

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.19.017

## 初期雨水就地快速处理技术中试研究

周传庭<sup>1,2</sup>, 朱砂砾<sup>2</sup>, 杨殿海<sup>1</sup>, 安莹<sup>3</sup>, 周振<sup>3</sup>, 余司颀<sup>3</sup>

(1. 同济大学环境科学与工程学院 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092; 2. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 3. 上海电力大学 环境与化学工程学院, 上海 200090)

**摘要:** 针对巢湖区域南淝河雨天出现的黑臭水体现象,自主研发出初期雨水末端就地快速处理工艺,即快速混凝沉淀+高效纤维滤池组合工艺,其中高效纤维滤池具有滤料密度可调节、使用时效长且截污能力强等特点。降雨期间,研究了不同启动方式和不同污染负荷下中试系统对污染物的去除效果。结果表明,实时启动缩短了装置的启动时间,可实现快速启动;当沉淀池表面负荷为 $20.0\sim 33.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ 时,快速混凝沉淀+高效纤维滤池组合工艺对SS、COD、TP的去除率分别为80%~99%、41%~88%和78%~90%,能够去除大部分非溶解性污染物。

**关键词:** 初期雨水; 混凝沉淀; 高效纤维滤池; 就地快速处理; 黑臭水体

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2022)19-0108-06

## Pilot Study on On-site Rapid Treatment Technology of Initial Rainwater

ZHOU Chuan-ting<sup>1,2</sup>, ZHU Sha-li<sup>2</sup>, YANG Dian-hai<sup>1</sup>, AN Ying<sup>3</sup>, ZHOU Zhen<sup>3</sup>,  
YU Si-qi<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Design and Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 3. College of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** To solve the problem of black and odorous water body in rainy days in Nanfei River, Chaohu area, a process for on-site rapid end-of-pipe treatment of initial rainwater was developed. The combined process consisted of rapid coagulation and precipitation and high efficiency fiber filter, and the high efficiency fiber filter has the advantages of adjustable filter density, long service age and strong interception capacity. The pollutants removal efficiencies of the pilot system under different start-up modes and pollution loads were investigated during rainfall. Real-time start-up shortened the start-up time of the device and realized fast real-time start-up. When the surface load of sedimentation tank was  $20.0\sim 33.0\text{ m}^3/(\text{m}^2\cdot\text{h})$ , the removal efficiencies of SS, COD and TP by the combined process were 80%~99%, 41%~88% and 78%~90%, respectively, which was capable of removing most of the insoluble pollutants.

**Key words:** initial rainwater; coagulation and precipitation; high efficiency fiber filter; on-site rapid treatment; black and odorous water body

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2011ZX07303-002-005)

近年来,雨水径流成为继生活污水和工业废水之后的第三种主要城市水体污染源<sup>[1]</sup>。这是由于在降雨过程中,雨珠吸附大气中的污染物,且在落地后进一步积累污染物,致使雨水径流具有严重的污染性。由于初期雨水径流污染影响范围广、治理难度大,已成为科研人员关注的热点。各国学者都在积极寻找相应的解决办法,已提出了许多可行的技术方案和污染控制理念,期望能够控制初期雨水径流污染<sup>[2-4]</sup>。

“十一五”期间,水污染控制与水环境综合整治工程的成功实施使作为城市景观水体的南淝河水质有了一定程度的改善,但依旧不稳定<sup>[5]</sup>。中下游水质呈污染状态,透明度低,甚至有变色发黑现象,尤其在雨天,雨污混接系统溢流污水直接进入南淝河,给水质造成了严重影响。

因此,迫切需要开发出一种雨天溢流污染的末端控制技术,以削减雨天入河污染。基于此,笔者调研了国内外常用的雨水就地处理工艺,如 Actiflo 工艺<sup>[6]</sup>、DENSADeg+Biofor 工艺<sup>[7]</sup>和 Lamella Clarifiers 工艺<sup>[8]</sup>,并综合相关文献与设计经验,自主研发了初期雨水末端就地快速处理工艺,即快速混凝沉淀+高效纤维滤池组合工艺,旨在为进一步提升入河污水水质奠定基础。

1 材料与方法

1.1 工艺流程及设计参数

末端快速处理工艺中试设计规模为 60~120 m<sup>3</sup>/h,工艺流程为进水→格栅→管道静态混合器→快速混凝沉淀→高效纤维滤池→消毒→出水(见图 1)。装置用水取自泵站集水井,采用实际溢流雨水或旱季污水进行现场试验。

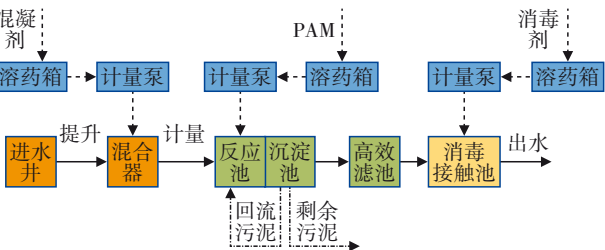


图 1 装置的工艺流程

Fig.1 Process flow chart of the device

混凝沉淀区:絮凝反应单元采用推进式机械搅拌,其长×宽×高为 1.5 m×1.5 m×4.0 m,停留时间为 9 min,设有导流筒,反应池与斜管沉淀池相连接,斜

管的倾斜角度为 60°,停留时间为 25 min,有效容积为 25.2 m<sup>3</sup>,表面水力负荷为 19.2~38.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)。其中,混凝剂采用聚合氯化铝(PAC),投加浓度为 10%,絮凝剂采用聚丙烯酰胺(PAM),投加浓度为 0.15%。

高效滤池:采用纤维束滤池,使用软填料-纤维束滤元,截污能力较强,对 SS 的去除率高于 80%,滤料密度可以调节,便于清洗,并且使用时效较长。装置处理水量为 5 m<sup>3</sup>/h,滤速为 20 m/h,过滤面积为 0.25 m<sup>2</sup>。

消毒接触池:尺寸为 2.0 m×1.5 m×3.0 m,采用漂白粉或漂粉精制成的氯片进行消毒,投加方式为计量泵压力投加。

1.2 试验水质与分析方法

本研究以冲沟雨水作为处理对象,当冲沟内水位达到进水泵最低启动水位时开始运行装置并取样。中试装置进水管上设有取样龙头,取样频率为:在 0~30 min 内,5 min 取 1 次;在 30~60 min 内,10 min 取 1 次;在 60 min 以后,30 min 取 1 次。水样包括沉淀单元出水和过滤单元出水,出水取样频率为 20 min 取 1 次。

水质检测项目包括 SS、COD、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N,均采用国标方法进行测定。2012 年—2013 年共完成了 18 场次试验,获得了降雨、冲沟雨水流量、水质和中试装置处理效果等系列数据,提取 9 次降雨情况及装置运行参数,具体见表 1。

表 1 降雨情况和运行参数

Tab.1 Rainfall and operating parameters

降雨场次	日期	雨前旱天数/d	实际降雨历时/min	总降雨量/mm	降雨强度/(mm·h <sup>-1</sup> )	径流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	投加量/(mg·L <sup>-1</sup> )		沉淀池表面负荷/(m <sup>3</sup> ·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )
							PAC	PAM	
1	2012-09-02	6	110	8.6	4.7	60	100	0.6	20.0
2	2012-09-11	9	280	16.1	3.5	60	100	0.6	20.0
3	2012-09-21	10	150	22.9	9.2	60	120	0.8	20.0
4	2012-10-16	25	35	14.0	24.0	60	120	0.8	20.0
5	2012-10-22	6	70	4.0	3.4	60	100	0.8	20.0
6	2012-10-26	4	185	13.6	4.4	100	120	0.8	33.0
7	2012-10-29	3	490	11.6	1.4	100	120	0.8	33.0
8	2013-08-24	34	127	29.9	14.1	120	120	0.8	38.5
9	2013-09-11	18	424	52.2	7.4	120	120	0.8	38.5

降雨试验过程中,由于降雨强度、降雨量、雨前旱天数等因素差别较大,冲沟内的雨水水质亦有较大幅度的变化。其中7场降雨进水水质的变化如图2所示。

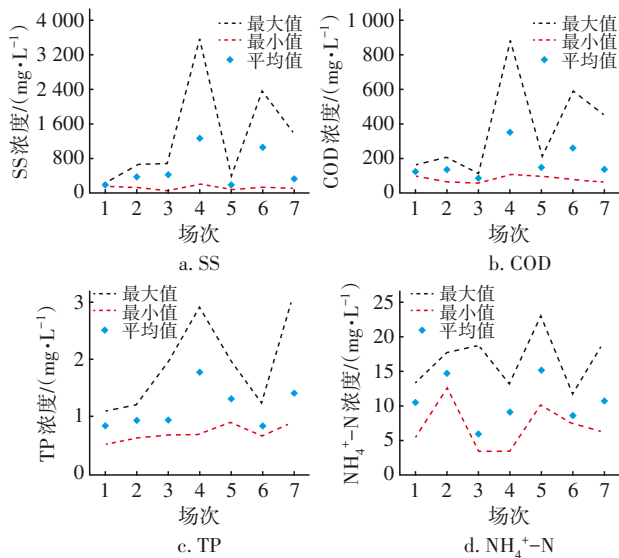


图2 7场降雨进水水质的变化

Fig.2 Changes of influent quality of 7 rainfalls

从图2可以看出,进水SS、COD、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的平均值分别为188~1271、85~349、0.9~1.9和6.4~16.2 mg/L。7场降雨的进水水质指标差别明显,这主要与降雨强度和前期降雨频次有关,其中进水SS、COD浓度的变化幅度较大,并且与降雨强度呈正相关关系;而进水TP和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度的变化幅度较小。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同启动方式下对SS和TP的去除效果

为实现装置的快速启动,对第1、2场降雨试验分别采用延时启动和实时启动方式,考察沉淀池出水SS和TP的变化。延时启动指装置在运行前排空,冲沟内的雨水径流泵入空池并开启相关设备进行处理,待装置充满水后开始出水。实时启动指装置在运行前装满上次运行处理后的水,在泵入雨水径流后随之开始出水。图3为第1场降雨延时启动对污染物的去除效果。可知,装置采用延时启动时,20 min内,出水SS、TP的浓度基本呈现下降趋势,随后趋于稳定。PAC混凝剂是一种阳离子型高分子电解质,在混凝过程中铝水解生成各种羟基多核络离子,这些水解聚合物通过电中和、吸附架桥发挥絮凝作用,吸附聚集颗粒物及胶体,达到净水

目的。

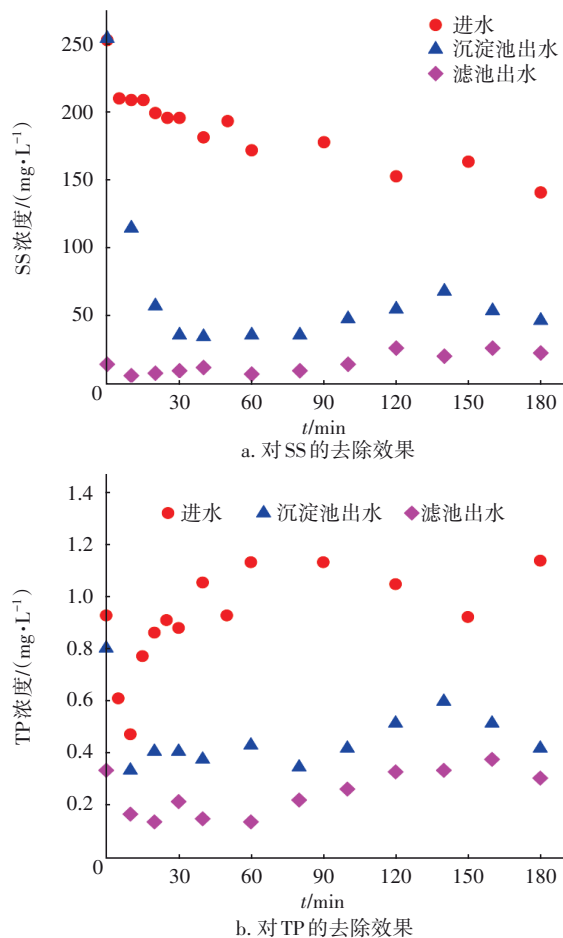


图3 第1场降雨延时启动对污染物的去除效果

Fig.3 Removal effect of pollutants in the first rainfall when using delayed start-up

沉淀池出水SS浓度分别从251 mg/L降至56 mg/L,TP浓度从0.81 mg/L降至0.41 mg/L。滤池出水与沉淀池出水变化趋势几乎相同,说明后续过滤单元能有效减缓响应过程中出水水质的波动。

图4为第2场降雨实时启动对污染物的去除效果。可知,由于装置实时启动,运行期间,沉淀池出水SS和TP的浓度分别在75和0.55 mg/L左右,而滤池出水TP浓度可降至0.2 mg/L。这是由于在纤维束过滤过程中,滤层孔隙率及过滤孔径自上而下由大到小分布,这种变孔径过滤通道主要靠分子间作用力吸附颗粒。对比实时启动与延时启动对SS和TP的去除效果,实时启动条件下,可实现污染物的快速去除,因此为缩短装置的响应时间可采用实时启动方式;若采用延时启动,装置启动时间需预留20 min,以降低对排放水体的污染。

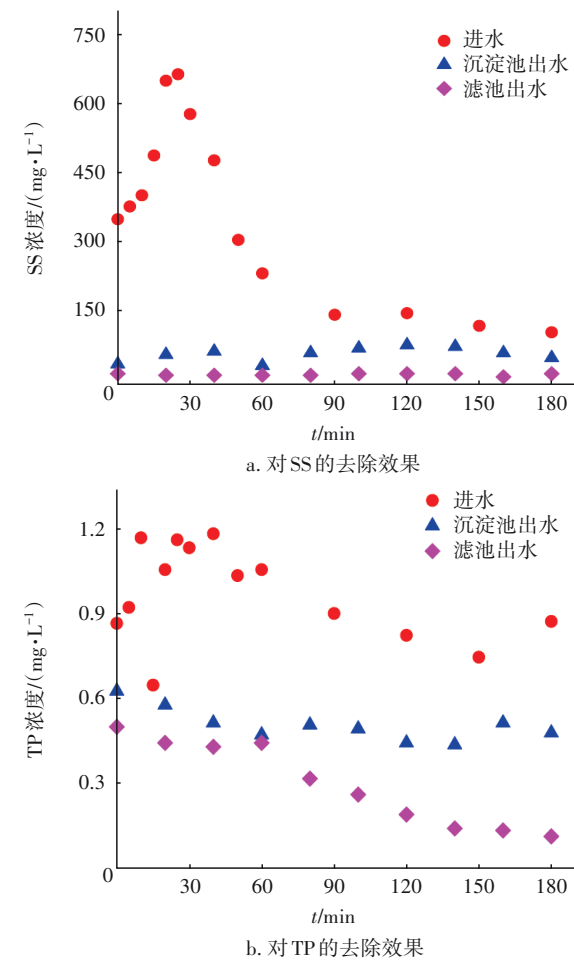


图4 第2场降雨实时启动对污染物的去除效果

Fig.4 Removal effect of pollutants in the second rainfall when using real-time start-up

2.2 不同污染负荷下对污染物的去除效果

在沉淀池表面负荷为  $20.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的条件下,以第3~5 场降雨为试验用水,对污染物的去除效果见表2。

表2 第3~5场降雨试验中对污染物的去除效果

Tab.2 Removal effect of pollutants in the 3rd to 5th rainfalls  $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

降雨场次	SS			COD			TP		
	进水	沉淀池	滤池	进水	沉淀池	滤池	进水	沉淀池	滤池
3	411	12.0	<5	85	46.4	49.8	1.0	0.3	0.2
4	1 271	24.2	<5	349	43.4	43.2	1.9	0.3	0.2
5	193	30.9	<5	143	55.2	43.7	1.4	0.5	0.3

从表2可以看出,虽然进水水质变化幅度较大,但是装置的出水水质良好且稳定。不同场次降雨下,沉淀池对SS的平均去除率为84%~98%,对COD

的平均去除率为45%~88%,对TP的平均去除率为64%~84%。对比滤池出水与沉淀池出水可知,高效滤池能进一步去除SS和TP,但对COD的去除效果不佳。综上所述,在沉淀池表面负荷为  $20.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  的条件下,快速混凝沉淀+高效纤维滤池组合工艺对SS、COD、TP的去除率分别为97%~99%、41%~88%和79%~90%。

当沉淀池表面负荷达到  $33.0 \text{ m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$  时,测定第6、7 场降雨中对SS的去除效果,结果如图5所示。

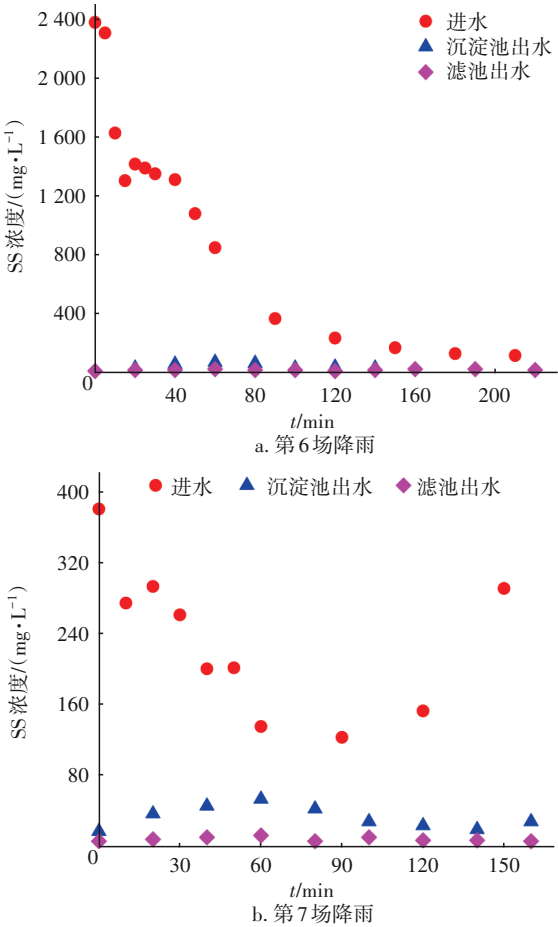


图5 第6、7场降雨中对SS的去除效果

Fig.5 Removal effect of SS in the 6th and 7th rainfalls

由图5可知,两场降雨初期,第6场降雨的SS浓度高达  $2400 \text{ mg/L}$ ,但沉淀池出水SS浓度仍较低。两场降雨中,沉淀池出水SS浓度为9~73  $\text{mg/L}$ ,平均值为  $33.0 \text{ mg/L}$ ;滤池出水SS浓度为5~11  $\text{mg/L}$ ,平均值为  $6.4 \text{ mg/L}$ 。相比于第3~5 场降雨,第6、7场降雨的出水SS浓度虽然有所上升,但去除率仍高达80%以上。



图6为第6、7场降雨中对COD的去除效果。可知,沉淀池出水COD为31.6~72.5 mg/L,平均值为48.8 mg/L;滤池COD出水为27.0~53.9 mg/L,平均值为38.1 mg/L。在第6场降雨进水污染物浓度较高的情况下,对COD仍具有一定的去除效果,与第3~5场降雨的去除效果相比,出水COD浓度变化幅度不大。

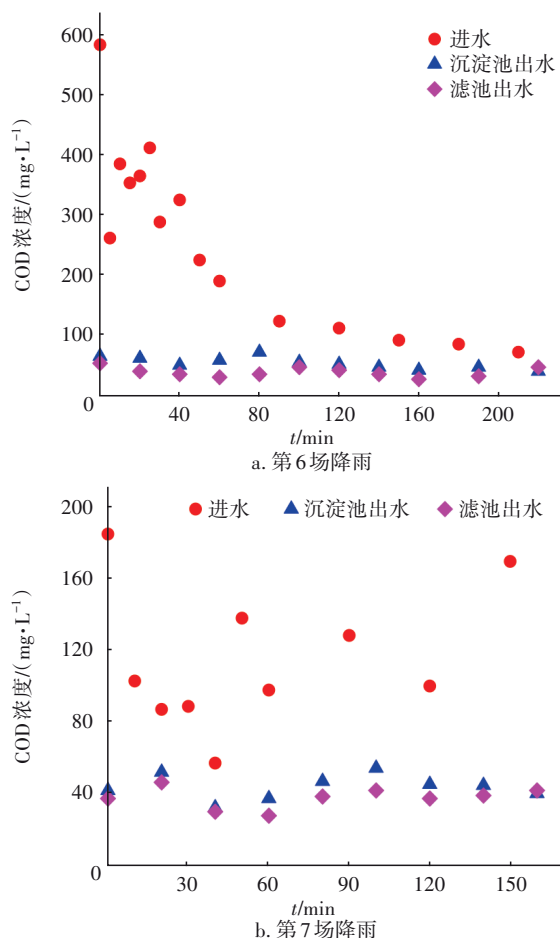


图6 第6、7场降雨中对COD的去除效果

Fig.6 Removal effect of COD in the 6th and 7th rainfalls

图7为第6、7场降雨中对TP的去除效果。可以看出,沉淀池出水TP浓度为0.10~0.51 mg/L,平均值为0.31 mg/L;滤池出水TP浓度为0.10~0.30 mg/L,平均值为0.17 mg/L。可见,高效滤池对TP的去除效果较为明显,这也符合前面获得的试验结果。综合上述分析可知,当沉淀池的表面负荷为33.0  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 时,快速混凝沉淀+高效纤维滤池组合工艺对SS、COD、TP的去除率分别为80%~99%、41%~84%和78%~89%,并不影响装置的运行,出水水质仍然较好。

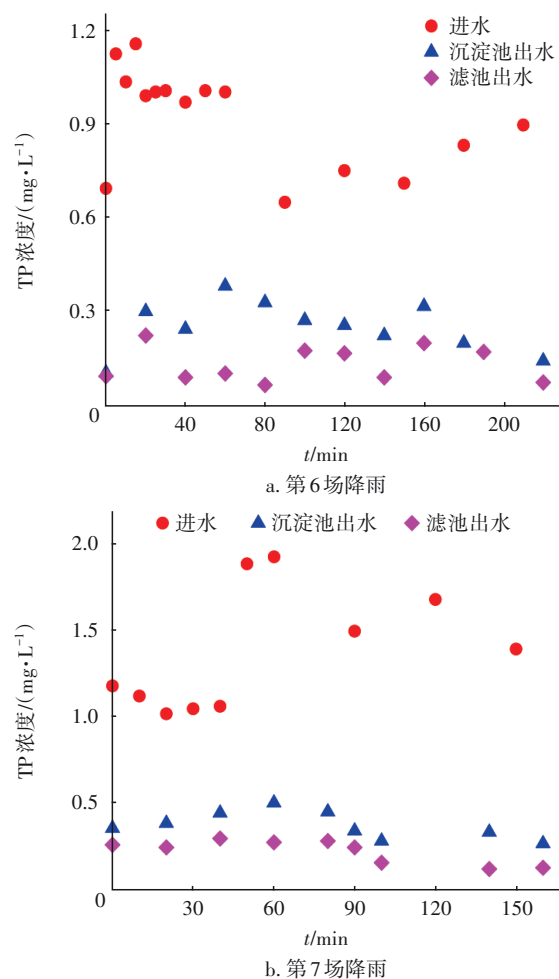


图7 第6、7场降雨中对TP的去除效果

Fig.7 Removal effect of TP in the 6th and 7th rainfalls

为探究该装置的表面负荷限值,避免实际运行中出现超负荷问题,进一步提高进水量至120  $\text{m}^3/\text{h}$ ,此时沉淀池表面负荷达到38.5  $\text{m}^3/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。第8场降雨中进水初期污染物浓度较高,进水SS为146~1610 mg/L,平均值达到660 mg/L。随着表面负荷的增加,沉淀池表面开始出现矾花,出水浊度增加,水质变差,出水SS浓度为90~770 mg/L,平均值为271 mg/L。第9场降雨中进水初期污染物浓度较低,进水SS为40~312 mg/L,但是由于表面负荷的增加,沉淀池出水SS效果不佳,平均值达到96.8 mg/L。尽管沉淀池有矾花上浮现象发生,但未见大块污泥絮体上浮。因此可以推断,斜管还具有泥水分离的能力,并没有达到负荷极限,但由于提升泵的流量已达到极限,无法进一步探究负荷极限。

### 3 结论

① 7场降雨中,进水SS、COD、TP、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 浓

度的平均值分别为188~1 271、85~349、0.9~1.9和6.4~16.2 mg/L。从降雨进水水质变化来看,各场降雨中水质指标变化幅度差别较大,这主要与降雨强度和前期降雨频次有关。

② 采用延时启动方式时,装置的响应时间为20 min;采用实时启动方式时,装置不需要响应时间,可实现快速实时启动。实际运行中,建议采用实时启动方式;当需要采用延时启动方式时,建议将装置启动后20 min内处理的出水回流至进水池。

③ 当沉淀池表面负荷为20.0~33.0 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)时,快速混凝沉淀+高效纤维滤池组合工艺对SS、COD、TP的平均去除率分别为80%~99%、41%~88%和78%~90%,但对NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N和TN的去除效果不明显。当沉淀池表面负荷达到38.5 m<sup>3</sup>/(m<sup>2</sup>·h)时,沉淀池出现矾花上浮现象。

#### 参考文献:

- [1] 陈莹. 西安市路面径流污染特征及控制技术研究[D]. 西安: 长安大学, 2011.
- CHEN Ying. Pollution Characteristics and Control Technology of Urban Road Runoff in Xi'an City [D]. Xi'an: Chang'an University, 2011 (in Chinese).
- [2] 胡煜. 合肥市肥西县老城区初期雨水处理厂工艺设计方案[J]. 净水技术, 2019, 38(7): 47-51.
- HU Yu. Design proposal of treatment process for the initial rainwater treatment plant in old town of Feixi Country of Hefei City [J]. Water Purification Technology, 2019, 38(7): 47-51 (in Chinese).
- [3] DELANEY C, FAM D. The 'meaning' behind household rainwater use: an Australian case study [J]. Technology in Society, 2015, 42: 179-186.
- [4] GREGOIRE B G, CLAUSEN J C. Effect of a modular

extensive green roof on stormwater runoff and water quality [J]. Ecological Engineering, 2011, 37 (6): 963-969.

- [5] 陈义飞, 孙琴, 丁士明, 等. 强化混凝技术处理南淝河污染水的效果[J]. 水资源保护, 2015, 31(4): 103-110.

CHEN Yifei, SUN Qin, DING Shiming, et al. Effect of enhanced coagulation technology for treatment of polluted water from Nanfei River [J]. Water Resources Protection, 2015, 31(4): 103-110 (in Chinese).

- [6] 王银爽, 周立, 王英, 等. 法国里尔污水厂 Actiflo<sup>®</sup> Turbo 工艺处理大流量暴雨水[J]. 中国给水排水, 2017, 33(22): 111-115.

WANG Yinshuang, ZHOU Li, WANG Ying, et al. Actiflo<sup>®</sup> Turbo application for stormwater treatment of Lille WWTP in France [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(22): 111-115 (in Chinese).

- [7] 吴建磊. 污水处理新工艺——DENSADeg+BIOFOR [J]. 中国给水排水, 2003, 19(1): 103-104.

WU Jianlei. A new wastewater treatment process—DENSADeg+BIOFOR [J]. China Water & Wastewater, 2003, 19(1): 103-104 (in Chinese).

- [8] WEISS G. Innovative use of lamella clarifiers for central stormwater treatment in separate sewer systems [J]. Water Science & Technology, 2014, 69 (8): 1606-1611.

作者简介:周传庭(1980—),男,辽宁辽阳人,博士,高级工程师,主要研究方向为市政污水和初期雨水处理。

E-mail: 13482299753@139.com

收稿日期:2020-06-27

修回日期:2020-07-10

(编辑:任莹莹)

绿水青山就是金山银山