

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2024.03.006

污水厂二沉池运行条件对微塑料截留特性的影响

郝飞麟¹, 沈明卫²

(1. 浙江树人学院 生物与环境工程学院, 浙江 杭州 310015; 2. 浙江大学 生物系统工程与食品科学学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 为了探索已建成运行污水处理厂低成本、高效截留微塑料的途径,以污水处理流程末端的二沉池单元为研究对象,考察了二沉池的3个运行参数(进水微塑料浓度、污泥浓度和水力负荷)和2种配水方式(周进周出、中进周出)对3种典型微塑料颗粒(聚乙烯PE、聚丙烯PP和聚氯乙烯PVC)截留特性的影响。结果表明,通过调节二沉池的运行参数和改变其配水方式,可有效提高二沉池对微塑料颗粒的截留率,采用中心进水方式可将PE和PP微塑料颗粒的截留率提升近20%,二沉池出水中的微塑料颗粒以对人类更为有害、等效直径<35 μm的颗粒为主。同时,运用方差分析方法,提出了不影响污水处理厂主体工艺的优化调节方案。

关键词: 微塑料; 污水处理厂; 二沉池; 截留; 运行参数; 配水方式

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)03-0038-08

Effect of Secondary Settling Tank Operation Conditions on Retention Characteristics of Microplastics in Wastewater Treatment Plant

HAO Fei-lin¹, SHEN Ming-wei²

(1. College of Biology and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou 310015, China; 2. College of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: This paper investigated the effect of three operation parameters (microplastic concentration in influent, sludge concentration and hydraulic loading rate) and two water distribution modes (peripheral-feed and peripheral-overflow, central-feed and peripheral-overflow) on the retention characteristics of three typical microplastic particles (polyethylene, polypropylene and polyvinyl chloride) in secondary settling tank at the end of the wastewater treatment process, so as to explore the low-cost and efficient retention of microplastics in existing operational wastewater treatment plants. The retention efficiency of microplastic particles in the secondary settling tank was effectively improved by adjusting its operation parameters and changing its water distribution mode. The retention rates of polyethylene and polypropylene microplastic particles were improved by nearly 20% by using the central-feed mode. The microplastic particles in effluent from the secondary settling tank were mainly those more harmful to humans with equivalent diameter less than 35 μm. In addition, the optimized regulation scheme which did not affect the main process of wastewater treatment plant was proposed by using variance analysis method.

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(LGN19E080001)

Key words: microplastic; wastewater treatment plant; secondary settling tank; retention; operation parameter; water distribution mode

污水处理厂作为连接人类活动与自然水环境的枢纽,是微塑料进入自然水体最重要的“汇”和“源”^[1-4],Raju等^[2]和Murphy等^[5]发现自然水体中80%的微塑料均可溯源自污水处理厂。目前,已有近千篇研究微塑料的文章公开发表,国内外研究人员不但对各地区已建成的污水处理厂的整体(表观)赋存(截留)特性有了较为深入的了解^[6-10],同时也探索了不同处理程度(一级、二级和三级处理)和不同主体处理工艺对微塑料赋存特性的影响^[4,6,8-13],这为微塑料污染的评价、管理以及新建污水处理厂的设计提供了科学依据。

微塑料的种类、特性以及污水处理的工艺和运行参数对微塑料的赋存特性影响巨大,最近的研究表明,已建成运行的二级和三级污水处理厂对微塑料的截留率(颗粒数量截留率)在40%~99.9%之间^[14],这意味着如果管理或者设计不善,仍会有大量的微塑料(高达60%)排入环境水体^[4,6-11,13,15-16];另一方面,污水处理厂建造的目的在于去除以有机物为主的污染物质,在目前仍未制定与微塑料有关的排放标准的情况下,作为无明显经济效益的污水处理厂,人们显然没有足够的动力对已建成运行的污水处理厂进行大规模的升级、改造,如增设混凝沉淀单元、过滤单元和高级氧化单元等可以提升微塑料截留率的设施^[17]。从上述两方面来看,在尽量不改变现有运行模式的前提下,探索如何高效且低成本地提升已建成运行污水处理厂的微塑料截留率显得更具有现实意义。基于此,笔者以污水处理厂广泛采用的二沉池为研究对象,探索其运行参数和配水方式(周进周出和中进周出)对微塑料截留效果的影响,以期实现以下目标:①对已有工艺系统和操作模式干扰尽可能小;②能显著控制污水处理厂排水中微塑料的数量。大量的报道表明,污水经过一级处理后,二级处理段仍可去除3.6%~66.7%的微塑料颗粒^[1,6,8-11,16,18]。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

污水处理厂所服务区域内的生产和生活方式决定着污水中微塑料的种类和特性,Sun等^[12]和Ngo

等^[18]研究发现:污水中存在着30种以上的微塑料,其中检测到最多的6种分别是:聚乙烯(PE)、聚丙烯(PP)、聚酰胺(PA)、聚醚砜(PES)、聚苯乙烯(PS)和聚对苯二甲酸乙二酯(PET)^[12,16]。为使本研究具有一定代表性,选取两种在污水处理厂中出现最多的微塑料PE和PP^[18-19],同时增加占比较大的聚氯乙烯(PVC)作为补充,3种微塑料均购自上海石化公司,其中,PE和PP均为透明颗粒,密度分别约为0.94、0.86 g/cm³,PVC为深色颗粒,密度约为1.40 g/cm³。试验前,将3种微塑料颗粒冷冻至-16℃后,用磨盘式样品磨(PFEUFFER Labomil M)粉碎为等效直径在1 000 μm以下的颗粒,因为污水经一级处理后,其等效颗粒直径绝大部分小于1 000 μm^[13,17,20]。

1.2 试验系统设置

试验在实验室以模拟的方式进行,设置两套系统:一套是活性污泥培养系统,用于培养试验所需活性污泥;一套为正式的试验系统,其配置如图1所示。为避免实际污水中所含背景微塑料的干扰,图1中进样槽内定量补充的“污水”为反渗透和离子交换处理后的纯净水。在试验前和试验过程中,将预先配制好的营养液(对应好氧微生物)加入进样槽,以防止试验系统中的好氧污泥变性。在首次加入营养液后,按试验设计好的种类和数量在进样槽S1中投入微塑料颗粒并进行长时间(>48 h)搅拌分散,然后将实验室另一好氧系统中的活性污泥引入污泥接触池(水力停留时间<5 min),启动进流泵和污泥补充泵,控制污泥接触池的悬浮污泥浓度(MLSS)、进样中微塑料的浓度(IMP)和二沉池水力负荷(HLR)3个变量进行试验。为减少系统运行及测量随机误差对试验结果的影响,IMP采用了国外文献中较高的浓度^[16,21],同时,为减轻微塑料颗粒在处理过程中破碎对测量结果的影响及试验变量控制的方便性,本试验采用质量浓度来度量IMP的变化情况。试验设计应用Design Expert®软件,设计结果见表1。系统运行稳定后立即开始从进样槽S1和储水槽S2中取样,微塑料每个种类、每个投加量的试验持续时间为4.5 h(超出二沉池的停留时间1.0 h),试验重复3次。试验过程中每隔0.5 h分别从S1

和S2处取样500 mL,分析时将分时所取水样进行混合,这样水样体积超过1.0 L,可以满足样品代表性的要求^[9]。

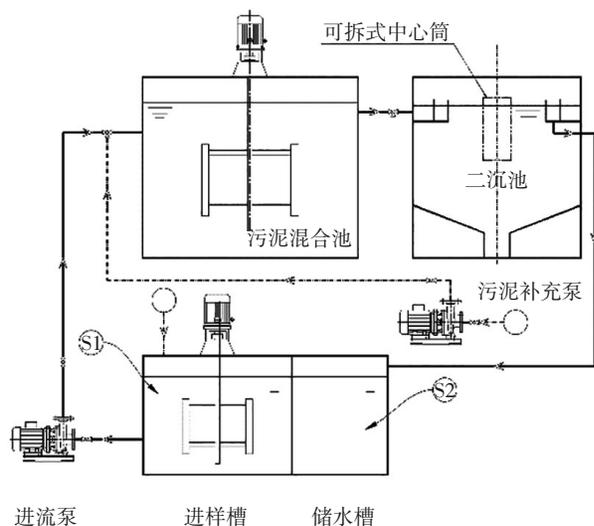


图1 试验装置

Fig.1 Schematics of experimental set-up

表1 试验设计

Tab.1 Experiment design

试验编号	HLR/(m ³ ·m ⁻² ·h ⁻¹)	MLSS/(mg·L ⁻¹)	IMP/(g·m ⁻³)
1	0.8	3 500	1.0
2	1.0	4 000	10.0
3	1.2	3 000	5.0
4	0.8	4 000	5.0
5	1.0	4 000	1.0
6	1.0	3 500	5.0
7	1.0	3 000	1.0
8	1.0	3 500	5.0
9	1.0	3 500	5.0
10	1.2	3 500	10.0
11	0.8	3 000	5.0
12	1.2	4 000	5.0
13	1.0	3 000	10.0
14	0.8	3 500	10.0
15	1.0	3 500	5.0
16	1.0	3 500	5.0
17	1.2	3 500	1.0

水样的采集和储存均采用经过反复冲洗的玻璃烧杯和不锈钢容器,并且在洁净工作台进行隔离式操作。微塑料的第一步分离采用氧化性较强的芬顿试剂而不是H₂O₂,因为对于PP、PE和PVC三种微塑料来说,芬顿试剂对其形状的影响较小而分离

效率较高^[19]。具体过程为:将0.05 mol/L的FeSO₄和30%的H₂O₂^[3,19]缓慢加入不锈钢容器(置于水浴锅内)中搅拌30 min以上,保持温度低于40℃直至溶液变透明;冷却到室温后用真空抽滤装置进行过滤,滤膜采用1.0 μm孔径以便分析更小尺寸的微塑料颗粒^[7,19];滤膜上截留的颗粒用超纯水冲洗到烧杯中,再用NaI定容配制到密度约为1.2~1.8 g/mL(PP和PE采用较低的密度、PVC采用较高的密度),在室温下静置24 h^[3,15],然后放入冰箱12 h继续沉淀,将上部悬浮物移入烧杯准备进行进一步分析。

1.3 微塑料检测方法

由于本研究是运行参数与配水方式的对比试验,所以试验和检测方法的首要任务是保证试验条件的可比性,而非测量结果的绝对精确性。本研究采用激光粒度分析仪进行微塑料粒径分析,其优点是可对溶液中直径为1~1 000 μm的颗粒采用复合激光散射原理(米氏散射理论与夫琅和费衍射理论)进行测量分析,与采用多个分级滤纸的研究方法^[3,22-23]相比,粒度分析仪可检测到20 μm以下的颗粒,而且所得结果为更形象生动的颗粒直径连续分布图。为进一步提高激光粒度分析仪的准确性,本研究在粒径分析时(称质量后)用尼罗红将PP和PE两种透明微塑料颗粒进行了染色处理(PVC为深色,故不进行染色)^[3]。

为检验微塑料的分离效果和粒径测量数据,作为质量控制措施,本研究对称质量后的每种微塑料颗粒进行抽样检查:将0.2 mg/mL的孟加拉玫瑰红滴到放置PP和PE样品的滤纸上染色^[15,24],然后在光学显微镜下观察有无夹杂在其中的有机物,并进行投影尺寸测量,以此来检验芬顿氧化过程的有效性和颗粒粒径数据的符合性。采用Olympus光学显微镜,配备DP22数码摄像头和DP2-SAL分析软件,观察和测量染色后(二次染色)微塑料颗粒的大小,以确定激光粒度分析仪的精度^[7,22]。

2 结果与讨论

2.1 对微塑料尺寸分布的影响

对每次试验中分离出的微塑料颗粒称质量后,将同种类微塑料样品混合、染色(PVC样品不染色),配制成浓度适当的混合液进行粒径分析。图2为光学显微镜下观察到的、粉碎后的微塑料颗粒的典型微观形态,以碎片和纤维状为主,颗粒状很少,

这与文献中报道的污水处理厂样品中观察到的出现最多的微塑料形态一致^[3,13,16]。

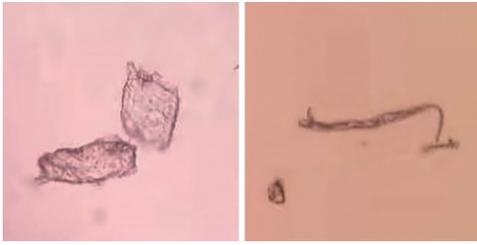


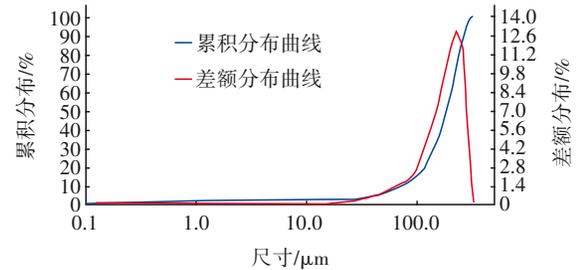
图2 试验中微塑料颗粒的微观形态

Fig.2 Morphology of the microplastics

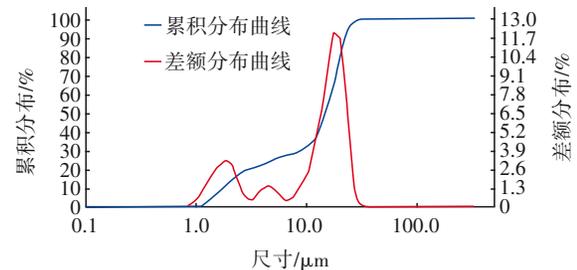
图3~5为3种微塑料颗粒在试验前后尺寸分布的变化情况(此处仅列出周边进水方式,中心进水方式的试验结果类似)。微塑料颗粒的典型等效直径(等效体积直径)变化的数据统计见表2。从图3可以看出,进水中的PVC颗粒直径的峰值集中在100~300 μm之间,50 μm以下的颗粒仅占5.25%,具体的统计特征直径为(见表2):中位直径 D_{50} =190.94 μm、体积平均直径 $D[4,3]$ =183.08 μm、面积平均直径 $D[3,2]$ =14.82 μm,这些特征参数基本与Talvitie等^[20]、Edo等^[23]和Petroody等^[24]的研究结果相吻合;二沉池出水中的PVC颗粒直径集中分布在10~30 μm范围,直径<35 μm的颗粒占100%,颗粒的中位直径 D_{50} 下降了90%以上,表明二沉池对大颗粒微塑料的截留效果十分明显。为使微塑料颗粒的尺寸分布平衡,本次试验对PE和PP采用了较小的研磨筛网,其颗粒尺寸分布峰值比PVC颗粒低,PP颗粒的 D_{50} 为52.56 μm,PE颗粒的 D_{50} 为25.28 μm。与PVC颗粒的变化规律类似,PE和PP(见图4和图5)在二沉池出水中的颗粒直径均低于35 μm,在本试验中,不论二沉池进水中微塑料颗粒的种类、直径大小和尺寸分布如何,出水中均未发现直径>35 μm的微塑料颗粒。

本研究得到的微塑料颗粒直径结果低于Liu等^[16]所统计的11个国家38座污水处理厂出水的检测数据(81%~91%的微塑料颗粒直径<1.0 mm),也低于Ziajahromi等^[15]和Browne等^[25]研究得出的污水处理厂出水中90%的微塑料颗粒直径<500 μm、其中约60%小于100 μm的结论,这可能是由于进水中微塑料的种类、颗粒直径和测量方法不同;但与Simon等^[21]的研究结果(出水中直径<25 μm的微塑料颗粒占相当大的比例)相近,也与大西洋中32%

的微塑料颗粒直径<20 μm的监测结果^[25]契合。值得注意的是,虽然污水处理厂有效截留了人类产生的微塑料,但对人类健康有明显影响的部分(颗粒尺寸)并没有有效消除,这仍然需要深入的研究。



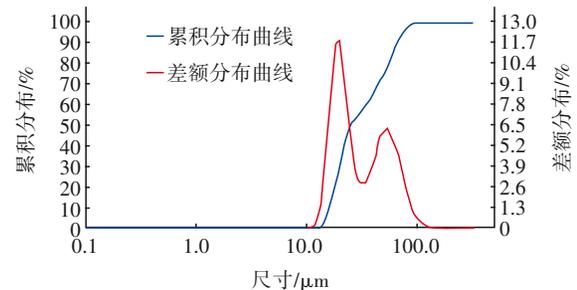
a. 二沉池进水



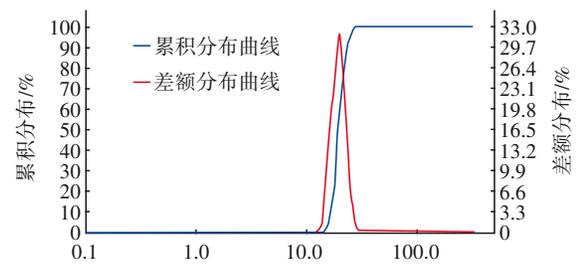
b. 二沉池出水

图3 试验前后PVC颗粒的尺寸变化情况

Fig.3 Size change of PVC particles before and after the experiment



a. 二沉池进水



b. 二沉池出水

图4 试验前后PE颗粒的尺寸变化情况

Fig.4 Size change of PE particles before and after the experiment

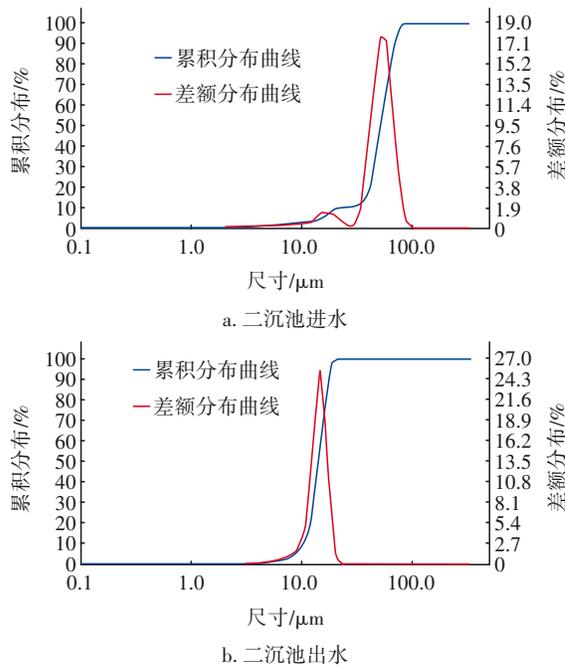


图5 试验前后PP颗粒的尺寸变化情况

Fig.5 Size change of PP particles before and after the experiment

表2 二沉池处理前后3种微塑料颗粒粒径的变化情况
Tab.2 Changes in particle size of three types of microplastics before and after secondary settling tank treatment

项目	中位直径 D_{50}	体积平均直径	
		$D[4,3]$	$D[3,2]$
进水 PE	25.28	35.12	26.33
出水 PE	19.86	20.00	19.67
进水 PP	52.56	50.74	36.83
出水 PP	14.16	13.92	13.11
进水 PVC	190.94	183.08	14.82
出水 PVC	15.18	13.29	5.45

对比图3~5中二沉池处理前后污水中微塑料颗粒在10 μm直径附近的分布情况,可以发现,出水部分的颗粒直径分布图形并不是进水部分对应段简单的等比例放大,这说明微塑料在试验过程中有机械破碎的情况,而且这种过程比较明显,这与Enfrin等^[26]的研究结果一致。

2.2 对微塑料质量截留率的影响

在二沉池不同运行参数和配水方式条件下,3种微塑料的质量截留率对比情况如图6所示。可知,两种配水方式条件下二沉池对3种微塑料的质量截留率均在38.18%以上,其中在周边进水方式下平均截留率为59.09%,而在中心进水方式下为

74.55%,显然,中心进水方式具有更高的微塑料截留率,与周边进水方式相比,对PE和PP的平均截留率提高了19.78%,对PVC的平均截留率提高了5.92%,这可能是二沉池中心进水柱的狭小空间增加了微塑料颗粒之间及微塑料颗粒与活性污泥颗粒之间的碰撞机会而导致的。

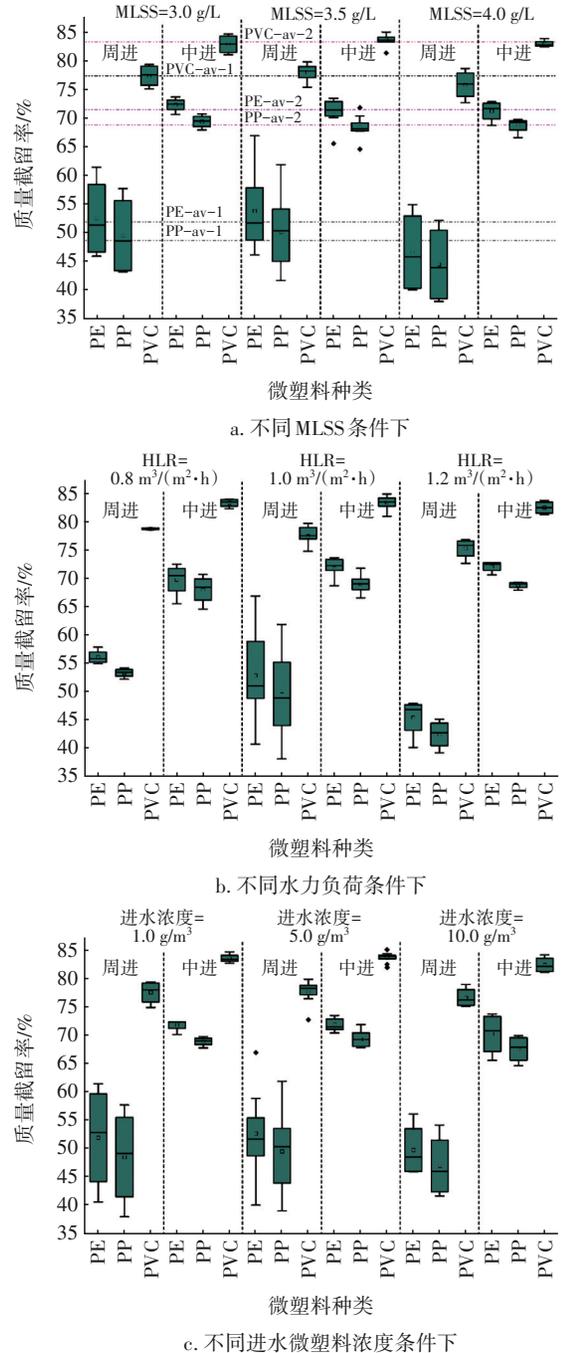


图6 在不同运行条件下二沉池对3种微塑料的截留率
Fig.6 Retention rate of three types of microplastics in secondary settling tank under different operation conditions

从图6(a)中的截留率平均线可以看出,3种微塑料颗粒的截留特性差异明显,PVC颗粒由于密度远大于水,截留率明显高于PE和PP颗粒,平均高出27.18%;PE与PP的截留率在考虑试验误差的情况下差别不大,PE的平均截留率略高于PP,这说明:在生化处理阶段,污泥对微塑料的截留机制除了吸附和网捕外^[16],沉淀和浮除同样也是十分重要的截留手段,这与Bilgin等^[22]的研究结论一致。

有限的初步试验表明,二沉池对3种微塑料颗粒的平均截留率高于38.18%,这一结果与文献中报道的实际污水处理厂二级处理段对微塑料的截留率在3.6%~66.7%之间的结果基本吻合^[1,6,8-11,18],虽然有微塑料种类、尺寸分布乃至颗粒数量去除率与颗粒质量去除率计算的差别,但其截留机制仍需要进一步深入研究。

考虑到试验误差,图6中列出的影响因子对二沉池截留微塑料效能的影响不尽相同,其中,二沉池进水的MLSS和微塑料浓度对两种配水方式的二沉池截留3种微塑料颗粒的效果影响不大,尤其是进水微塑料浓度,在本次试验设置的变化范围内几乎未发现对截留微塑料颗粒有明显的影响。这与文献报道中去除微塑料的胞外聚合物(EPS)吸附机制有一定的矛盾:因为随着污泥浓度的提高,微生物所分泌的EPS浓度亦会提高,会有更多的微塑料被吸附形成絮体,但在本试验中发现的情况是,随着污泥浓度的增加,微塑料颗粒的截留率先出现一定程度的升高,但随着污泥浓度的进一步增加,微塑料颗粒的截留率反而逐渐降低。产生这种现象的原因和机制有待进一步探索。另外,二沉池的水力负荷对微塑料的截留率有较为明显的影响:随着水力负荷的增加,污泥与微塑料接触、絮凝的机会相对降低,截留率随之降低,这对于密度较小的PE和PP颗粒表现尤为明显,而且在周边进水方式下,这种影响更为强烈。

值得注意的是,本试验中二沉池对不同种类微塑料颗粒的质量截留率表现出较为明显的差别:在两种配水方式下,对密度较大的PVC颗粒具有74.85%以上的平均截留率,比PE和PP颗粒的平均截留率高出26.96%。微塑料颗粒密度越大,则越容易沉淀,进而截留率就越高。

2.3 交叉因素影响方差分析

图7为利用方差分析(ANOVA)方法得出的因

子的主成分影响关系分析结果(此处仅以PE颗粒、周边进水方式为例,其他塑料颗粒的结果与之类似),其突出特征为:二沉池水力负荷与PE颗粒的平均截留率呈现较为明显的负相关关系,而且MLSS浓度越大,这种影响越剧烈,进水微塑料浓度对二沉池截留微塑料的效果影响相对较小,这与图6中单因子的影响情况一致。在实践操作中,可以维持适当的悬浮污泥浓度(如本试验中的3500 mg/L),然后选择较低的二沉池水力负荷,则可提升污水处理厂对微塑料的截留率。图8为基于ANOVA的因子交叉影响分析结果,可以更直观地找出最主要的影响因子以及多因子交叉影响关系,从而形成实践操作指导,即:首先通过可行的水力负荷调节范围确定理想的进水负荷,这与二沉池设计的初衷(越小越好)一致;其次是调节进水MLSS浓度,这需要结合生化池的具体运行情况,但降低MLSS往往比提高MLSS会带来更好的微塑料截留效果。

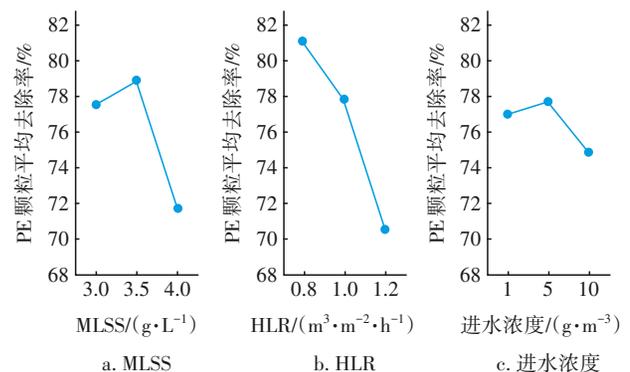


图7 二沉池截留微塑料的影响因子方差分析

Fig.7 ANOVA of main factors on retention of microplastics in secondary settling tank

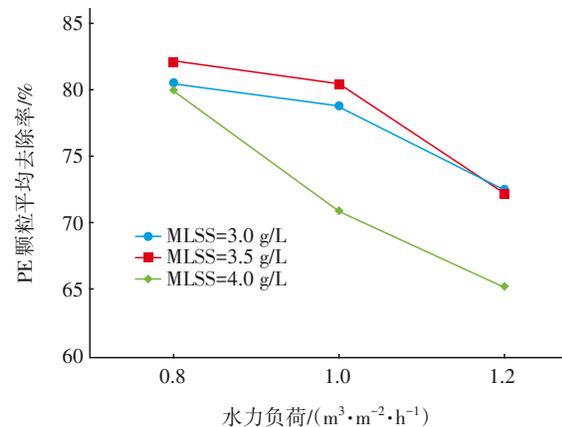


图8 二沉池截留微塑料的因子交叉影响方差分析

Fig.8 ANOVA of factors intersection on retention of microplastics in secondary settling tank

3 结论

① 在本试验条件下,二沉池可较为有效地截留较大颗粒的3种微塑料(PE、PP、PVC),出水中的微塑料颗粒粒径均在35 μm以下,微塑料在沉淀和浮除截留过程中有明显的机械破碎现象发生,出水中的微塑料仍会对人类健康构成较大的风险。

② 配水方式对二沉池截留微塑料有较大的影响,中心进水方式下二沉池对3种微塑料颗粒的截留率明显高于周边进水方式,尤其是对PE和PP两种密度较小的微塑料颗粒,其平均质量截留率可提高19.78%。二沉池对密度较大的PVC颗粒具有74.85%以上的平均截留率,比PE和PP的平均质量截留率高出26.96%。

③ 二沉池的水力负荷与微塑料截留率呈显著的负相关关系,而进水微塑料浓度对其截留率影响不大,在实践操作中,维持尽可能低的水力负荷和适中的进水MLSS,有利于获得较高的微塑料颗粒截留率。

④ 有限的试验发现,除絮凝和网捕外,沉淀和浮除是微塑料与水分离的重要过程,但微塑料与活性污泥的分离机制还需要进一步的深入研究。

参考文献:

- [1] MASON S A, GARNEAU D, SUTTON R, *et al.* Microplastic pollution is widely detected in US municipal wastewater treatment plant effluent [J]. *Environmental Pollution*, 2016, 218: 1045-1054.
- [2] RAJU S, CARBERY M, KUTTYKATTIL A, *et al.* Transport and fate of microplastics in wastewater treatment plants: implications to environmental health [J]. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2018, 17: 637-653.
- [3] RAJU S, CARBERY M, KUTTYKATTIL A, *et al.* Improved methodology to determine the fate and transport of microplastics in a secondary wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2020, 173: 115549.
- [4] ZIAJAHROMI S, NEALE P A, SILVEIRA I T, *et al.* An audit of microplastic abundance throughout three Australian wastewater treatment plants [J]. *Chemosphere*, 2021, 263: 128294.
- [5] MURPHY F, EWINS C, CARBONNIER F, *et al.* Wastewater treatment works (WwTW) as a source of microplastics in the aquatic environment [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50: 5800-5808.
- [6] 许霞,侯青桐,薛银刚,等. 污水厂中微塑料的污染及迁移特征研究进展[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(11): 4393-4400.
XU Xia, HOU Qingtong, XUE Yingang, *et al.* Research progress on the transference and pollution characteristics of microplastics in wastewater treatment plants [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(11): 4393-4400 (in Chinese).
- [7] GIES E A, LENOBLE J L, NOËL M, *et al.* Retention of microplastics in a major secondary wastewater treatment plant in Vancouver, Canada [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2018, 133: 553-561.
- [8] 白濛雨,赵世焯,彭谷雨,等. 城市污水处理过程中微塑料赋存特征[J]. *中国环境科学*, 2018, 38(5): 1734-1743.
BAI Mengyu, ZHAO Shiye, PENG Guyu, *et al.* Occurrence, characteristics of microplastic during urban sewage treatment process [J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(5): 1734-1743 (in Chinese).
- [9] 贾其隆,陈浩,赵昕,等. 大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除[J]. *环境科学*, 2019, 40(9): 259-266.
JIA Qilong, CHEN Hao, ZHAO Xin, *et al.* Removal of microplastics by different treatment processes in Shanghai large municipal wastewater treatment plants [J]. *Environmental Science*, 2019, 40(9): 259-266 (in Chinese).
- [10] 吴君怡,张燕,李宁远,等. 中国水环境微塑料污染及水处理工艺对其去除效果[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(16): 17-23.
WU Junyi, ZHANG Yan, LI Ningyuan, *et al.* Microplastic pollution in China water environment and the effect of water treatment process on microplastics removal [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(16): 17-23 (in Chinese).
- [11] 郝晓地,翟学棚,吴远远,等. 微塑料在污水处理过程中的演变与归宿[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(8): 20-26.
HAO Xiaodi, ZHAI Xuepeng, WU Yuanyuan, *et al.* Evolution and fate of microplastics in sewage treatment [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(8): 20-26 (in Chinese).
- [12] SUN J, DAI X H, WANG Q L, *et al.* Microplastics in

- wastewater treatment plants: detection, occurrence and removal [J]. *Water Research*, 2019, 152: 21–37.
- [13] BAYO J, LÓPEZ-CASTELLANOS J, OLMOS S. Membrane bioreactor and rapid sand filtration for the removal of microplastics in an urban wastewater treatment plant [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, 156: 111211.
- [14] TURAN N B, ERKAN H S, ENGIN G O. Microplastics in wastewater treatment plants: occurrence, fate and identification [J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2021, 146: 77–84.
- [15] ZIAJAHROMI S, NEALE P A, RINTOUL L, *et al.* Wastewater treatment plants as a pathway for microplastics: development of a new approach to sample wastewater-based microplastics [J]. *Water Research*, 2017, 112: 93–99.
- [16] LIU W Y, ZHANG J L, LIU H, *et al.* A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: characteristics and mechanisms [J]. *Environment International*, 2021, 146: 106277.
- [17] HOU L Y, KUMAR D, YOO C G, *et al.* Conversion and removal strategies for microplastics in wastewater treatment plants and landfills [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 406: 126715.
- [18] NGO P L, PRAMANIK B K, SHAH K, *et al.* Classification and removal efficiency of microplastics in wastewater treatment plants [J]. *Environmental Pollution*, 2019, 255: 113326.
- [19] ALVIM C B, MENDOZA-ROCA J A, BES-PIA A. Wastewater treatment plant as microplastics release source—quantification and identification techniques [J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 255: 109739.
- [20] TALVITIE J, MIKOLA A, KOISTINEN A, *et al.* Solutions to microplastic pollution—removal of microplastics from wastewater effluent with advanced wastewater treatment technologies [J]. *Water Research*, 2017, 123: 401–407.
- [21] SIMON M, VAN ALST N, VOLLERTSEN J. Quantification of microplastic mass and removal rates at wastewater treatment plants applying Focal Plane Array (FPA)-based Fourier transform infrared (FT-IR) imaging [J]. *Water Research*, 2018, 142: 1–9.
- [22] BILGIN M, YURTSEVER M, KARADAGLI F. Microplastic removal by aerated grit chambers versus settling tanks of a municipal wastewater treatment plant [J]. *Journal of Water Process Engineering*, 2020, 38: 101604.
- [23] EDO C, GONZALEZ-PLEITER M, LEGANES F, *et al.* Fate of microplastics in wastewater treatment plants and their environmental dispersion with effluent and sludge [J]. *Environmental Pollution*, 2020, 259: 113837.
- [24] PETROODY S S A, HASHEMI S H, VAN GESTEL C A M. Factors affecting microplastic retention and emission by a wastewater treatment plant on the southern coast of Caspian Sea [J]. *Chemosphere*, 2020, 261: 128179.
- [25] BROWNE M A, DISSANAYAKE A, GALLOWAY T S, *et al.* Ingested microscopic plastic translocates to the circulatory system of the mussel, *Mytilus edulis* (L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42 (13): 5026–5031.
- [26] ENFRIN M, DUMEE L F, LEE J. Nano/microplastics in water and wastewater treatment processes—origin, impact and potential solutions [J]. *Water Research*, 2019, 161: 621–638.

作者简介:郝飞麟(1971–),男,山西忻州人,硕士,高级工程师,从事污废水处理方面的工作。

E-mail: haofeilin@qq.com

收稿日期:2021-03-22

修回日期:2021-04-18

(编辑:刘贵春)