放，应对初沉池、浓缩池等潜在逸散点实施加盖密闭，并接入高效沼气收集系统；推广厌氧消化与热电联产(CHP)技术，将CH₄转化为电能与热能，实现能源回收与碳减排双赢。长远来看，发展厌氧膜生物反应器

(AnMBR)耦合主流厌氧氨氧化的组合工艺,有望构建“能源正产出”的下一代污水处理厂。

4.2 能源回收与资源化

污水处理本质上是将污染物中的化学能转化为可利用能源的过程。每吨生活污水蕴含约0.6–0.9kWh的化学能,若能高效回收,可显著抵消运行能耗。通过厌氧消化产生的沼气经提纯后可用于发电或供热,1立方米含60%甲烷的沼气可发电约2千瓦时;消化液余热亦可回收用于加热进泥,提升消化效率。此外,从污泥焚烧灰中回收磷资源,可减少化肥生产带来的上游碳排放;再生水回用则降低新鲜水资源取用与处理的能耗。国际实践已证明其可行性,如丹麦AarhusMarselisborg污水厂通过系统优化,年发电量超过自身用电量的150%,成功转型为“能源工厂”,为全球提供了低碳运行范本。

4.3 智能化运行与监测

智能化是实现精细化减排的技术保障。部署 N_2O 在线传感器可实时捕捉排放热点,结合数字孪生模型模拟不同工况下的温室气体生成动态,为运行优化提供数据支撑。人工智能算法可基于历史数据与实时进水负荷预测,动态调整曝气强度、回流比及碳源投加量,实现“按需供气、精准脱氮”。此外,建立全厂碳排放监测平台,整合直接与间接排放数据,有助于开展碳足迹核算与减排效果评估,为参与碳交易市场奠定基础。智能化不仅提升减排效率,也推动污水处理从经验驱动向数据驱动转型。

4.4 政策与标准引导

制度建设是推动行业系统性减排的外部驱动力。应将温室气体排放纳入污水处理厂绩效考核体系,激励运营单位主动减排。制定统一的《污水处理厂温室气体排放核算指南》,规范排放因子选取、边界界定与核算方法,确保数据可比性与透明度。通过碳交易机制、绿色

信贷或财政补贴等方式,降低企业减排技术投资门槛。同时,推动“厂-网-河”一体化管理,统筹管网维护与污水处理,从源头减少 CH_4 逸散。政策与市场的双重引导,将加速污水处理行业向低碳化、资源化方向演进。

5 结语

污水处理过程是温室气体排放的重要人为源,其中 N_2O 因其高GWP和工艺相关性成为减排核心。不同处理工艺的排放特征差异显著,传统好氧工艺 N_2O 排放突出,而厌氧工艺虽可回收能源,但需防范 CH_4 逸散。影响排放的关键因素包括进水水质、运行参数及管理水平。未来减排路径应聚焦于“源头控制—过程优化—末端回收”全链条:技术层面,推广PN/A、AnMBR、AGS等低碳工艺;系统层面,推动污水处理厂向“能源-资源回收中心”转型;管理层面,建立GHG监测-核算-交易机制,纳入碳市场体系。随着碳中和目标的深入推进,污水处理行业亟需从“污染治理”向“生态服务+碳管理”双重功能转变。通过科技创新与制度协同,污水处理厂完全有能力从“碳负担”转变为“碳资产”,为全球气候治理贡献水务力量。

参考文献

- [1]赵旭,杨慧文,朱玥,等.我国污水处理行业非二氧化碳温室气体排放核算的现状、挑战与减排策略综述[J].能源与气候变化,2025,1(04):459-475.
- [2]程一鸣,龙海燕,裴勤.污水处理厂温室气体排放实证分析及低碳运行策略研究[J].给水排水,2024,60(S2):294-298+304.
- [3]马泽宇.污水处理厂温室气体排放特征与减排技术研究[J].中国资源综合利用,2024,42(08):215-218.
- [4]邱巨龙,刘树洋,王华,等.污水处理厂温室气体排放核算与减排路径研究[J].环境监测管理与技术,2024,36(03):83-87.