DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260130

基于海绵城市理念下的雨水收集回用技术研究

苏　琋
(中交水利水电建设有限公司,浙江 宁波 315200)

摘　要: 为缓解城市化进程中水资源紧缺与城市内涝的双重矛盾,以海绵城市“低影响开发”理念为核心,结合苕溪清水入湖河道整治后续工程(湖州开发区段二期)及城市小区实践,系统研究雨水收集回用技术的原理、系统设计、材料选择及综合效益。通过构建“收集—过滤—存储—回用”全流程技术体系,明确屋顶雨水回收、地面透水铺装、植被浅沟-下凹绿地、多功能景观水池等关键技术的工程适配参数。依托苕溪工程彩虹广场(占地面积8 366.36 m^2,汇水分区2 382.04 m^2,综合径流系数0.795 3)的实测数据,验证系统效能:年径流总量控制率达77.0%,面源污染物削减率61.6%,年可节约常规水资源超1 500 m^3。研究结果表明,这种技术体系可有效降低城市排水负荷、保护水资源生态,为海绵城市建设中雨水资源化利用提供可推广的工程方案。

关键词: 海绵城市;雨水收集回用;低影响开发;年径流总量控制率
中图分类号:　　**文献标志码:**　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0289-05

Research on Rainwater Collection and Reuse Technology Based on Concept of Sponge City

SU Xi

Abstract: To alleviate the dual contradiction of water shortage and urban waterlogging in the process of urbanization, taking the “low-impact development” concept of sponge cities as the core, and combined with the the follow-up project of the clear water of Tiaoxi River flowing into the lake (Phase II of the Huzhou Development Zone) and the practice of urban communities, the principle, system design, material selection and comprehensive benefits of rainwater collection and reuse technology are systematically studied. By establishing a full-process technical system of “collection - filtration - storage - reuse”, the engineering adaptation parameters for key technologies such as roof rainwater recovery, ground permeable pavement, vegetation shallow gullies - sunken green spaces, and multi-functional landscape water pools are clearly defined. Based on the measured data of the Rainbow Square of the Tiaoxi Project (covering an area of 8366. 36 m^2, with a catchment area of 2382. 04 m^2 and a comprehensive runoff coefficient of 0. 7953), the efficiency of the system is verified that the annual total runoff control rate reaches 77. 0%, the reduction rate of non-point source pollutants is 61. 6%, and over 1,500 m^3 of conventional water resources can be saved annually. Research result shows that this technical system can effectively reduce the urban drainage load, protect the water resource ecology, and provide a scalable engineering solution for the utilization of rainwater resources in the construction of sponge citities.

Keywords: sponge city; rainwater collection and reuse; low-impact development; annual total runoff control rate

0　引　言

随着我国城市化率突破65%,城市硬化下垫面比例显著提升(部分城市达70%以上),导致雨水径流系数增大、渗透量减少,引发两大核心问题:一是水资源紧缺加剧,全国600余座城市中400座面临缺水,常规水资源开发逼近上限[1];二是城市内涝频发,年均因涝直接经济损失超千亿元,同时初期雨水携带的污染物加剧河湖水体污染[2](如苕溪流域面源污染贡献率达35%)。

海绵城市作为新一代城市雨洪管理模式,以“自然积存、自然渗透、自然净化”为核心,通过低影响开发(LID)设施实现雨水“渗、滞、蓄、用、排”协同,而雨水收集回用技术作为海绵城市的关键支撑,可将雨水转化为“第二水资源”,同时削减径流污染,成为破解城市水危机的重要路径[3]。

雨水收集回用技术的优化应用,具有三重核心价值:一是资源效益,替代绿化灌溉、道路清洗、厕所冲厕等非饮用水需求,降低对地下水及自来水的依赖;二是生态效益,减少雨水径流总量,降低内涝风险,同时削减面源污染物入河湖量;三是经济效益,

收稿日期:2026-02-05
作者简介:苏琋(1999—),男,本科,助理工程师,从事水利工程建设工作。

长期可节省水资源费用与污水处理成本,抵消初期设施投资[4]。

当前国内外雨水收集回用技术已形成多元化体系。国际上以美国“最佳管理措施(BMPs)”、澳大利亚“水敏感城市设计(WSUD)”为代表,注重生态化设施应用[5]。国内以《海绵城市建设技术指南》为指导,形成“源头减排—过程控制—末端调蓄”三级技术框架[6]。

但现有应用仍存在不足:一是技术适配性不足,针对河湖周边(如苕溪流域)、高密度小区等特定场景的参数设计不明确;二是系统集成度低,收集、过滤、存储环节衔接不畅;三是效益评估缺乏量化数据[7]。本文结合苕溪清水入湖工程及小区实践,细化技术参数与工程设计,可为同类海绵城市项目提供标准化技术参考,推动雨水回用技术从“试点”向“规模化应用”转型[8]。

1　雨水收集回用技术体系与原理

1.1　雨水收集回用技术

雨水收集回用技术指通过物理、生态手段,将屋面、路面、绿地等区域的雨水进行收集、净化、存储后,用于非饮用水场景的技术体系,核心目标是“资源化利用”与“生态保护”协同[9]。

1.2　技术体系构成

雨水收集回用技术体系分为4个核心环节,各环节功能与技术要求如下:

(1)收集环节:作为系统起点,需覆盖不同下垫面(屋面、路面、绿地),核心要求是“高效截流”与“初期弃流”,避免污染严重的初期雨水进入系统。

(2)过滤环节:实现水质净化,需分级去除大颗粒杂质(如泥沙)、小分子污染物(如有机物),核心要求是“适配雨水水质特征”,避免过度处理或处理不足。

(3)存储环节:保障雨水供需平衡,需具备防水、防渗漏能力,核心要求是“空间适配”(如地下存储节省用地)与“水位可控”。

(4)回用环节:实现雨水资源化,需按需分配至不同用水点,核心要求是“输送稳定”与“水质安全”[10]。

1.3　核心技术原理

1.3.1　初期雨水弃流原理

初期雨水(通常为前2~5 mm降雨)污染负荷占总径流污染的60%~80%,采用“容积式弃流”或“旋流分离弃流”。容积式通过弃流池暂存初期雨水,满后切换至净化系统。旋流分离则利用离心力分离细小颗粒(粒径≥0.1 mm),分离效率随旋流器直径减小而提升(本文工程采用直径150 cm旋流器,分离效率达85%)。

1.3.2　生态净化原理

依托植被、土壤、微生物的协同作用,如屋顶绿化通过植物根系吸附、土壤渗透过滤雨水,径流削减率达40%~60%[11];下凹绿地通过“滞留—渗透—净化”,SS(悬浮固体)去除率达70%~80%,COD(化学需氧量)去除率达30%~40%。

1.3.3　存储与回用调控原理

采用“水位监测+变频泵控制”。存储设施(如地下储水池)通过超声波液位计实时监测水量,低水位(≤0.5 m)时停止回用,高水位(≥2.3 m)时开启溢流。回用泵采用变频控制,确保不同用水点(如屋顶绿化、地面清洗)的水压稳定。

2　工程设计与实践案例

2.1　工程概况与系统设计

2.1.1　工程概况

湖州市多年平均降雨量1 388.9 mm,降水时空分布不均,5—9月降雨量占全年的72.2%,暴雨日数(日降水量≥50 mm)年均4.1 d,年降水量变化范围在1 200~1 800 mm,降水集中度呈上升趋势,强降水事件频率增加。

以苕溪清水入湖河道整治后续工程(湖州开发区段二期)为例,项目位于太湖度假区长兜港两侧(北起滨湖大桥,南至杭嘉湖州高速),核心区域为彩虹广场。

建筑参数:地上4座1层框架结构商业体,地下1层地下室;±0.000相对1985高程6.700 m,室外地面标高3.000~5.000 m(1985高程);地下室层高4.5 m,地上层高4.5 m(斜屋面)。

场地参数:南北长269 m,周长621 m,总占地面积8 366.36 m^2;汇水分区总面积2 382.04 m^2,年降雨总量约2 382.04 m^2×1.388 9 m=3 308.4 m^3,下垫面组成及径流系数如表1所示。

2.1.2　系统详细设计

(1)收集装置设计。

a.屋面雨水收集:每座商业体斜屋面(坡度15°~20°)布置4个304不锈钢重力流雨水斗(DN100),间距不大于15 m;雨水斗入口加装5 mm孔径不锈钢格栅,拦截落叶、杂物。

表 1　汇水分区下垫面指标

下垫面类型	面积/m²	雨水径流系数	占汇水面积比/%
硬质屋面	1 174.35	0.90	49.3
绿化屋面	108.34	0.30	4.5
混凝土/沥青路面	625.01	0.90	26.2
绿地	166.00	0.15	7.0
普通铺装	208.34	0.90	8.7
透水铺装	208.34	0.30	8.7
汇水分区总面积	2 382.04	0.795 3(综合)	100.0

b. 地面雨水收集:透水铺装(208.34 m²)下铺设 DN300 透水混凝土管(管间距 3 m),填充 5~8 mm 砾石(厚 300 mm);硬化路面/普通铺装设铸铁雨水篦子(300 mm×500 mm,间距 20 m),内置 2 mm 孔隙截污挂篮;绿地改造为下凹绿地(下凹深度 200 mm),铺设 DN110 盲管(坡度 0.5%)。

c. 初期雨水弃流:采用容积式弃流井(混凝土结构,2 m×2 m×1.5 m,有效容积 4.5 m³),容纳初期 2 mm 降雨(计算雨水量 3.8 m³),雨停后 12 h 内排空至市政污水管网。

(2)过滤系统设计。采用“三级过滤+消毒”工艺,确保出水符合《城市污水再生利用城市杂用水水质》(GB/T 18920)要求。

a. 初级过滤:弃流井出口设不锈钢机械格栅(孔径 5 mm),去除大颗粒杂质。

b. 中级过滤:玻璃钢砂滤罐(直径 1.2 m,高度 2.5 m),填充 0.8~1.2 mm 石英砂(高度 1.2 m),滤速 10 m/h,SS 去除率不小于 85%。

c. 高级过滤:串联活性炭滤罐(同规格),填充 1.5~2 mm 柱状活性炭(高度 1.0 m),COD 去除率约 40%。

d. 消毒:紫外线消毒器(功率 30 W,处理量 5 m³/h),杀灭细菌、病毒。

(3)存储设施设计。利用地下室空闲区域建设地下钢筋混凝土储水池。

a. 参数:尺寸 8 m×5 m×2.5 m,有效容积 100 m³;混凝土强度 C30,抗渗等级 P6;内壁涂刷 1.5 mm PVC 防水卷材,底板铺膨润土防水毯。

b. 辅助设施:2 个 800 mm×800 mm 检修口(配防坠网),DN100 UPVC 通风管(接地下室通风井);超声波液位计(测量范围 0~2.5 m,精度±1 mm),数据接入雨水控制柜。

(4)回用装置设计。采用“三路回用管网+变频控制”。

a. 泵组:2 台 304 不锈钢变频离心泵(1 用 1 备,流量 10 m³/h,扬程 30 m)。

b. 管网分区:绿化灌溉(De50 PE 管,洒水栓间距 10 m)、道路清洗(De80 PE 管,3 个取水口)、厕所冲厕(De65 PE 管,接商业体卫生间,设双水源切换阀)。

c. 智能控制:雨水控制柜集成液位监测、泵组启停、水质预警功能,出水浊度大于 5NTU 时自动回流至砂滤罐。

2.2　城市小区雨水收集回用设计

2.2.1　总体设计思路

以“住区用地控制+水资源平衡”为核心,合理布局道路、公共空间与建筑,确保 LID 设施覆盖率不小于 30%。按雨水污染程度分类处理(屋面/绿地雨水污染轻,优先回用[12];路面/初期雨水污染重,用于杂用),实现“收集—处理—回用”集中化。雨水自动过滤器雨水蓄水模块[13]。

2.2.2　关键技术应用

(1)屋顶雨水回收技术。

a. 屋顶绿化:选择承载能力不小于 2.0 kN/m²、防水等级Ⅱ级以上的建筑,种植耐旱耐淹植被(如佛甲草),土壤层厚度 150~200 mm,径流削减率达 50%~60%。

b. 雨水收集系统:非绿化屋顶设雨水斗+滤网(孔径 2 mm),添加聚合氯化铝(PAC)混凝剂(投加量 5~10 mg/L),多余雨水排至溢流管,最终汇入雨水调节池。

(2)地面透水铺装技术。

a. 材料选择:根据地质条件选用硅砂砖(渗透系数不小于 1×10^{-3} m/s)或透水混凝土。

如图 1 所示,结构层设计(自上而下):60 mm 透水砖→30 mm 中粗砂找平层→300 mm 碎石垫层(粒径 13~50 mm)→土基压实(压实度≥90%)。

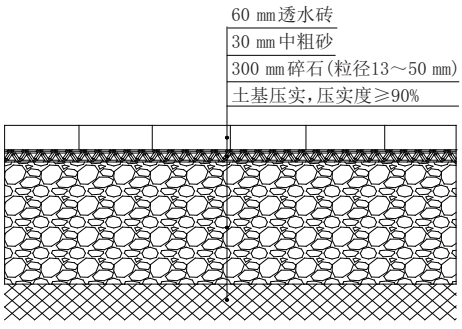


图 1　透水铺装示意图

b. 辅助系统:铺设 DN300 集水管与水井,收集未渗透雨水至处理系统。

(3)植被浅沟与下凹绿地。

植被浅沟，沟宽0.5~1.0 m，深0.3~0.5 m，种植狗牙根、鸢尾等耐淹植被，与城市雨水管渠连通，径流流速不大于0.3 m/s，SS去除率不小于70%。

如图2、图3所示，绿地下凹深200 mm（特殊区域可调整至150~250 mm），设溢流口（标高高于绿地0.1 m），暴雨时超量雨水通过溢流口排至管网，年渗透量提升40%~50%。

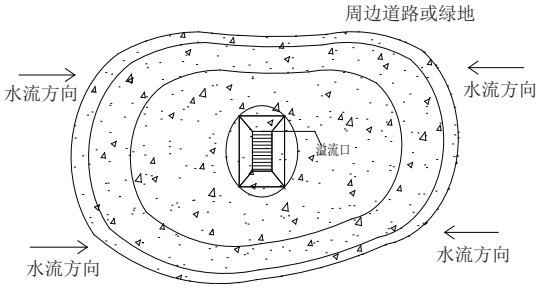


图2　下凹绿地平面示意图

（4）多功能景观水池与蓄水池。

a. 设计原则：结合小区景观规划，水池容积按“10年一遇24 h降雨量”计算。

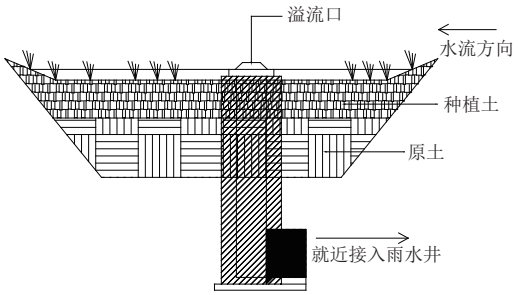


图3　下凹绿地剖面示意图

b. 功能分区：前部为沉淀池（去除泥沙），中部为景观水体（种植水生植物净化），后部为蓄水池（存储净化雨水）。

c. 回用场景：净化雨水用于绿化灌溉、景观补水，污染较重雨水用于车辆清洗、路面冲洗。

3　材料选择与系统工作原理

3.1　关键材料选择标准

基于“耐腐蚀、耐磨损、长寿命、环保”原则，核心材料选型如表2所示，确保系统寿命不小于15年。

表2　雨水收集回用系统关键材料选型

部件名称	材料类型	规格参数	性能优势
雨水斗/格栅	304不锈钢	DN100/孔径5 mm	耐潮湿腐蚀，抗拉强度≥520 MPa
收集/回用管道	HDPE管	DN50 ~ DN300	柔韧性好，抗冲击强度≥20 kJ/㎡
储水池	C30混凝土+PVC防水卷材	抗渗等级P6/厚1.5 mm	渗透系数≤1×10^{-8} m/s，防渗漏
滤罐	玻璃钢	直径1.2 m，高度2.5 m	密度1.8 ~ 2.0 g/cm³，耐酸碱腐蚀
变频泵叶轮	316不锈钢	流量10 m³/h，扬程30 m	耐泥沙磨损，屈服强度≥205 MPa
透水铺装基层	5 ~ 8 mm砾石——透水混凝土	基层厚度300 mm	孔隙率15% ~ 20%，渗透系数≥1×10^{-3} m/s

3.2　系统工作流程

降雨初期（0~2 mm）：屋面、地面雨水经收集装置汇入弃流井，暂存初期污染雨水。

降雨中后期（＞2 mm）：弃流井满后切换至过滤系统，雨水依次经机械格栅→砂滤罐→活性炭滤罐→紫外线消毒器，进入地下储水池。

回用阶段：雨水控制柜根据水位（≥1.0 m）与水质（浊度≤5 NTU），启动变频泵，将雨水输送至绿化、道路或卫生间。

溢流与维护：储水池水位不小于2.3 m时，超量雨水经溢流阀排入长兜港支流；每月排空储水池清淤1次，每季度更换活性炭1次。

4　综合效益评估

4.1　环境效益

（1）内涝防控。针对苕溪工程核心区域彩虹广场的汇水分区（汇水面积2 382.04 m²），为5年一遇24 h降雨（降雨量100 mm）条件下的单次降雨径流量数据。改造前，径流量采用原下垫面综合径流系数0.795 3计算，按$W=1\ 000\times C\times P\times F$（$W$为径流总量，$C$为径流系数，$P$为降雨量，$F$为汇水面积）计算得径流量1 150 m³。改造后，通过低影响开发设施优化下垫面，径流系数降低，实测结合SWMM模型验证得径流量820 m³，径流总量削减28.7%，实现该降雨条件下无积水。小区LID设施使内涝发生频率下降60%。

（2）污染削减。苕溪工程面源污染物削减率61.6%（SS平均值8 mg/L，COD平均值35 mg/L），减少入长兜港污染负荷约0.2 t/年；小区植被浅沟与下凹绿地SS去除率不小于70%。

（3）生态保护。透水铺装与绿地年渗透量约500 m³，补充地下水，缓解地下水位下降趋势；屋顶绿化覆盖率提升15%，改善小区微气候。

4.2　经济效益

以苕溪清水入湖河道整治后续工程（湖州开发区段二期）彩虹广场项目为例，系统初期投资约18万元，项目年回用水量1 386 m³为实测年回用总

量。该数据通过储水池液位监测、回用管网计量统计得出，主要用于绿化灌溉、道路清洗与商业体厕所冲厕，按当地自来水价 3.2 元/m^3 计算，年节省水费 4 435 元；旋流分离器优化后，砂滤罐反洗次数减少 50%，年节省反洗水费与电费约 800 元。雨水利用占比约为 41.9%，表明该区域雨水资源化利用潜力较高，低影响开发设施可有效截留利用降雨径流。此外，项目可减少内涝导致的商业体停业损失，预计年减少间接损失约 12 765 元，综合年收益约 18 000 元，初期投资 10 年可收回。小区年回用雨水约 800 m^3，年节省水费 2 560 元，同时提升小区房产价值约 5%~8%。

4.3　节能环保效益

（1）节能。雨水回用替代自来水，减少自来水厂取水、输水能耗（约 0.2 kW·h/m^3），年节能约 277 kW·h（苕溪工程）。

（2）减排。减少污水处理量，降低污水处理厂 CO_2 排放（约 0.5 kg/m^3），年减排 CO_2 约 693 kg（苕溪工程）。

（3）资源循环。实现雨水“取之自然、用之自然”，推动城市水资源循环利用，符合“双碳”目标。

5　结论与建议

5.1　研究结论

基于海绵城市理念的雨水收集回用技术体系（“收集—过滤—存储—回用”）可有效解决城市水资源紧缺与内涝问题，在河湖周边工程（如苕溪项目）与城市小区中均具有良好适用性。

关键技术参数（如下凹绿地深 200 mm、旋流器直径 150 cm、储水池容积 100 m^3/万 m^2）可作为同类项目设计参考，确保系统效能（年径流控制率≥75%，污染物削减率≥60%）。

该技术体系具有显著的环境效益、经济效益与节能环保效益，初期投资可通过长期节水与运维成本节约收回，具备规模化推广条件。

5.2　优化建议

（1）技术层面。研发低成本滤料（如改性生物炭）替代活性炭，降低运维成本；结合物联网技术，实现系统远程监控与自动运维。

（2）政策层面。将雨水回用率纳入城市规划强制性指标，对海绵城市项目给予财政补贴（如初期投资的 10%~15%）。

（3）应用层面。针对北方寒冷地区，优化存储设施保温设计；针对高密度城市，探索“地下空间+雨水回用”复合利用模式。

参考文献：

[1] GB 50400—2016 建筑与小区雨水控制及利用工程技术规范 [S].
[2] 车伍，李俊奇，刘燕. 海绵城市建设指南解读与实践[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2020：89-105.
[3] 周玉文，李海燕，王浩正. 河湖周边区域雨水回用系统设计关键技术[J]. 给水排水，2022，48（5）：45-50.
[4] 浙江省水利厅. 苕溪流域水生态环境保护规划（2021—2030 年）[R]. 杭州：浙江省水利水电勘测设计院，2021.
[5] 陈建刚，张书函，丁跃元. 城市雨水利用技术体系与关键设备[J]. 水利学报，2020，51（增刊 1）：123-129.
[6] 张炜，车伍，赵杨. 初期雨水弃流装置的工程适配性设计[J]. 中国给水排水，2019，35（12）：87-91.
[7] 王鹏，刘敏，侯立柱. 透水铺装在河湖周边海绵工程中的应用优化[J]. 中国市政工程，2021（3）：34-37.
[8] 湖州气象局. 湖州市近 10 年降雨特征分析报告[R]. 湖州：湖州市气象服务中心，2023.
[9] 车伍，李俊奇，赵杨. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建（试行）解读[M]. 北京：中国建筑工业出版社，2015.
[10] 冯伟杰. 雨水的资源化利用研究进展[J]. 水污染及处理，2025，13（2）：25-33.
[11] 杜翠亭，杜昊霖. PP 模块集水带雨水收集利用系统在海绵城市中的应用[J]. 花卉，2025（7）：94-96.
[12] 张利民，彭赤焰，杜建康，等. 海绵城市理念下雨水系统构建：以合肥某新区为例[J]. 给水排水，2025，51（22）：33-38.
[13] 李涛. 海绵城市背景下屋面雨水收集系统优化设计研究和效益评估[D]. 北京：清华大学，2024.