

城市雨水管理

合流制溢流污染控制实践:以岳阳蛇皮套泵站为例

朱利民, 王 润, 李洪浩, 彭赤焰

(德国汉诺威水有限公司 常德代表处, 湖南 常德 415000)

摘 要: 岳阳市蛇皮套泵站及调蓄池改造工程是典型的合流制溢流污染控制工程,设计通过科学的管网水力模型与系统的水文建模分析,基于海绵城市建设理念,在排口末端采用调蓄池与生态滤池组合工艺处理溢流水,达到精准治污的效果,并将处理设施结合景观设施进行设计,将黑臭水体改造为海绵公园。介绍了项目的基本情况以及泵站、调蓄池、生态滤池的设计规模和运行工况,并对设计方案进行长历时水文模型验证。模拟结果表明,在经济允许的情况下,采用该工艺措施可使受纳水体的溢流污染得到一定的控制,单位硬化面积的溢流 COD 污染负荷低于 $250 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$,生态滤池出水 COD 平均值为 10.2 mg/L ,生态滤池溢流频次为 12.2 次/年 ,调蓄池截流的 COD 污染负荷为 $2\,343 \text{ t/a}$,生态滤池去除的 COD 污染负荷为 105 t/a ,分别占 COD 污染总量的 48.2% 和 2.2% ,而溢流污染量仅占 2.3% ,达到了一定的面源污染控制要求,生态环保效益明显。

关键词: 合流制溢流; 黑臭水体; 调蓄池; 生态滤池; 水文模型

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)01-0099-06

Combined Sewer Overflow Control Engineering Practice: A Case Study of Shepitao Pumping Station in Yueyang City

ZHU Li-min, WANG Run, LI Hong-hao, PENG Chi-yan

(Changde Office, Wasser Hannover GmbH, Changde 415000, China)

Abstract: Shepitao pumping station and storage tank reconstruction project in Yueyang City is a typical combined sewer overflow (CSO) control project. Based on the scientific drainage modeling and systemic hydrological modeling analysis and the concept of sponge city, the storage tank and retention biofilter at the end of drainage outlet were built in order to achieve accurate pollution control effect, and the treatment facilities were designed in combination with landscape facilities to transform the black odorous water body into a sponge park. The basic conditions, scale and operational conditions of the storage tank, pumping station and retention biofilter were introduced, and model verification through long-term rainfall hydrology simulation was carried out. The simulation results showed that, under the condition of economic permission, the CSO pollution of the receiving water body was controlled to a certain extent after adopting the process. The overflow COD pollution load per unit area was less than $250 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, the COD average concentration in the effluent of the retention biofilter was 10.2 mg/L , and the overflow frequency of the retention biofilter was $12.2 \text{ times per year}$. The COD pollution load intercepted by the storage tank was $2\,343 \text{ t/a}$, and the COD pollution load removed by the retention biofilter was 105 t/a , accounting for 48.2% and 2.2% of the total COD pollution load, respectively. The overflow pollution only accounted for 2.3% , indicating that certain requirements for non-point source

pollution control were achieved and the ecological and environmental protection benefits were obvious.

Key words: combined sewer overflow; black odorous water body; storage tank; retention biofilter; hydrological model

合流制溢流 (CSO) 污染是我国城市水环境恶化的主要原因之一, 近年来, 合流制排水系统溢流污染整治工作越来越受到重视, 并成为当前解决城市黑臭水体问题的重要任务^[1]。目前合流制溢流污染控制技术相对成熟, 常用的方法有人工湿地、调蓄沉淀池、水力旋流分离器、化学强化高效沉淀池以及后续的消毒等^[2]。对于工艺效果的验证评估, 数学模型法已成为 CSO 控制效果模拟评估的有效方法, 国外常用的模型有水文模型、水力模型和水质模型^[3]。岳阳市蛇皮套泵站及调蓄池改造工程采用调蓄池 + 生态滤池组合工艺控制集水区的溢流污染, 并在设计中采用长历时水文模型对溢流污染控制效果进行验证。

1 工程现状及问题

岳阳南湖是岳阳市中心城区的绿色心脏,是岳阳市民重要的休闲空间,近年来随着城市的发展,点源和面源污染导致南湖水环境恶化。南湖当前水质为地表Ⅳ类水,且时有蓝藻暴发情况,其主要污染源是合流制排口的溢流污染、污水厂尾水排放以及自身湖底底泥的回溶。岳阳市蛇皮套泵站及调蓄池位于岳阳主城区南部,南邻南湖,是岳阳市打造南湖三圈的重要节点,当下也是污染南湖水环境的节点。泵站服务区面积为 653 hm^2 ,集水区为高度硬化的老城区,人口密集;现状排水体制为合流制;现状排水系统由 3 条主要排水箱涵组成,分别为蛇皮套主涵、市政府主涵和金东门截污干管,见图 1。



图 1 蛇皮套集水区排水系统

Fig. 1 Drainage system of Shepitao catchment

蛇皮套泵站为雨污合流泵站,现状主体为露天调蓄池以及配套污水泵站和雨水泵站,污水泵站规模为 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,雨水泵站最大抽排能力为 $44\,880 \text{ m}^3/\text{h}$ 。旱季时,污水经排水箱涵收集后由污水泵站提升进入南津港污水处理厂;小雨时,由于污水泵站抽排能力以及下游污水厂处理负荷有限,过多的污水溢流至露天调蓄池;暴雨时,超过露天调蓄池调蓄能力的水溢流至南湖。当前存在的主要问题是:为了保护南湖水质,雨水泵站及溢流出口皆被封堵,不允许排放,暴雨时排水区域内存在内涝隐患;较高截流倍数的污水通过污水泵站、截污干管送入污水处理厂,造成下游污水处理厂进水量大、进水浓度低,污水厂处理效率低;调蓄水塘在常年运行下,水体厌氧发臭,夏季臭气熏天,蚊蝇滋生,水环境恶劣,对周边居民生活造成不良影响。

2 总体思路和目标

为了实现对蛇皮套节点水体环境的整治,彻底解决城市合流溢流水对南湖的污染问题,满足未来南湖地表Ⅲ类水的目标,打造一个优美的公共空间,建立一个高品质的滨湖景区,项目总体思路以解决南湖水质污染问题为导向,统筹整个集水区排水系统,在不额外增加截污干管截流倍数、保证污水厂进水负荷稳定的前提下,寻求南湖水质保障综合解决方案。基于海绵城市建设理念,通过对集水区管网和水文的实际测量调查,以及通过数学模型的科学计算分析,对排水系统进行改造,源头雨污分流,采用分散式海绵设施、绿色廊道等,消除管道薄弱点、内涝点;在管网排口末端,合理化改造现有污水泵房,采用调蓄池和生态滤池组合工艺,针对溢流混合水进行调蓄和生态处理,并结合水处理设施进行景观设计,提升整体景观效果。基于以上思路,项目实施的主要目标为:改造并消除管网系统中的水力拥堵管段,消除检查井冒溢点,排水管网系统达到3年一遇的排水标准(该部分内容不在本文做具体阐述);对混合水进行分质、分量处理,对浓度较高的污水进行收集后送往污水处理厂,对浓度较低的泄洪雨污水就地生态处理,生态滤池出水水质达到观赏性景观用水目标,同时减少排口的溢流频次,溢流

负荷和溢流体积。

3 工程整体布局

结合工艺运行要求,新建污水泵房 $6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,配套4台潜污泵,每台泵的流量为 350 L/s ,其中两台为调蓄池的放空泵,也作为污水泵的备用泵;新建调蓄池 $10\,000 \text{ m}^3$,设9个冲洗廊道,总尺寸为 $72.65 \text{ m} \times 42.8 \text{ m}$,采用全地下结构,顶部覆土,根据景观需求设计为公园;新建雨水生态滤池 $20\,000 \text{ m}^2$,分两格配水,出水采用4台潜水泵,每台泵的流量为 200 L/s ,处理后出水用于景观水体或排入南湖;维持现有雨水泵房,作为生态滤池的泄洪泵和放空泵,重新打开雨水泵房排放口。构筑物的设计规模保障在10年一遇工况下溢流和泄洪的安全。工程整体布局如图2所示。

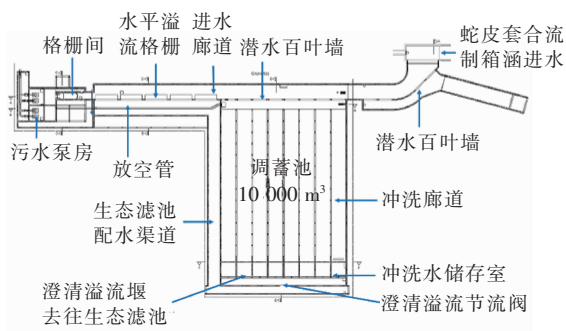


图2 工程整体布局示意

Fig. 2 Overall layout of the project

4 工艺运行工况

针对集水区不同降雨强度及对应的水质和水量变化情况,系统设计了5种运行工况,具体工艺流程如图3所示。

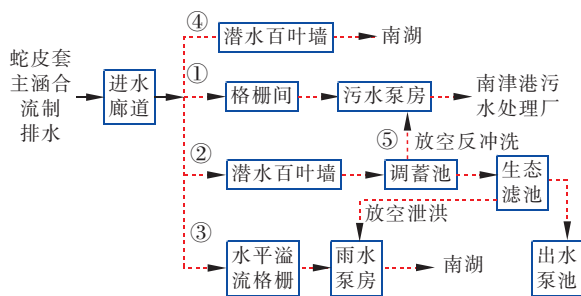


图3 工艺流程

Fig. 3 Flow chart of treatment process

工况①(晴天和小雨工况):箱涵来水量 $\leq 0.7 \text{ m}^3/\text{s}$,污水或雨污混合水(雨水基本上为初期雨水)通过调蓄池北侧的进水廊道的污水流槽输送进入西

侧新建的污水泵站,水泵通过变频器控制运行,可根据入水量相应调节送水量。通过压力管进入下游污水处理厂。

工况②(中雨和持续小雨工况): $0.7 \text{ m}^3/\text{s} <$ 箱涵来水量 $\leq 6.5 \text{ m}^3/\text{s}$,当被雨水稀释的雨污混合水量超过了污水泵的输送能力时,则通过调蓄池北侧的潜水百叶墙溢流进入调蓄池。调蓄池起到临时调蓄和沉淀的作用,雨污混合水中的可沉淀物质沉降下来。若降雨结束、来水量下降,调蓄池中储存的雨污混合水则通过放空管和放空泵排空,通过压力管进入下游污水处理厂;若持续降雨,调蓄池全部装满,发生溢流,沉淀后的水通过调蓄池南侧的澄清溢流堰溢流进入生态滤池,进行生态化处理。

工况③(强降雨工况): $6.5 \text{ m}^3/\text{s} <$ 箱涵来水量 $\leq 31.5 \text{ m}^3/\text{s}$,此时来水量远超过调蓄池的处理能力,西侧的溢流堰则开始溢流直接进入生态滤池进行处理,混合水进入生态滤池前,需要通过一道水平细格栅去除漂浮物。此时大量的水进入生态滤池进行调蓄和处理,超过生态滤池处理能力的水经过简单沉淀后直接溢流或通过雨水泵排入南湖。

工况④(暴雨工况):箱涵来水量 $> 31.5 \text{ m}^3/\text{s}$,箱涵来水量进一步增大,主要为雨水,污染物浓度低,超过了调蓄池和生态滤池的处理能力,为了防止上游检查井溢流,需要紧急溢流,此时雨水通过紧急溢流堰直接溢流进入南湖,为了防止漂浮物进入水体,同样设置一道潜水百叶墙,阻隔下来的漂浮物留在进水廊道中,通过格栅间收集。

工况⑤(放空反冲洗工况):降雨结束后,排水管道系统水位逐渐降低,调蓄池和生态滤池停止进水,污水泵房继续运行,水位降至晴天工况,调蓄池通过放空管和泵放空;放空后的调蓄池,底部沉积了大量的底泥,此时调蓄池端部的冲洗门打开,冲洗调蓄池廊道,冲洗的污水输送进入下游污水处理厂。生态滤池通过泵抽排放空,处理水可以作为景观用水或排放进入南湖。

至此,调蓄池、生态滤池和泵房完成了一个处理流程,迎接下一场降雨。

5 基于KOSIM的长历时水文模型验证

KOSIM是一款水文降雨-径流模型软件,由德国汉诺威水文研究所研发,通过实际降雨数据,可以对集水区内地处理构筑物进行单场次或长历时的实际水文模拟,可以得出真实降雨序列以及调蓄空间

的充满、放空过程中可能出现的叠加过程,计算并记录分析,从而得出水处理构筑物的实际运行效能,如验证调蓄池和生态滤池的设计规模、尺寸是否满足污染控制要求,包括溢流浓度、溢流频次、对水体造成的污染程度;复核生态滤池水力负荷是否满足运行要求、是否可以达到最优状态等。KOSIM 模拟包括水文模型的建立、参数的输入以及模拟结果的分析等步骤。

5.1 模型的建立

基于蛇皮套泵站集水区排水管网拓扑关系以及末端泵站、调蓄池和生态滤池组成的排水体系,搭建工程整改后的水文模型,如图4所示。

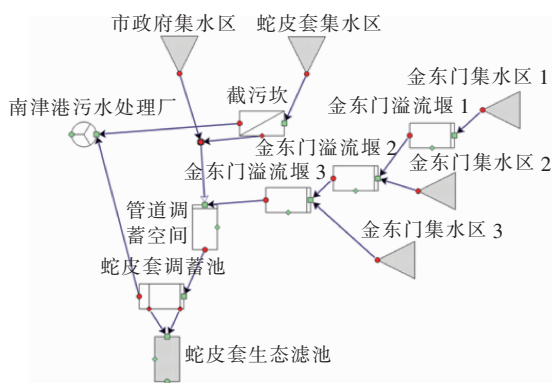


图4 蛇皮套泵站工程整改后的集水区水文模型

Fig.4 Hydrological model of catchment after reconstruction of Shepitao pumping station project

根据主干管网系统构架可以分为3个子集水区:蛇皮套集水区、市政府集水区及金东门集水区,蛇皮套主涵在进入泵站前设有截污坎,当管道水位高于1 m时,合流箱涵的混合水溢流进入截污干管,最终进入南津港污水处理厂。金东门集水区设有1条截污干管连接蛇皮套泵站,截污干管沿线设有3个污水溢流井,分别对应3个子集水区和排放点。市政府主涵、蛇皮套主涵及金东门截污干管汇合后,最终通过4.5 m×3.5 m的排水箱涵接入蛇皮套泵站。蛇皮套泵站配套10 000 m³的调蓄池和20 000 m²的蓄水型生态滤池,依据不同降雨条件和来水量情况,进行不同的运行工况。调蓄池蓄水位达到3 m后(即调蓄容积达到7 500 m³),混合水通过调蓄池澄清溢流,以恒定流量进入生态滤池;当调蓄池水位达到4 m时,混合水直接溢流进入生态滤池,生态滤池出水通过泵提升以固定的800 L/s的流量进行出流;生态滤池蓄水水位超过1 m时,雨水泵房开

启,泵房设有3台雨水泵,每台泵的抽排能力为4 156 L/s,水泵可以单独或者并联同时开启;生态滤池蓄水水位超过2.5 m时,生态滤池直接发生泄洪溢流进入南湖,以保证防洪安全。上述集水区、构筑物及设备参数都通过KOSIM软件内置参数来设定。

5.2 参数的输入

参数的输入包括:集水区下垫面信息,硬化区域和非硬化区域面积;雨季时的降雨参数,集水区径流生成指标及对应的污染负荷;旱季流量及不明来水量和污染物负荷。污染负荷根据该区域的污水处理厂在旱季和雨季时的平均进水浓度进行校准。根据实际建成项目的运行经验,确定调蓄池和生态滤池的处理效能,生态滤池以85%的COD去除率进行模拟,调蓄池对COD的沉淀去除率设为20%。

5.3 模拟结果

输入长历时降雨数据后,KOSIM软件通过数据迭代模拟即可输出模拟结果,这些结果包括构筑物的溢流污染物总量、单位硬化面积的溢流污染负荷、溢流量、溢流频次等,都是基于降雨数据年的统计平均值。不同构筑物年均溢流污染负荷的模拟结果如图5所示。

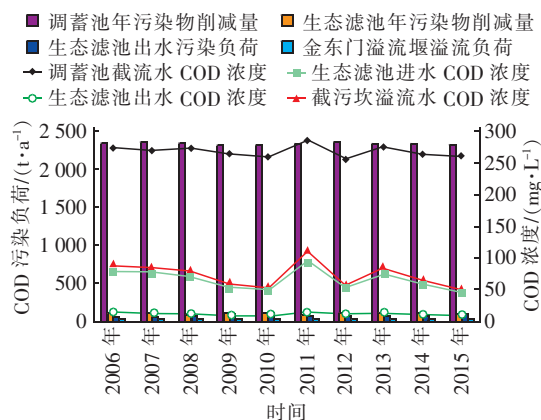


图5 不同构筑物年均溢流污染负荷的模拟结果

Fig.5 Simulation results of annual overflow pollution load of different structures

由图5可以看出,集水区产生的COD污染负荷为4 859 t/a,调蓄池截流的COD污染负荷为2 343 t/a,生态滤池去除的COD污染负荷为105 t/a,生态滤池排放进入水体的COD污染负荷为82 t/a,通过金东门3个溢流堰溢流进入水体的COD污染负荷为28 t/a,剩余的污染负荷通过污水泵站和截污管送入污水处理厂。折算单位硬化面积的溢流COD污染负荷为194.35 kg/(hm²·a),满足小于250

kg/(hm²·a)的控制要求(参照德国萨克森州环保部的规定)。调蓄池的调蓄沉淀对污染物的截流起重要作用,占比为 48.2%,生态滤池削减的污染负荷占比为 2.2%,排放进入水体的污染负荷占比为 2.3%。从水质上看,调蓄池调蓄和截流去往污水厂的 COD 平均浓度为 267.9 mg/L,生态滤池进水 COD 平均浓度为 66.0 mg/L、出水 COD 平均浓度为 10.2 mg/L,生态滤池在进一步提高溢流混合水水质方面起到了重要作用。

不同构筑物的年均进水频次和溢流频次模拟结果见图 6。

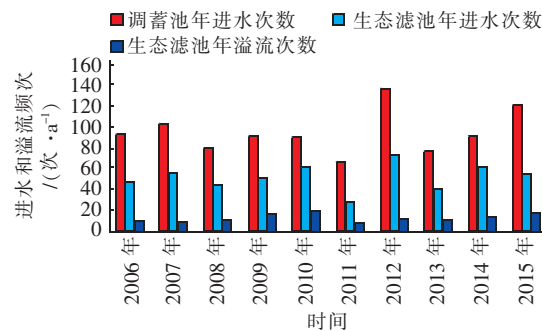


图 6 不同构筑物的年均进水频次和溢流频次模拟结果

Fig. 6 Simulation results of annual inflow frequency and overflow frequency of different structures

由图 6 可以看出,调蓄池年均进水次数为 95.6 次/a,2012 年进水次数最多,达到 137 次;生态滤池年均进水次数为 52.3 次/a,2012 年进水次数最多,

达到 75 次;生态滤池年均溢流次数为 12.2 次/a,2010 年溢流次数最多,达到 19 次。同时也发现,溢流频次和不同场次降雨强度、场次降雨间隔以及池体的放空时间有关,而与降雨次数无相关关系。

不同构筑物的年均进水量和溢流量模拟结果见图 7。可以看出,通过污水泵站、截污干管送往南津港污水处理厂的年均污水量为 1 687.5 × 10⁴ m³/a,由于调蓄池的调蓄作用,污水处理厂的进水流量相对稳定;调蓄池年均进水量为 1 177.5 × 10⁴ m³/a,生态滤池年均进水量为 307.6 × 10⁴ m³/a、年均处理水量为 189.26 × 10⁴ m³/a、年均溢流量为 114.93 × 10⁴ m³/a。

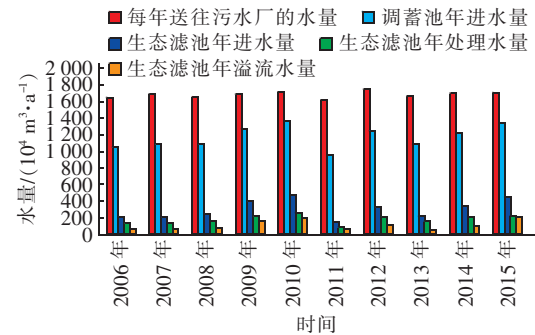


图 7 不同构筑物的年均进水量和溢流量模拟结果

Fig. 7 Simulation results of annual inflow and overflow of different structures

不同雨水泵开启数量下的年均溢流污染模拟结果见表 1。

表 1 不同雨水泵开启数量下的年均溢流污染模拟结果

Tab. 1 Simulation results of annual overflow pollution under different number of rainwater pumps

项 目	雨水泵开启数量/台			
	0	1	2	3
生态滤池出水污染负荷/(kg·a ⁻¹)	18 626	14 437	14 033	13 925
生态滤池溢流污染负荷/(kg·a ⁻¹)	63 198	91 127	93 819	94 538
生态滤池总排放污染负荷/(kg·a ⁻¹)	81 824	105 564	107 852	108 463
单位硬化面积的溢流污染负荷/(kg·hm ⁻² ·a ⁻¹)	194.35	236.22	240.25	241.33
生态滤池出水量/(m ³ ·a ⁻¹)	1 892 594	1 381 194	1 365 243	1 362 882
生态滤池溢流量/(m ³ ·a ⁻¹)	1 149 263	1 660 944	1 676 907	1 679 270
生态滤池总排放水量/(m ³ ·a ⁻¹)	3 041 857	3 042 138	3 042 150	3 042 152
生态滤池水力效率/%	62.23	45.42	44.89	44.82
生态滤池平均表面负荷/(m·a ⁻¹)	94.60	69.10	68.30	68.10
生态滤池最大表面负荷/(m·a ⁻¹)	136.10	98.20	96.80	96.80

由表 1 可以看出,随着雨水泵开启数量的增加,生态滤池的溢流量增大、出水量减少、水力效率和表面负荷降低,溢流对受纳水体的污染负荷增大。污染负荷方面,通过生态滤池排入南湖的 COD 污染总

量在 81 ~ 108 t/a 之间,随着雨水泵开启数量的增加,污染总量升高。从单位硬化面积的溢流污染负荷来看,模拟结果都低于 250 kg/(hm²·a),达到了整改标准要求,其中,不启动雨水泵时,单位硬化面

积的溢流污染负荷为 $194.35 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 启动1台雨水泵时为 $236.22 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 二者相差约 $40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 而启动3台与启动1台雨水泵相差不大, 两者的差值仅约为 $5 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。在溢流水量方面, 不开启雨水泵时, 生态滤池处理的水量为 $189.26 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 生态滤池溢流排放的水量为 $114.93 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$, 生态滤池处理的水量占进入生态滤池总水量的 62.23% (即生态滤池的水力效率), 约 37.77% 的雨污混合水在极端暴雨情况下会发生直接溢流; 生态滤池的平均表面负荷为 $94.60 \text{ m}/\text{a}$, 最大表面负荷为 $136.10 \text{ m}/\text{a}$, 满足生态滤池的运行要求, 在气候温暖的地区, 这一指标可以更高, 达到 $300 \text{ m}/\text{a}$ 也是合理的。

6 结论

针对岳阳蛇皮套调蓄池改造工程, 在充分调研和系统建模的基础上, 采用德国传统的合流制溢流污染控制技术——调蓄池 + 生态滤池组合工艺作为处理方案, 对不同降雨工况采取不同的处理流程, 对雨污混合水进行了分质、分量处理, 以达到灰绿结合、智慧分流、精准治污的效果。同时通过长历时水文模型对工程措施进行实际的水文验证评估。由于我国现行规范中没有明确的以溢流频次、溢流体积和溢流污染物控制为直接效果导向的控制标准, 因此模拟结果以德国相关标准要求作为评估依据, 模拟结果表明, 工程实施后, 单位硬化面积的溢流污染负荷、溢流频次及生态滤池的表面负荷都可达到相应的标准要求, 可达到一定的面源污染控制要求, 生态环保效益明显。

参考文献:

- [1] 赵泽坤, 车伍, 赵杨, 等. 美国合流制溢流污染控制灰绿设施结合的经验[J]. 中国给水排水, 2018, 34(20): 36-41.

Zhao Zekun, Che Wu, Zhao Yang, *et al.* Experiences of combination of gray-green infrastructure for combined sewer overflow control in the United States[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(20): 36-41 (in Chinese).

- [2] 徐祖信, 王卫刚, 李怀正, 等. 合流制排水系统溢流污水处理技术[J]. 环境工程, 2010, 28(S1): 153-156.

Xu Zuxin, Wang Weigang, Li Huaizheng, *et al.* Treatment technique of combined sewer overflows [J]. Environmental Engineering, 2010, 28(S1): 153-156 (in Chinese).

- [3] 王建龙, 黄涛, 张萍萍, 等. 合流制溢流调蓄池污染控制研究进展[J]. 环境污染与防治, 2015, 37(8): 85-89, 95.

Wang Jianlong, Huang Tao, Zhang Pingping, *et al.* Research progress on combined sewer overflow stormwater storage tank for pollution control [J]. Environmental Pollution & Control, 2015, 37(8): 85-89, 95 (in Chinese).



作者简介: 朱利民 (1987-), 男, 江西瑞金人, 硕士, 工程师, 主要从事市政给水排水设计和研究方面的工作。

E-mail: zlm.hit@outlook.com

收稿日期: 2019-06-11