

建筑雨水收集回用系统设计与效益分析

李云燕

新疆交通规划勘察设计院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830006

【摘要】：随着我国城市水资源短缺问题日益突出、海绵城市建设理念全面普及，建筑雨水资源化利用已成为建筑节水、生态减排、缓解城市内涝的重要技术手段。建筑雨水回用系统在绿色建筑、海绵城市和建筑节水要求之间承担径流削减与非饮用水替代功能，设计失衡时容易出现池体过大、溢流频繁、水质衰减和运维收益偏低等问题。本文分析建筑屋面雨水收集管网、调蓄容积、过滤消毒和分区回用途径，测算设计降雨、额定回用、暴雨溢流和枯水补水工况下的运行关系，并从自来水替代量、费用回收周期和碳减排情景评价系统效益。测算表明，34m³调蓄池在4200m²屋面条件下可形成1845m³/a替代水量，效益由水量平衡、水质安全和运维成本共同判定。

【关键词】：建筑雨水；收集回用；调蓄容积；水量平衡；效益分析

DOI:10.12417/2811-0722.26.09.061

引言

建筑屋面和硬质铺装降雨初期形成快速径流，若全部接入市政雨水管网，排水峰值、污染冲刷和水资源浪费会同时出现。绿色建筑和海绵城市设计把雨水收集回用纳入建筑给排水系统后，屋面径流可转化为绿化、冲洗、公厕和景观补水的非饮用水源，但工程设计不能停留在设置水池和水泵的层面。调蓄容积、弃流量、过滤消毒、回用端要求和暴雨溢流之间存在数量约束，任一环节脱离水量平衡都会削弱节水和安全效果。建筑雨水收集回用系统设计把收集、处理、储存、输配和效益测算放在同一运行边界内，使系统在常见降雨中释放节水价值，在暴雨和枯水期仍保持排水安全和水质可控。

1 建筑屋面雨水收集回用系统设计

1.1 建筑雨水收集管网结构与回用运行原理

建筑雨水收集回用系统以屋面、露台和硬质铺装径流为水源，雨水斗、立管、弃流井、过滤器、调蓄池、消毒装置、变频泵组和回用管网共同承担截流、沉降、净化、储存和输配功能。屋面径流携带尘土、落叶和防水层老化物，初期污染浓度高于稳定降雨阶段，收集管网应在汇入口设置弃流节点，使污染负荷先被旁通排入污水或调蓄排放系统^[1]。调蓄池水位达到运行下限后，补水阀由液位信号控制并引入自来水或中水，回用泵组只向公厕、绿化、道路冲洗和景观补水等非饮用端供水。系统运行不追求全部降雨入池，而是在可收集水量、非饮用要求、水质保持时间和溢流安全之间取得平衡。系统收集与回用原理见图1。

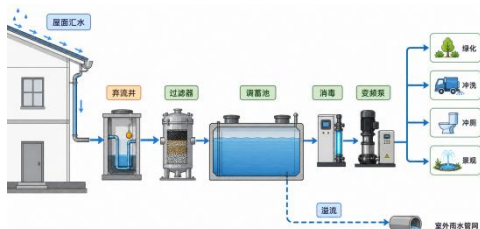


图1 建筑雨水收集回用系统结构关系

图1中，屋面汇水沿左侧立管进入弃流井，橙色弃流节点位于过滤器之前，说明初期污染段应在入池前被切出；调蓄池、消毒装置和变频泵按蓝色箭头串联，右侧绿化、冲洗、公厕和景观支路形成并列回用端。下方虚线溢流线单独接入室外雨水管网，表明回用系统在水池满水时仍要保留独立排水通道。

1.2 建筑雨水调蓄容积方程

调蓄容积计算要同时约束汇水产流和末端用水，屋面材质、坡度、汇水面积、当地设计降雨量和过滤折减系数决定可进入水池的水量，绿化灌溉、道路冲洗和公厕补水的日要求决定水池释放速度。建筑小区雨水控制与利用规范要求回用规模开展水量平衡分析，资料不足时可按回用系统最高日用水量0.25~0.35倍估算，或取1年~2年24小时降雨扣除初期径流后的水量确定雨水池回用容积^[2]。本设计采用屋面汇水面积4200m²、综合径流系数0.85、过滤可用系数0.90、24小时设计降雨量32mm和最高日回用要求46m³/d作为边界，容积还要扣除弃流、净化损失和短期用水消纳能力。

1.3 建筑雨水过滤消毒处理工艺设计

过滤消毒工艺应贴合回用端水质风险，而不是把雨水处理成饮用水标准。屋面径流进入弃流井后先由格栅截留树叶、砂粒和塑料碎片，初期2mm~3mm降雨形成的高污染径流被旁通排走，后续雨水经沉砂段进入石英砂或纤维束过滤器。绿化灌溉和道路冲洗对透明度要求低，但喷头、滴灌管和冲洗阀容易被细颗粒堵塞，过滤精度宜控制在80μm~150μm；公厕补水要控制异味和微生物再生，紫外消毒或次氯酸钠投加点应布置在回用泵可检修位置。清水池设置低水位保护、溢流和排泥接口，水体停留超过72h时加大循环或排空比例，防止厌氧气味传入卫生间和地下车库。

1.4 景观绿化雨水回用途径分区配置设计

景观绿化回用途径按水质敏感度和供水连续性分区，草坪、灌木带和屋顶花园优先采用滴灌或微喷，绿化支路末端压

力控制在 0.20MPa~0.35MPa, 喷头间距按 3m~5m 布置。回用支管从泵房出水总管分成绿化、冲洗、冲厕和景观四类支路, 各支路设置独立水表、止回阀和非饮用水标识, 冲厕支路在楼层管井内与生活给水保持物理隔离, 倒流防止器前后压差不低于 0.03MPa。绿化区土壤含水率高时, 控制阀推迟灌溉时段; 夏季连续高温下, 绿化要求峰值可能超过水池可供量, 补水液位低于正常回用启泵水位 0.20m, 使有限雨水先被消纳。景观水体补水只适合流动性较好的浅水池, 封闭水体若长期接受低盐度雨水和有机物输入, 藻类生长会增加清淤与消毒负荷, 回用支路应保留旁通接口。

2 建筑雨水回用系统运行工况分析

2.1 建筑雨水回用水量参数

运行水量参数应从年降雨分布、屋面有效汇水面积和末端用水节律共同确定。以 4200m² 屋面为汇水面、年可利用降雨量按 680mm 折算时, 理论径流量约 2427.60m³/a, 扣除初期弃流、过滤反冲洗和不可收集损失后, 可用雨水量按 0.76 折减为 1845m³/a^[3]。回用要求侧由绿化灌溉、道路冲洗、车库冲洗、冲厕补水、景观补水和设备冲洗组成, 日要求量从 1.20m³/d 到 18m³/d 不等, 年运行天数受季节和使用频次影响明显。若调蓄池有效容积取 34m³, 晴雨交替条件下可覆盖绿化和冲洗的多数日要求, 冲厕补水属于连续负荷, 要接受自来水低位补充。

2.2 设计降雨条件下调蓄运行特征

设计降雨到达时, 屋面径流先在雨水斗和立管内汇集, 弃流并液位快速上升并排走初期污染段, 清洁径流随后进入调蓄池。按 32mm 的 24 小时降雨计算, 4200m² 屋面在 0.85 径流系数下可形成 114.24m³ 径流, 经过过滤和管路损失折减后约 92.55m³ 具备回用条件^[4]。34m³ 有效水池在降雨前若保留 8m³ 底水, 可接纳 26m³ 新增雨水, 剩余可用径流转入溢流或下游滞蓄设施。调蓄运行的控制点在预留容积、进水限流和溢流高程, 溢流口标高必须低于检修井倒灌风险线并高于正常启泵水位, 标高差还要留出检修井沉积和液位传感误差余量。

2.3 绿化冲洗额定工况回用过程控制

绿化和冲洗属于间歇回用负荷, 额定工况宜由时间段、阀门开度和水池液位共同控制。夏季绿化灌溉可安排在清晨或傍晚, 单次灌溉控制在 30min~45min; 道路和车库冲洗宜在降雨后或低峰运营时段进行, 每日不超过 2 次, 使水池尽快释放出下一场降雨所要空间。泵组控制不宜只按压力启停, 支路阀门开启数量变化会引起瞬时流量波动, 变频泵应以末端压力和清水池低水位双条件联锁, 低水位触发后先切换补水或关闭冲洗支路, 避免水泵空转^[5]。喷灌和冲洗支路的设计流速控制在 0.80m/s~1.50m/s 更利于减少沉积和水锤, 支管末端应布置排空阀, 冬季停用时排空管内积水。额定工况控制的结果是让回

用水优先服务低风险、高消纳的用水端, 连续卫生器具补水在水量不足时自动降级为备用水源供应。

2.4 暴雨溢流条件下安全运行控制

雨水回用系统在暴雨溢流工况下的稳定调控, 是防范蓄水池漫溢、管网倒灌、污染物外溢及设施结构受损的关键。暴雨工况下, 雨水回用系统必须把建筑排水安全置于回收率之前。屋面斗、立管和溢流井的排水能力应满足建筑屋面排水设计要求, 调蓄池只接纳设计允许的流量, 溢流管径不小于 DN100, 超过进水限值的雨水经溢流口进入室外雨水管网或下凹绿地。溢流出口设置防倒灌拍门, 高水位报警线距池顶 0.30m, 报警联动关闭回用泵并启动事故排水, 事故排水泵能力不低于 15m³/h。暴雨后池内水质受悬浮物和有机物冲击影响, 过滤器压差上升到 0.05MPa 以上、清水池浊度增大时, 应延长沉降时间或排放首批回用水, 不能直接向冲厕和景观补水支路供给。地下调蓄池清淤前要检测氧气、硫化氢和可燃气体浓度, 有限空间作业条件不满足时不得进入。暴雨溢流安全控制关系见图 2。

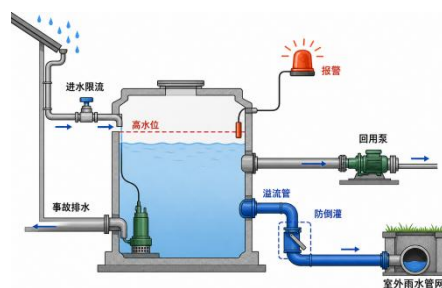


图2 暴雨溢流安全控制关系

图2中, 红色高水位线位于调蓄池正常水面之上, 报警探头与顶部警示灯连接, 说明暴雨时控制信号应早于池体漫溢触发。蓝色溢流管经防倒灌装置排向室外雨水管网, 右侧回用泵仍与正常供水方向分开; 左下事故排水支路独立布置, 使检修或异常高水位时可以绕开回用端排空。

2.5 枯水期补水调节方式

雨水回用系统在枯水期的运行矛盾由汛期的溢流风险控制, 转变为供水连续性与储水水质的双向保障。当连续无有效降雨超过 10d 时, 调蓄池水位将持续走低, 存在供水中断风险。对此可采用分级用水管控模式, 优先暂停绿化浇灌、道路冲洗等非必要用水支路, 仅保留冲厕、日常保洁等刚需用水支路, 并通过自动补水阀维持水池最低运行水位, 保障基础用水需求。补水调节不宜把水池一次性补满, 较高补水位会占用下一场降雨的可接纳容积, 低水位以下补至运行下限, 连续用水时再小流量补充。长期少雨地区还要控制水体停留时间, 若池内余水浊度、色度或余氯衰减超过运维阈值, 可将少量存水排入绿化或冲洗支路后重新补水, 并同步冲洗泵前过滤器, 避免低流量沉积物再次进入支管。此外, 可依托补水阀启闭频次与运行记录, 反推枯水期实际用水强度与补水规律, 为系统精细化

运维调度提供数据支撑。。

3 建筑雨水回用系统综合效益分析

3.1 年度自来水替代量效益测算

年度自来水替代量可用雨水量和各回用对象要求共同确定,不能简单按降雨总量估计。例设计情景中,绿化灌溉年要求 900m³,雨水可满足 620m³;道路冲洗年要求 416m³,雨水可满足 330m³;车库冲洗、冲厕补水、景观补水和设备冲洗合计年要求 1413m³,可满足 895m³[6]。全年回用满足量合计 1845m³,低于年总要求 2729m³,也低于折减后的可用雨水上限,说明系统效益受季节错配和调蓄容积限制。若当地自来水综合价格按 4.80 元/m³ 计,直接水费替代额为 8856 元/a,管网排水压力降低和绿化微气候改善属于附加收益,不宜与水费收益混同计算。各回用对象用水量与满足量见表 1。

表 1 雨水回用对象年替代量测算

回用对象	日用水量 (m ³)	年运行天数 (d)	年用水量 (m ³)	雨水满足量 (m ³)	峰时流量 (m ³ /h)	储水保障时长 (h)
绿化灌溉	6	150	900	620	4	5.67
道路冲洗	2.60	160	416	330	3.20	10.63
车库冲洗	1.80	120	216	160	2.40	14.17
冲厕补水	18	60	1080	520	5.50	6.18
景观补水	1.50	90	135	120	1.80	18.89
设备冲洗	1.20	70	84	65	1.50	22.67

表 1 中,冲厕补水年用水量达到 1080m³,但雨水满足量只有 520m³,说明连续负荷受降雨季节和水池容积限制;绿化灌溉雨水满足量为 620m³,峰时流量 4m³/h 对应 8.50h 以内的单池保障能力,适合在降雨后优先释放。设备冲洗的储水保障时长最长,日用水量较小,对调蓄池峰值压力低,可作为枯水期保留的低强度回用端。

3.2 投资运维费用回收周期经济测试

经济测试应把土建池体、设备、电控、管网改造和运维耗材拆开计算。34m³ 地下调蓄池、弃流过滤设备、紫外消毒、变频泵组、回用管网和电控柜的初始投资按 13.80 万元估算,年运维费用包括滤料清洗更换、紫外灯管、药剂、电费、排泥

和水质化验,合计约 0.72 万元/a。按 1845m³/a 替代水量和 4.80 元/m³ 水价计算,年水费节省 0.89 万元,扣除运维后净现金流仅 0.17 万元/a,静态回收期明显偏长[7]。若项目所在城市执行非居民用水阶梯价格、绿色建筑评价奖励或海绵城市专项资金,经济性会明显改善;若只服务少量绿化和冲洗,土建池体费用会吞噬大部分节水收益。建筑雨水回用的经济价值更适合在新建项目同步预留池体和管井时释放,既有建筑后改造要重点比较开挖、停业和管线碰改费用;运维合同还应固定滤料更换、水质化验和泵组巡检责任,并把异常水质、泵组停机和补水阀失灵列入响应时限,避免节水收益被停运时间抵消。

3.3 碳减排综合收益情景对比测试

碳减排收益来自自来水制备输配和污水处理负荷的减少,但该收益受当地供水能耗、污水厂处理工艺和雨水泵组电耗影响。按替代自来水 1845m³/a、供排水综合碳排因子 0.70kgCO₂/m³、回用泵组电耗 0.12kWh/m³ 和电力碳排因子 0.58kgCO₂/kWh 估算,年净减排量约 1163kgCO₂,折合到单立方米回用水为 0.63kgCO₂。50m³ 池体高于 34m³ 池体 16m³,若年替代量从 1845m³/a 增至 2050m³/a,差值为 205m³/a;单位容积新增替代量 12.81m³/a,低于 34m³ 池体对应的 54.26m³/a。小型建筑更适合采用地上组合水箱和分散过滤,公共建筑或商业综合体则可把雨水回用并入中水、景观和冷却补水的统一调度。综合收益情景的判读重点不是单一水费回收,而是节水量、溢流削减、水质风险、运维成本和碳排放之间的数量平衡。

4 结语

建筑雨水收集回用系统设计应把屋面产流、调蓄容积、过滤消毒、分区回用和效益测算作为连续工程关系处理。4200m² 屋面、34m³ 调蓄池和 1845m³/a 替代水量的设计情景表明,系统节水能力主要受降雨季节、末端用水节律和池体预留空间共同控制,单纯扩大水池并不能线性增加收益。过滤消毒工艺应围绕非饮用端风险配置,暴雨工况下以溢流安全和防倒灌为先,枯水期则采用分级补水避免自来水长期滞留。效益分析显示,直接水费回收周期可能偏长,水量替代、峰值削减、运维费用和碳减排要一并核算;新建建筑同步预留池体、管井和回用支路时,雨水回用系统更容易取得稳定的工程和经济结果。

参考文献:

- [1] 张晓梅,刘艳辉.智能化雨水收集与回用系统设计及在绿色建筑中的应用[J].绿色中国,2022,(3):78-81.
- [2] 崔乐.绿色建筑标准下的雨水收集利用系统设计[J].建筑工程与管理,2025,7(6):4-6.
- [3] 周鹏.建筑雨水收集回用系统的水量平衡设计[J].给水排水,2024,60(9):102-106.
- [4] 刘湘明.绿色建筑中雨水收集回用系统与给排水协同设计[J].建筑工程进展,2025,5(5):16-18.
- [5] 陈立,周敏.海绵城市理念下建筑雨水资源化利用设计探讨[J].中国建筑装饰装修,2025,(18):92-94.
- [6] 吴家欣,吴宇昂.绿色建筑标准下的雨水收集利用系统设计[J].工程施工新技术,2025,4(7):45-47.
- [7] 李晨.环保建筑中的雨水收集回用与效益分析[J].工程施工新技术,2025,4(8):31-33.