

蓄水型生态滤池多目标设计优化与工程实践

鲍子薇¹, 王磊¹, 仝凯¹, 郑宏付²

(1. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210000; 2. 中新南京生态科技岛投资发展有限公司, 江苏 南京 210000)

摘要: 针对城市初期雨水高污染负荷间歇排放、河道水体低污染负荷持续排放和雨洪调蓄多目标协同难题, 以中新南京生态科技岛海绵公园为例, 开展蓄水型生态滤池的优化设计研究。采用“沉淀+蓄滞+过滤+净化”工艺和“高位+低位”滤池组合, 通过设置多种蓄水深度, 最大程度利用池体的蓄滞空间, 结合工艺特点构建多工况协同运行模式。运行监测结果表明, 蓄水型生态滤池出水水质稳定达到地表准Ⅲ类标准, 排水能力由3年一遇提升至10年一遇, 年雨水回用量约3万m³。该设计显著提升了生态敏感区的水系统韧性, 实现了雨洪调控、水质净化与景观科普的多功能融合, 可为类似项目提供技术参考。

关键词: 生态滤池; 初期雨水; 净化技术; 多目标优化

中图分类号: X522; X703; TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0313-06

Multi-objective Design Optimization and Engineering Practice of Storage-type Ecological Filters

BAO Ziwei, WANG Lei, TONG Kai, ZHENG Hongfu

(1. China Design Group Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 2. Sino-Singapore Nanjing Eco Hi-Tech Island Investment and Development Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Aiming at the multi-objective coordination challenges, such as intermittent discharge of urban initial rainwater with high pollution load, continuous discharge of river water with low pollution load, and rainwater flood regulation and storage, taking the Sponge Park of Sino-Singapore Nanjing Eco-tech Island as an example, the optimization design research is conducted on storage-type ecological filters. The combination of “sedimentation – storage – filtration – purification” process and the “high-level + low-level” filters is adopted. By setting multiple water storage depths, the storage space of the tank is maximized. A multi-condition coordinated operation mode is constructed in combination with the process characteristics. The operation monitoring results show that the effluent quality of the storage-type ecological filters stably meets the Quasi-Class III Standards for surface water. The drainage capacity is upgraded from a once-in-3-year standard to a once-in-10-year standard, and the annual rainwater reuse volume is about 30 000 m³. This design significantly improves the water system resilience of the ecologically sensitive area, realizes the multi-functional integration of rainwater flood regulation, water purification and landscape science popularization, which can provide technical reference for similar projects.

Keywords: ecological filter; initial rainwater; purification technology; multi-objective optimization

0 引言

随着我国城市化进程加快,下垫面硬化率不断提高,导致径流总量增加、峰值流量加大及面源污染

加剧等一系列水环境问题^[1]。海绵城市建设作为系统性应对策略,旨在通过“渗、滞、蓄、净、用、排”等技术手段,恢复城市自然水文循环^[2]。生态滤池作为绿色基础设施,在雨水净化与河道水质提升中具有显著生态效益及应用潜力^[3-4]。目前国内外对生态滤池的研究应用已较广泛,欧洲以德国为代表,依托成熟的雨洪管理系统,将蓄水型生态滤池广泛应用

收稿日期: 2025-12-09

作者简介: 鲍子薇(1986—), 男, 本科, 高级工程师, 从事城市污水处理、城市内涝治理及海绵城市等方面工作。

于合流制溢流污染控制和分散式雨水处理,突显“滞留—过滤—净化”复合功能^[5]。国内研究多集中于垂直接、水平流人工湿地在尾水深度处理、农村污水治理及河道生态修复中的应用^[3,6]。针对高污染负荷、间歇排放特点的城市初期雨水和持续流动、低污染负荷特征的河道水体协同处理,并兼顾雨洪峰值调蓄的复合型生态滤池系统研究较为薄弱^[7]。现有设计多参照单一功能人工湿地参数,缺乏多目标、多工况协同运行的系统优化及量化设计方法^[7-8]。

在海绵城市全面推进过程中,随着雨水花园、下沉式绿地等渗透型海绵设施的广泛应用,雨水集中入渗对地下水土环境的潜在污染影响也日益受到关注。特别是在生态敏感区域,需在净化雨水的同时,兼顾环境承载力的限度,避免污染物迁移对地下水造成二次污染。因此,在海绵工程的建设中,需要实现海绵功能和地下水环境保护的协同。

中新南京生态科技岛作为长江生态敏感江岛,对排水安全、水质保障及生态景观有严格要求,单一功能海绵设施难以满足其复合需求^[9]。本研究依托该岛海绵公园建设,开展多目标协同的蓄水型生态滤池优化设计,主要创新点体现在:①功能集成,将初期雨水处理、河道旁路净化与雨洪调蓄功能整合,通过工况切换实现高效运行;②参数优化,对滤池规模、调蓄水深、蓄滞容积及结构层配比等关键参数进行优化选择;③系统联动,构建生态滤池与市政雨水设施的动态协同机制,提升区域排水韧性^[10]。本研究旨在弥补多目标生态滤池设计的研究短板,为生态敏感区海绵城市建设提供可复制的工程范例。

1 项目概况

海绵公园位于南京市建邺区江心洲中新南京生态科技岛,南邻星影街,西靠中新大道,北侧和东侧分别紧邻发展水道和跃进水道,占地面积 1.65 hm²,服务面积 7.77 hm²,自 2021 年开始建设至 2023 年竣工验收投入运行,总投资约 2 200 万元。项目融合海绵城市和雨洪管理理念,因地制宜配置海绵设施,收集处理片区初期雨水,实现“灰色+绿色”基础设施的生态协同^[11]。建成后,年径流总量控制率达 92%、SS 去除率达 77% 以上,出水水质达到地表准Ⅲ类标准,显著提升了片区排水能力,改善了江心洲内河水质,已成为周边居民休闲娱乐的重要场所。蓄水型生态滤池位于海绵公园的北侧临河区域,总面积约为 750 m²,是海绵系统的核心处理单元,承担初期雨水

处理、河水净化和雨洪峰值调蓄的多重功能。

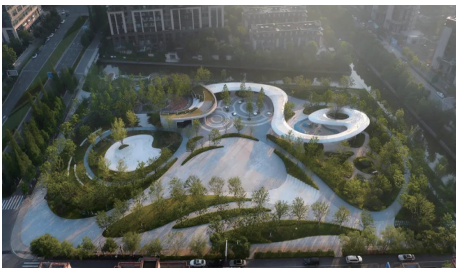


图1 海绵公园实景图

2 总体设计

2.1 服务范围

海绵公园占地面积约 1.65 hm²,服务范围为市政雨水主管对应汇水区域,总面积约 7.77 hm²,划分为 6 个汇水分区(见表 1),雨水径流经 DN600~DN1200 管道收集转输,最终汇入发展水道(见图 2)。汇水范围下垫面以建筑屋面、市政道路和绿化用地为主,综合径流系数为 0.55。

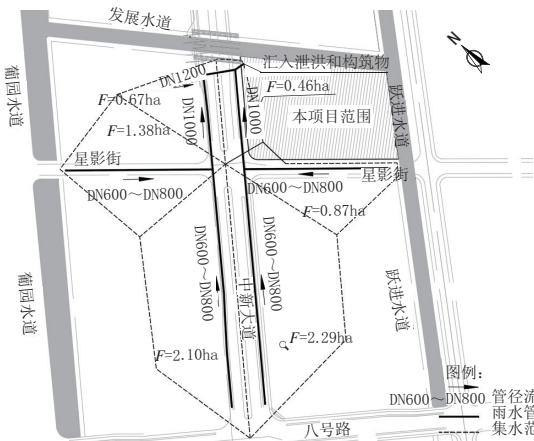


图2 海绵公园项目雨水汇水范围图

表1 雨水汇水分区指标一览表

分区序号	汇水面积/ha	雨水管径/mm	备注
F1	2.29	DN600~DN800	起始端
F2	2.1	DN600~DN800	起始端
F3	0.87	DN600~DN800	起始端
F4	1.38	DN600~DN800	起始端
F5	0.67	DN1000	转输段
F6	0.46	DN1000	转输段
排河段	7.77	DN1200	出水口

2.2 工艺设计

海绵公园工艺设计按照降雨的过程分为 3 种工况^[12]。降雨的初期,以径流总量控制和收集处理地块初期雨水为主(见图 3);超标降雨时,海绵设施功能趋于饱和状态,此时启动生态滤池的调蓄功能,协同市政雨水管道系统进入到蓄排模式;降雨结束后,启用生态滤池的净化功能,对北侧河道水质进行旁

路净化处理(见图4)。

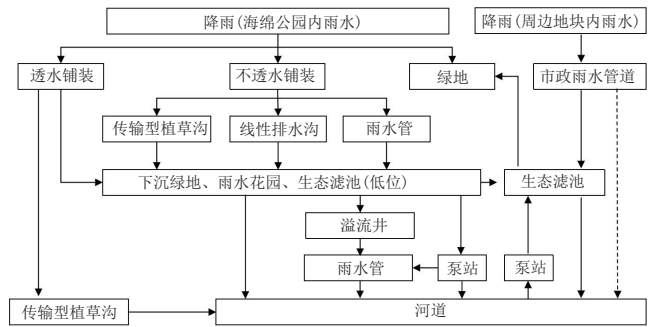


图3 径流总量控制和初雨收集工艺路线图

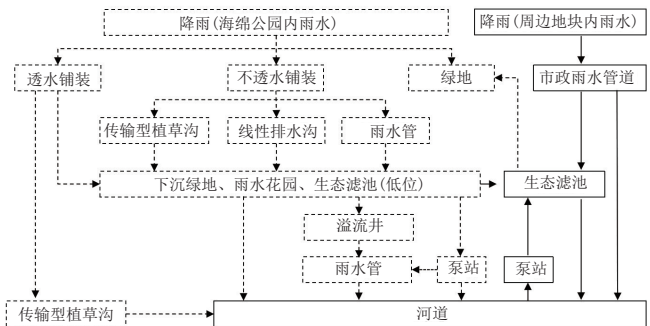


图4 雨量峰值调蓄和河道旁路净化工艺路线图

3 工程设计

海绵公园共布置透水铺装 2 737.60 m²,雨水花园 778.40 m²,下沉绿地 263.70 m²,传输型植草沟 41.00 m²,生态滤池 738.08 m²。措施增加后公园径流系数为 0.45,调蓄总容积 653.60 m³,年径流总量控制率达到 92% 以上,满足规划要求。海绵设施设计依据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建》计算^[1],本文不做详述,重点对蓄水型生态滤池设计进行探讨。

3.1 规模计算

3.1.1 滤池处理规模

初期雨水调蓄容积依据《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)计算^[12]:

$$V=10DF\Psi\beta \tag{1}$$

式中: V 为调蓄池有效容积,m³; D 为单位面积调蓄深度,mm,按降雨量计,可取 4~8 mm; F 为收集面积,hm²; Ψ 为径流系数; β 为调蓄池容积计算安全系数,可取 1.1~1.5。

项目雨水收集面积为 7.77 hm²,单位面积调蓄深度取为 8 mm,径流系数按照 0.6 取值,调蓄池容积计算安全系数取为 1.3,调蓄池有效容积不小于 480 m³。

生态滤池设计规模参考德国水协标准 DWA-A 102^[5]和国内相关研究^[11]:

$$Q_p=C_R\cdot I\cdot A_b \tag{2}$$

式中: Q_p 为最大流量,m³/h; C_R 为径流系数; I 为所采用的汇水区域的平均雨强,m/h; A_b 为汇水面积,m²;

径流系数 C_R 根据设计降雨重现期和汇水区土地利用性质进行取值,也可由下式根据汇水区非透水面积比值 k 计算^[5]:

$$C_R=0.05+0.009k \tag{3}$$

汇水面积 A_b 为 7.77 ha,汇水区域的平均雨强取为 8 L/(s·ha),汇水区非透水面积比值 k 根据汇水区下垫面解析,取值为 0.5,经计算最大流量 Q_p 为 110 m³/h。

进水水质参考住宅及商业用地污染物负荷,设计降雨径流 TP 平均进水浓度 $C_{i(TP)}$ 取为 0.25 mg/L,设计降雨径流 TN 平均进水浓度 $C_{i(TN)}$ 取为 2.40 mg/L,取值参考不同土地利用性质汇水区的年平均径流浓度和单位面积污染负荷率^[11]。

出水水质参考地表Ⅲ类水体主要指标, TP 平均出水浓度 $C_{o(TP)}$ 取为 0.2 mg/L, TN 平均出水浓度 $C_{o(TN)}$ 取为 1.0 mg/L。生态滤池对污染物的削减负荷取值参考垂直潜流人工湿地,采用污染物削减负荷(N_A)计算生态滤池面积^[4]:

$$A=Q(S_o-S_i)/N_A \tag{4}$$

式中: A 为表面积,m²; N_A 为污染物削减负荷(以化学需氧量、氨氮、总氮和总磷计),g/(m²·d); Q 为设计流量,m³/d; S_o 为进水污染物浓度,g/m³; S_i 为出水污染物浓度,g/m³;

以 TP 计算,生态滤池表面积为 536 m²,以 TN 计算,生态滤池表面积为 470 m²,结合项目的实际用地情况,生态滤池表面积取为不小于 610 m²。

3.1.2 河道旁路处理规模

非雨季时段,对公园北侧河道水体进行旁路净化,依据生态环境部发布的《人工湿地水质净化技术指南》^[13]设计。进水水质按照地表Ⅳ类标准,出水执行地表Ⅲ类标准。设计规模 850 m³/d;水力停留时间 0.8 d,生态滤池实际表面积 750 m²,校核表面水力负荷 1.39 m³/(m²·d)。详细数据如表所示。

3.1.3 调蓄容量与重现期核算

调蓄系统由开放式雨水净化池及高、低位生态滤池组成,总调蓄容积约 572 m³。依据《城镇雨水调蓄工程技术规范》(GB 51174—2017)^[12],通过脱过系数法核算:

$$V=f(a)\cdot W \tag{5}$$

其中:

表2 生态滤池处理河水工况下技术参数一览表

序号	生态滤池及附属设施	面积/ m ²	水深/ m	水力 停留 时间/d	处理 规模/ (m ³ ·d ⁻¹)	校核表面 水力负荷 m ³ /(m ² ·d)
1	泄洪构筑物	24	/			
2	开放式雨水净化池	24	2.00			
3	蓄水型高位生态滤池	310	1.00	0.8	850	1.39
4	蓄水型低位生态滤池T1	106	0.66			
5	蓄水型低位生态滤池T2	218	0.66			

$$f(a) = \left[- \left(\frac{0.65}{n^{1.2}} + \frac{b}{t} \cdot \frac{0.5}{n + 0.2} + 1.10 \right) \lg(a + 0.3) + \frac{0.215}{n^{0.15}} \right] \tag{6}$$

$$W = Q \cdot t \tag{7}$$

式中:V为调蓄设施有效容积,m³;a为脱过系数,取值为调蓄设施下游设计流量(Q′)和上游设计流量之比(Q);Q为调蓄设施上游设计流量,m³/min;t为相应集流时间,min;b、n为暴雨强度公式参数。

项目转输管道最长约380 m,调蓄池后出水管道直径为DN1200,坡度为0.001。系统运行后,排水标准由3年一遇提升至10年一遇,显著增强区域防涝能力^[10],如表3所示。

表3 生态滤池蓄排联动技术参数一览表

序号	降雨重现期P/a	调蓄前设计流量Q/(m ³ ·s ⁻¹)	调蓄后设计流量Q′/(m ³ ·s ⁻¹)	脱过系数/a	所需调蓄容积V/m ³
1	3	1.20	0.96	0.80	135.68
2	5	1.38	0.96	0.70	302.00
3	9	1.58	0.96	0.61	508.06
4	10	1.62	0.96	0.59	546.42

3.2 构筑物设计

本次生态滤池由泄洪构筑物(雨量分配井)、开放式雨水净化池、高位蓄水型生态滤池、低位蓄水型生态滤池、低位蓄水型生态滤池、泵井组成(见表4);多工况处理工艺路线(见图5)。

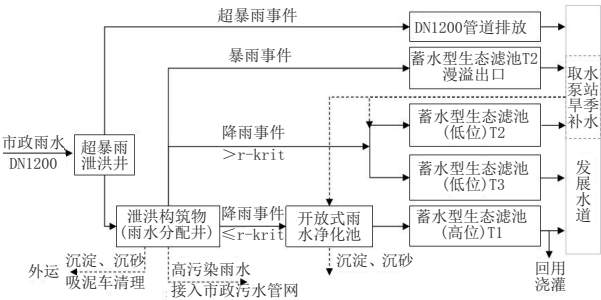


图5 蓄水型生态滤池处理工艺路线图

表4 生态滤池建构筑物一览表

序号	名称	尺寸	单位	数量	备注
1	泄洪构筑物(雨量分配井)	6.90 m×3.10 m	座	1	/
2	开放式雨水净化池	6.90 m×3.10 m	座	1	调蓄
3	蓄水型生态滤池(高位)	310 m ²	座	1	调蓄
4	蓄水型生态滤池(低位)	106 m ²	座	1	调蓄
5	蓄水型生态滤池(低位)	218 m ²	座	1	调蓄
6	1#和2#泵井	/	座	2	/

3.2.1 泄洪构筑物(雨量分配井)

泄洪构筑物承担雨量分配的作用,为椭圆形钢筋混凝土结构(见图6),尺寸为π×4 m×1.9 m,面积为24 m²,内设沉砂池截留粗颗粒杂质;构筑物南侧设置3台潜水提升泵,对水位2.20~3.80 m之间进行梯级提升;出水堰通过液压平板闸控制水位,3.80~4.06 m之间进入低位生态滤池配水渠道,暴雨时水位高于4.06 m,通过暴雨溢流堰流出进入河道;为了方便维修和清淤,构筑物设有装配口和检修人孔^[14]。

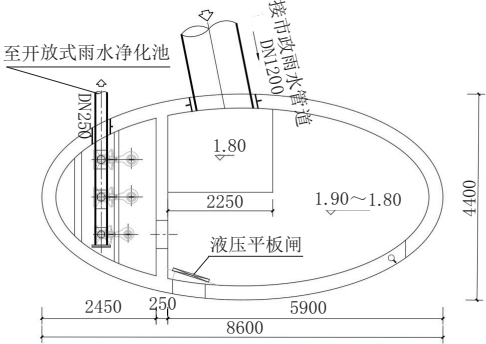


图6 泄洪构筑物平面布置图(单位:mm)

3.2.2 开放式雨水净化池

开放式雨水净化池为π×4 m×1.9 m的椭圆型构筑物(见图7),面积为24 m²,有效水深2.0 m。设计在入水口处设置折流板减缓流速,在出水口设置潜水板拦截漂浮物^[13]。水体在池内完成沉淀后,上清液经自流堰进入高位蓄水型生态滤池,底部沉积物由污水泵排入市政污水管道^[15]。

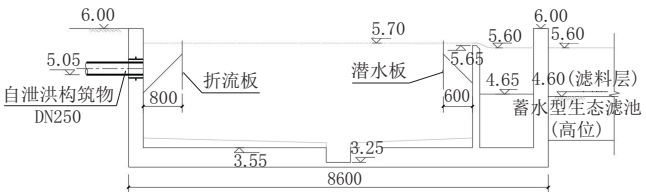


图7 开放式雨水净化池剖面图(单位:mm)

3.2.3 蓄水型生态滤池

蓄水型生态滤池承担蓄滞和净化双重功能,通过物理过滤、吸附与生物降解等协同作用去除污染物^[4,14],同时雨水被暂时蓄滞后缓慢处理排出。一方面,通过砂砾表面的过滤作用将未溶解的固体物

质物理分离,截留在砂层表面;另一方面,与过滤滤料发生化学反应,将溶解物从水中长期或暂时的被去除。在滤料的颗粒表面生长的细菌,以水中的污染物质为养分,细菌通过消耗氧气将有机污染物(chemical oxygen demand, COD)分解为二氧化碳和水^[6]。芦苇为生态滤池的主要植物,为滤层中的细菌提供部分养分,同时芦苇根系发达,可以阻止滤料表面板结,为微生物膜提供附着基,强化硝化反硝化作用^[12,14],同时其自身也有一定的水体净化功能^[3]。本次工程设置一组高位蓄水型生态滤池和两组低位蓄水型生态滤池(见图8)。

3.2.3.1 布水和收水系统

高位蓄水型生态滤池设有一道 1 m×0.5 m 的配

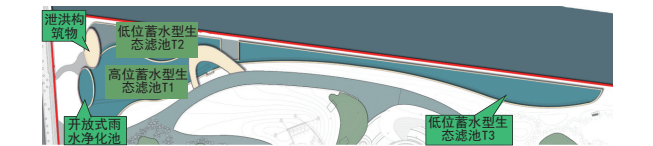


图8 蓄水型生态滤池系统平面布置图

水渠和与其连接的 16 根 DN100 布水管道,实现均匀配水。布水管道末端设置水工石,以防止冲刷砂面^[13]。收水管道通过每隔 2 m 交错铺设的 DN150 渗水管道,汇入 DN300 的收水主管,后排入北侧河道。低位蓄水型生态滤池 T1 和 T2 设有一道 0.7 m×0.5 m 的配水渠和与其连接的 25 根 DN100 管道用于排水,1 根 DN300 排水集水管用于收水,后排入北侧河道。蓄水型生态滤池收水系统,如图9所示。

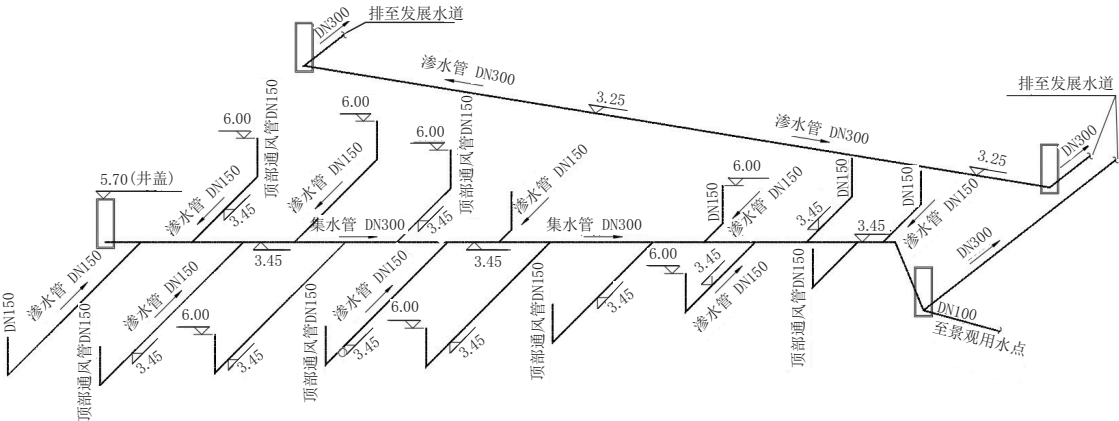


图9 蓄水型生态滤池收水系统图

3.2.3.2 蓄水深度和滤层参数

蓄水型滤池通过设置不同水位组合,满足多种工况下的调蓄容积需求,高位滤池一般蓄水深度为 1.0 m,超高蓄水深度为 1.3 m;低位滤池蓄水深度为 0.66 m。生态滤池由找平层、排水层、过滤层组成(见图10),每个结构层衔接需满足对应的级配要求:找平层,厚度 50 mm,中粗砂(粒径 0.25~2 mm);排水层,厚度 300 mm,厚圆砾石(粒径 2~8 mm);过滤层,厚度 1 300 mm,厚滤砂(粒径 0.25~2 mm),相关参数如表5所示。

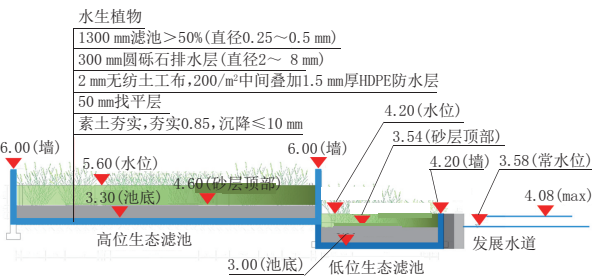


图10 蓄水型生态滤池平面和剖面布置(单位:m)

考虑到蓄水深度较大可能带来的污染物迁移风险,设计中采用了双层防渗土工布夹 HDPE 防水层

表5 生态滤池砂砾技术参数一览表

编号	项目	指标
1	有效粒径/%	≥80
2	有效试件极限抗压强度/MPa	≥30
3	真密度/(t·m ⁻³)	2.5~2.8
4	堆积密度/(t·m ⁻³)	1.4~1.7
5	空隙率(堆积)/%	≥39
6	转化系数	≥0.75
7	含泥量/%	≤1

的复合防渗结构,有效阻隔污染物下渗,确保不增加地下水土环境负荷^[16]。系统运行监测表明,污染物去除效果稳定(见表6)。

表6 蓄水型生态滤池对污染物的去除效果一览表

序号	污染物指标	去除率/%
1	可过滤固体物含量	90
2	化学需氧量	85
3	铵态氮含量	80
4	磷酸盐含量	75
5	病原体含量	90

3.3 景观设计

滤池上部设置观景平台,对生态滤池构造进行

科普展示,通过科普滤池剖面,观察各滤层的功能及植物生长的状态。在植物的配置方面,主要选用芦苇、再力花、路易斯安拉鸢尾、美人蕉、香蒲、花叶芦竹等,保证净化环境功能的同时兼顾美观性^[14,16]。

4 设计特点

4.1 多工况协同运行与动态适应设计

针对初期雨水间歇高污染与河道水持续低负荷的特性,创新性地采用了“一池多用、工况切换”的动态适应设计。通过“1座高位滤池+2座低位滤池”的组合,配合可调节的堰门与泵控系统,实现了3种模式的无缝切换:初雨处理模式、雨洪调蓄模式及河道旁路净化模式。设计通过调节生态滤池的有效水深,在净化单元与调蓄空间之间实现功能转换,突破传统人工湿地功能单一的局限,在有限用地内实现了处理目标、水力负荷与净化效能之间的精准匹配。

4.2 “绿-灰”设施联动与系统韧性提升

项目构建了蓄水型生态滤池(绿色基础设施)与市政雨水管网(灰色基础设施)的动态协同调控机制。在雨洪调蓄模式下,生态滤池作为分布式调蓄节点,通过实时水位感知和预泄调控,与下游管网系统联动运行。基于蓄水容积的精细化设计,使系统能够在不同重现期降雨下,智能分配绿灰设施的排水负荷,将区域排水能力从3年一遇提升至10年一遇,显著增强了城市雨水管道系统应对极端降雨的韧性。

4.3 全流程资源化与能效耦合设计

系统贯穿了“源头减量—过程控制—末端回用”的全流程资源化管理理念^[13]。净化后的雨水与河水通过独立回用管网,100%用于公园内绿化浇灌与道路冲洗,年节约自来水约3万m³。滤池上部空间与科普景观有机结合,形成了低能耗、自维持的“植物-微生物”共生净化系统^[15]。实现环境、经济和社会教育的深度融合。

5 指标和成效

5.1 指标完成情况

项目建成后,开展了2年多的运行监测,各项指标均达到或优于规划要求(见表7)。补充性指标包括:初雨收集处理量为8mm/hm²,出水水质稳定达到地表准Ⅲ类标准;雨洪峰值调蓄指标,提高雨水排放标准至10年一遇;科普教育指标,通过设置展示区、示范站点进行海绵城市宣传。

5.2 综合效益

项目先后获得2023年度江苏省“乐享园林”民生

表7 海绵城市目标完成值表

序号	管控目标	规划值	设计值	施工完成值
1	年径流总量控制率/%	92.00	92.00	93.60
2	SS去除率/%	72.00	77.76	77.76
3	下凹式绿地率(引导性)/%	30.00	14.41	15.94
4	透水铺装率(引导性)/%	50.00	33.92	37.89
5	初雨收集处理(补充性)	—	收集量8mm/hm ² ,处理后达地表准Ⅲ类标准	
6	提高雨水排放标准(补充性)	3	10	
7	科普教育(补充性)	—	设置展示区和示范点	

实事项目、“南京市群众最喜爱的口袋公园”及“2024年度江苏省海绵城市示范项目”等荣誉。接待国内外考察交流20余次,社会反响良好,实现了生态处理、景观融合与科普教育的有机结合。

6 结论

蓄水型生态滤池是应对多目标水环境问题的有效解决方案。采用“沉淀+蓄滞+过滤+净化”一体化工艺与“高位+低位”模块化组合,可协同解决初期雨水处理、河道水质净化与雨洪峰值调蓄等复杂问题。系统通过动态工况切换,实现对不同来水水质与水文条件的灵活适应,出水水质稳定达到地表水准Ⅲ类标准。

合理的设计参数与系统联动机制显著提升综合效能。通过对滤料级配、水力负荷、有效水深等关键参数的匹配优化,以及构建生态滤池与市政管网的“绿-灰”联动机制,系统在保障优异净化效果的同时,将区域排水防涝标准从3年一遇提升至10年一遇,年雨水资源化回用量达3万m³,全方位增强水系统的安全性、生态性与资源循环能力^[10]。

在生态敏感区海绵工程中,需高度重视雨水入渗对地下水土环境的潜在影响。研究通过防渗结构优化与水力负荷控制,兼顾雨水净化与地下水环境保护,体现了基于环境承载力的设计理念,为类似项目提供了重要参考。

本项目在中新南京生态科技岛的实践表明,蓄水型生态滤池在空间受限、生态要求高的江岛区域具有显著优势,为多目标生态滤池设计与生态敏感区海绵城市建设提供了可复制的技术范式。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.
- [2] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘. 低影响开发雨水系统设计原理与实践(2版)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.