建筑中水回用系统设计及经济效益评价

黄倩萍
中国联合工程有限公司　浙江　杭州　310000

摘　要：水资源短缺已成为制约城市可持续发展的重要因素，建筑中水回用系统作为节水减排的有效途径，受到广泛关注。本文系统探讨了建筑中水回用系统的设计要点与经济效益评价方法。首先分析了建筑中水的水源选择与水量平衡计算原则，其次从处理工艺、管网布置、消毒储存等环节阐述了系统设计方案，并建立了包含初始投资、运行费用、节水收益及投资回收期的经济效益评价模型。研究表明，建筑中水回用系统在技术上是可行的，在经济上具有良好的投资回报前景，其效益受建筑规模、水价水平及运行管理水平等因素显著影响。本文可为建筑中水回用工程的规划设计与经济决策提供参考。

关键词：建筑中水；回用系统；工艺设计；经济效益；投资回收期

引言

随着城市化进程加快和人口持续增长，城市用水需求不断攀升，水资源供需矛盾日益突出。建筑生活用水在城市总用水量中占有较大比重，其中冲洗便器、绿化浇洒、道路清扫等用途对水质要求相对较低，完全具备使用再生水的条件。建筑中水回用系统通过收集建筑内部优质杂排水或生活污水，经适当处理后回用于上述非饮用用途，可实现水资源的梯级利用，既减少自来水消耗，又降低污水排放量，具有显著的节水效益和环境效益。然而，建筑中水回用系统的推广应用仍面临初期投资较高、运行管理复杂、经济效益不确定等障碍。如何科学合理地设计系统，并准确评价其经济效益，成为工程实践中的关键问题。本文围绕建筑中水回用系统的设计方法与经济效益评价展开论述，旨在为相关工程提供理论依据和技术参考。

1 建筑中水回用系统设计

1.1 中水水源选择

建筑中水水源选择是系统设计的关键，直接决定工艺复杂度、运行成本及系统稳定性。常见水源包括优质杂排水、生活污水和雨水。优质杂排水主要指洗脸盆、淋浴及洗衣排水，其COD（200-400mg/L）、BOD5（100-200mg/L）及SS（100-200mg/L）浓度低，处理难度小、成本低，是优先推荐的水源类型。生活污水虽水量稳定充足，但COD高达400-800mg/L，且氨氮含量高，导致处理工艺复杂，通常适用于需求较大的公共建筑或小区。雨水收集受季节气候影响大，波动显著，多作为补充水源[1]。实际工程中，应结合建筑类型、用水规律、回用用途及当地水资源状况进行技术经济比较。办公建筑和商场宜优先采用优质杂排水；住宅小区可考虑优质杂排水与雨水联合收集；在极度缺水地区，可适当引入生活污水。此外，必须重视水质稳定性，防止大幅波动影响处理效果，并设置专用管道实现清污分流，为后续处理创造有利条件。科学合理的水源选择是实现中水系统高效、经济运行的基础。

1.2 水量平衡计算

水量平衡是确保中水系统稳定运行的核心环节，其计算精度直接影响系统设计的合理性和运行可靠性。设计时需统计建筑内各类用水量，确定可收集的原水量与回用需求量，使二者在时间尺度上尽量匹配。原水量应大于回用需求量，以保证供水可靠性；当原水量不足时，需补充自来水或雨水。水量平衡计算还应考虑处理过程中的自用水量，如反冲洗用水、药剂配制用水等，通常自用水量占处理水量的5%至10%。调节池容积的确定是水量平衡设计的关键参数。调节池的作用是调蓄原水水量和水质，使处理设备在相对稳定的工况下运行。调节池容积一般按日用水量的百分数确定，通常取日回用量的20%至30%。对于用水规律波动较大的建筑，可适当增大调节池容积。调节池内应设置预曝气装置，曝气强度一般控制在0.6至1.2立方米空气每立方米水每小时，以防止污泥沉淀和厌氧发臭。清水池容积应满足消毒接触时间和用水高峰调节需求，一般按日回用量的15%至25%设计，消毒接触时间不应少于30分钟。通过合理的水量平衡设计，可避免系统出现溢流或供水不足的问题，同时降低设备频繁启停带来的能耗和磨损。

1.3 处理工艺选择

建筑中水处理工艺的选择取决于原水水质和回用标准。针对优质杂排水，常用“格栅+调节池+生物接触氧化+沉淀+过滤+消毒”流程。该组合运行稳定、管理简便

且抗冲击能力强。其中，生物接触氧化法利用填料上的生物膜降解有机物，具有污泥少、费用低的特点。其关键参数包括：水力停留时间4-8小时，气水比10:1至15:1，填料填充率50%-70%，溶解氧2-4mg/L。沉淀池表面负荷取1.0-1.5m³/m²·h，以去除脱落悬浮物；过滤环节采用石英砂或纤维球过滤器，滤速8-12m/h，截留细小颗粒；消毒使用次氯酸钠（投加量2-5mg/L，接触时间 ≥ 30分钟）确保细菌指标达标。对于污染较重的生活污水，可采用“厌氧+好氧”组合或膜生物反应器（MBR）。MBR结合膜分离与生物处理，出水水质优、占地小、污泥浓度高（8-12g/L），膜通量控制在15-25L/m²·h。但其投资及运行费用较高，需定期清洗更换膜组件（化学清洗周期3-6个月）。消毒方面，次氯酸钠具备持续消毒能力，紫外线消毒无副产物（剂量 ≥ 40mJ/cm²）[2]。总体而言，工艺选择应遵循技术可靠、经济合理、运行简便原则，避免盲目追求高精尖技术而忽视实际运行条件和管理能力。

1.4 管网与储存系统设计

中水管网应独立设置，严禁与自来水管网连接，防止误饮误用。管道材质应耐腐蚀，常用聚乙烯管或镀锌钢管，管道接口应严密，防止渗漏。管网布置应缩短管线长度，减少水头损失，同时避免穿越卧室、厨房等对水质要求较高的区域。管道应设置明显标识，如涂刷绿色环带或标注“中水”字样，以区别于自来水管网。中水管道的流速一般控制在0.8至1.5米每秒，以减少水头损失和噪音。管网设计还应考虑检修和冲洗需求，设置必要的阀门和泄水装置。储存设施包括中水清水池和调节池，清水池容积应满足消毒接触时间和用水高峰调节需求。水池应设溢流管、通气管和检修口，并采取防渗漏措施。为防止水质恶化，清水池中的中水停留时间不宜过长，必要时可设置循环消毒装置。水池内壁应采用无毒、耐腐蚀材料，定期清洗消毒。储存系统还应设置水位控制装置，实现自动补水与停泵控制，保证系统安全运行。清水池应设置在线余氯监测仪，余氯含量应维持在0.2至0.5毫克每升之间，确保消毒效果持续有效。

2 经济效益评价方法

2.1 评价指标体系

建筑中水回用系统的经济效益评价应建立多层次指标体系，主要包括初始投资、年运行费用、年节水收益、投资回收期和内部收益率等。初始投资涵盖设备购置费、土建工程费、管道安装费及调试费，其中设备购置费通常占较大比重，约占总投资的50%至65%。年运行费用包括电费、药剂费、人工费、维修费及折旧费，电费是运行费用中最主要的组成部分，约占总运行费用的40%至60%。年节水收益等于回用水量乘以自来水单价与污水排污费之和，节水收益是项目经济可行性的核心来源。投资回收期是初始投资与年净收益的比值，是衡量经济可行性的直观指标。内部收益率是使净现值等于零的折现率，反映项目自身的盈利能力。此外，还可采用效益费用比、单位制水成本等指标进行辅助评价。单位制水成本等于年运行费用除以年回用水量，是衡量系统运行经济性的重要参数，一般应在1.5至3.0元每立方米之间，具体取决于处理工艺和规模。

2.2 费用效益计算模型

设初始投资为C，年运行费用为O，年节水收益为B，则年净收益为B减O。静态投资回收期T等于C除以（B减O）。当考虑资金时间价值时，可采用净现值法，净现值等于各年净收益折现值之和减去初始投资。若净现值大于零，说明项目在经济上可行。内部收益率是使净现值等于零的折现率，其值越高，项目盈利能力越强[3]。计算中需合理确定折现率，通常取行业基准收益率或长期贷款利率。年运行费用中的折旧费应按设备使用寿命计算，一般采用直线折旧法。设备使用寿命通常为10至15年，管道使用寿命可达20年以上。年节水收益的计算应基于实际回用水量，而非设计回用水量，因为实际运行中可能因水量不足或设备检修导致回用量低于设计值。计算模型还应考虑通货膨胀和价格变动因素，可采用不变价格或可变价格两种方式进行分析。此外，应计入设备大修和膜组件更换等周期性费用，通常膜组件每3至5年需更换一次，更换费用约占总投资的10%至15%。

2.3 敏感性分析

经济效益受多种因素影响，需进行敏感性分析以识别关键变量。主要影响因素包括自来水价格、电价、药剂价格、处理水量及设备寿命。一般而言，自来水价格越高，节水收益越大，投资回收期越短。电价和药剂价格上升会增加运行费用，降低经济效益。处理水量不足会导致设备利用率低，单位成本上升。设备寿命延长可降低年均折旧费用，提高经济效益。敏感性分析可采用单因素分析和多因素分析两种方法。单因素分析逐一改变某一参数，观察其对评价指标的影响程度；多因素分析则同时考虑多个参数的变化组合，评估项目在不同情景下的经济表现。在项目决策阶段，应充分调研当地水价政策及能源价格走势，对关键参数进行多情景分析，以评估项目的抗风险能力。对于水价较低的地区，可考虑通过政策补贴或综合效益补偿来提高项目经济可行性。敏感性分析结果表明，自来水价格和处理水量通常

是影响经济效益最显著的两个因素。

2.4 综合效益分析

除直接经济效益外，建筑中水回用系统还具有显著的环境效益和社会效益。环境效益表现为减少新鲜水取用量和污水排放量，减轻水体污染负荷，降低污水处理厂运行压力。据估算，每回用一立方米中水，可减少约一立方米自来水取用量和约零点八立方米污水排放量，同时减少相应的化学需氧量和氨氮排放。社会效益包括提升建筑绿色品质、缓解城市供水压力、增强公众节水意识等[4]。在评价中，可采用条件价值法或影子价格法对环境和社效益进行货币化估算，从而更全面地反映项目的综合效益。对于绿色建筑评价体系，中水回用系统的设置还可获得相应加分，间接提升建筑的市场价值。综合效益分析有助于全面认识中水回用系统的价值，为项目决策提供更完整的依据。

3 影响经济效益的关键因素

3.1 建筑规模与用水特征

建筑规模直接影响中水系统的经济性。大型公共建筑和住宅小区用水量大，原水收集充足，单位处理成本较低，经济效益较好。小型建筑因水量小、投资分摊高，经济性相对较差。一般而言，当建筑日用水量达到一定规模时，中水回用系统才具备经济可行性。此外，用水特征也很关键，如办公建筑用水集中在工作日，住宅用水早晚高峰明显，这些规律影响调节池容积和处理设备运行策略，进而影响运行费用。对于用水规律稳定的建筑，中水系统运行更为经济。建筑内不同用途的用水比例也会影响中水系统的设计规模，如冲洗便器用水量占总用水量的比例越高，中水回用的潜在效益越大。

3.2 水价与政策支持

自来水价格和污水处理费标准是决定节水收益的核心参数。水价越高，中水回用的经济优势越明显。目前许多城市水价尚未充分反映水资源稀缺程度，导致中水回用经济激励不足。政策支持方面，政府可通过财政补贴、税收优惠、绿色信贷等方式降低项目初始投资压力，提高项目吸引力。此外，将中水回用纳入节水考核和绿色建筑评价体系，也能有效推动技术应用。部分地区已出台强制性的中水回用规定，要求一定规模以上的建筑必须配套建设中水设施，这为行业发展提供了制度保障。

3.3 运行管理水平

运行管理水平直接影响系统实际效益。科学的管理制度、专业的运维人员和定期的水质监测可保证系统稳定运行，延长设备寿命，降低故障率。反之，管理不善会导致出水水质不达标、设备损坏频繁、运行费用超支，甚至系统闲置。因此，在项目设计阶段就应考虑后期运维的便利性，并建立完善的操作规程和应急预案。同时，应加强对运维人员的培训，提高其专业技术水平和责任意识。智能化管理手段的应用，如远程监控和自动控制，可有效提升运行管理效率，降低人工成本。在线监测仪表应定期校准，确保数据准确可靠，为工艺调整提供依据。

结束语

建筑中水回用系统是实现建筑节水减排的重要技术手段，其设计需综合考虑水源选择、水量平衡、处理工艺及管网储存等环节，确保技术可行、运行可靠。经济效益评价应涵盖初始投资、运行费用、节水收益及投资回收期等指标，并辅以敏感性分析和综合效益分析。研究表明，在建筑规模较大、水价较高、政策支持得力的条件下，中水回用系统具有良好的经济可行性。未来应进一步完善水价形成机制，加大政策扶持力度，提升运行管理水平，推动建筑中水回用技术的规模化应用，为城市水资源可持续利用作出贡献。

参考文献

[1]张伟,李华.建筑中水回用系统设计与运行管理研究[J].给水排水,2021,47(3):56-61.

[2]王强,刘洋.基于全生命周期的建筑中水回用经济效益评价[J].中国给水排水,2022,38(7):112-117.

[3]陈晓明,赵丽.绿色建筑中水回用技术经济分析[J].建筑科学,2020,36(5):88-93.

[4]孙鹏,周敏.城市建筑中水回用系统优化设计探讨[J].环境工程,2023,41(2):145-150.