

不同水质目标下市政污水厂深度处理单元的差异化设计研究

文 / 冷 雪 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

王晓杰 中国市政工程中南设计研究总院有限公司

高 源 中国市政工程华北设计研究总院有限公司（通讯作者）

摘要：水环境治理是现代城市可持续发展的关键命题。市政污水处理面临不同水质目标的复杂挑战。随着生态环境保护要求的不断提升，水处理技术需要更加精细化与差异化的设计方案。本研究聚焦于基于不同水质目标的市政污水深度处理单元差异化设计，通过系统性分析水质需求、工艺特点及技术路线，构建多元化的处理解决方案。研究探讨了水质目标的分类、深度处理单元的工艺选择、设备配置、能效优化以及未来技术发展方向，为城市水环境治理提供更精准的技术指导。

关键词：市政污水处理；水质目标；深度处理

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.06.116

引言

水资源是生态系统与人类社会生存发展基本的保障。随着工业化与城市化进程的加速，水环境问题日益突出。市政污水处理作为水环境治理的重要环节，面临着水质目标多元化、处理要求差异化的复杂挑战。传统污水处理模式难以满足不同水体功能与使用需求，迫切需要构建更加精细化与智能化的处理技术体系。

一、不同水质目标的划分与要求

（一）出水水质的标准与分类

（1）《城镇污水处理厂污染物排放标准》

在市政污水处理厂的深度处理单元设计中，需根据不同的出水水质目标进行差异化设计。我国《城镇污水处理厂污染物排放标准》（GB 18918-2002）对污水处理厂出水水质进行了明确分类，分为一级A、一级B、二级和三级标准。其中，一级A标准是最高要求，适用于对出水水质要求较高的场合。该标准规定了化学需氧量（COD）、生化需氧量（BOD）、悬浮物（SS）、氨氮、总磷等主要污染物的排放限值。例如，一级A标准中，COD的排放限值为50mg/L，BOD为10mg/L，SS为10mg/L，氨氮（NH₃-N）为1.0mg/L（当水温>12℃时）或1.5mg/L（当水温≤12℃时），总磷为0.5mg/L。这些指标的设定旨在确保污水处理厂出水能够满足不同受纳水体的环境质量要求。

（2）不同水质目标的水体功能要求

水体功能主要分为饮用水源地、工业用水、农业用水、景观用水等。不同功能的水体对水质有不同要求。例如，饮用水源地要求水质达到地表水环境质量标准中的Ⅱ类或Ⅲ类标准，对污染物浓度有严格限制；而农业用水则可能对某些指标有较高的容忍度。

（二）水质目标的差异化

（1）城市用水回用标准

城市用水回用包括市政杂用、景观环境用水等。

《城市污水再生利用 城市杂用水水质》（GB/T 18920-2002）规定了再生水用于城市杂用水时的水质要求，包括pH值、浊度、BOD₅、氨氮、大肠菌群等指标。例如，景观环境用水对浊度和大肠菌群有较高要求，以确保公共卫生安全。

（2）地下水补给标准

将再生水用于地下水补给时，需满足《地下水质量标准》（GB/T 14848-2017）的相关要求。该标准对重金属、挥发性有机物、总硬度等指标设定了限值，以防止地下水污染，保护饮用水安全。

（3）河流/湖泊生态环境要求

为保护河流和湖泊的生态环境，污水处理厂的出水需满足《地表水环境质量标准》（GB 3838-2002）的相应类别要求。例如，向渔业水域排放时，需控制氨氮和总磷的浓度，以防止水体富营养化，保障水生生物的生存环境。

综上所述，不同的水质目标对应不同的水质标准要求。在市政污水处理厂的深度处理单元设计中，需根据具体的出水用途和受纳水体功能，采用差异化的处理工艺，来保证出水水质达标，保护生态环境和公共健康。

二、深度处理单元的差异化设计

（一）基于水质目标的工艺选择

（1）高级氧化法与膜技术结合的方案

水质净化要精准且多层次的技术干预。在水处理领域，高级氧化法与膜技术的融合已然成为突破水质极限的利器。臭氧这种强氧化剂能够劈开复杂有机分子，将其转化为更小且易降解的结构，如医生手中的手术刀将顽固污染分子切割得支离破碎。紧随其后的膜分离技术如同精密的过滤网，将被切割的分子碎片以及悬浮颗粒，实现水质的极致净化。这一技术路线尤其适合对水质要求极其苛刻的领域，例如电子工业超纯水制备以及生态脆弱区域的地下水补给。工艺设计先通过砂滤与活性炭过

滤去除大颗粒杂质，随后引入臭氧反应器，产生大量具有强氧化性的羟基自由基，彻底打碎有机污染物的分子链接。接下来多级膜过滤系统如同层层关卡，将水中的微小杂质逐步过滤，最终实现近乎纯净的水质状态。

(2) 活性炭与生物滤池联合的处理方案

水处理技术需要不同技术配合，活性炭与生物滤池的组合借庞大的内部孔隙结构，吸附水中的色素、异味、微量有机物、将污染物牢牢捕获。紧接着生物滤池中的微生物群落将持续分解被活性炭吸附的有机物，将其转化为更简单的无害物质。这一处理方案特别适合生态景观用水与特定工业回用场景。

工艺流程首先经过生物滤池，利用微生物的代谢活动去除部分有机物，随后引入颗粒活性炭吸附系统，深度去除色度与异味。生物接触氧化工艺进一步提升水质的生物稳定性，最后通过精准的消毒处理，保证水质安全可靠。整个过程精心设计每一个环节都恰到好处。

(3) 反硝化与脱氮工艺的选型

氮素污染已然成为现代水环境治理的顽疾。农业灌溉与生态水系保护迫切需要有效的脱氮技术。A20工艺的生物化学反应器通过精心设计的厌氧、缺氧、好氧三个阶段，如图一，模拟并放大自然界的氮素转化过程。在厌氧段，异养菌释放磷；在缺氧段，反硝化菌将硝酸态氮还原为氮气；在好氧段，硝化菌将氨氮转化为硝酸态氮。此工艺如一个生态系统的缩影，通过调控不同阶段的微生物群落，实现氨氮的精准生物转化与脱除。对于追求水质极致的农业灌溉，生态修复等领域，这种工艺能够将氮素污染控制在极低水平，为水生态系统的平衡与健康提供有力保障^[1]。



图一 缺氧/好氧(A/O)工艺

(二) 处理能力与设备配置

(1) 设备规模与处理能力的匹配

水处理系统的设计要对每一个设备的性能进行精准匹配。深度处理单元的设备选型就像为不同音色的乐器找到最佳位置，保证整体和谐且高效。根据水质目标的差异、选择膜组件的通量、反应器的容积负荷、生物反

应器的停留时间，力求达到最佳的处理效果。不同水质目标对应不同的设备配置方案。超高纯水处理需要高通量低压损的膜组件，生态景观用水则可选择更经济的处理设备。设备选型根据不同场景要量身定制，既要考虑功能性，又要兼顾经济性与美观性。可利用精细的数学模型与实验验证找到处理效率与投资成本的最佳平衡点^[2]。

(2) 系统配置的优化设计

水处理系统集成是提升处理效能的关键，模块化设计则是实现柔性连接的核心策略。例如，一个系统在高级氧化单元前精心设置精密过滤，好比城市中的第一道防线，随后是臭氧反应器，接着再配置膜处理系统，最后是消毒系统。这种多屏障处理流程不只是为了简单的设备堆砌，而是基于水质特征的智慧构建。每一个处理单元都像城市中精心设计的功能区，既相对独立，又紧密联系。利用先进的在线监测技术，可实时调整各个处理单元的运行参数，使整个系统如同一个具有智慧的生命体，能够自适应不同的水质挑战。以四川省某市为例，该市在污水处理过程中面临着复杂的水质需求，既需要满足城市用水回用的标准，也需保护生态水体的环境质量。为了应对这一挑战，市政污水处理厂采用了先进的多级处理工艺，其中包括预处理、膜技术、臭氧氧化、以及高级生物处理等多个环节，如图二。根据《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002)的要求，处理后的水质需达到一级A标准，特别是对于氨氮和总磷的排放限值要求严格。为此，该市污水处理厂在工艺设计中结合了高效的反硝化与脱氮工艺，采用A20反应器系统进行氮素去除。与此同时，利用膜分离技术强化了水质的精细净化，保证处理后的水质达到超纯水级别，适用于景观用水和工业冷却水回用。另外在设备配置方面，厂区采用了模块化设计理念，不同处理单元通过灵活的技术集成优化了整体性能。例如，臭氧氧化与膜分离技术的结合有效提高了有机物的降解效率，减少了后续生物处理的负担。该项目成功实现了出水水质的差异化设计，同时保证了生态环境的安全性。



图二 市政污水处理厂多级处理

(三) 能效与资源回收

(1) 能效优化策略

在深度处理单元的运行中，有效降低能耗是提升整

体效率的核心。膜系统的反冲洗频率需结合实际污染负荷进行动态调整，浓水通过优化流程回收用于前端处理，可以减少资源浪费。与此同时，设备余热的充分回收和分级利用能够将废热转化为可用能源，提高系统整体能量利用率。选用低压损设备能够在保证处理效率的前提下减少能源消耗，比如高效的离心泵和优化的管路设计。智能化控制系统则通过实时数据采集和算法优化，精确控制设备运行状态，实现按需供能，避免不必要的能源浪费。这种多维度的能效优化不仅降低了运行成本，也显著提升了整体环保效益。

(2) 污水资源化

污水作为一种特殊资源，其潜在价值远未被完全挖掘。通过先进的资源化技术，可以将污水转化为具有经济价值的产品。例如，利用磷回收技术从污水中提取高纯度磷酸盐，用于农业肥料生产。污泥处理方面，可以采用厌氧发酵技术将有机物转化为甲烷，生成生物能源，为工业或居民供能提供绿色选择。微生物电解池技术则通过电化学手段，将污水中的有机污染物直接转化为电能或化学能，同时减轻后续处理压力。这些方法相辅相成，实现了污水中资源的全面回收利用，使得污水处理不再是单纯的净化过程，而成为资源循环的重要环节。

(四) 运营与维护要求

(1) 维护难度与成本

在深度处理单元中，维护工作直接影响系统的稳定运行。高端水质目标往往要求对膜组件进行定期反冲洗和化学清洗，来维持通透性能；而生物反应器则需要通过监测和调控微生物群落的动态变化，确保其在高效状态下运行。此外仪器设备的精准校准对维持系统精密性至关重要，如流量计、压力传感器等都需定期校验。这些维护操作因其专业性和频率而增加了运行成本，但通过优化维护计划和引入自动化诊断工具，可有效降低总体难度并提升维护效率^[3]。

(2) 系统的稳定性与持续性

为了保证深度处理单元的稳定运行，从设计到运营全流程中加强对稳定性的关注。通过在关键环节进行冗余设计，保证在单点故障时系统依然能够持续运行。同时在线监测系统结合智能预警功能，可以在问题发生之前预测，避免因突发故障导致的大范围停机。另外全过程质量控制体系的建立，要从原水到最终出水的每个阶段都进行实时质量追踪，保证产品水质达标并且运行持续可靠。通过这些措施，系统的抗干扰能力得到显著增强，实现稳定性与持续性的有机统一。

三、深度处理单元优化与改进方向

(一) 新兴技术的应用前景

纳米技术、生物电催化技术以及智能感知与控制技术正在为污水深度处理带来新的解决方案。纳米催化材料具有较大的比表面积和优异的催化性能，可显著提高

有机污染物的氧化还原效率，同时在去除难降解污染物方面表现出色。例如，通过纳米铁催化剂可有效分解工业废水中的复杂有机化合物。生物电催化技术则利用微生物电化学系统，实现污染物降解与电能回收的双重目标，为污水处理引入了全新的能量转化路径。而且智能感知与控制技术结合传感器与人工智能算法，实现对污染物的精准监测与动态调控，为污水处理过程的精细化管理提供了重要支持。

(二) 系统集成与多重工艺联用

未来的污水深度处理将更加注重系统集成与多重工艺的联合应用。通过将膜分离技术与生物处理工艺相结合，实现对污染物的分级去除提升处理效率。人工智能算法的引入可对多工艺系统的运行参数进行实时优化，实现不同单元间的动态协调。例如，利用机器学习模型可预测进水水质的变化并调整各处理单元的参数，形成自适应处理流程。又例如，某些先进的污水处理厂已通过集成膜生物反应器与高级氧化技术，实现了污水资源化的高效转化。

(三) 绿色与可持续设计理念

在全球碳中和与生态保护的背景下，污水处理的目标已逐步从单纯的污染物去除转向更加综合的绿色设计理念。低碳化工艺、零排放技术和资源再生利用成为深度处理技术创新的核心方向。例如，通过厌氧氨氧化（Anammox）工艺，污水中氮元素的去除过程可减少能源消耗，同时实现污泥产量的显著降低。另外污水资源化利用技术，如从污水中回收磷资源用于农业生产，或将处理过程中产生的沼气用于发电，均体现了可持续发展的理念。利用生态化设计，污水处理将从单一的末端治理转型为生态系统循环的重要组成部分。

结语

市政污水深度处理技术的发展在不同水质目标下展示了多样化的应用潜力。通过结合精细化的工艺选择、多重技术联用以及绿色设计理念，污水处理厂正逐步实现从传统末端治理向资源循环利用的转型。本研究聚焦差异化设计，为不同水质目标提供了理论支撑和实践路径。这不仅有助于实现污染物的有效去除，还能够为城市可持续发展及生态环境保护提供坚实的技术保障，为水环境治理开辟新局面。未来，随着技术的进步与应用实践的深入，市政污水深度处理将继续推动生态健康与经济效益的有机统一。

参考文献

- [1] 张欢, 刘德宁. 某污水处理厂高排放标准提标改造设计探讨[J]. 中国资源综合利用, 2024, 42(11): 255-257.
- [2] 潘俊杰. 浅析废污水处理技术比选和工艺设计问题[J]. 广东化工, 2024, 51(21): 122-124.
- [3] 史登峰. 新疆地区某污水处理厂提标改造工艺设计实例分析[J]. 绿色科技, 2024, 26(20): 153-157.