

# 组合湿地系统对山地城市面源污染的控制效果

何强<sup>1</sup>, 刘琼<sup>1</sup>, 李果<sup>1</sup>, 古励<sup>1</sup>, 孟捷<sup>1</sup>, 范庭兵<sup>2</sup>, 王华东<sup>2</sup>,  
肖中俭<sup>2</sup>

(1. 重庆大学 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400045; 2. 重庆市园博园管理处,  
重庆 401122)

**摘要:** 构建了由雨水塘、微型水景以及大坡度道路径流控制滤池组成的组合湿地系统, 研究了该组合系统对重庆市园博园江南园集水区内不同降雨量下径流污染的去除效果。在8次降雨事件中, 该组合湿地系统对 COD、TN、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、TP 和 TSS 的平均去除率分别为 57%、83%、53%、65%、40% 和 54%, 且去除率与径流水质密切相关。经组合湿地系统处理后出水 COD、TN、NH<sub>3</sub>-N 和 TP 浓度均达到了《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的Ⅲ类水质标准, 有助于龙景湖保持Ⅳ类水质的要求。

**关键词:** 山地城市; 龙景湖; 组合湿地系统; 面源污染; 降雨径流

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2017)03-0028-05

## Nonpoint Pollution Control in Mountainous City Using Combined Wetland System

HE Qiang<sup>1</sup>, LIU Qiong<sup>1</sup>, LI Guo<sup>1</sup>, GU Li<sup>1</sup>, MENG Jie<sup>1</sup>, FAN Ting-bing<sup>2</sup>,  
WANG Hua-dong<sup>2</sup>, XIAO Zhong-jian<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Three Gorges Reservoir Region's Eco-Environment < Ministry of Education >, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Administrative Office of Chongqing Garden Expo, Chongqing 401122, China)

**Abstract:** A combined wetland system consisting of rain pond, miniature water feature and the large slope road runoff filter was constructed, and its effect on runoff pollution control in the Jiangnan Garden, the Expo Park of Chongqing was investigated. The results showed that the average removal rates of COD, TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N, TP and TSS in eight rainfall incidents reached 57%, 83%, 53%, 65%, 40% and 54%, respectively, and the removal rates were correlated with the initial concentration of pollutants. The concentrations of COD, TN, NH<sub>3</sub>-N and TP in effluent of the combined system could meet the requirements of the surface water class Ⅲ criteria, which was helpful for maintaining the water quality of the receiving water in Longjing Lake.

**Key words:** mountainous city; Longjing Lake; combined wetland system; nonpoint pollution; rainfall runoff

随着点源污染控制水平的提高,城市降雨径流污染对城市水环境的影响日益突出,成为导致城市周边水体水质恶化的主要原因<sup>[1]</sup>。1990 年美国 EPA 公布了农业、工业、城市污水等不同污染源对河流污染的贡献,其中城市雨水占到了 9%<sup>[2]</sup>。我国以往的雨水系统基本都以快速排放为主要原则,20 世纪 80 年代初,我国开始对城市径流污染进行研究<sup>[3]</sup>。2014 年 10 月住建部针对全国海绵城市建设发布了《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,推进了我国城市降雨径流的处理与资源化利用技术的发展。

目前,我国针对山地城市降雨径流污染控制措施的研究相对较少,而相比于平原水网地区,山地城市降雨径流引起的面源污染对受纳水体水质的影响更显著。重庆是典型的山地城市,地形地貌复杂、坡度起伏较大、径流对地表的冲刷强度大,面源污染初期效应突出。笔者以重庆市园博园内江南园降雨径流的治理为研究对象,构建了组合湿地系统,分析了 8 次降雨特征,研究了不同降雨量下该系统对径流水质的处理效果。研究结果可为山地城市地表径流污染物的控制提供借鉴,也可海绵城市建设及相关 LID 设施的组合设计提供参考。

## 1 研究对象

### 1.1 研究区域

江南园湿地花园位于重庆园博园东南侧龙景湖江南园码头湖湾处(位置如图 1 所示),其总占地面积约 22.24 hm<sup>2</sup>,集水面积为 2.80 hm<sup>2</sup>,有效设施面积为 1.21 hm<sup>2</sup>,水域面积为 0.36 hm<sup>2</sup>。江南园紧靠力帆停车场和工厂企业,在原有管网规划中,降雨期力帆停车场大量的含油污水地表径流和厂区的地表径流均沿江南园坡地的排水渠进入江南园湖湾区,通过园内边沟进入龙景湖。

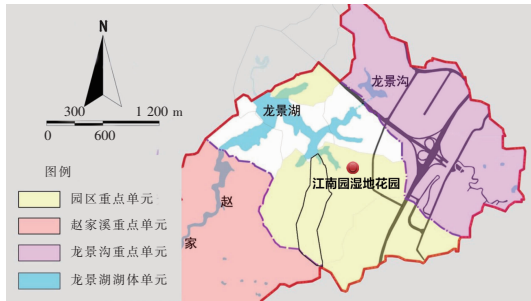


图 1 江南园地理位置

Fig. 1 Location map of Jiangnan Garden

### 1.2 组合系统

龙景湖上游流域处于待建期,污染控制重点为上游流域内降雨径流带来的面源污染,结合前期龙景湖环境容量分析的结果,已确定龙景湖水水质保持方案的总体目标为维持湖体Ⅳ类水质标准。因此,为了有效削减江南园降雨径流对龙景湖水质的影响,在龙景湖上游江南园园区构建了包括雨水塘、微型水景以及大坡度道路径流控制滤池在内的组合湿地系统。

#### 1.2.1 雨水塘

雨水塘停留时间按 2 ~ 3 min 计,体积为 300 m<sup>3</sup>,面积为 249 m<sup>2</sup>,最大池深为 2 m,平均水深为 1.2 m。雨水塘四壁采用钢筋混凝土构建,以保证暴雨期雨水冲刷时的结构强度,底部采用 300 ~ 500 mm 砾石衬底,以强化雨水的下渗,雨水塘内部投放部分大型长江石和卵石,用于应对来水冲刷和分散水流。雨水塘设计剖面如图 2 所示。

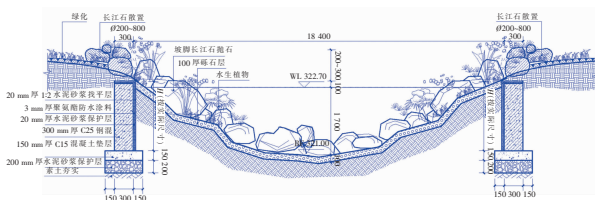


图 2 雨水塘设计剖面

Fig. 2 Profile of rain pond

#### 1.2.2 微型水景

微型水景的设计水力停留时间为 3 h,水力负荷为 30 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · d),有效调蓄容积为 369 m<sup>3</sup>,有效水深为 1.8 m,面积为 205 m<sup>2</sup>。

微型水景池底铺设了厚度为 10 ~ 30 cm、粒径为 30 ~ 50 mm 的卵石层,为微生物繁殖提供附着点,形成的生物膜可进一步净化水质。植物以岸际植物为主,包括睡莲、石菖蒲和水竹芋等挺水植物,设计剖面如图 3 所示。

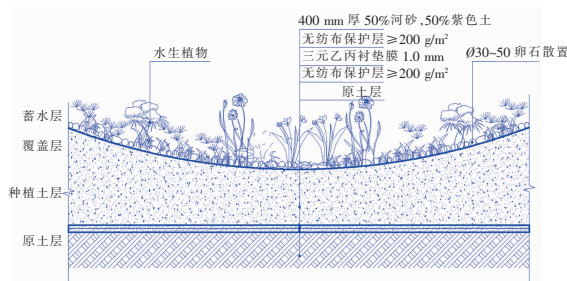


图 3 微型水景设计剖面

Fig. 3 Profile of miniature water feature

1.2.3 大坡度道路径流控制滤池系统

大坡度道路径流控制滤池系统面积为 630 m<sup>2</sup>,设计滞水深度为 40 cm、水力停留时间为 24 h,底层至顶层的搭配分别为素土夯实、砾石层、碎石层、500 mm 厚 50% 河砂/50% 紫色土层。部分砾石层中设有穿孔管用于收集下渗雨水,并随预埋地下管道排入龙景湖。穿孔管顶部设溢流槽,便于大流量雨水直接流入地下管道及时排出,设计剖面见图 4。

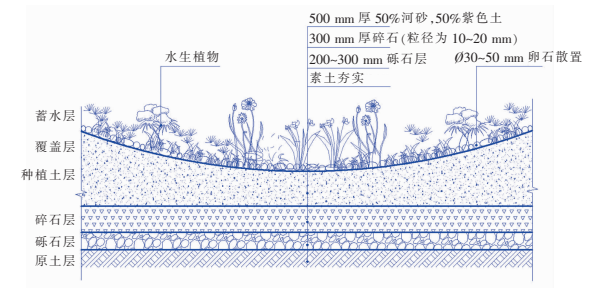


图 4 大坡度道路径流控制滤池设计剖面

Fig. 4 Profile of large slope road runoff filter

2 监测方法

2.1 监测点布置

监测点位于江南园区内,分别在系统进水口、雨水塘、大坡度道路径流控制滤池及系统出水口共设置 4 处采样点(记作 1<sup>#</sup>~4<sup>#</sup>),具体位置及雨水径流向见图 5。降雨径流经雨水沟进入雨水塘,经过雨水塘的缓冲、初步沉淀后溢流至微型水景补充水量,当微型水景中水位达到溢流高度时,从溢流口进入大坡度道路径流控制滤池系统,最终进入龙景湖。

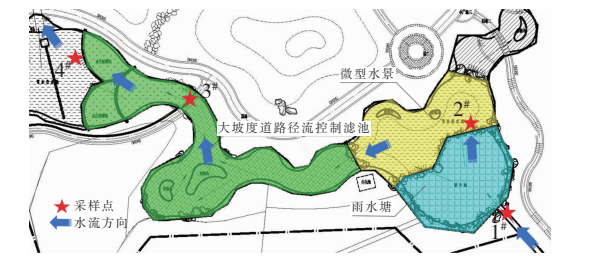


图 5 监测点位置分布

Fig. 5 Distribution map of monitoring point position

2.2 水质测试方法

2015 年 6 月—9 月间对园博园江南园区的 8 次降雨事件(记作 1<sup>#</sup>~8<sup>#</sup>)进行了监测,降雨特征见表 1。降雨期的实时降雨量数据来自放置在江南园西北侧高地的 JDZ-1 型翻斗数字雨量计,雨量计距采样点的距离为 200 m,连续监测,每隔 2 min 记录一次数据。

表 1 江南园降雨特征

Tab. 1 Rainfall characteristics of Jiangnan Garden

时 间	降雨量/mm	前期干旱时间/d	雨量等级
2015-06-18	73.7	2	暴雨
2015-07-02	14.7	1	中雨
2015-07-04	39.3	1	大雨
2015-07-22	62.7	0	暴雨
2015-08-17	205.1	6	大暴雨
2015-08-18	25.8	0	大雨
2015-08-19	18.3	0	中雨
2015-09-17	67.4	4	暴雨

注: 大暴雨、暴雨、大雨、中雨、小雨分别是指单日 24 h 累计降雨量 >100、(50~100)、(25~50)、(10~25)、<10 mm。

降雨期间,自产流开始 30 min 内每 5~10 min 在各采样点采集一个样品,后期采样间隔取 30~60 min,具体根据降雨强度大小而定。采用 500 mL 聚乙烯采样瓶收集水样,水样采集后立即带回实验室检测,测试指标包括 TN、TP、NH<sub>3</sub>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、COD 及 TSS,均采用《水和废水监测分析方法》(第 4 版)中的方法进行测定。

3 结果及分析

3.1 降雨径流水质分析

根据降雨径流监测结果,对径流过程中进入湿地系统的各污染物浓度的最大值、最小值及平均值进行了统计,结果见表 2。与《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)进行对比后可知,该集水区降雨径流中 TN 的平均浓度超过了国家地表水Ⅳ类标准,为主要污染物。此外,径流水质与前期干旱天数有关,前期干旱天数越多,径流污染物浓度越高。

表 2 系统入口处的降雨径流水质

Tab. 2 Runoff water quality of influent mg·L<sup>-1</sup>

项 目	COD	TN	NH <sub>3</sub> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	TP	TSS
最小值	7.97	0.34	0.19	0.34	0.03	13.00
最大值	36.14	2.74	1.25	1.24	0.38	67.00
平均值	20.34	1.51	0.60	0.65	0.19	29.75

3.2 组合湿地系统沿程各污染物浓度变化

3.2.1 氮浓度的变化

当降雨径流中 TN 浓度高于 1.5 mg/L 时,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>两采样点间 TN 浓度变化幅度大,说明雨水塘对 TN 的去除效果较明显,去除率在 50% 左右;而当降雨径流中 TN 浓度低于 1.5 mg/L 时,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>两采样点间的 TN 浓度变化较平缓,去除率在 20% 以下,说明雨水塘对 TN 的去除效果受初始浓度的影响较大,浓



度越高则去除效果越好(见图 6)。

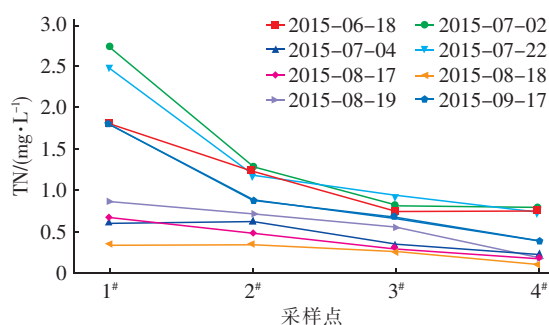


图 6 组合湿地系统中 TN 浓度的变化

Fig. 6 Change of TN concentration in combined wetland system

径流中以溶解态存在的  $\text{NH}_3 - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  主要依靠吸附、植物吸收及生物化学作用被去除。由于雨水塘的水力停留时间较短,导致上述途径对  $\text{NH}_3 - \text{N}$  和  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  的去除效果受限,平均去除率分别仅为 11% 和 21%。而经微型水景和大坡度道路径流控制滤池系统的共同作用,对两者的平均去除率分别可达 47% 和 55% (见图 7、8)。

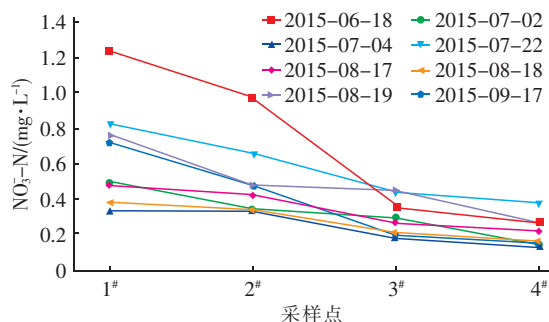


图 7 组合湿地系统中  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度的变化

Fig. 7 Change of  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  concentration in combined wetland system

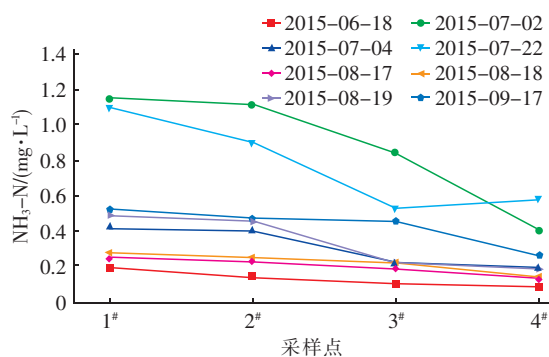


图 8 组合湿地系统中  $\text{NH}_3 - \text{N}$  浓度的变化

Fig. 8 Change of  $\text{NH}_3 - \text{N}$  concentration in combined wetland system

### 3.2.2 总磷浓度的变化

TP 浓度沿径流过程逐渐降低,且整体变化较为平缓。径流中 TP 浓度均在 0.4 mg/L 以下,在径流过程中受各处理设施植物和渗透介质的释磷作用影响较大,导致系统对 TP 的去除效果不佳,只有在进入雨水塘时径流水质得到稀释,使得 TP 浓度明显下降。表明系统对 TP 的去除效果受进水浓度的影响,在磷浓度较低的情况下,湿地系统对磷的吸附能力有限,甚至有释磷的风险,这与 Lai 等<sup>[4]</sup>用鱼塘底泥、花岗碎石和河沙的混合物作为人工湿地的基质处理城市降雨径流时得到的结论一致。

### 3.2.3 COD 浓度的变化

在径流过程中 COD 浓度基本呈“先下降、后升高、再下降”的趋势(见图 9)。研究发现,COD 浓度与水中颗粒物数量密切相关。在降雨径流过程中,水流进入雨水塘后经过初步沉淀,水中 COD 得到较好的去除,平均去除率为 26%,而后进入后续处理设施时沉积在滤池底部的颗粒物受径流冲刷再次悬浮,造成浓度升高,之后随着颗粒物逐步沉淀,加之植物等消耗利用 COD, COD 浓度再次降低。此外,由于滤池的设计停留时间较长,且生物降解是土地处理系统去除有机污染物的主要途径<sup>[5]</sup>,故滤池填料表面附着的生物膜及游离在水中的微生物对 COD 有一定的降解作用。

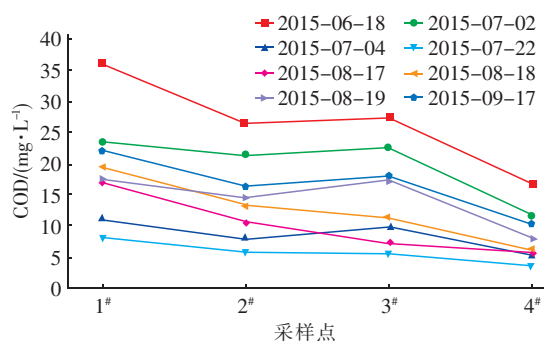


图 9 组合湿地系统中 COD 浓度的变化

Fig. 9 Change of COD concentration in combined wetland system

### 3.2.4 TSS 浓度的变化

径流中的 TSS 与 COD 存在一定的相关性,系统对径流中 TSS 的平均去除率为 54%。分析显示, TSS 浓度受降雨量的影响较大,初期进入湿地系统的径流中的 TSS 浓度与降雨量呈正相关,这是由于降雨量较大时冲刷效应更显著,导致 TSS 累积较多。

总体来看,沿程 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$  浓度均呈持续下降的趋势,表明雨水塘、微型水景和大坡度道路径流控制滤池的组合在削减氮营养物方面能够互补,实现系统脱氮效能的最优化。对于 TP、COD、TSS 来讲,3<sup>#</sup> 采样点的浓度较 2<sup>#</sup> 采样点有不同程度的升高,特别是当径流雨水中三种指标浓度较高时变化更为明显,表明该组合湿地去除 TP、COD、TSS 的能力与径流雨水水质有关。

### 3.3 组合湿地系统对各污染物的总体去除效果

总体来看,在不同降雨量下,各污染物指标经组合湿地系统处理后其浓度均显著下降。其中, TN 和  $\text{NH}_3 - \text{N}$  经系统处理后的出水浓度分别为 0.10 ~ 0.79 和 0.09 ~ 0.59 mg/L, 均达到 GB 3838—2002 中Ⅲ类标准(见表3)。组合湿地系统对多次降雨径流中 TP 的平均去除率达到 40%, 出水水质可达Ⅲ类水质标准。不同降雨量下组合湿地系统对 COD 的去除效果较稳定, 去除率为 51% ~ 68%, 且出水浓度均低于 20 mg/L, 达到Ⅲ类水质标准。

表3 江南园湿地系统对各污染物的总体去除率

Tab.3 Removal rate of pollutants by combined wetland system in Jiangnan Garden %

项目	COD	TN	$\text{NH}_3 - \text{N}$	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	TP	TSS
1 <sup>#</sup>	54	76	54	78	54	48
2 <sup>#</sup>	51	91	64	69	55	62
3 <sup>#</sup>	53	84	52	62	32	57
4 <sup>#</sup>	56	91	47	54	23	49
5 <sup>#</sup>	66	89	45	58	54	43
6 <sup>#</sup>	68	70	49	55	26	55
7 <sup>#</sup>	53	80	62	64	29	60
8 <sup>#</sup>	54	79	49	79	51	45
均值	57	83	53	65	40	54

可见,经雨水塘、微型水景和大坡度道路径流控制滤池系统处理后,出水 TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、TP、COD 浓度均可达Ⅲ类水标准,能有效控制江南园区的面源污染,满足维持龙景湖Ⅳ类水质标准的要求,且能显著削减入湖污染物量,有效降低了龙景湖的污染物负荷。

## 4 结论

① 针对龙景湖江南园降雨径流对龙景湖水质的影响,构建了雨水塘、微型水景以及大坡度道路径流控制滤池组合湿地系统,其对 COD、TN、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、

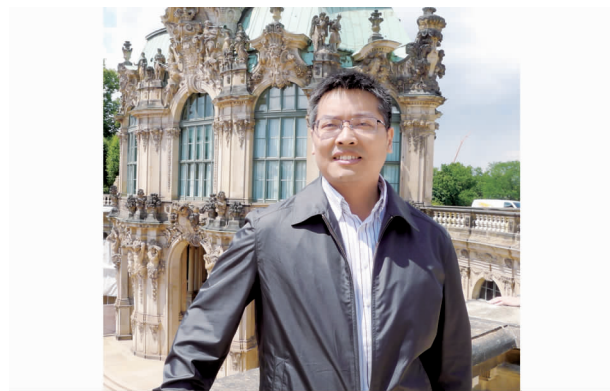
$\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、TP 和 TSS 的平均去除率分别为 57%、83%、53%、65%、40% 和 54%, 主要污染物的出水浓度均达到了地表水Ⅲ类标准。

② 该组合湿地系统去除污染物的效果与径流水质有关,且对不同污染物的去除能力存在差异,8 次降雨事件中该系统对污染物的去除能力依次为  $\text{TN} > \text{NO}_3^- - \text{N} > \text{COD} > \text{TSS} > \text{NH}_3 - \text{N} > \text{TP}$ 。

③ 该组合湿地系统有效削减了江南园区的面源污染,降低了龙景湖的污染物负荷,出水指标有助于维持龙景湖Ⅳ类水体水质标准。

## 参考文献:

- [1] 何丽君,马邕文,万金泉,等. 新型人工湿地对工业区降雨径流的净化研究[J]. 环境科学,2012,33(3): 817-824.
- [2] 王和意,刘敏,刘巧梅,等. 城市降雨径流非点源污染分析与研究进展[J]. 城市环境与城市生态,2003,16(6):283-285.
- [3] 宫莹,阮晓红,胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展[J]. 中国给水排水,2003,19(3):21-23.
- [4] Lai D Y, Lam K C. Phosphorus sorption by sediments in a subtropical constructed wetland receiving stormwater runoff[J]. Ecol Eng,2009,35(5):735-743.
- [5] 郭劲松,王春燕,方芳,等. 湿干比对人工快渗系统除污性能的影响[J]. 中国给水排水,2006,22(17):9-12.



作者简介:何强(1965—),男,江苏江阴人,博士,教授,博士生导师,从事水污染控制技术研究。

E-mail:hq0980@126.com

收稿日期:2016-11-05