

基于脱氮除磷的污水处理工艺优化策略分析

谢远定

爱沃特智能水务(安徽)有限公司 安徽 合肥 230022

【摘要】：脱氮除磷是污水处理工艺优化中的关键环节，直接关系到出水水质达标和水体富营养化防控效果。围绕污水中氮、磷污染物去除效率不稳定、运行能耗较高、工艺协同性不足等问题，分析生物脱氮除磷工艺的运行特点，探讨曝气控制、污泥龄调节、碳源补充、厌氧缺氧好氧段协同优化等策略。完善工艺参数配置与运行管理机制，可提高系统抗冲击负荷能力，增强氮磷去除效果，推动污水处理向高效、稳定、低耗方向发展。

【关键词】：脱氮除磷；污水处理；工艺优化；生物处理；运行调控

DOI:10.12417/2705-0998.26.07.048

引言

城镇污水中氮、磷污染物排放量较大，若处理不充分，容易造成水体富营养化，影响生态环境安全。传统污水处理工艺在实际运行中存在脱氮除磷效率波动、能耗偏高、碳源利用不足等问题，难以满足日益严格的排放标准。有必要围绕脱氮除磷目标，对污水处理工艺进行系统优化，明确影响氮磷去除效果的关键因素，提出科学可行的运行调控策略，为提升污水处理质量和环境治理水平提供参考。

1 污水脱氮除磷工艺的运行基础

1.1 氮磷污染物控制标准趋严

污水排放管理对氮、磷指标的控制要求不断细化，城镇污水处理厂需要关注化学需氧量、悬浮物等常规污染物去除，还需要将氨氮、总氮、总磷作为稳定达标的核心指标。氮、磷进入河流、湖泊等受纳水体后，容易引发藻类异常繁殖，造成水体透明度下降、溶解氧降低、水生态系统失衡等问题，因此排放标准对相关指标的约束更具针对性。在实际运行中，部分污水处理厂面临进水水质波动较大、雨污混接导致负荷变化明显、工业废水混入影响生化系统稳定等情况，使氮磷稳定控制难度增加。特别是在低温季节，硝化菌活性下降，氨氮去除效率容易受到影响；在进水碳氮比较低时，反硝化过程缺乏充足电子供体，总氮去除效果不理想。总磷控制也受到厌氧释磷、好氧吸磷条件变化的影响，若污泥排放不及时，已吸收的磷可能重新释放至水体中。排放标准趋严使污水处理工艺不能停留在单一污染物去除层面，而需要围绕氮、磷协同削减建立更加精细的运行控制体系。实际运行中，应将氨氮、总氮、总磷等指标纳入全过程监测范围，根据进水浓度、负荷波动和季节变化及时调整曝气量、回流比、污泥龄及碳源投加量。尤其在低温、低碳氮比和雨季水量冲击条件下，系统更需要通过分区控制和动态调节保持硝化、反硝化及生物除磷过程的连续性，避免局部环节失衡影响整体出水水质。

1.2 生物脱氮除磷反应条件复杂

生物脱氮除磷依赖多种微生物协同反应，对溶解氧、碳源、

污泥龄等条件敏感。脱氮包括好氧硝化和缺氧反硝化两个环节。好氧区溶解氧(DO)不足会抑制硝化，当DO低于0.5mg/L时硝化作用严重受阻，通常需控制在2.0~4.0mg/L；缺氧区DO过高则会抑制反硝化，纯培养下0.2mg/L的DO即可使反硝化停止，实际系统中缺氧区DO应严格控制在0.5mg/L以下。两个环节对氧环境的需求差异明显，需分区精准控制，否则易导致出水氨氮升高或总氮去除率下降^[1]。生物除磷主要依靠聚磷菌在厌氧环境中释放磷并吸收易降解有机物，在好氧环境中过量吸收磷，最终通过剩余污泥排放实现磷的去除。该过程要求厌氧区避免硝酸盐和溶解氧干扰，否则聚磷菌释磷效果不足，后续吸磷能力随之减弱。脱氮菌、聚磷菌和普通异养菌之间还存在碳源竞争关系，进水有机物不足时，反硝化脱氮与生物除磷容易相互制约，导致系统难以实现高效脱氮和稳定除磷。在低碳氮比条件下，反硝化菌需要利用有限有机物完成硝酸盐还原，聚磷菌也需要吸收易降解有机物维持释磷和吸磷功能，普通异养菌则会消耗部分碳源用于自身代谢。若碳源分配不合理，缺氧段反硝化速率下降，厌氧段释磷不足，好氧段吸磷能力减弱，出水总氮和总磷均可能出现波动。

1.3 工艺协同运行要求不断提高

脱氮除磷工艺需要厌氧、缺氧、好氧、沉淀、回流及排泥等环节连续配合。以A²/O、氧化沟、SBR等为代表的主流工艺，均需通过空间分区或时间分段为不同微生物创造适宜环境。若内回流量过高，硝酸盐进入厌氧区会破坏除磷环境；回流量不足，则缺氧区硝酸盐供应不够，反硝化难以充分进行。曝气强度须与进水负荷匹配，过度曝气增加电耗并干扰缺氧环境，曝气不足则削弱硝化与吸磷效果。污泥龄控制同样具有协同性要求：硝化菌的世代周期一般为1~5天(氨氧化细菌世代时间约1.01天)，为保证其在系统中的优势地位，污水厂通常将污泥龄控制在15~20天，以兼顾硝化菌的富集与除磷效果。运行管理中需要结合在线监测数据，对溶解氧、氧化还原电位、污泥浓度、回流比和排泥量进行动态调节，使各处理单元在不同水质条件下保持协调。在线监测能够及时反映进水负荷、污染物浓度和生化反应状态的变化，为运行参数调整提供依据。

当好氧段溶解氧偏低时,应适当提高曝气强度,保障硝化反应充分进行;当缺氧段氧化还原电位异常升高时,应检查内回流量和碳源供给情况,避免反硝化受抑。污泥浓度和排泥量也需与负荷变化相匹配,防止污泥老化、沉降性能下降或磷二次释放。

2 污水处理工艺运行中的关键制约

2.1 碳源不足影响反硝化效率

碳源供给水平直接影响反硝化反应完整性,尤其在进水可生化有机物偏低时,总氮去除效果易受限制。反硝化菌需利用易降解有机物作为电子供体将硝酸盐氮还原为氮气,当碳源不足时,硝酸盐氮仅能部分转化,导致出水总氮浓度偏高。部分污水厂因管网停留时间较长,生活污水中挥发性脂肪酸在处理前已被消耗,进入缺氧区后有效碳源比例降低,反硝化速率随之下降。若前端预处理或厌氧段对有机物消耗过多,也会造成缺氧段碳源分配不足,使反硝化缺乏持续动力。从量化角度分析,要保证稳定的反硝化效率,进水碳氮比(COD/NO₃⁻-N)不宜低于4~6。当该比值低于此范围时,反硝化速率将明显下降,需考虑外加碳源。外加碳源虽然能够改善脱氮效果,但投加量控制不精准时,容易导致运行成本上升,甚至造成出水化学需氧量增加。碳源不足还会加剧反硝化菌与聚磷菌之间的竞争关系,使有限有机物难以满足脱氮和除磷需求。低碳氮比条件下,系统对进水水质变化更加敏感,一旦水量、水质发生波动,缺氧区反应稳定性下降,总氮达标控制难度明显增加。尤其在雨季来水稀释、管网渗入清水或工业废水间歇排入时,进水中可利用有机物比例下降,反硝化菌缺乏充足电子供体,硝酸盐氮还原过程容易受阻。若缺氧段停留时间、内回流量和碳源投加量未能同步调整,硝态氮会在系统中积累,造成出水总氮升高。此时需要依据进水负荷变化及时优化碳源补充和回流控制,维持反硝化反应连续性。

2.2 曝气控制不当增加运行能耗

曝气系统是污水处理工艺中能耗占比较高的环节,供氧量控制是否合理直接关系到处理效率和运行成本。好氧段需要通过曝气维持硝化反应和有机物降解,但供氧并非越高越有利。曝气强度过大时,溶解氧浓度长期处于高水平,鼓风机运行负荷增加,电耗持续上升,单位水量处理成本随之提高。过量溶解氧还可能随混合液回流进入缺氧区,破坏反硝化所需的低氧环境,抑制反硝化菌活性,使总氮去除效果受到影响^[2]。曝气不足则会导致硝化细菌供氧不充分,氨氮氧化过程受阻,出水氨氮浓度容易波动。部分污水处理设施仍采用固定风量或经验式曝气控制,未能根据进水负荷、氨氮浓度、温度变化和污泥活性进行动态调节,造成高负荷时供氧不足、低负荷时供氧过剩的问题。曝气设备老化、曝气头堵塞、管路压力分布不均等情况,也会降低氧转移效率,使局部区域出现溶解氧失衡。曝

气控制不当表现为能源浪费,还会打乱好氧与缺氧反应之间的衔接关系,使脱氮除磷系统难以保持高效稳定运行。

2.3 污泥龄失衡削弱除磷效果

污泥龄是影响微生物种群结构和污染物去除能力的重要运行参数,控制不当会直接削弱生物除磷效果。聚磷菌需要在厌氧与好氧交替环境中完成释磷和吸磷过程,并通过剩余污泥排放将吸收的磷带出系统。若污泥龄过长,系统中老化污泥比例增加,聚磷菌代谢活性下降,吸磷能力减弱,部分富磷污泥在沉淀池或污泥回流过程中还可能发生磷释放,导致出水总磷升高。污泥龄过短时,虽然有利于排出富磷污泥,但硝化菌等生长较慢的功能菌难以维持足够数量,氨氮去除效果会受到影响,脱氮与除磷之间出现新的矛盾。实际运行中,排泥量若长期依靠经验控制,容易造成污泥浓度波动,影响厌氧段释磷、好氧段吸磷以及沉淀分离效果。污泥负荷过高时,微生物处于高代谢状态,系统抗冲击能力下降;污泥负荷过低时,内源呼吸增强,细胞衰亡和磷释放风险上升。低温季节为维持硝化功能往往需要延长污泥龄,但过度延长又会降低除磷效率。

3 脱氮除磷工艺优化的实施路径

3.1 优化碳源配置增强脱氮能力

碳源配置优化需要围绕进水水质、碳氮比变化和缺氧段反硝化需求进行精细调节,避免单纯依赖固定投加方式。实际运行中,可连续监测进水COD、总氮、硝酸盐氮等指标,判断系统内源碳源是否能够满足反硝化反应需要。当进水可生化有机物不足时,可选择乙酸钠、甲醇、葡萄糖等外加碳源,也可利用污泥水解液、初沉污泥发酵液等内部碳源,提高资源利用效率并降低药剂消耗。碳源投加位置应优先布置在缺氧段前端或反硝化反应活跃区域,使反硝化菌能够快速利用有机物完成硝酸盐还原。投加量需要依据硝酸盐氮负荷动态调整,避免过量投加造成出水有机物升高。对A²/O工艺而言,还应合理分配进水流量,使部分原水直接进入缺氧段,为反硝化提供易降解有机物,减少前端厌氧段对碳源的过度消耗。优化碳源种类、投加点位和投加比例,可增强系统在低碳氮比条件下的脱氮能力,提高总氮去除稳定性。

3.2 精准调控曝气提升处理效能

曝气调控应以满足好氧反应需求和降低无效能耗为目标,结合进水负荷、氨氮浓度、溶解氧变化和硝化反应状态进行动态控制。好氧段可设置分区曝气模式,在前段保持适宜供氧强度,保障有机物降解和氨氮氧化;在后段根据氨氮残余量适度降低曝气量,减少过度供氧造成的能源浪费^[3]。在线溶解氧仪、氨氮仪和氧化还原电位仪可用于判断系统反应进程,并与鼓风机变频控制系统联动,实现供氧量随污染负荷变化自动调节。基于工艺优化数据,好氧区溶解氧浓度通常维持在2.0~3.0mg/L即可满足硝化需求,无需长期维持在4.0mg/L以上,此举可显

著降低曝气能耗。曝气强度不宜长期维持高水平，通常应使好氧区溶解氧保持在适宜范围内，既满足硝化菌活性需求，又减少高溶解氧混合液回流对缺氧段反硝化的干扰。曝气设备维护同样不可忽视，曝气头堵塞、管路漏气、风量分配不均会降低氧利用效率，增加运行成本。定期清洗曝气装置、校准在线仪表、优化风机运行组合，可改善氧转移效率，使好氧段处理能力与实际污染负荷相匹配，提升脱氮除磷工艺整体运行效能。

3.3 完善运行管理保障稳定达标

运行管理优化需要建立以水质监测、参数调控和异常预警为核心的全过程控制机制，使脱氮除磷系统在水量、水质波动条件下保持稳定。管理过程中应持续跟踪进出水 COD、氨氮、总氮、总磷、污泥浓度、污泥沉降比等关键指标，并结合数据变化判断厌氧、缺氧、好氧各段运行状态^[4]。内回流比、污泥回流比和排泥量应根据处理负荷及时调整，避免硝酸盐回流干扰厌氧释磷，也防止污泥浓度过低影响微生物数量。工程实践表明，污泥回流比一般控制在 60%~100%可维持系统污泥浓度稳定；混合液回流比（内回流）则需根据脱氮率要求设定，通常取 200%~400%，此时系统脱氮率可达 70%以上。低温季节

可适当延长污泥龄以维持硝化菌活性，高负荷阶段则需加强排泥和沉淀池管理，防止污泥膨胀、污泥上浮及磷二次释放。当污泥龄超过 20 天时，需密切关注除磷效率的下降风险。低温季节可适当延长污泥龄以维持硝化菌活性，高负荷阶段则需加强排泥和沉淀池管理，防止污泥膨胀、污泥上浮及磷二次释放。对于进水异常、工业废水冲击或雨季水量突增等情况，应通过预警机制及时调整曝气、回流和药剂投加参数。运行人员还需定期开展设备巡检、仪表校准和工艺复核，保证监测数据准确可靠^[5]。

4 结语

脱氮除磷工艺优化是提升污水处理质量的重要路径，其核心在于协调碳源利用、曝气控制、污泥龄调节与运行管理之间的关系。针对碳源不足、能耗偏高、除磷稳定性不足等问题，应结合进水水质变化和单元运行状态，实施精细化参数调控。优化碳源配置、完善曝气控制、强化污泥管理和监测预警，可增强系统抗冲击能力，提高氮磷协同去除效率，推动污水处理工艺向稳定达标、节能降耗和高效运行方向发展。

参考文献：

- [1] 刘玉扬.生活污水处理厂转型与扩容提标改造的工程技术研究[D].南昌大学,2025.
- [2] 王红军,王小飞,周昊,等.某工业污水站全流程脱氮诊断与优化运行研究[J].当代化工研究,2025,(20):89-91.
- [3] 王志.生物技术在污水处理中的应用研究[J].中国资源综合利用,2025,43(09):266-268.
- [4] 潘宝.污水生物除磷脱氮工艺的运行优化研究[J].中国新技术新产品,2025,(15):112-114.
- [5] 吴来春.污水处理厂冬季脱氮增效策略探究[J].节能,2025,44(07):128-130.