

# 工业区雨洪强化净化与调蓄水水质保持技术中试研究

黎京士, 周秀秀, 何晨晖, 庞志华, 谌建宇, 雷蕾  
(环境保护部 华南环境科学研究所, 广东 广州 510655)

**摘要:** 针对目前工业区高污染负荷雨源型河道具有的径流量小、污染负荷高、非雨季缺乏新鲜水水源补充的特点,研发了工业区雨洪强化净化与调蓄水水质保持技术,并建立了一套规模为 $20\text{ m}^3/\text{h}$ 的中试装置。雨季时对初期雨水进行净化处理,非雨季时维持水质,并对河道进行生态补水。在降雨时期,雨洪强化净化中试系统对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP、SS的去除率分别为84.90%~92.96%、29.05%~68.82%、35.68%~59.12%、55.75%~67.18%、89.74%~93.31%,出水除总磷外,其他指标可达到《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918—2002)的一级B标准。在非降雨时期,调蓄水水质保持系统对COD、 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、TN、TP、SS的去除率分别为14.13%~31.99%、33.64%~77.42%、24.72%~48.04%、61.29%~67.20%、45.44%~76.90%,出水水质可达到一级A标准。

**关键词:** 初期雨水; 雨源型河道; 絮凝沉淀; 稳定塘; 人工湿地

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2018)17-0025-05

## Purification, Storage and Water Quality Maintenance of Initial Rainwater in Industrial Park

LI Jing-shi, ZHOU Xiu-xiu, HE Chen-hui, PANG Zhi-hua, CHEN Jian-yu,  
LEI Lei

(South China Institute of Environmental Science, Ministry of Environmental Protection,  
Guangzhou 510655, China)

**Abstract:** For the rain source river of industrial park with small runoff and high pollution load, lacking of fresh water supplement in dry season, a purification and storage process of initial rainwater was developed. The scale of pilot plant was  $20\text{ m}^3/\text{h}$ . During the rainy season, the initial rainwater was purified and stored. The effluent quality was maintained for river water supplement during the dry season. The research showed that the initial rainwater purification system had a significant removal rate of COD,  $\text{NH}_3\text{-N}$ , TN, TP and SS in rainy season, which reached 84.90%–92.96%, 29.05%–68.82%, 35.68%–59.12%, 55.75%–67.18% and 89.74%–93.31%, respectively. The effluent quality met the first class B criteria specified in *Discharge Standard of Pollutants for Municipal Wastewater Treatment Plant* (GB 18918–2002) except TP. While during dry season, a removal rate of 14.13%–31.99%, 33.64%–77.42%, 24.72%–48.04%, 61.29%–67.20% and 45.44%–76.90% was maintained in rainwater storage system, whose effluent met the requirement of first class A standard.

**Key words:** initial rainwater; rain source river; flocculation and precipitation; stabilization pond; constructed wetland

城市雨水径流水质随着季节、降雨特征、下垫面污染情况等不同而产生很大的变化。初降雨时所形成的雨水径流会挟带地面和屋面上的各种污染物,是雨水中污染最严重的部分,必须加以有效控制。受大气环境、区域功能、地形地质、水文水力等影响,不同区域的地表径流表现出不同的污染特性<sup>[1]</sup>。研究表明,工业区的地表径流相对城市中心区和农村表现出更显著的初期冲刷效应。同时,由于工厂性质大相径庭,其污染种类更多,成分更加复杂,某些污染物浓度比城市雨水更高,如油类、重金属等。对于处在工业区周边的雨源型河道,雨季时沿河工业区的面源污染更是加剧了河流的污染。因此,对工业区初期雨水的截留处置显得尤为重要。目前国内关于初期雨水处理技术主要集中于城市雨水,对于工业区初期雨水的除污效率较低。针对工业区高污染负荷雨源型河道面源污染严重及缺乏新鲜水补充的问题,研发高效、管理便捷的雨洪净化与调蓄补水技术具有重要的意义。

1 材料和方法

1.1 试验装置与运行参数

工业区雨洪强化净化与调蓄水水质保持技术中试装置设计规模为 20 m<sup>3</sup>/h,其中雨洪强化净化系统包括高效絮凝沉淀装置、植物强化稳定塘、调蓄贮水塘,而调蓄水水质保持中试系统则由植物强化稳定塘、调蓄贮水塘和强化人工湿地组成(见图1)。

降雨时期,初期雨水经截流井截流后进入雨洪强化净化系统。初期雨水先进入高效絮凝沉淀反应装置进行絮凝沉淀处理,去除初雨中的固体悬浮物,然后出水进入植物强化稳定塘。植物强化稳定塘设有浮床,浮床上种植狐尾藻和水芹菜,通过植物吸收作用去除部分氮、磷,其出水进入调蓄贮水塘,满溢后排入附近水体。非降雨时期,调蓄贮水塘中雨水在强化人工湿地和植物强化稳定塘中进行循环处理和复氧,以维持水质。当附近河道缺乏新鲜水源补充时,用以补充生态基流。

高效絮凝沉淀反应器尺寸为 4.0 m × 1.5 m × 5.0 m,表面负荷为 6.0 ~ 12.0 m<sup>3</sup>/(h · m<sup>2</sup>);植物强化稳定塘有效容积为 185 m<sup>3</sup>,水力停留时间为 4.6 ~ 18.5 h;调蓄贮水塘有效容积为 185 m<sup>3</sup>,水力停留

时间为 4.6 ~ 18.5 h,鼓风机定时鼓风曝气,气水比为(4 : 1) ~ (6 : 1);强化人工湿地表面负荷为 0.40 ~ 0.80 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup> · h)。

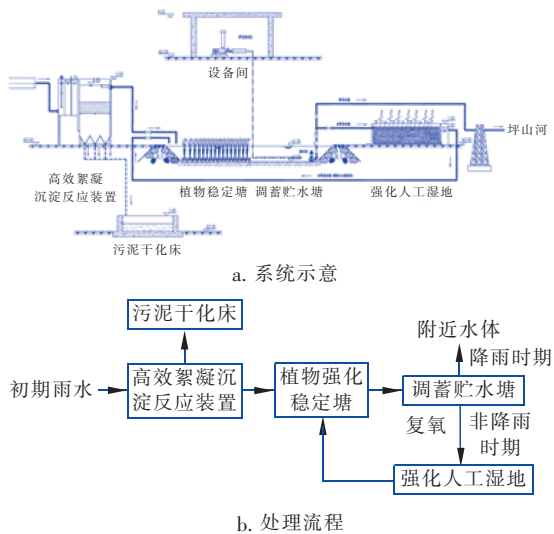


图1 工艺流程

Fig. 1 Flow chart of purification and storage of initial rainwater

1.2 试验水质与分析方法

本研究以深圳大工业区为研究背景,根据对其初期雨水水质污染特征<sup>[2]</sup>的分析可知,SS、COD、NH<sub>3</sub> - N、TN、TP 浓度分别可达 300 ~ 1 142、533 ~ 1 467、4.3 ~ 19.64、5.66 ~ 29.43、0.72 ~ 3.16 mg/L。中试系统采用配水,进水取自深圳市某污水处理厂的调节池,由于污染物浓度偏低,投加淀粉作为碳源、氯化铵作为氮源、磷酸二氢钾作为磷源、当地的泥土作为 SS。

试验设置低、中、高三种污染负荷,添加碳源、氮源、磷源和 SS 后的原水水质见表 1。水质指标均采用标准方法进行测定。

表1 原水水质  
Tab. 1 Quality of influent mg · L<sup>-1</sup>

项 目	低浓度	中浓度	高浓度
COD	220 ~ 363	493 ~ 630	913 ~ 1 300
NH <sub>3</sub> - N	4.89 ~ 6.53	9.87 ~ 12.77	16.76 ~ 29.79
SS	144 ~ 228	428 ~ 670	888 ~ 1 173
TN	10.32 ~ 14.56	19.56 ~ 25.69	31.33 ~ 60.38
TP	1.98 ~ 3.20	4.19 ~ 5.67	4.95 ~ 8.53

2 结果与讨论

2.1 降雨时期不同污染负荷下的除污效能

中试系统对初期雨水的处理效果如表 2 所示。在低浓度阶段中试系统对 COD、NH<sub>3</sub> - N、TN、TP、SS 的去除率分别为 84. 90%、68. 82%、59. 12%、56. 08%、89. 74%，在中浓度阶段去除率分别为 90. 59%、64. 16%、58. 71%、55. 75%、91. 05%，在高浓度阶段去除率分别为 92. 96%、29. 05%、35. 68%、67. 18%、93. 31%。COD、TP、SS 的去除率基本上与污染负荷呈正相关，即污染负荷越高，对 COD、TP 和 SS 的去除率也越高；而 NH<sub>3</sub> - N、TN 去除率则与污染负荷呈负相关，污染负荷越高，其去除率越低。

表 2 降雨时期不同污染负荷下中试系统对初期雨水的处理效果

Tab. 2 Initial rainwater pollutant removal performance in pilot plant during rainy season under different pollution loads

mg · L<sup>-1</sup>

项 目		低浓度	中浓度	高浓度
COD	进水	305. 11	575. 48	1 096
	出水	46. 08	54. 16	77. 12
NH <sub>3</sub> - N	进水	5. 58	11. 02	22. 86
	出水	1. 74	3. 95	16. 22
TN	进水	11. 62	23. 3	49. 19
	出水	4. 75	9. 62	31. 64
TP	进水	2. 5	4. 52	7. 16
	出水	1. 10	2. 00	2. 35
SS	进水	195	570	1 017
	出水	20	51	68

初期雨水的主要污染物为 COD 和 SS。根据对初期雨水特性的有关分析<sup>[3]</sup>，不同土地利用类型、不同雨型条件下 COD 和 SS 的去除存在一定的线性相关性，主要是因为非溶解态的 COD 吸附于颗粒表面，由于初期雨水具有良好的沉降性能<sup>[4,5]</sup>，初期雨水经高效絮凝沉淀反应装置处理后，大部分的 SS 被截留，同时去除了大部分的 COD。同时，部分吸附于颗粒上的 N、P 也被去除。而对于初期雨水中的溶解态 COD、N、P，则通过植物强化稳定塘中的植物吸收作用实现部分削减。

2.2 降雨时期不同水力负荷下的除污效能

在中浓度条件下，通过调节初雨流量，考察中试系统在 10、20、40 m<sup>3</sup>/h 的水力负荷下对污染物的去除特性，结果如表 3 所示。当水力负荷为 10 m<sup>3</sup>/h 时，中试系统对 COD、NH<sub>3</sub> - N、TN、TP、SS 的去除率

分别为 94. 23%、72. 05%、65. 07%、64. 58%、91. 41%，在水力负荷为 20 m<sup>3</sup>/h 时去除率分别为 91. 00%、65. 36%、57. 37%、56. 00%、90. 80%，在水力负荷为 40 m<sup>3</sup>/h 时去除率分别为 87. 06%、47. 67%、49. 19%、50. 59%、84. 85%。污染物去除率与水力负荷呈负相关，水力负荷越高，污染物的去除率越低。其中，N、P 的去除率下降幅度比 COD、SS 要高。

表 3 降雨时期不同水力负荷下中试系统对初期雨水的处理效果

Tab. 3 Initial rainwater pollutant removal performance in pilot plant during rainy season under different hydraulic loads

mg · L<sup>-1</sup>

项 目		水力负荷/(m <sup>3</sup> · h <sup>-1</sup> )		
		10	20	40
COD	进水	607. 12	611. 41	618. 55
	出水	35. 02	55. 02	80. 02
NH <sub>3</sub> - N	进水	11. 12	10. 92	10. 91
	出水	3. 11	3. 78	5. 71
TN	进水	24. 64	21. 96	23. 54
	出水	8. 61	9. 36	11. 96
TP	进水	4. 60	4. 44	4. 59
	出水	1. 63	1. 95	2. 27
SS	进水	567	573	565
	出水	49	53	86

2.3 非降雨时期不同污染负荷下的除污效果

经雨洪强化净化系统处理后的初雨虽然对 COD、SS 的去除率超过了 85%，N、P 也有近 50% 以上的去除率，但处理后的出水 COD、NH<sub>3</sub> - N、TN、TP、SS 仍有 54. 16、3. 95、9. 62、2. 00、51 mg/L（中浓度初雨出水）。由于贮水塘尾水相对静止，在有光照的情况下易暴发水华。为保持贮水塘水质，采用“强化人工湿地 - 植物强化稳定塘”组合工艺，对贮水塘存水进行处理。强化人工湿地采用垂直流结构形式，以碎石、细砂和粉煤灰陶粒作为载体，种植美人蕉、风车草等植物，通过对调蓄贮水塘复氧以及植物稳定塘、强化人工湿地的循环处理来达到保持水质的效果。

调蓄水水质保持系统对贮存水的处理效果如表 4 所示。在低浓度阶段对 COD、NH<sub>3</sub> - N、TN、TP、SS 的去除率分别为 24. 69%、77. 42%、36. 58%、67. 20%、76. 90%，在中浓度阶段去除率分别为 31. 99%、71. 49%、48. 04%、61. 29%、62. 12%，在高浓度阶段去除率分别为 14. 13%、33. 64%、

24.72%、66.81%、45.44%。

表 4 非降雨时期不同污染负荷下中试系统对初期雨  
的处理效果

Tab.4 Initial rainwater pollutant removal performance in pilot  
plant during dry season under different pollution loads

		mg · L <sup>-1</sup>		
项 目		低浓度	中浓度	高浓度
COD	进水	46.08	54.16	77.12
	出水	34.71	36.83	66.23
NH <sub>3</sub> - N	进水	1.74	3.95	16.22
	出水	0.39	1.13	10.76
TN	进水	4.75	9.62	31.64
	出水	3.01	5.00	23.82
TP	进水	1.10	2.00	2.35
	出水	0.36	0.77	0.78
SS	进水	20	51	68
	出水	5	19	37

调蓄水水质保持系统在中、低浓度下对 N、P 和 SS 有较好的去除效果。强化人工湿地的沸石、粉煤灰陶粒、风车草、美人蕉、再力花和植物强化稳定塘的狐尾藻和水芹菜都对 N、P 有一定的吸收效果,同时强化人工湿地的填料对剩余的 SS 具有一定的拦截作用。但在高浓度阶段,由于系统负荷过高,植物稳定塘和强化人工湿地的处理能力不能满足要求,因此去除率出现了较大幅度下降。

2.4 非降雨时期不同循环时长下的除污效果

三种循环时长工况(0.5、1、2 h/d)下对尾水水质的保持效果见表 5。

表 5 非降雨时期不同循环时长下装置对初期雨水  
的处理效果

Tab.5 Initial rainwater pollutant removal performance in pilot  
plant during dry season under different circulation

		mg · L <sup>-1</sup>		
项 目		循环时长/(h · d <sup>-1</sup> )		
		0.5	1	2
COD	进水	59.55	55.02	53.30
	出水	41.74	36.05	29.05
NH <sub>3</sub> - N	进水	4.49	3.78	4.11
	出水	1.58	1.09	0.91
TN	进水	9.88	9.62	9.86
	出水	5.50	4.62	4.36
TP	进水	2.03	1.95	2.04
	出水	0.72	0.82	0.94
SS	进水	48	53	50
	出水	28	21	18

由表 5 可知,对污染物的去除率随循环时长的增加而增加。其中,循环时长对 COD 和 SS 的去除效果影响相对较大,在 2 h/d 的工况下,中试系统对 COD、SS 的去除率分别可达 45.50%、63.61%;而在 0.5 h/d 工况下,其对 COD、SS 的去除率分别仅为 29.90%、40.97%,下降了约 20%。当循环时长为 2 h/d 时,对 NH<sub>3</sub> - N、TN、TP 的去除率分别为 77.74%、55.74%、64.45%;当循环时长为 0.5 h/d 时,对 NH<sub>3</sub> - N、TN、TP 的去除率分别为 64.79%、44.28%、53.99%,只下降了 12% 左右。

3 结论

① 降雨时期,雨洪强化净化中试系统对 COD、NH<sub>3</sub> - N、TN、TP、SS 的去除率分别为 84.90% ~ 92.96%、29.05% ~ 68.82%、35.68% ~ 59.12%、55.75% ~ 67.18%、89.74% ~ 93.31%,出水除总磷外,其他指标可达到一级 B 标准。

② 非降雨时期,调蓄水水质保持中试系统对 COD、NH<sub>3</sub> - N、TN、TP、SS 的去除率分别为 14.13% ~ 31.99%、33.64% ~ 77.42%、24.72% ~ 48.04%、61.29% ~ 67.20%、45.44% ~ 76.90%,出水水质达到了一级 A 标准。

③ 降雨时期,雨洪强化净化中试系统对初期雨水中 COD、TP、SS 的去除率与污染负荷呈正相关,而氮的去除率则与污染负荷呈负相关。水力负荷越高,对污染物的去除率越低,且 N、P 的去除率下降幅度比 COD、SS 要大。

④ 降雨时期,调蓄水水质保持中试系统在中、低浓度下对 N、P 和 SS 有较好的去除效果。在高浓度阶段,由于系统负荷过高,植物稳定塘和强化人工湿地的处理能力不能满足要求,去除率呈较大幅度下降。此外,系统对污染物的去除率随循环时长的增加而提高。

参考文献:

[1] 李思敏,杜国帅,任志强. 邯郸市城区污水污染及利用研究[J]. 工业用水与废水,2012,43(6):49-52.  
Li Simin, Du Guoshuai, Ren Zhiqiang. Research on rainwater pollution and its utilization in Handan City[J]. Industrial Water & Wastewater, 2012, 43(6):49-52 (in Chinese).  
[2] 赖后伟,黎京士,庞志华,等. 深圳大工业区初期雨水水质污染特征研究[J]. 环境污染与防治,2016,38(3):

(下转第 34 页)