

# 采用等离子 - 电浮联合技术富集处理地表水体中微塑料的装置设计和研究

黄逸琳, 蒋雨欣, 陈雪松\*, 郝飞麟, 叶 恺, 张雅荃

浙江树人学院, 生物与环境工程学院, 浙江 杭州

收稿日期: 2023年6月11日; 录用日期: 2023年7月11日; 发布日期: 2023年7月19日

## 摘 要

作为一种新型污染物, 微塑料对生态环境和人类健康的影响越来越受到关注。目前, 人们对微塑料的研究主要集中于生物系统以及毒理方面污染特性调查, 工程化的微塑料清除系统尚未见报道。本文从技术的可行性和工程的可持续性出发, 在实验探索的基础上设计了一种地表水体中微塑料的清洁高效富集技术及装置, 它主要通过低温等离子体(气体)将微塑料荷电, 使水体中的微塑料颗粒首先通过气浮的作用上浮, 再通过表面的电场(电极)富集。经初步实验表明, 该系统对微塑料(PP, PE, PVC)降解效率超过87%, 同时对水中COD的去除率达到60%以上, 是一种清洁、高效、低能耗的处理技术和装置, 可以进一步推广到工业废水、生活污水处理中, 为水体深度处理提供有力支撑。

## 关键词

等离子, 电浮, 地表水体, 微塑料, 富集处理

# Design and Study of Device for Enrichment Treatment of Microplastics in Surface Water by Plasma-Electric Flotation Technology

Yilin Huang, Yuxin Jiang, Xuesong Chen\*, Feilin Hao, Kai Ye, Yaquan Zhang

College of Biological and Environmental Engineering, Zhejiang Shuren University, Hangzhou Zhejiang

Received: Jun. 11<sup>th</sup>, 2023; accepted: Jul. 11<sup>th</sup>, 2023; published: Jul. 19<sup>th</sup>, 2023

\*通讯作者。

文章引用: 黄逸琳, 蒋雨欣, 陈雪松, 郝飞麟, 叶恺, 张雅荃. 采用等离子-电浮联合技术富集处理地表水体中微塑料的装置设计和研究[J]. 水污染及处理, 2023, 11(3): 54-61. DOI: 10.12677/wpt.2023.113008

## Abstract

As a new type of pollutant, the impact of microplastics on the ecological environment and human health has attracted more and more attention. At present, people's research on microplastics mainly focuses on the investigation of pollution characteristics in biological systems and toxicology and engineered microplastic removal systems have not been reported. Starting from the feasibility of technology and the sustainability of engineering, this paper designs a clean and efficient enrichment technology and device for microplastics in surface water on the basis of experimental exploration, which mainly charges microplastics through low-temperature plasma (gas), so that the microplastic particles in the water body first float up through the action of air flotation, and then enrich through the electric field (electrode) on the surface. Preliminary experiments show that the degradation efficiency of microplastics (PP, PE, PVC) exceeds 87%, and the removal rate of COD in water reaches more than 60%, which is a clean, efficient and low-energy treatment technology and device, which can be further promoted to industrial wastewater and domestic sewage treatment, and provide strong support for the advanced treatment of water.

## Keywords

Plasma, Electric Flotation, Floor Water Bodies, Microplastics, Enrichment Treatment

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 前言

微塑料污染是联合国环境规划署(UNEP, 2014)提出的全球十大新兴环境污染问题之一[1]。全球目前的塑料年产量已超过 3.2 亿吨,并且会在未来的 20 年翻番[2],其中的 79%没有经过循环利用直接排放到了环境中[3]。研究表明,2016 年进入地表水体的塑料废弃物在 19~23 Mt 之间,这个数值预计在 2030 年会超过 53 Mt/年[4] [5]。

微塑料具有高比表面积和强吸附性,使其能够吸附环境激素、多环芳烃和多氯联苯等有机污染物和重金属等,形成的复合毒理效应显著增加微塑料的危害[6]。近期研究表明,全球海洋中漂浮着 4.85 万亿个微塑料颗粒[7],这其中,我国是塑料废物产生和污染最严重的国家[8]。以长江为例,我国每年向长江排放 0.33 Mt 的塑料碎片,长江水体中的微塑料含量约 0.5~10.2 个/L,江底沉积物中的微塑料含量约 25~340 个/kg [9],上海市河道污泥中的微塑料含量已达到  $1600 \pm 191$  个/kg [10]。目前对微塑料的研究主要集中在样本中微塑料的检测、微塑料的生态迁移、转化和毒性等方面,对处理或净化工艺以及装置的研究报道较少。现有的报道对微塑料的治理技术主要有:化学混凝技术、电絮凝技术、吸附去除技术等。但这些技术绝大部分适用于实验室小处理量的样品制备过程,不过多地考虑成本和后续的处理要求,而且绝大多数处理方式具有针对性。

密度分离技术在实验室规模上已被广泛应用,但在文献研究中还没有关于放大方法的报道。由于微塑料具有良好的表面疏水性,在静电和浮力作用下微塑料具有一定的去除效率,浮选法可以有效脱水环境中的微塑料。

因此,本作品针对地表水体中微塑料污染和处理技术存在的问题,设计了一种离子气浮高效一体化

的无人船装置，将基于离子气浮技术的去除微塑料装置放入带有净化作用的且带有 GPS 功能技术的无人船中，采用远程遥控模式将无人船置于地表水中去除微塑料颗粒。该基于离子气浮技术的去除微塑料装置具有整个过程不无化学品添加、适应性强、对污染水体其它成分不敏感、无操作条件限制、不产生二次污染、工艺简单、处理效果良好、运行操作方便、自动化程度高、设备结构紧凑、占地空间很小等特点。该装置可以推广应用于河道、废水处理厂、近海、景观水域，为水体的深度清洁提供了有力的支撑。

## 2. 实验工艺流程图

### 2.1. 工艺路线

等离子 - 电浮联合技术富集处理地表水中微塑料的装置是通过等离子体放电结构、曝气结构、电极电压等设计集成了绿色的处理单元，可以高效的去除微塑料。工艺流程图见图 1。

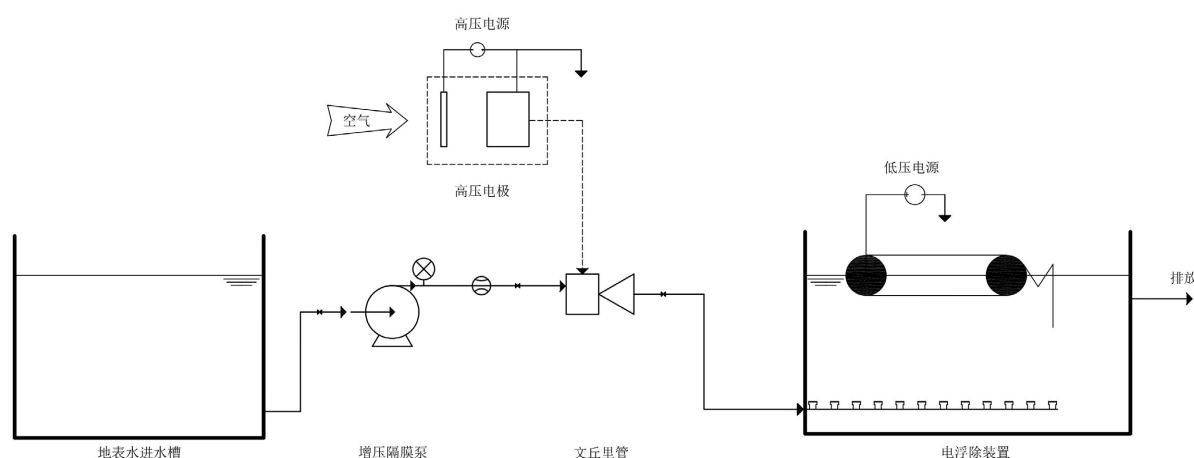


Figure 1. Microplastic removal system process flow chart

图 1. 微塑料去除系统工艺流程图

首先将地表水收集，进入进水槽，通过增压隔膜泵将水体提升，同时让空气在高压电极的作用下，击穿空气，使其成为带负电的等离子体，再通过文丘里管抽吸至水体中，使水体中的微塑料带上负电，并进入电浮除装置，通过池底曝气装置使水体中的微塑料上浮，同时水面装有带正电的转动鼓，带有负电的微塑料在气浮作用下被吸附在转动鼓上，而右侧收集槽可将微塑料刮下收集处理。

其中进水的方式会影响凝聚絮体的扰动利用，需要注意气浮装置动态进水，静态出水，保持液面相对静止使浮选体在相对静止的环境中垂直浮至水面，上浮路程减至最小，不受出水速度的影响，因此而具有非常短的水力停留时间，很高的容积效率。

进入水量的流速也需要得到相对控制，过快的流速会冲击已经吸附或刚分离的微塑料，导致去除效果明显减半。如果流速过慢则会导致微塑料在附电不均匀以及正在进入电浮装置之后微塑料的附电效果会下降导致微塑料不能有效附着在正电转动鼓上面。

再者曝气量和曝气力度也会对整个工艺去除效果产生影响。曝气过强、曝气力度过大会使微塑料过于混乱以及相互之间产生激烈搅动、碰撞，会使转动鼓无法吸附带负电的微塑料。

### 2.2. 等离子体放电结构

采用简单、高效的滤网式放电结构，高压电在滤网上与空气击穿发出蓝紫色火焰，使电能达到最大有效利用，与空气充分混合带负电，进入工艺系统，同时为确保工作时安全性，设计接头全部采用绝缘

体(如图 2 所示)。

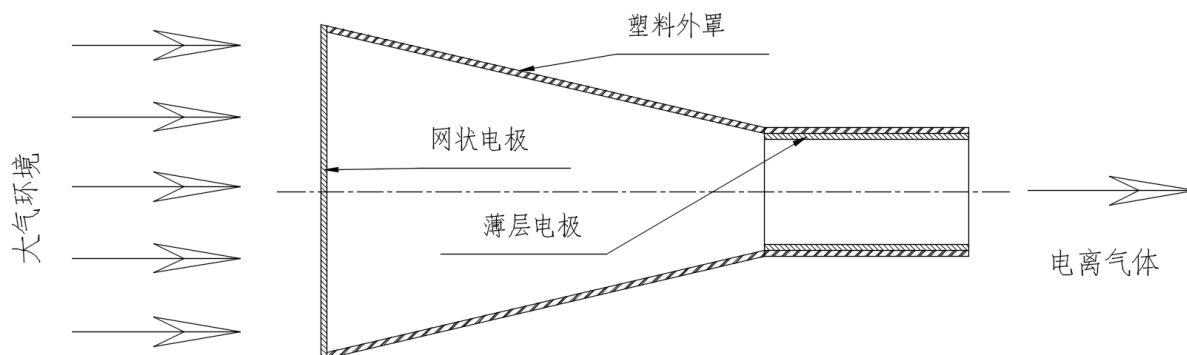


Figure 2. Plasma discharge structure diagram

图 2. 等离子放电结构图

### 2.3. 曝气结构

为使反应器内形成环流，利于微塑料收集，故设计池底曝气系统使反应器两边曝气，中间不曝气，由于电解池底部进水口直径小，流速快，导致靠近进水口处的呈真空状态，为解决问题，我们延长进水至反应池末端并减少装置末端出水孔，解决单边出水现象(如图 3 所示)。

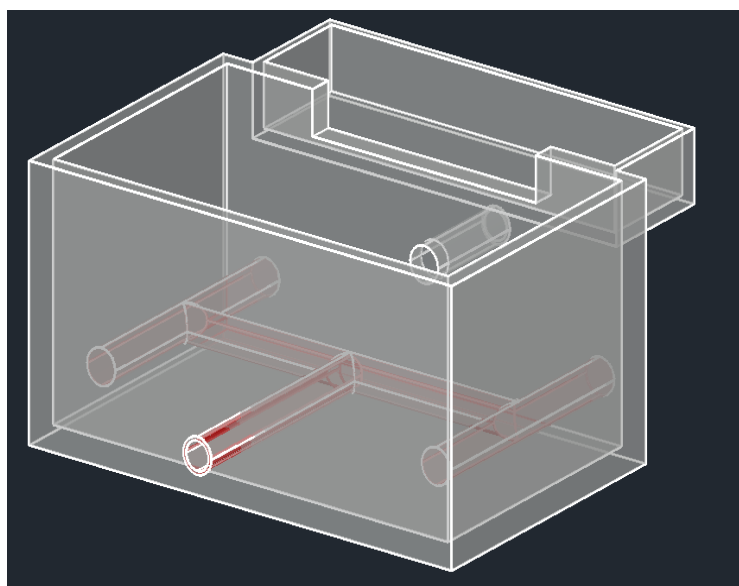


Figure 3. Aeration structure device diagram

图 3. 曝气结构装置图

### 2.4. 电极设计

在等离子体 - 电浮作用下，水中微塑料带上负电，由此设计两块正极板(铜板)与一块负极板(铝板)，排放顺序为正极板 - 负极板 - 正极板，通电后产生两个电场，使水体表面微塑料在电场中运动聚集。此外，为进一步提高微塑料富集，本设计后期采用网状电极组合，减少电极的数量并降低了能耗(如图 4 所示)。

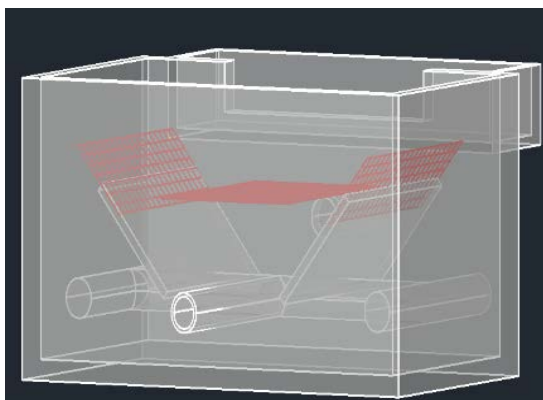


Figure 4. Electrode design

图 4. 电极设计图

## 2.5. 刮除系统

为使反应后聚集的微塑料能够收集再利用, 故设计输送刮板机, 待塑料大量聚集时能在短时间内快速且自动化的收集微塑料(如图 5 所示)。

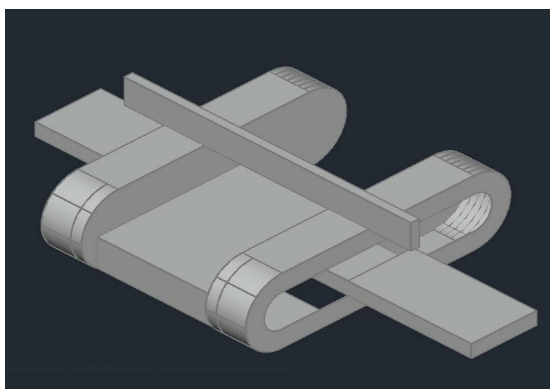


Figure 5. Electrode design

图 5. 电极设计图

## 2.6. 设计工艺参数调节灵活

为减少装置的运行成本, 保证收集的高效, 实际操作可根据具体需要灵活更改设计工艺参数, 如电极板距离、高压电大小与通电时间、电气浮时间等。

## 3. 实验内容和方法

为初步验证该工艺流程处理微塑料的实际效果, 模拟真实的微塑料悬浮状态, 确定河水水样比重, 对河水、新制 PE、新制 PP、新制 PVC 和纤维五种不同样品进行了实验室试验。检测指标为颗粒数目变化、粒径分布变化、COD 值变化。

为初步验证作品的实际效果, 模拟真实的微塑料悬浮状态, 确定河水水样比重, 对 PE (比重: 0.94~0.96 g/cm<sup>3</sup>)、PP (比重: 0.9~0.91 g/cm<sup>3</sup>)、PVC (软质、黑色) (比重: 1.16~1.35 g/cm<sup>3</sup>) 三种不同比重的微塑料进行了实验室试验。在水样中加入 1 g 微塑料, 静置 36 小时使其充分浸透融入水中, 在实验前后, 分别抽取实验前后水样中不同深度的水样, 进行水样预处理后, 在显微镜下目测得出微塑料个数。

### 3.1. 河道现场水体微塑料含量调研

为研究淡水体中微塑料的存在现象, 随机选取某市某河道水样, 取水样进行预处理后, 使微塑料悬浮于水体表面, 再取上清液在 OLYMPUS 显微镜下计数。经多次检测取平均得每滴(2.5  $\mu\text{L}$ )水样中大约有 30 个微塑料。从不同采样点随机抽取 3 组微塑料数量分布情况, 详情见表 1。

**Table 1.** Microplastic counts in water samples

**表 1.** 水体采样微塑料计数

水样 500 ml, 取 50 ml 上清液中的一滴 2.5 $\mu\text{L}$ , 单位: 长 $\times$ 宽/ $\mu\text{m}^2$					
采样点 1	2 $\times$ 1.5	2 $\times$ 0.5	1 $\times$ 1	0.5 $\times$ 0.5	0.3 $\times$ 0.3
	1 $\times$ 0.2	1.5 $\times$ 1	1.5 $\times$ 1	1 $\times$ 1	2 $\times$ 1.5
	1 $\times$ 1	0.5 $\times$ 0.5	3 $\times$ 2.5	1 $\times$ 1	1.5 $\times$ 2
	0.5 $\times$ 0.5	2 $\times$ 1	2 $\times$ 2	1 $\times$ 0.5	3 $\times$ 4
	1 $\times$ 1	1 $\times$ 0.7	4 $\times$ 2	0.5 $\times$ 0.5	1.5 $\times$ 1.5
	4 $\times$ 2	3 $\times$ 7	1.5 $\times$ 1.5	4 $\times$ 4	1 $\times$ 1
采样点 2	1.5 $\times$ 1.5	2 $\times$ 0.5	4 $\times$ 1.5	2 $\times$ 2	1 $\times$ 0.5
	2 $\times$ 2	4 $\times$ 3	8 $\times$ 3	1 $\times$ 1	0.5 $\times$ 1
	8 $\times$ 8	0.5 $\times$ 0.5	4 $\times$ 2	5 $\times$ 4	8 $\times$ 4
	4 $\times$ 2	4 $\times$ 2	3 $\times$ 1	4 $\times$ 1.5	0.7 $\times$ 0.7
	3 $\times$ 4	1 $\times$ 3	7 $\times$ 6	2 $\times$ 1.5	6 $\times$ 3
	4 $\times$ 2	3 $\times$ 3	4 $\times$ 2		
采样点 3	1 $\times$ 1	2 $\times$ 1	1.5 $\times$ 2	1 $\times$ 0.5	1 $\times$ 0.7
	1 $\times$ 1.5	2 $\times$ 0.5	0.5 $\times$ 0.5	0.7 $\times$ 0.7	1 $\times$ 1
	1 $\times$ 0.5	1 $\times$ 0.2	3 $\times$ 3	3 $\times$ 2	4 $\times$ 4
	2 $\times$ 1.5	1 $\times$ 1	6 $\times$ 4	4 $\times$ 2	4 $\times$ 2
	1 $\times$ 1	0.7 $\times$ 0.7	4 $\times$ 2	2 $\times$ 2	1 $\times$ 1
	3 $\times$ 4	2 $\times$ 3	1 $\times$ 1	1 $\times$ 1	2 $\times$ 0.7
	4 $\times$ 4	6 $\times$ 3			

通过表 1 可知, 该河道中水体中微塑料颗粒面积小, 大部分处于 0.1  $\mu\text{m}^2$ ~20  $\mu\text{m}^2$ , 也存在较大颗粒(64  $\mu\text{m}^2$ ), 都处于 0.2~5.0 mm 的尺寸; 数量大, 大约每升水样存在  $6 \times 10^6$  个微塑料, 平均丰度/最大丰度从不足 1 个/ $\text{m}^3$  到几百万个/ $\text{m}^3$ ; 同时由于其密度低, 粒径小, 难以被肉眼观察, 需要设计较为工业化的微塑料清除技术与装置。

### 3.2. 塑料颗粒电性实验

分别在通电前后观察反应池中微塑料的分别情况。在电解池中, 水样从一开始充满悬浮微塑料, 短暂通电后, 电极板之间产生大量微小气泡, 并观察到水样表面微塑料大量聚集, 并有向正极板靠近的趋势。因此猜测微塑料颗粒带微弱负电。

该实验是在静止的电解池中，通过较短时间内可以有效使数量较小的微塑料有效聚集在一起。因此通过该实验可以考虑针对微塑料带微弱负电的性质可以通过设计一种放大或赋予微塑料较强负电荷的装置以及一种带正电的装置将微塑料有效吸附、分离，从而使得微塑料有效去除。

### 3.3. 不同塑料荷带电后的实验

经过多次实验得，不同比重微塑料带电后呈现不同实验现象，PE 塑料大部分悬浮于水中；PP 塑料大部分悬浮于水中，还有部分浮于水体表面，为减小实验误差，PP 塑料实验时先将浮于水面的微塑料用刮板刮走后再进行实验；PVC 塑料在水样中大部分沉淀在水底，少部分悬浮在水中。但三种微塑料经系统，都有大量微塑料浮于水面，并能够明显观察到水体表面微塑料向正极板运动聚集，拿出极板后观察到正极板上黏附大量微塑料，而负极板上几乎没有，且水体基本澄清，未见微塑料悬浮。

该实验证明三种微塑料在带电后分别浮于水面、水中以及沉淀于水底且聚集程度很可观，也进一步说明通过带电性去除微塑料的效果是可行的。因此可以设置相对应高度的刮板进行有效刮取悬浮于水面的微塑料，并且定时将沉淀于水滴的微塑料去除。

## 4. 实验结果及分析

### 4.1. 微塑料数量变化

经水样预处理后，多次水样在显微镜下计数并取平均值；此外，在相同实验条件下，改变曝气时间，控制其他变量不变，进行对照实验，多次实验取平均得实验结果，详情见表 2 所示。

**Table 2.** Quantity change of microplastics before and after experiment

**表 2.** 实验前后微塑料数量变化表

取样点	曝气 5 分钟			曝气 30 分钟		
	水面	水中	水底	水面	水中	水底
实验前 PP 个数/个	42	32	32	43	38	33
实验后 PP 个数/个	4	4	2	3	3	2
去除率/%	90.48	87.50	93.75	93.02	92.10	93.94
实验前 PE 个数/个	35	32	32	38	35	38
实验后 PE 个数/个	3	2	3	2	1	3
去除率/%	91.43	93.75	90.62	94.74	97.14	92.10
实验前 PVC 个数/个	36	37	44	36	38	43
实验后 PVC 个数/个	3	4	5	2	2	3
去除率/%	91.67	91.49	88.64	94.44	94.74	93.02

由表 2 可以明显发现实验前后，本装置对水样中的微塑料去除效果非常好，水样水体基本都可澄清并无微塑料悬浮状况，效率均可达 87% 以上，延长曝气时间后去除率更是可达 97%。

### 4.2. COD 的变化

在实验中，由于直流电场的作用，水直接被电解，在阳极析出  $O_2$  和  $Cl_2$ ，在阴极析出  $H_2$ ，产生的气泡粒径小，密度小，并发生一系列电极反应，可去除水样中悬浮物，故我们在实验前后进行 COD 测定，利用重铬酸钾法计算 COD 浓度变化以及 COD 去除率，详情见表 3 所示。

**Table 3.** Changes of COD concentration before and after the experiment  
**表 3.** 实验前后 COD 浓度变化

	曝气 0 分钟	曝气 5 分钟	曝气 30 分钟
COD <sub>Cr</sub> (mg/l)	76	44	28
COD 去除率/%		42.11%	63.16%

## 5. 结论

本论文通过参数优化确定了一种地表水体中微塑料的分离技术, 兼顾等离子体和电极反应的结构和过程参数; 确认了经过该装置的运行, 对水体中微塑料的去除效果可达到 80% 以上甚至可达 97% 以上。在此基础上, 开发了一体化的低温等离子联合电浮技术对地表水体中微塑料的高效富集清除系统。其优势在于可有效减轻微塑料对地表水体的污染, 同时对水体中有机物起到降解作用, 而且系统运行时无噪音, 无能量额外输入, 节能环保, 是一种清洁、低能耗的处理技术和装置。还可与太阳能和电能协同作用, 装置运行成本低, 结构简单且易批量生产, 有广阔的应用前景。可进一步推广到工业废水、生活污水处理中, 为水体深度处理提供有力支撑。

且整个处理系统将较于其他微塑料去除工艺, 无化学添加、不生成副产物, 无二次污染; 电浮除装置工艺简单、运行操作方便、自动化程度高、设备结构紧凑、占地空间很小; 除此之外实际操作可根据具体需要灵活更改设计工艺参数, 如电极板距离、高压电大小与通电时间、电气浮时间等, 因此在保证装置的运行成本较低情况的同时保证收集的高效。

## 参考文献

- [1] Song, Y.K., Hong, S.H., Jang, M., Kang, J., Kwon, O.Y., Han, G.M. and Shim, W.J. (2014) Large Accumulation of Micro-Sized Synthetic Polymer Particles in the Sea Surface Microlayer. *Environmental Science & Technology*, **48**, 9014-9021. <https://doi.org/10.1021/es501757s>
- [2] Ding, J.F., Jiang, F.H., Li, J.X., Wang, Z.X., Sun, C.J., Wang, Z.Y., Fu, L., Ding, N.X. and He, C.F. (2019) Microplastics in the Coral Reef Systems from Xisha Islands of South China Sea. *Environmental Science & Technology*, **53**, 8036-8046. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01452>
- [3] Kelly, M.R., Lant, N.J., Kurr, M. and Burgess, J.G. (2019) The Importance of Water-Volume on the Release of Microplastic Fibres from Laundry. *Environmental Science & Technology*, **53**, 11735-11744. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03022>
- [4] Zhang, Y.Y., Luo, Y.Y., Guo, X.T., Xia, T.J., Wang, T.C., Jia, H.Z. and Zhu, L.Y. (2020) Charge Mediated Interaction of Polystyrene Nanoplastic (PSNP) with Minerals in Aqueous Phase. *Water Research*, **178**, Article 115861. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115861>
- [5] Ding, J., Jiang, F., Li, J., Wang, Z., Sun, C., Wang, Z., Fu, L., Ding, N.X. and He, C. (2019) Microplastics in the Coral Reef Systems from Xisha Islands of South China Sea. *Environmental Science & Technology*, **53**, 8036-8046. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01452>
- [6] Koelmans, A.A., Bakir, A., Burton, G.A., *et al.*, (2016) Microplastic As a Vector for Chemicals in the Aquatic Environment: Critical Review and Model-supported Reinterpretation of Empirical Studies. *Environmental Science & Technology*, **50**, 3315-3326. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b06069>
- [7] 刘强, 徐旭丹, 黄伟, 徐晓群, 寿鹿, 曾江宁. 海洋微塑料污染的生态效应研究进展[J]. 生态学报, 2017, 37(12): 7397-7409.
- [8] Zhang, W.W., Zhang, S.F., Wang, J.Y., Wang, Y., Mu, J.L., Wang, P., Lin, X.Z. and Ma, D.Y. (2017) Microplastic Pollution in the Surface Waters of the Bohai Sea, China. *Environmental Pollution*, **231**, 541-548. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.058>
- [9] 耿世雄. 长江中下游典型湖泊微塑料污染与水体富营养化相关性研究[D]: [硕士学位论文]. 安徽: 安徽建筑大学, 2020.
- [10] 白濛雨, 赵世焯, 彭谷雨, 高磊, 李道季. 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.