步海鑫,邵森林,李 凯,等.流式细胞仪快速计量饮用水中微塑料数量 [J]. 中国环境科学, 2025,45(7):3807-3813.
Bu H X, Shao S L, Li K, et al. Rapid measurement of microplastics in drinking water by flow cytometry [J]. China Environmental Science, 2025,45(7):3807-3813.

流式细胞仪快速计量饮用水中微塑料数量

步海鑫[1],邵森林[2],李 凯[1*],文 刚[1],黄廷林[1] (1.西安建筑科技大学环境与市政工程学院,陕西省环境工程重点实验室,陕西省水污染控制与水质安全保障协同创新中心,陕西 西安 710055；2.武汉大学土木建筑工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要: 针对缺乏不需要视觉分类或预处理的快速监测技术问题,基于流式细胞仪开发可快速测定饮用水中微塑料数目的新方法.结果表明,选用尼罗红染料(NR),以甲醇作为的其溶剂、染料浓度选用 10μg/mL、染色 10min 后,再采用流式细胞仪进行测定,可以实现水中微塑料的定量分析,单个样品的测试时间可以缩短到 14min 以内.应用该方法测定了商品瓶装水和超滤膜进出水的微塑料,结果表明商品瓶装水中微塑料浓度在(0.46~1.52)×10^5 个/L.新使用的聚偏氟乙烯(PVDF)超滤膜仅在过滤初期(第 1d)存在较高的微塑料释放风险,在长期运行中微塑料的释放可以忽略,另外其对进水中微塑料可以实现 99.99%的高效去除.

关键词: 微塑料；定量分析；流式细胞仪；瓶装水；超滤膜
中图分类号: X52 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2025)07-3807-07

Rapid measurement of microplastics in drinking water by flow cytometry. BU Hai-xin[1], SHAO Sen-lin[2], LI Kai[1*], WEN Gang[1], HUANG Ting-lin[1] (1. Shaanxi Key Laboratory of Environmental Engineering, Collaborative Innovation Center of Water Pollution Control and Water Quality Security Assurance of Shaanxi Province, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China；2.School of Civil Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China). *China Environmental Science*, 2025,45(7)：3807~3813

Abstract: Developing a new method based on flow cytometry for rapid determination of the number of microplastics in drinking water, in response to the lack of rapid monitoring techniques that do not require visual sorting or pre-processing. The results showed that the use of Nile red dye (NR), methanol as the solvent, a dye concentration of 10μg/mL, a dyeing time of 10minutes, and flow cytometry for the quantitative analysis of microplastics in water, could reduce the testing time of a single sample to less than 14minutes. This method was used to analyse microplastics in influent and effluent water from a commercial bottled water plant and an ultrafiltration membrane. The results showed that the microplastic concentration in commercial bottled water was in the range (0.46~1.52)×10^5 particles/L. The newly used polyvinylidene fluoride (PVDF) ultrafiltration membrane posed a higher risk of releasing microplastics only during the initial filtration stage (1d), and the release of microplastics during long-term operation could be disregarded. This new membrane's microplastic release could be analysed with 99.99% efficiency and effectiveness. Additionally, it can efficiently and effectively remove 99.99% of microplastics from feed water.

Key words: microplastics；quantitative analysis；flow cytometry；bottled water；ultrafiltration membrane

微塑料是粒径≤5mm、不溶于水的固体塑料颗粒[1].目前对于塑料的定量主要以质量浓度为主,但是塑料尺寸越小,数目越多,因此需要探究对微塑料数目进行定量的方法.目前微塑料的监测方法主要基于光学显微镜、扫描电子显微镜、拉曼散射、傅里叶变换红外光谱、荧光显微镜、气相-热裂解等[2-5].目前微塑料测定方法的局限性主要在于测定方法的分辨率和测样速度.由于仪器分辨率的限制,傅里叶变换红外光谱法不能测定 20μm 以下和黑色的微塑料颗粒[6].光学显微镜仅可以看到毫米级别的颗粒[7],且存在一定误差[8].拉曼光谱虽然能测 1μm 以上的微塑料颗粒,但是其无法分辨微塑料与其他污染物[9].在测样速度方面,拉曼光谱每次最多可分析 5000 个颗粒/扫描计数,从而低估微塑料的数量[10].总体来说,现有的微塑料定量方法需要较长的分析时间,而且其测试过程是劳动密集型,测试成本较高.

尼罗红(NR)是一种亲脂性恶嗪酮类荧光染料[11],其自身在水中几乎不发荧光,但与脂类物质结合会产生荧光,因此可用于微塑料的特异性染色[12].多篇文献已验证了 NR 对于微塑料染色的可靠

收稿日期: 2024-12-18
基金项目: 陕西省自然科学基金资助项目(2023-JC-YB-448);陕西省重点科技创新团队项目(2023-CX-TD-32)
* 责任作者, 教授, likai@xauat.edu.cn

性[13-14].采用 NR 作为微塑料染色剂具有特异性强、识别灵敏度高、操作简便、荧光信号稳定等优势.NR 对于微塑料检测的应用大多是与傅里叶变换红外光谱和拉曼散射相结合的[15-16].关于NR对于微塑料染色效果的相关研究也已经很多,但是将NR与流式细胞仪的结合还很少.流式细胞仪已广泛用于快速和自动分析悬浮在水样品中的细胞和颗粒生物分子,测量范围较广,可以通过荧光染色[17]检测 0.2~100μm 的颗粒[18],且使用药剂较少,分析成本较低,是一种绿色高效的分析方法.本文基于流式细胞仪,通过优选染色剂和测定条件实现对水中微塑料颗粒的特异性、快速测定,使用这一方法测定了瓶装水和超滤膜工艺中的微塑料.

1 材料与方法

1.1 材料

采用分析纯化学品和试剂.某商品膜聚偏氟乙烯中空纤维膜截留分子量 100kDa;聚对苯二甲酸乙二醇酯粉末(PET,1300 目)和尼龙颗粒(PA66 粉末,300 目)购自美国杜邦公司;聚偏氟乙烯粉末(PVDF 粉末,2000 目)购自法国阿科玛公司;聚苯乙烯微球(PS 微球,0.6~1.0μm)购自上海阿拉丁公司.

实验仪器:流式细胞仪(BD Accuri® C6Plus),超高分辨率激光共聚焦倒置显微镜(STORM-A1),扫描电子显微镜(MIRA 3),能谱仪(Aztec Energy).

1.2 染料的优选

在流式细胞术中, NR 染色的聚合物可以通过橙色和绿色发射滤光片显示[19].NR 染色的微塑料的荧光行为受多种因素影响,例如染色浓度、染色时间和染料溶剂的选择.本实验对比不同溶剂、不同染色浓度、染色时间对于微塑料颗粒染色效果的影响.并对水样中的其他颗粒进行染色,确定了NR对于微塑料颗粒染色的特异性.

分别采用丙酮、甲醇和二甲基亚砜(DMSO)作为溶剂对 NR 进行溶解,超声处理 10min 后将染色剂通过 0.22μm 的过滤器进行过滤,过滤后将染色剂分装在棕色瓶中,保存在 4℃冰箱中.在探究溶剂对于测样情况的影响时,一方面在共聚焦荧光显微镜下观测微塑料颗粒的染色情况,另一方面对比使用不同溶剂采用流式细胞仪测样时 NR 的聚集程度及其产生的影响,从而确定最佳染色溶剂.在探究染色剂浓度的影响时,采用 5,10,50μg/mL 的浓度,染色后在共聚焦荧光显微镜下观察染色效果,从而确定最佳染色浓度.在探究染色时间的影响时,分别染色 5,10,20,30,60,120min 后根据流式细胞仪测定结果中颗粒在门内的聚集情况以及计数结果选择最优染色时间.

1.3 流式细胞仪的测定

每个样品取 20mL 于烧杯中进行染色,染色时间 10min.染色后取样于 1.5mL 离心管中进行流式细胞仪测样,每种样品重复检测 3 次.阈值设置为 600,进样速度为快速,每次进样 250mL.另取 200mL 水样采用不锈钢膜组件在蠕动泵的驱动下进行过滤,将微塑料颗粒过滤在聚醚砜膜表面,将膜烘干并裁剪为 3mm 边长的方块后粘于样品台上,喷金 150s 后采用扫描电子显微镜观察,以 image-J 软件作为辅助计数工具.通过对比两个方法对于同一批样品的测定结果确定流式细胞仪测定结果的准确性.

计数区域是指含有染色塑料颗粒的区域.为了确定最佳计数区域,本研究对微塑料的流式细胞仪测定结果进行了评估.在纯水中添加微米级别的 PVDF 和 PET 颗粒配制微塑料溶液(选取不同粒径的微塑料颗粒混合配置,模拟实际水样中微塑料种类、粒径不一的情况),再将溶液按照一定的浓度梯度进行稀释,采用流式细胞仪进行测样.以未 NR 染色的微塑料颗粒作为阴性对照,初步选择三个计数区域.再通过对比微塑料浓度与该计数区域内的微塑料数目的线性相关性来优选计数区域.

1.4 方法的应用

采用本研究开发的基于流式细胞仪的快速计量方法对水中微塑料进行了定量分析.一方面测定 PVDF 超滤膜对于微塑料颗粒的截留率,另一方面测定 PVDF 超滤膜使用过程中微塑料的释放规律.

在探究复合 PVDF 超滤膜对于微塑料颗粒的截留率时,取 0.2g PET 和 0.2g PVDF 微塑料颗粒于 500mL 纯水中充分搅拌后再进行超声,取悬浮于中间层的水样进行测试,分别测定过膜前后水样中含有的微塑料数目,重复测定 3 次.

在确定超滤膜释对微塑料颗粒的截留率后,探究了超滤膜使用过程中微塑料颗粒的释放.将 PVDF 超滤膜浸没在自来水中采用重力过滤的方式进行过滤,将出水收集在玻璃瓶中,每隔一段时间,取样

20mL 采用流式细胞仪进行定量分析.

为了防止干扰,在使用仪器进行取样、制样和测样过程中,均在使用前采用超纯水进行冲洗 2~3 次,尽量避免含有微塑料成分器具的使用.在收集水样过程中采用玻璃管进行连接,玻璃瓶口用锡纸包裹,防止空气中的微塑料颗粒进入水样.为了减少由于 NR 染料聚集而造成的干扰,采用纯水作为水样,10μg/mL 的 NR 反应 10min 后,采用流式细胞仪的测定结果为 44 个/L.以此作为阴性对照组,实际测定的数值需要扣除阴性对照组的数值作为最终测样结果.

2　结果与讨论

2.1　染色剂的优选

2.1.1　染色剂溶剂优选　由图 1(a)可以看出,在 3 种溶剂配置的染料均可以有效对微塑料颗粒进行染色,但是丙酮和甲醇作为溶剂时的显色效果更为明显.图 1(b)中染色后的颗粒主要聚集于右上角部位.在未添加微塑料颗粒时,流式细胞仪点图中的部分点仍然聚集于右上角的部位,这是由于NR具有疏水性,在水溶液体系中表现出高度的不稳定性,容易在水中聚集从而对测样结果产生的干扰,其干扰在流式细胞仪图中测样的点与被染色的微塑料颗粒是重叠的.通过对比 3 种溶剂的干扰可以发现,甲醇产生的干扰是最小的.且在添加了微塑料颗粒后甲醇作为溶剂时的背景杂质(黑色的点)是最少的. 因此采用甲醇作为溶剂可以最大程度减少 NR 的聚集产生的干扰.

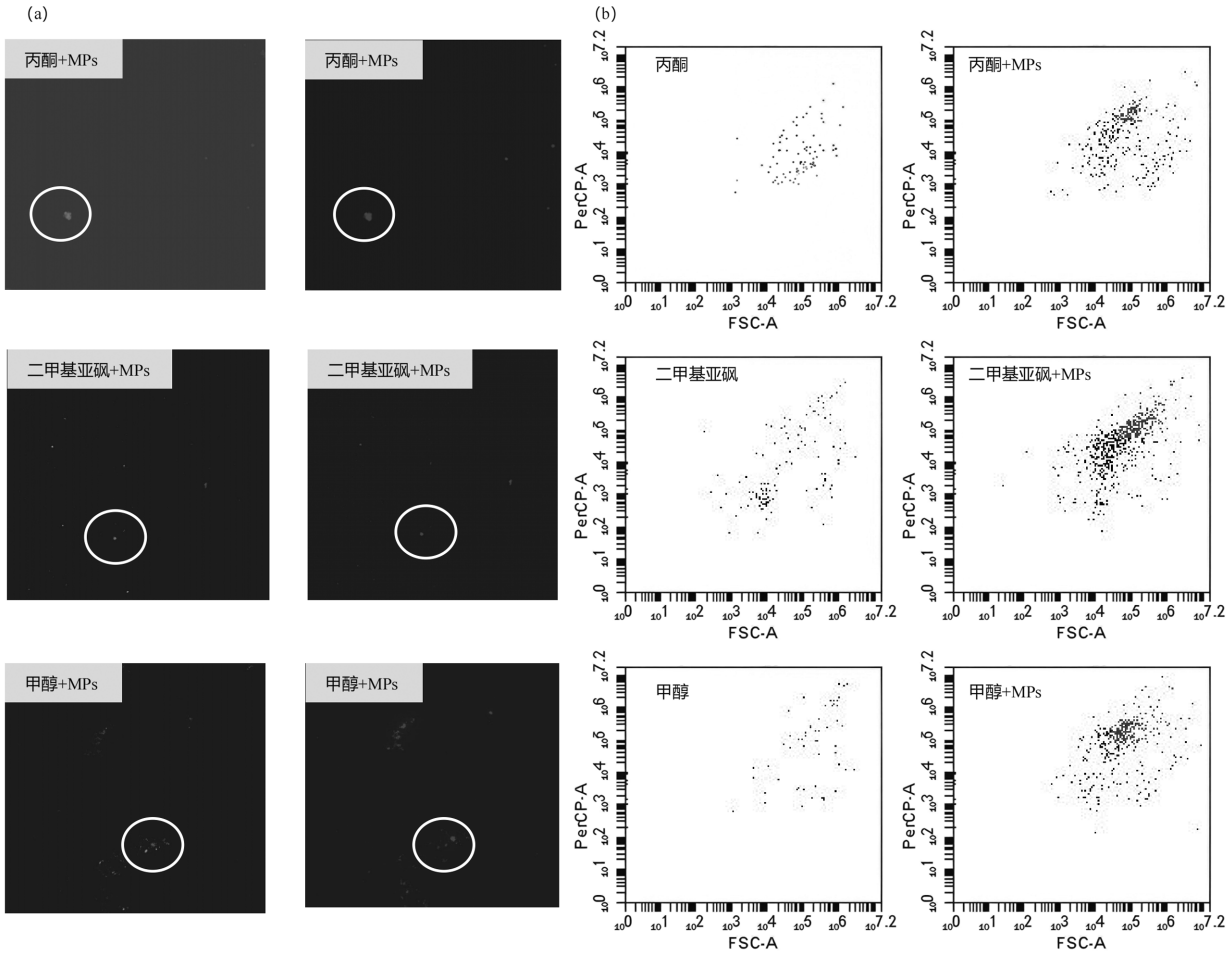


图 1　以丙酮、二甲基亚砜、甲醇作为 NR 溶剂时的测定结果

Fig.1　Measurement results when acetone, dimethyl sulfoxide and methanol were used as NR solvents

(a)共聚焦荧光显微镜; (b)流式细胞仪

2.1.2　染色剂浓度优选　如图 2 所示分别采用 5,10　　和 50μg/mL 的 NR 染色 10min 时, 5μg/mL 时的染色

效果较弱;使用 10μg/mL 的 NR 时,不论是红光还是绿光都可以很好的观察到微塑料颗粒;使用 50μg/mL 的 NR 时,微塑料颗粒的荧光图像出现了过曝光现象. Maes 等[14]的研究发现,10μg/mL 的 NR 在能见度、速度和背景信号之间取得了良好的平衡.采用 10μg/mL 的 NR 可以很好的对微塑料颗粒进行染色.

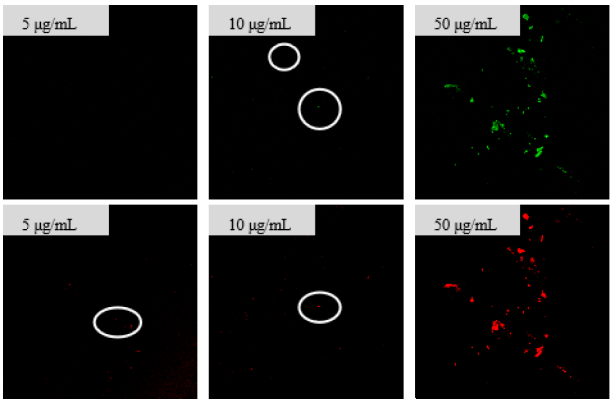


图 2 共聚焦荧光显微镜测定结果

Fig.2 Confocal fluorescence microscopy results

2.1.3 染色时间的优选 由图 3 可以看出,染色时间为 10~20min 时,流式细胞仪结果中颗粒的聚集程度最好,从数量对比可以看出,当染色时间为 20min 时,颗粒能更多的被识别到.但是染色 10 和 20min 时的荧光信号差距很小,为了节约测样时间选择 10min 为最优染色时间,这与文献报道中的最优染色时间一致[20-22].

2.1.4 染色剂的特异性 采用 NR 分别对 PVDF 颗粒、PET 颗粒、尼龙颗粒、Si 粉、大肠杆菌和粪肠球菌进行染色,并在共聚焦荧光显微镜下观测染色效果.由图 4 可以看出,PVDF 颗粒、PET 颗粒、尼龙颗粒均可以被有效染色,但是不论浓度多高 Si 粉均无法被染色,当采用 10μg/mL 的 NR 时,大肠杆菌和粪肠球菌无法被染色.这进一步表明 NR 可以对水中微塑料颗粒进行特异性染色[23].后续采用甲醇作为 NR 的溶剂,染色浓度 10μg/mL,染色时间 10min.

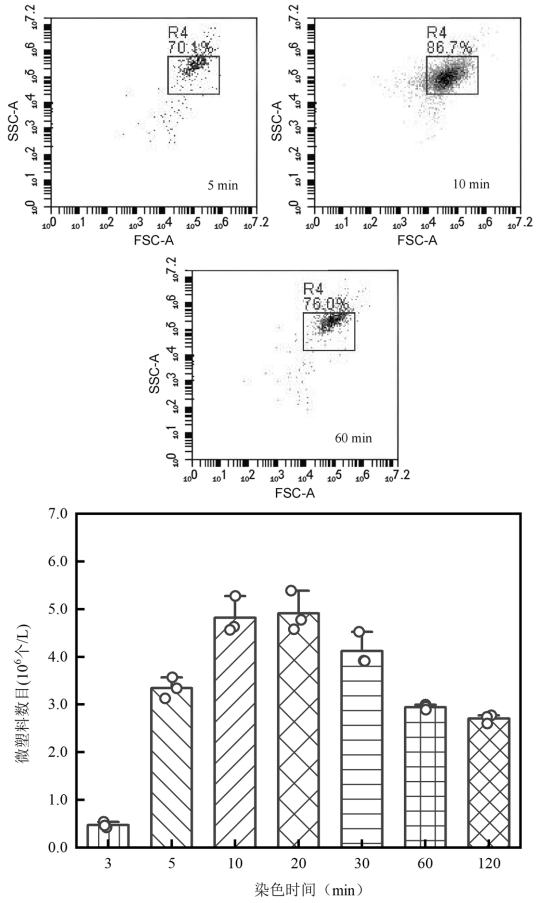


图 3 染色时间对于流式细胞仪计数结果的影响

Fig.3 Effect of staining time on flow cytometry counts

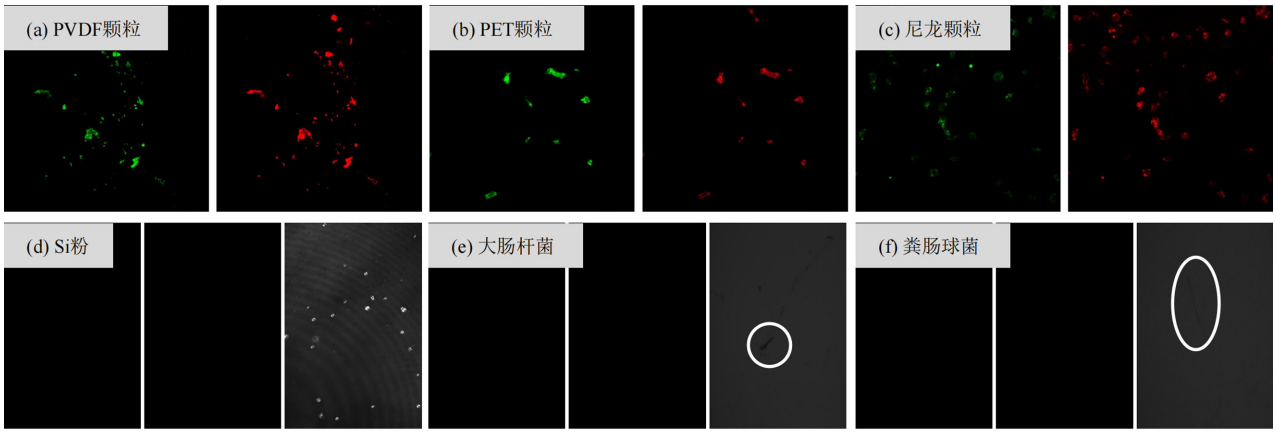


图 4 不同颗粒的共聚焦荧光显微镜拍摄结果

Fig.4 Confocal fluorescence microscopy shots of different particles

2.2　流式细胞仪测定方法的确定

2.2.1　流式细胞仪测定的准确性　为了确定流式细胞仪对于微塑料测定的准确性,收集水样于玻璃瓶中,采用扫描电子显微镜和流式细胞仪进行测定.由图 5 可见,二者符合线性规律且 R^2 可以达到 0.904,因此可以确定流式细胞仪与 NR 结合的方式是可以对微塑料颗粒进行有效计数的.

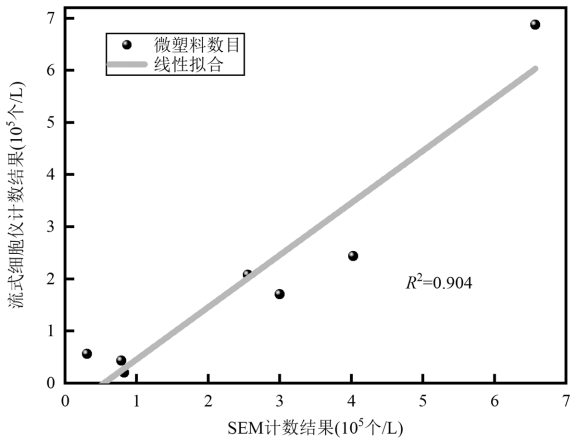


图 5　流式细胞仪与扫描电子显微镜结果对比

Fig.5　Comparison of flow cytometry and scanning electron microscopy results

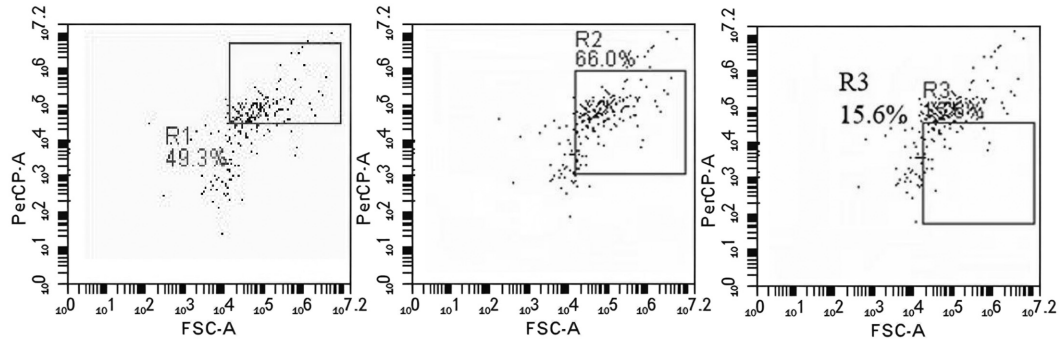
2.2.2　流式细胞仪计数区域的优选　在本研究中,通过对 3 个不同点图的 NR 染色微塑料计数结果进行比较分析,确定了最佳计数区域.如图 6 所示,R_1、R_2、R_3 3 个计数区域.从流式细胞仪图中可以看出,染色后的颗粒明显主要位于点图的右上角,聚集于 R_1、R_2 这 2 个区域内.这 3 个的 R^2 分别为 0.947、0.437 和 0.570,其中 R_1 作为计数区域时的拟合效果最好.可见 R_1 为最佳计数区域,在后续测样时选择 R_1 进行计数.

2.3　微塑料快速测定方法的应用

2.3.1　瓶装水中微塑料数目　瓶装水和饮料瓶大多是由 PET 制成的瓶身,PE 制成的瓶盖.采用本研究建立的方法对市售 3 种瓶装水中存在的微塑料颗粒进行了测定.以纯水加入 NR 的测定结果作为阴性对照组,每种品牌的瓶装水分别测定了 4 次,测定结果如下:品牌 1 中微塑料数目为(1.32~1.52)×10^5 个/L;品牌 2 中微塑料数目为(0.56~0.78)×10^5 个/L;品牌 3 中微塑料数目为(0.46~0.65)×10^5 个/L.

Qian 等[24]采用受击拉曼散射对瓶装水中微纳米塑料数目进行估计,每升不同品牌的瓶装水平均含有约(2.4±1.3)×10^5 个塑料颗粒,其测得的微塑料数量与本研究结果相当.如 Muneera 等[25]采用傅里叶变换红外微光谱研究发现瓶装水样品中微塑料的浓度范围 12~62 个/L.Nocon 等[26]采用 Delta Optical 显微镜对于瓶装水中微塑料颗粒进行计数,发现 4~15 个/L.这可能是由于这些文献研究的是 10μm 以上甚至是毫米级的塑料颗粒,并未计算小于 10μm 的微塑料颗粒.但是,随着微塑料尺寸的减少,其数目更多,因此本实验的测定结果高于这些方法测定的结果.鉴于小尺寸的微塑料数量更为庞大,后续研究应重点关注小尺寸微塑料颗粒.

2.3.2　PVDF 超滤膜对微塑料颗粒的释放与截留　PVDF 超滤膜广泛应用于饮用水处理.一方面,PVDF 超滤膜由于孔径较小,可以有效的去除微塑料,另一方面,PVDF 超滤膜作为一种高分子塑料,也可能是微塑料的释放源,特别是超滤膜往往处于饮用水净化的末端环节. Sun 等[27]推断 NF 和 RO 系统释放了微塑料颗粒. Zhang 等[28]发现在使用 MBR、UF、NF 和 RO 膜处理渗滤液过程中出现了新的聚合物.Gan 等[29]发现老化的合成有机膜在过滤过程中有释放 MPs 的风险.



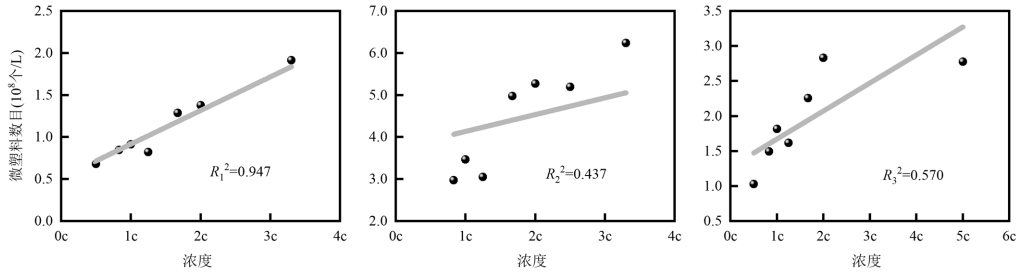


图 6 流式细胞仪计数区域的优选

Fig.6 Optimization of the flow cytometry counting area

上方 3 个计数区域的流式细胞仪点图是 FSC 和 PerCP 作为通道时的点图,下方为微塑料数目随微塑料浓度变化的线性拟合

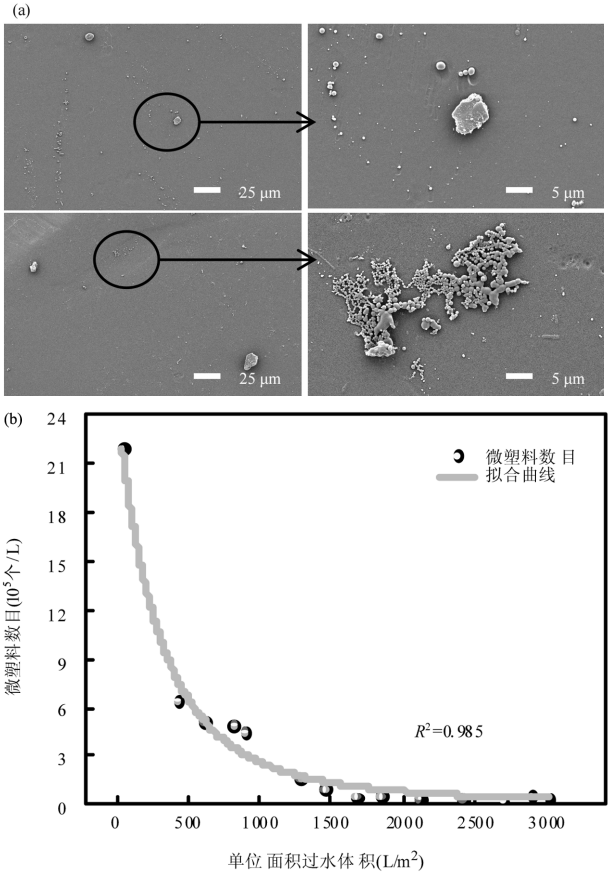


图 7 超滤膜出水中的微塑料

Fig.7 Microplastics in ultrafiltration membrane effluent

(a)微塑料形貌; (b) 微塑料释放规律

采用流式细胞仪对超滤膜进出水中微塑料数目进行了检测.根据进水和出水中微塑料数量计算了PVDF膜对微塑料的截留率,结果表明PVDF超滤膜对微塑料颗粒截留率可达 99.99%.

在此基础上,探究了超滤膜使用过程中微塑料颗粒的释放情况.由图 7(a)可以看出,超滤膜出水中释放微塑料颗粒主要是圆形颗粒,且微塑料颗粒聚集在一起;不规则碎片较少,但是尺寸较大.在通过扫描电子显微镜作为计数方法时,将拍摄的图片采用 Image-J 软件对于颗粒的尺寸进行测量,对于数目按照不同大小进行统计,发现微塑料尺寸越小,数目越多,越容易聚集.

图 7(b)中,在过水体积达到 1200L/m^2 后微塑料数目达到了 1.6×10^5 个/L,与瓶装水中微塑料浓度相当;随着进一步过滤,出水微塑料的浓度逐渐低于瓶装水中微塑料的浓度.非线性拟合表明微塑料数目与单位膜面积过水体积的关系符合指数函数的关系,拟合曲线的 R^2 可以达到 0.985,说明该指数方程可以较好地描述微塑料的释放.基于这个方程,可以得到,在过滤水体积达到 2600L/m^2 之后,微塑料的释放量基本可以忽略不计.如果超滤膜的过滤通量为 30L/(m^2·h),可以计算,PVDF 膜在过滤 1.5d 后,其出水微塑料与瓶装水相当;在过滤 4d 后,微塑料的释放基本可以忽略.因此,在长期运行过程中,PVDF 膜对微塑料的释放可以忽略不计.对于运行初期微塑料的释放问题,建议对新使用的膜采用一些清洗策略加以控制.

3 结论

3.1 以甲醇作为溶剂配置 10μg/mL 的尼罗红染料对水样染色 10min 后,采用流式细胞仪在优化的条件下可实现水中微塑料颗粒的快速定量分析,每个样品的测样时间小于14min,测量结果与扫描电子显微镜测定结果一致.

3.2 随机选取 3 种市售瓶装水,采用该方法对水中微塑料含量进行了检测,发现其微塑料数目为(0.46~1.52)$\times10^5$ 个/L.

3.3 PVDF 超滤膜对于微塑料颗粒的截留率可达 99.99%.新使用的 PVDF 超滤膜在过滤初期(第 1d)

存在一定的微塑料颗粒释放,但出水中微塑料数量随运行时间呈指数下降,4d 后微塑料的释放基本可以忽略.因此在长期运行中不存在微塑料释放风险.

参考文献：

[1] Tirkey A, Upadhyay L S B. Microplastics: An overview on separation, identification and characterization of microplastics [J]. Marine Pollution Bulletin, 2021,170:112604.

[2] 李和通,马振芳,郭　宇,等.黄河(郑州段)水体中微塑料污染特征及来源分析 [J]. 中国环境科学, 2024,44(7):4136-4144.
Li H, Ma Z F, Guo Y, et al. Distribution and source characterization of microplastics pollution in Zhengzhou Section of the Yellow River [J]. China Environmental Science, 2024,44(7):4136-4144.

[3] 刘丹童,宋　洋,李菲菲,等.基于显微拉曼面扫的小尺寸微塑料检测方法 [J]. 中国环境科学, 2020,40(10):4429-4438.
Liu D T, Song Y, Li F F, et al. A detection method of small-sized microplastics based on micro-Raman mapping [J]. China Environmental Science, 2020,40(10):4429-4438.

[4] Schwaferts C, Niessner R, Elsner M, et al. Methods for the analysis of submicrometer- and nanoplastic particles in the environment [J]. TrAC Trends in Analytical Chemistry, 2019,112:52-65.

[5] Erni-Cassola G, Gibson M I, Thompson R C, et al. Lost, but found with nile red: A novel method for detecting and quantifying small microplastics (1mm to 20μm) in environmental samples [J]. Environmental Science & Technology, 2017,51(23):13641-13648.

[6] 李　威,理查德·汤普森,维尼·库蒂尼-琼斯,等.微塑料污染研究 20 年,我们学到了什么? [J]. 世界科学, 2024,(12):4-10.
Li W, Thompson, Cutigni-Jones, et al. What have we learned from the pollution research in microplastics for 20years? [J]. World Science, 2024,(12):4-10.

[7] Eriksen M, Lebreton L C M, Carson H S, et al. Plastic pollution in the world's oceans: More than 5 trillion plastic pieces weighing over 250,000 tons afloat at sea [J]. PloS one, 2014,9(12):e111913.

[8] Hidalgo-Ruz V, Gutow L, Thompson R C, et al. Microplastics in the marine environment: A review of the methods used for identification and quantification [J]. Environmental Science & Technology, 2012, 46(6):3060-3075.

[9] 李　珊,张　岚,陈永艳,等.饮用水中微塑料检测技术研究进展 [J]. 净水技术, 2019,38(4):1-8.
Li S, Zhang L, Chen Y Y, et al.Research progress on detection technology of microplastics in drinking water [J]. Water Purification Technology, 2019,38(4):1-8.

[10] Schymanski D, Goldbeck C, Humpf H-U, et al. Analysis of microplastics in water by micro-Raman spectroscopy: Release of plastic particles from different packaging into mineral water [J]. Water Research, 2018,129:154-162.

[11] Basting D, Ouw D, Schäfer F. The phenoxazones: a new class of laser dyes [J]. Optics Communications, 1976,18(3):260-262.

[12] Greenspan P, Mayer E P, Fowler S D. Nile red: a selective fluorescent stain for intracellular lipid droplets [J]. The Journal of Cell Biology, 1985,100(3):965-973.

[13] Cole M. A novel method for preparing microplastic fibers [J]. Scientific reports, 2016,6(1):1-7.

[14] Maes T, Jessop R, Wellner N, et al. A rapid-screening approach to detect and quantify microplastics based on fluorescent tagging with Nile Red [J]. Scientific Reports, 2017,7(1):44501.

[15] Alonso-Vázquez P, Luján-Facundo M-J, Cuartas-Uribe B, et al. Advances in analysis of microplastics in drinking water treatment plants. Fluorescence techniques using iDye Pink [J]. Environmental Technology & Innovation, 2023,32:103430.

[16] Frère L, Paul-Pont I, Moreau J, et al. A semi-automated raman micro-spectroscopy method for morphological and chemical characterizations of microplastic litter [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016,113(1/2):461-468.

[17] Kaile N, Lindivat M, Elio J, et al. Preliminary results from detection of microplastics in liquid samples using flow cytometry [J]. Frontiers in Marine Science, 2020,7:552688.

[18] Frias J P G L, Nash R. Microplastics: Finding a consensus on the definition [J]. Marine Pollution Bulletin, 2019,138:145-147.

[19] Shim W J, Song Y K, Hong S H, et al. Identification and quantification of microplastics using Nile Red staining [J]. Marine Pollution Bulletin, 2016,113(1/2):469-476.

[20] Kaile N, Lindivat M, Elio J, et al. Preliminary results from detection of microplastics in liquid samples using flow cytometry [J]. Frontiers in Marine Science, 2020,7:552688.

[21] Tse Y T, Lo H S, Chan S M N, et al. Flow cytometry as a rapid alternative to quantify small microplastics in environmental water samples [J]. Water, 2022,14(9):1436.

[22] Li J, Huang F, Zhang G, et al. Separation and flow cytometry analysis of microplastics and nanoplastics [J]. Frontiers in Chemistry, 2023, 11:1201734.

[23] Greenspan P, Fowler S D. Spectrofluorometric studies of the lipid probe, nile red [J]. Journal of Lipid Research, 1985,26(7):781-789.

[24] Qian N, Gao X, Lang X, et al. Rapid single-particle chemical imaging of nanoplastics by SRS microscopy [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2024,121(3):e2300582121.

[25] Muneera A-M, Mia S, Stuart H, et al. Synthetic microplastics in UK tap and bottled water; Implications for human exposure [J]. Emerging Contaminants, 2025,11(1):100417.

[26] Nocoń W, Moraczewska-Majkut K, Wiśniowska E. Microplastics in bottled water and bottled soft drinks [J]. Desalination and Water Treatment, 2023,312:64-69.

[27] Sun J, Zhu Z R, Li W H, et al. Revisiting microplastics in Landfill Leachate: Unnoticed tiny microplastics and their fate in treatment works [J]. Water Research, 2021,190:116784.

[28] Zhang Z, Su Y, Zhu J, et al. Distribution and removal characteristics of microplastics in different processes of the leachate treatment system [J]. Waste Management, 2021,120:240-247.

[29] Gan X, Lin T, Jiang F, et al. Impacts on characteristics and effluent safety of PVDF ultrafiltration membranes aged by different chemical cleaning types [J]. Journal of Membrane Science, 2021,640:119770.

作者简介：步海鑫(2000-),女,新疆乌鲁木齐人,西安建筑科技大学硕士研究生,主要从事超滤膜与微塑料污染研究.bhx9863@aliyun.com.