



含氟水处理与在线协同监测专用膜开发

王亚琴

2026年6月

安徽 合肥



目录 / CONTENTS

1

低浓度含氟水处理的研究背景

2

多功能氟分离膜的开发与性能表征

3

展望

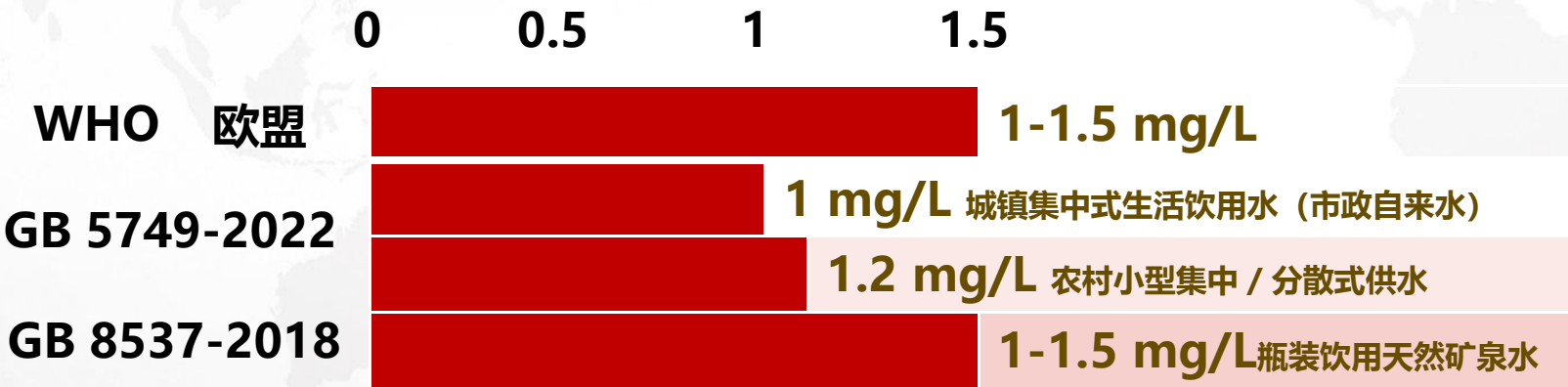
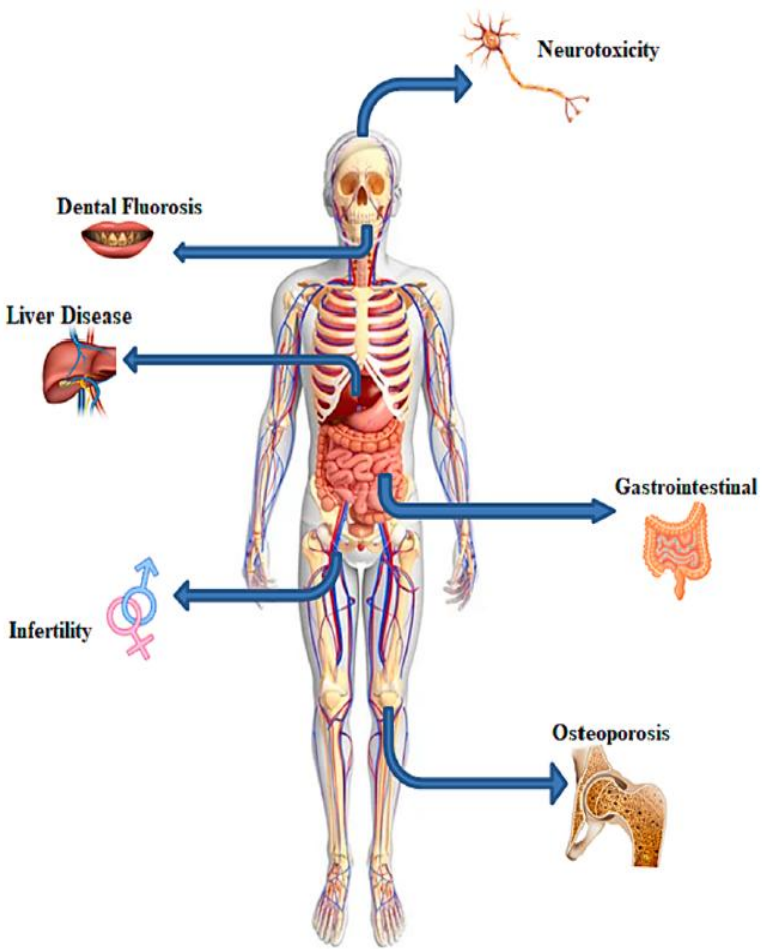
01

低浓度含氟水处理的研究背景

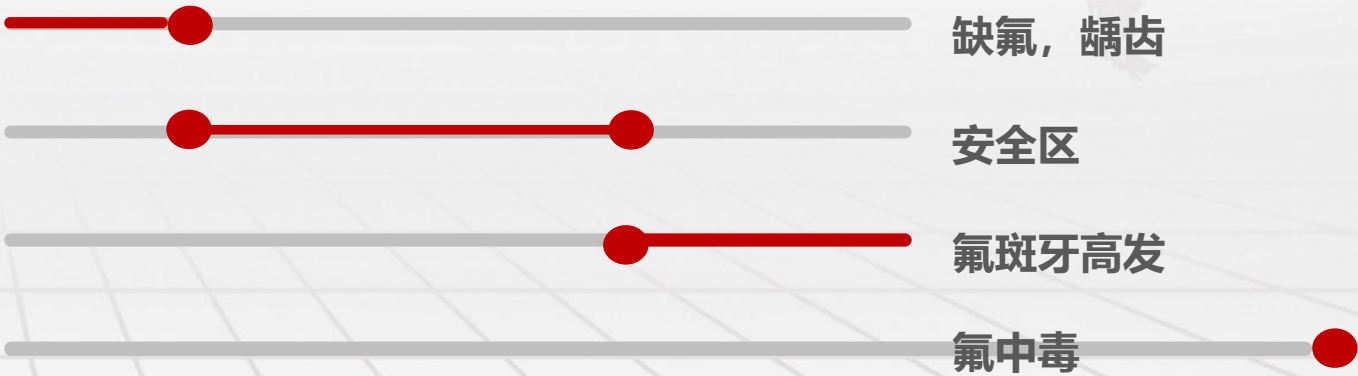
- 1.1 水体氟超标的危害
- 1.2 水体中氟的来源
- 1.3 含氟水的处理方法
- 1.4 饮用水氟超标治理——以安徽省为例



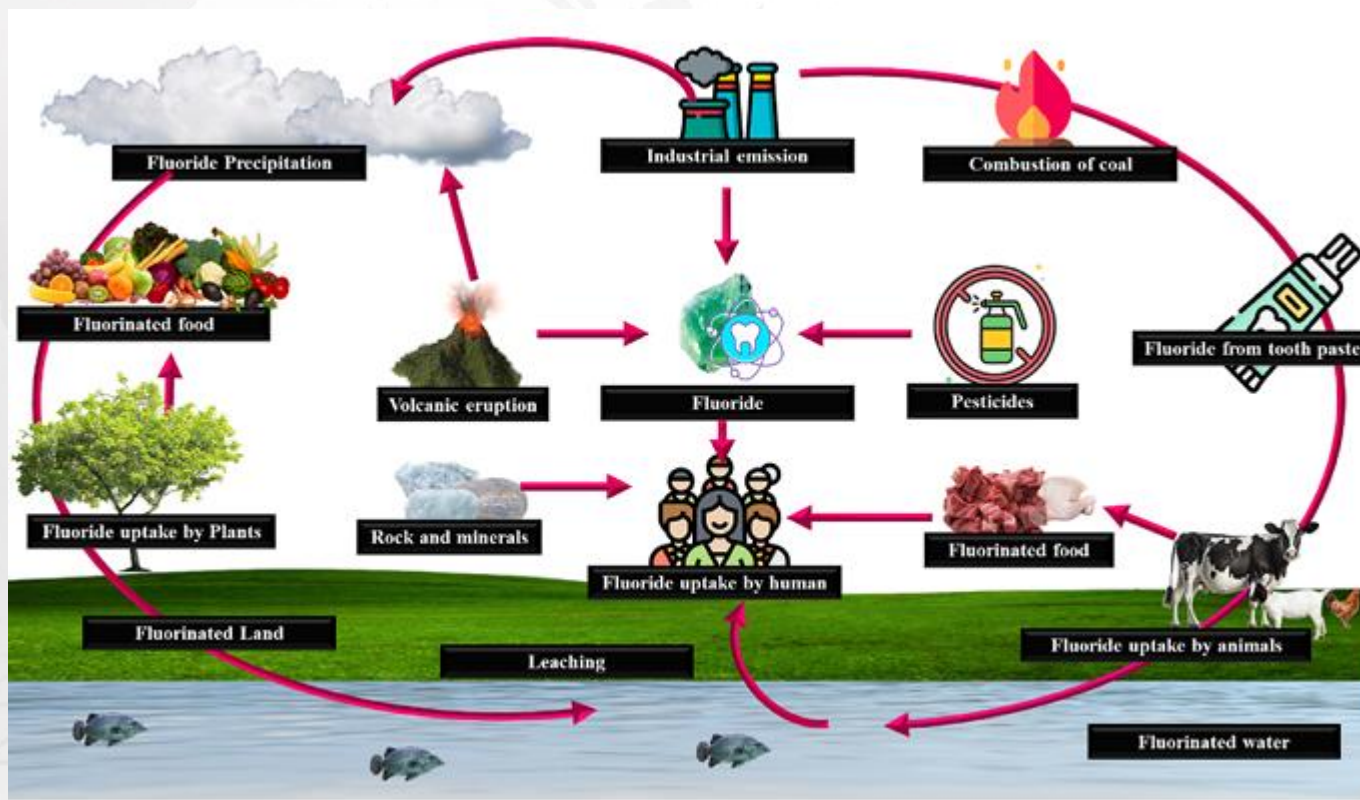
1.1 水体中氟超标的危害



氟化物浓度对健康的影响



1.2 水体中氟的来源



Chemical Engineering Journal 488 (2024) 150880

1.3 含氟水的处理方法

沉淀法

向含氟水中投加铝盐、钙盐等化学药剂，与氟离子反应生成难溶的氟化物沉淀。通过物理沉降与过滤工艺分离沉淀物，实现氟离子的初步去除，是含氟水处理的基础工艺之一。



离子交换法

借助离子交换树脂的特殊官能团，将水中游离的氟离子 (F^-) 与树脂结构上的氯离子 (Cl^-) 进行等当量交换，使氟离子被树脂吸附固定，从而实现从水体中分离的目的



吸附法

利用活性氧化铝、骨炭等具有巨大比表面积的固体吸附剂，通过物理吸附或化学结合作用，将水中游离的氟离子“捕获”并固定在其表面，从而实现除氟目的。



电渗析法

在直流电场作用下，利用离子交换膜的选择透过性，使水中的氟离子等阴离子定向迁移至浓水室，实现溶质与溶剂的高效分离



膜法

以压力为动力，利用半透膜的选择透过性，允许水分子通过，同时高效截留水中的氟离子、无机盐、胶体及微生物



1.3 含氟水的处理方法

方法	去除效率	成本	操作难度	核心优势	主要局限
沉淀法	低 (50-70%) 需投加化学药剂	初期投资低 运行成本中等	工艺简单 易于现场实施	技术成熟，设备要求不高，适合处理水量较大的场景。	除氟效率有限，产生大量含氟污泥，可能有铝盐残留风险。
离子交换法	高 (90-95%) 出水水质较好	树脂成本高 再生费用不菲	操作中等 需专业维护	处理效果稳定，出水氟离子浓度可降至较低水平。	受原水硬度干扰大，再生废液处理困难，长期运行成本高。
吸附法	较高 (90%+) 适合深度处理	设备投资中 吸附剂需更换	流程简单 维护便捷	占地面积小，操作灵活，对原水水质适应性较强。	吸附剂饱和后需再生或更换，处理高氟水时效率下降明显。
膜法	极高 (>95%) 水质纯净	设备投资昂贵 能耗成本高	系统复杂 需严格预处理	分离效果极佳，能截留几乎所有氟离子，出水品质高。	膜组件易受污染，运行维护要求高，产生高浓度浓盐水。
电渗析法	极高 (>95%) 物理分离	设备造价高 电耗成本大	控制复杂 需专业操作	无需投加化学药剂，可回收水中盐分，环境友好性较好。	会同时去除水中有益矿物质，膜堆易结垢，需频繁清洗。



1.3 含氟水的处理方法

如何选择？



1.4 饮用水氟超标治理——以安徽省为例

历史难题：饮水型氟超标主要集中在皖北6市，是全省地方病防控的重点与难点区域。

治理方案：确立“水源置换为主，就地除氟为辅”的核心路径。实施“皖北地区群众喝上引调水工程”，依托引江济淮干渠，将高氟深层地下水全面置换为优质的长江、淮河地表水，从源头阻断氟污染。

里程碑成果：2026年实现全线通水，不仅解决了氟超标问题，更构建了覆盖城乡的高标准供水网络，显著提升区域水资源韧性。惠及皖北6市28个县（市、区）约3000万城乡居民。



引江济淮：破解难题的“硬核”支撑

引江济淮工程作为跨流域调水的世纪工程，为皖北氟超标地区输送了优质长江水，是落实“水源置换”策略的决定性工程，彻底改变了当地依赖地下水的饮水结构。

兜底保障：分散式除氟技术



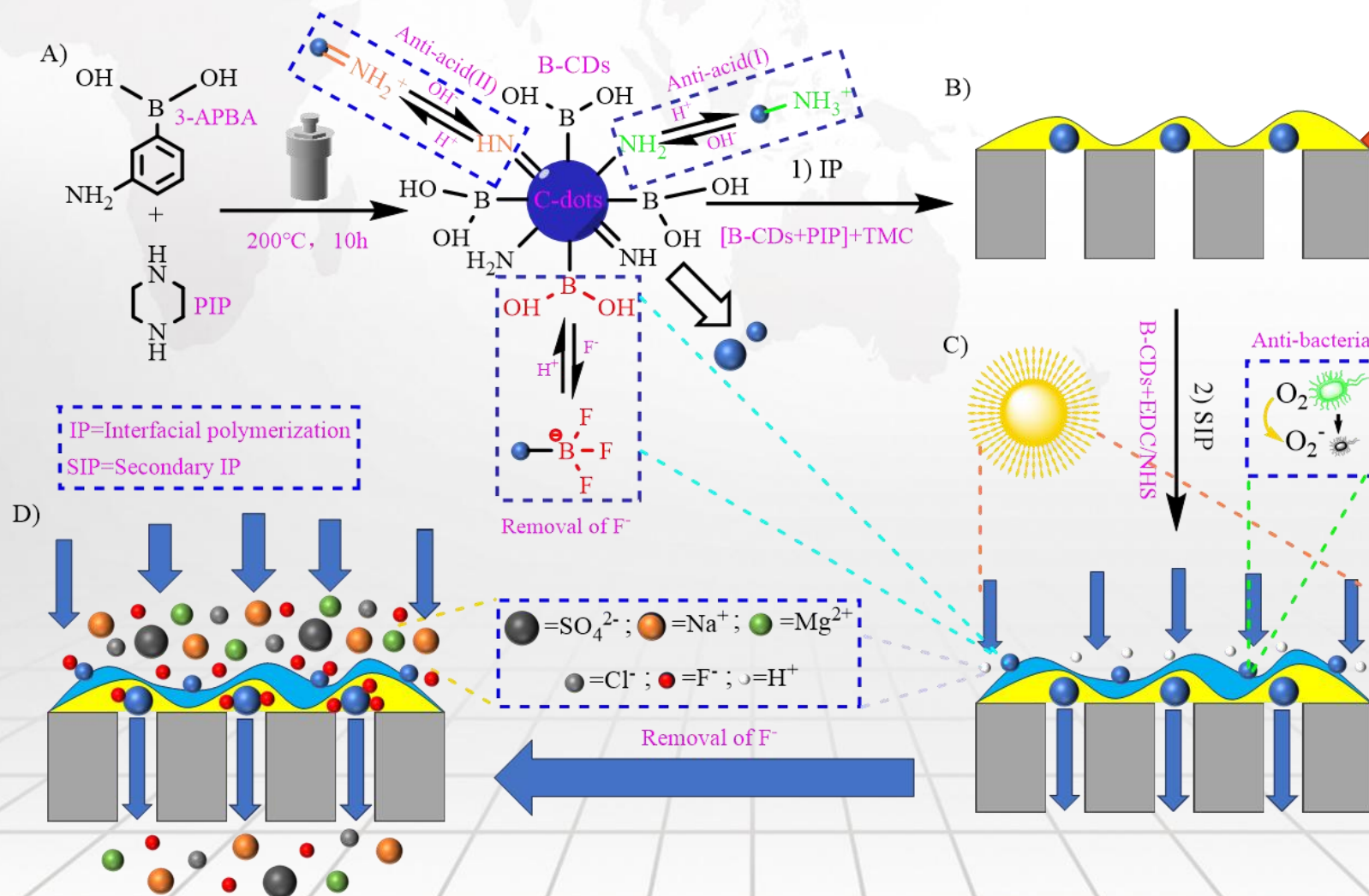
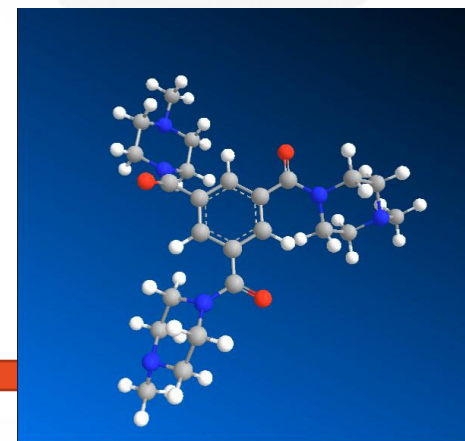
02

多功能氟分离膜的开发与性能表征

- 2.1 膜组成、结构与功能设计
- 2.2 膜性能表征
- 2.3 研究小结

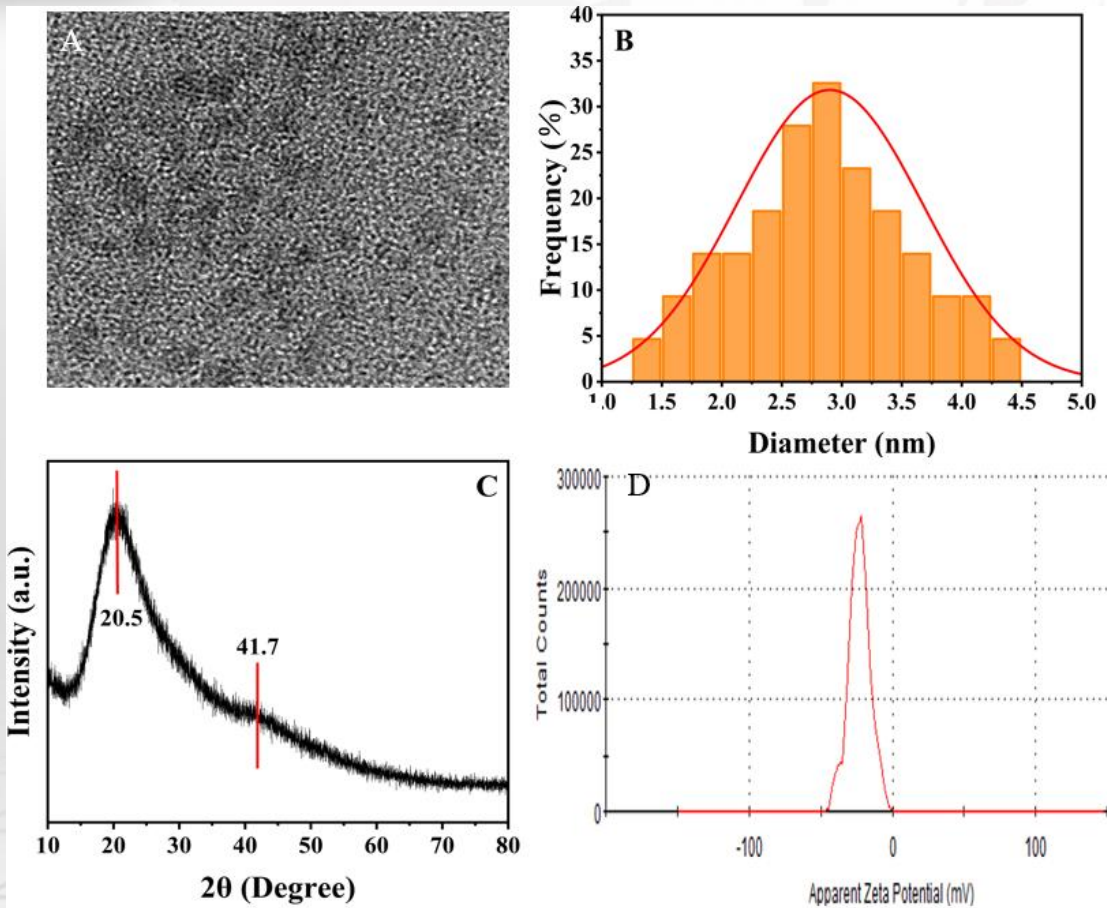


2.1 膜组成、结构与功能设计

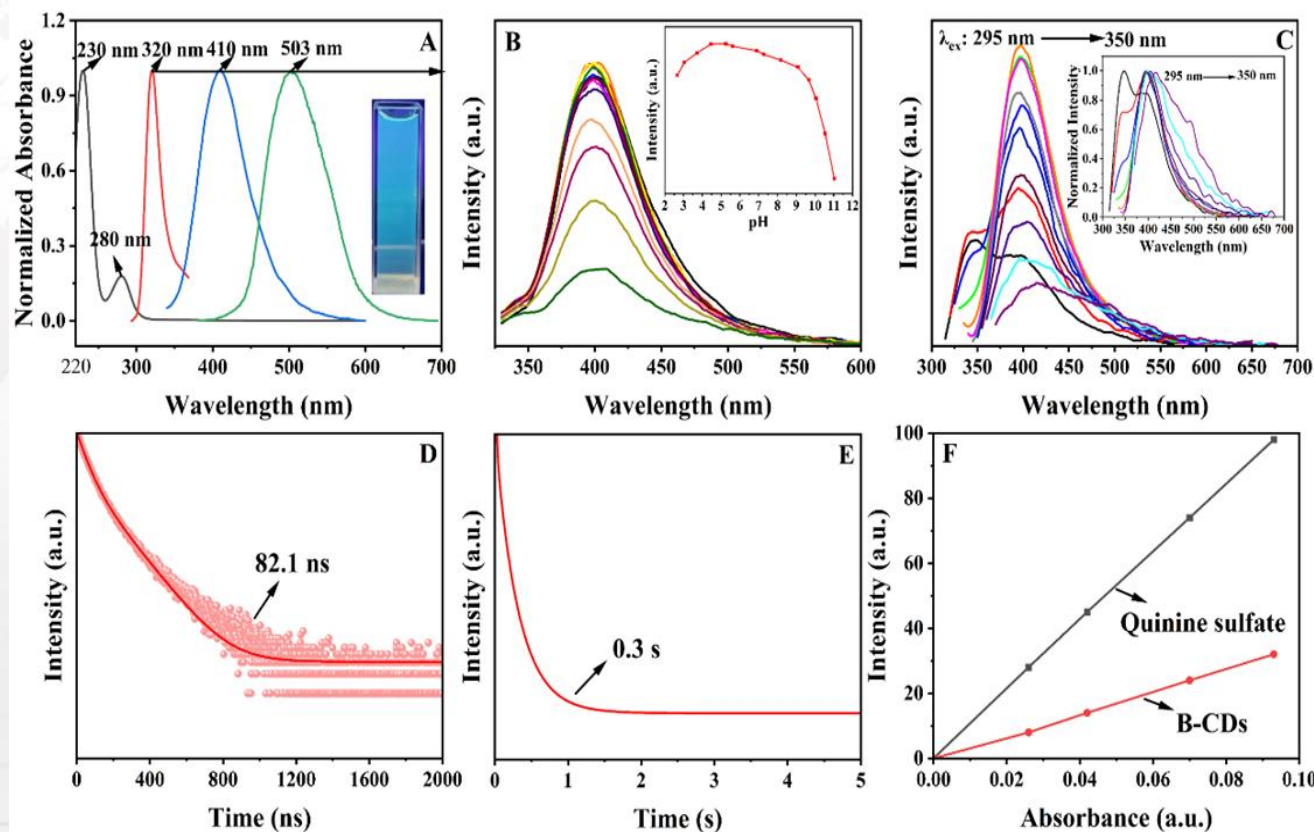


2.2 膜性能表征

2.2.1 碳量子点结构、尺寸、光学性能



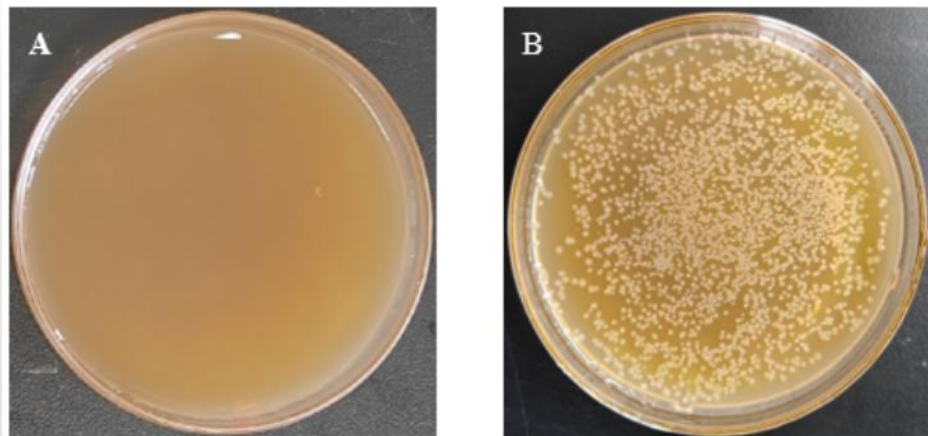
B-CDs的TEM图 (A)、孔径分布 (B)、XRD (C) 和Zeta电位 (D)



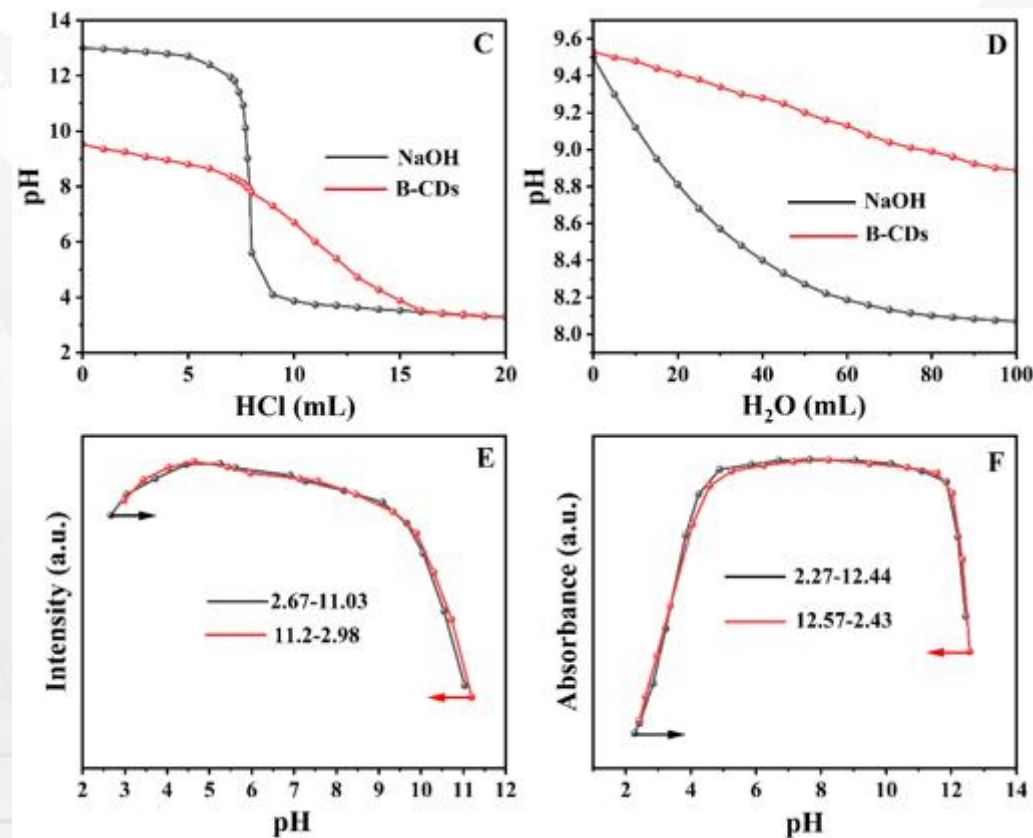
B-CDs的紫外可见、最大激发发射荧光、磷光发射归一化光谱 (A), B-CDs的pH依赖 (B)、激发依赖性 (C) 光谱, B-CDs的荧光寿命 (D)、磷光寿命 (E)、量子产率 (F)

2.2 膜性能表征

2.2.2 碳量子点抗菌性、光学性能的pH稳定性

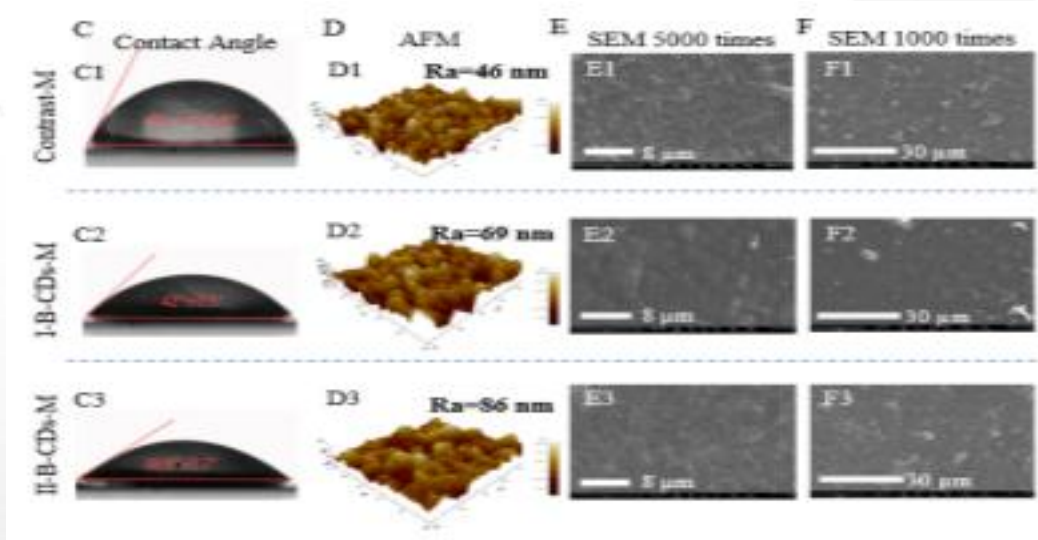
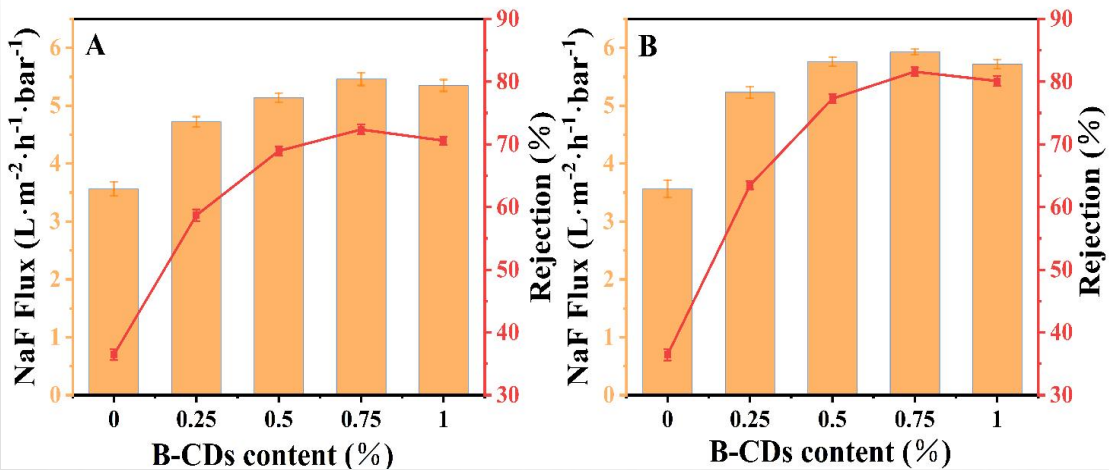


光照下，经B-CDs处理 (A) 和不经B-CDs处理 (B) 的细菌生长情况。外部加入HCl (C) 和用H₂O稀释 (D) 对B-CDs水溶液和NaOH溶液的pH影响。1.0 M的NaOH和HCl可逆滴定B-CDs水溶液的荧光 (E) 和紫外可见 (F) 光谱

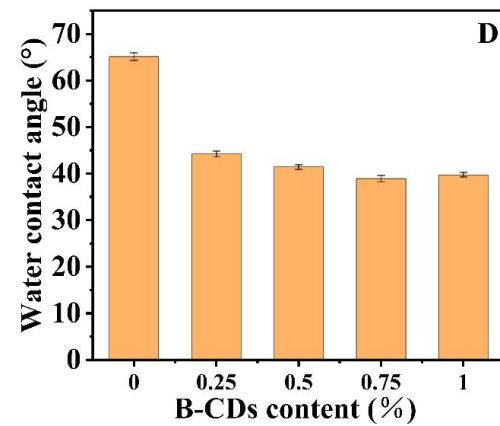
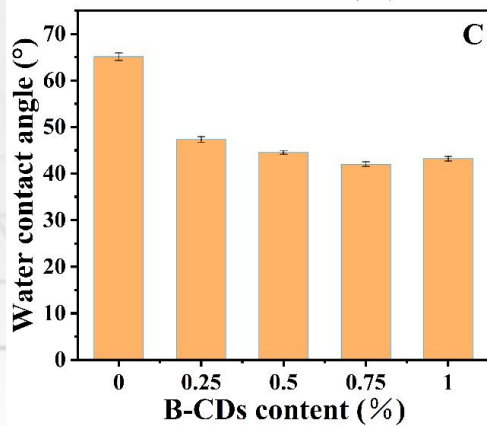


2.2 膜性能表征

2.2.2 碳量子点/聚酰胺复合膜水通量与对氟离子截留率

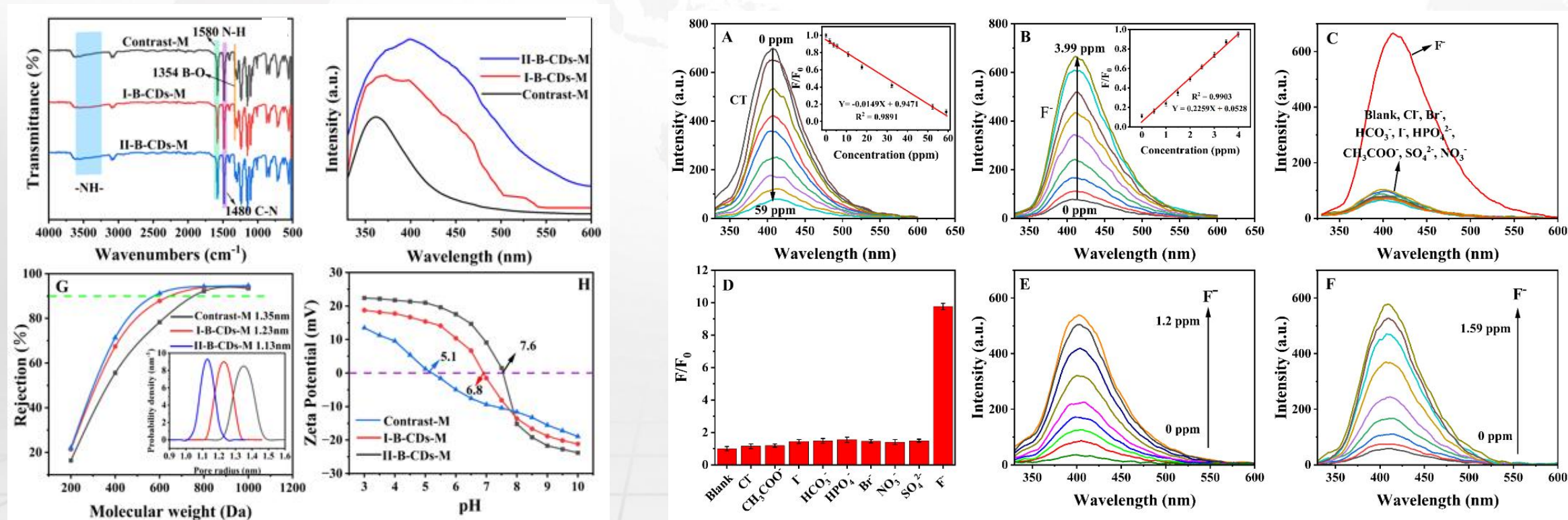


I-B-CDs-M	II-B-CDs-M	碳点掺杂前后皮层微观形貌变化	
分离性能			
		I-B-CDs-M	II-B-CDs-M
		亲水性	



2.2 膜性能表征

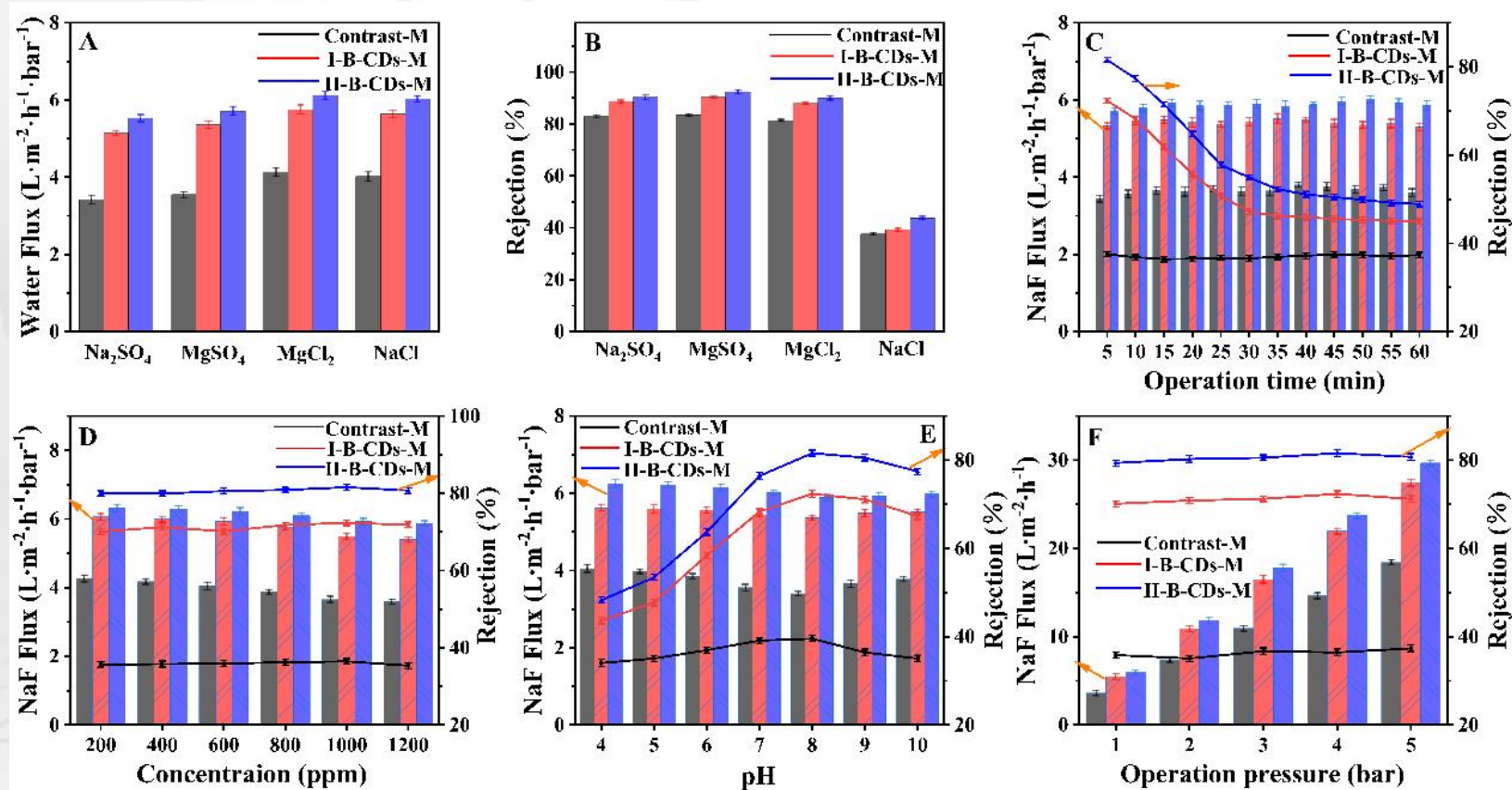
2.2.3 碳量子点/聚酰胺复合膜孔径、表面电荷、对F⁻的荧光响应



邻苯二酚 (CT) 滴定B-CDs水溶液的荧光光谱 (A), 以及F⁻滴定B-CDs/CT水溶液的荧光光谱 (B), A和B中的插图分别是 (F/F_0) 与CT和F⁻浓度在0 - 59.0 ppm和0 - 4.0 ppm范围内的关系图。其他阴离子注入B-CDs/CT水溶液的荧光光谱 (C), B-CDs/CT 水溶液对F⁻相较于其他阴离子的选择性 (D)。F⁻滴定 I-B-CDs-M/CT (E) 和II-B-CDs-M/CT (F) 水溶液的荧光光谱

2.2 膜性能表征

2.2.3 碳量子点/聚酰胺复合膜应用场景中的稳定性

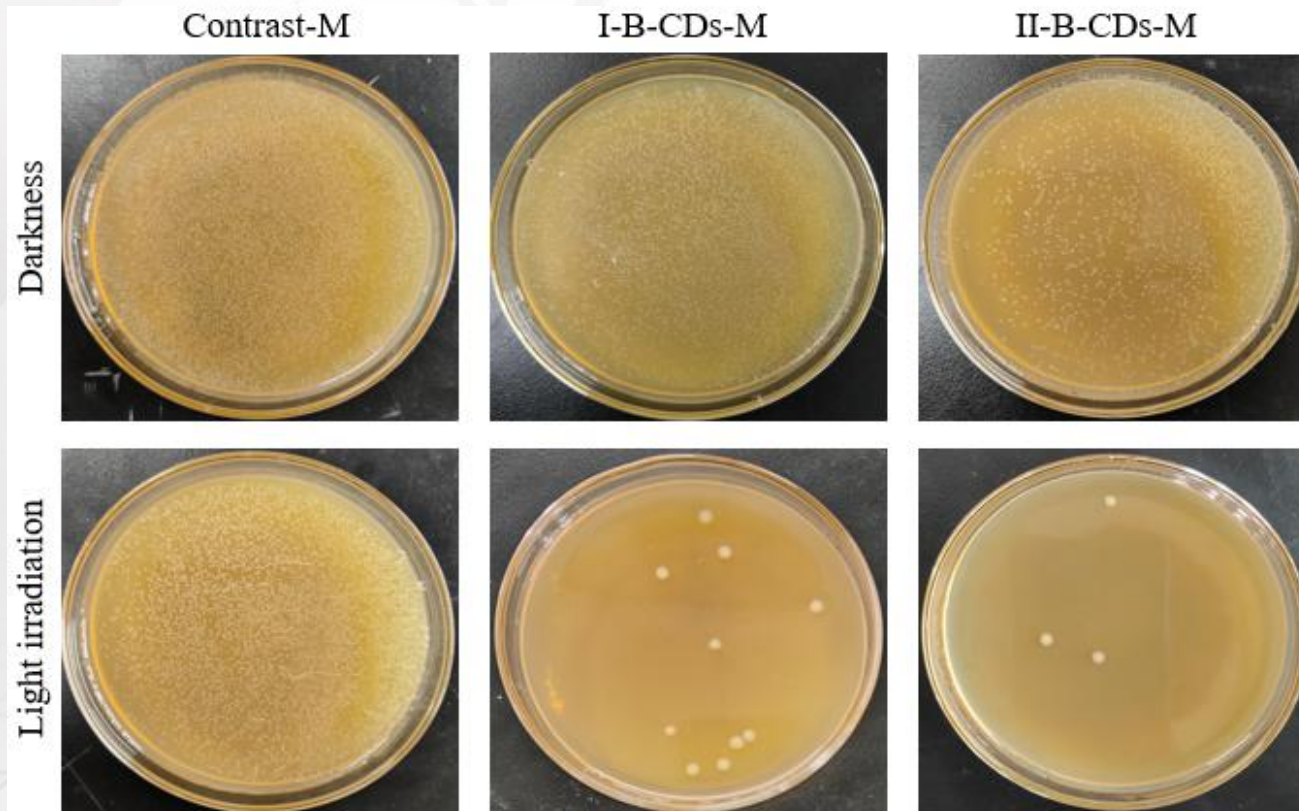


以 Na_2SO_4 、 $MgSO_4$ 、 $MgCl_2$ 和 $NaCl$ 为进料溶液时，Contrast-M、I-B-CDs-M与II-B-CDs-M水通量 (A) 和截盐率 (B) 对比。运行时间 (C)、运行压力 (D)、pH值 (E) 和浓度 (F) 对以NaF为进料溶液的Contrast-M、I-B-CDs-M和II-B-CDs-M的水通量和盐截留率的影响



2.2 膜性能表征

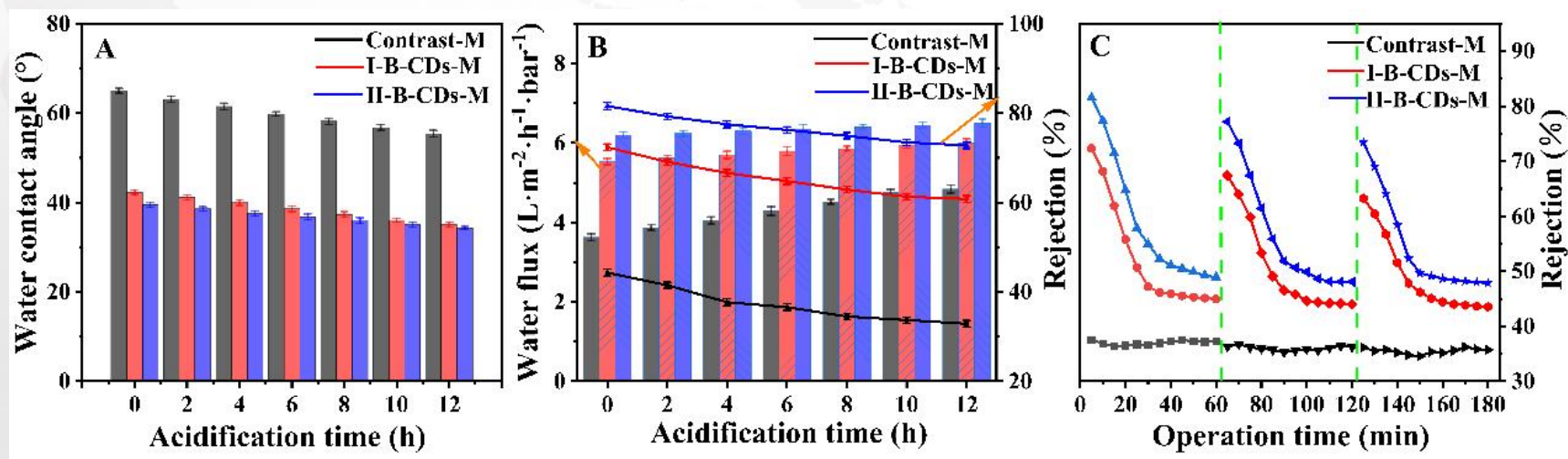
2.2.3 碳量子点/聚酰胺复合膜的抗菌能力



在黑暗（上）和光照（下）条件下，经Contrast-M、I-B-CDs-M和II-B-CDs-M处理的细菌的生长情况

2.2 膜性能表征

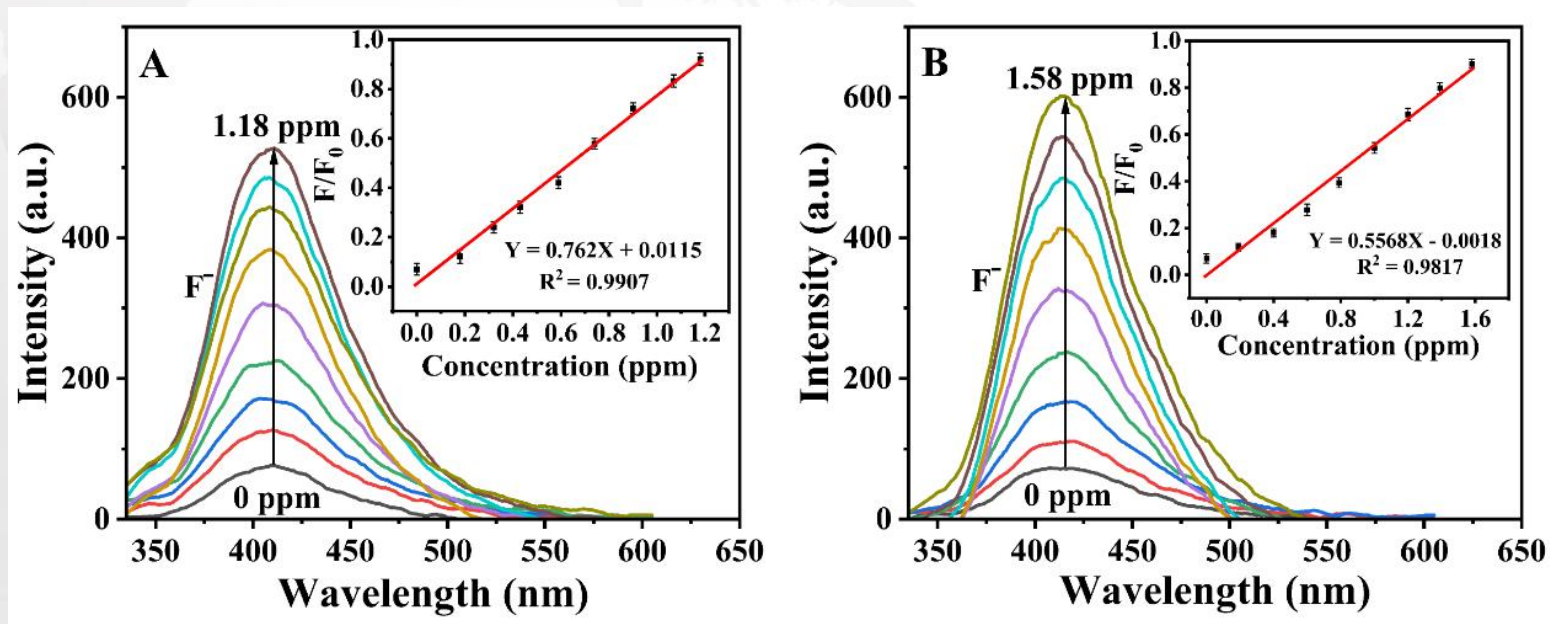
2.2.4 碳量子点/聚酰胺复合膜的抗酸能力



酸化时间对 Contrast-M、I-B-CDs-M和II-B-CDs-M的水接触角 (A)、水通量和NaF截留率 (B) 的影响。
对比 Contrast-M、I-B-CDs-M和II-B-CDs-M在经过两次酸洗循环 (5 min, pH = 4) 后的NaF截留率 (C)

2.2 膜性能表征

2.2.5 I/II-B-CDs-M/CT探针进行F⁻的实时监测



I-B-CDs-M/CT (A) 和II-B-CDs-M/CT (B) 实时监测F⁻ 的荧光光谱

2.3 研究小结

01

基于类氧化酶活性产生抗菌效应，对大肠杆菌**抑菌**率达**99.6%**

02

通过氨基质子化平衡实现pH 4-10范围内的结构**稳定性**

03

借助表面硼酸基团与氟离子的特异性配位作用，**氟离子截留**率高达**81.58%**。创新性地开发了II-B-CDs-M/CT荧光探针体系，可在0.01-1.58 ppm范围内实现**F⁻实时监测**

更多研究细节请查阅：

Separation and Purification Technology 377 (2025) 134413



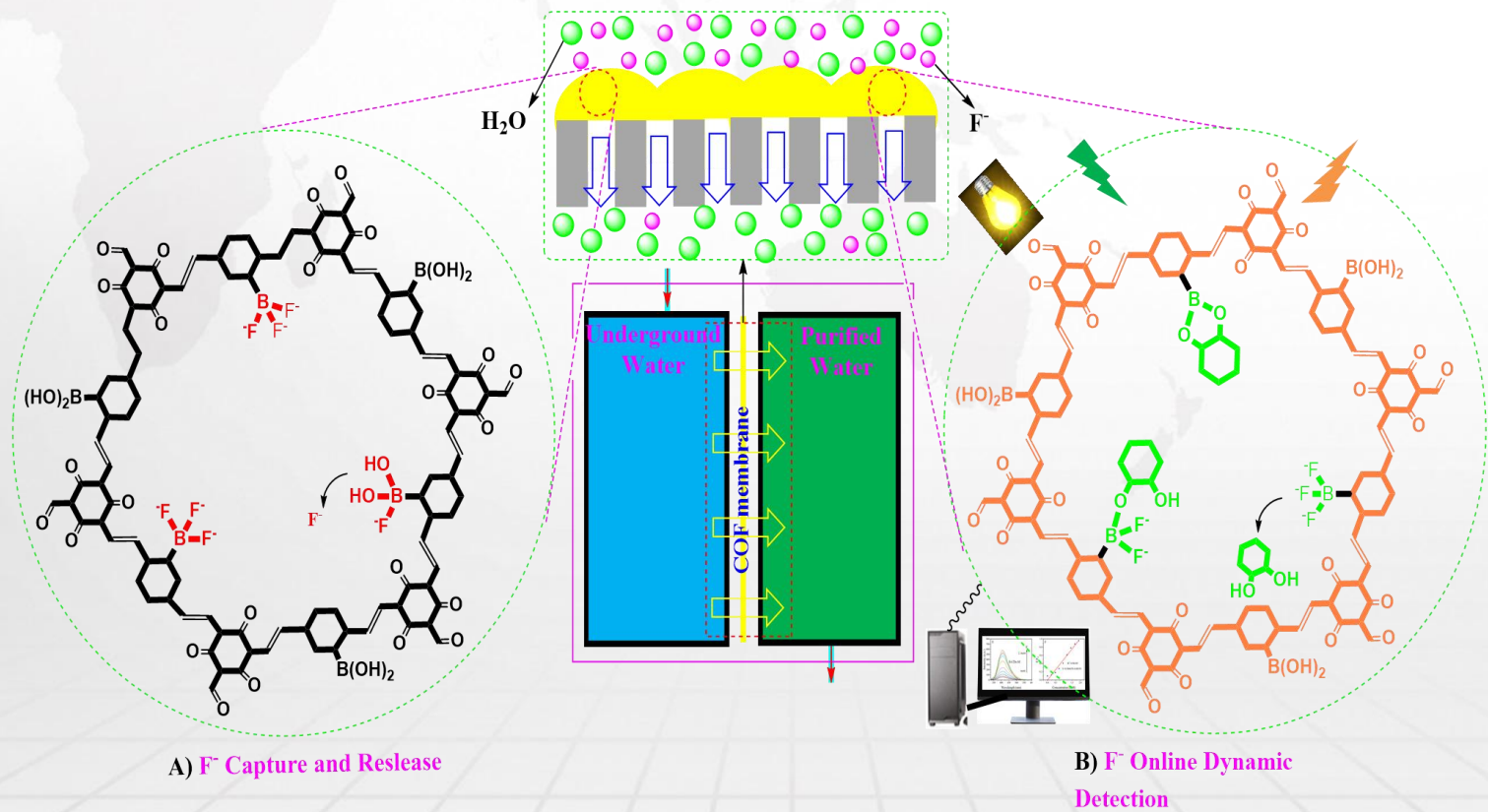
03

展 望



3 展望

3.1 膜活性分离层微观结构无序向有序化转变



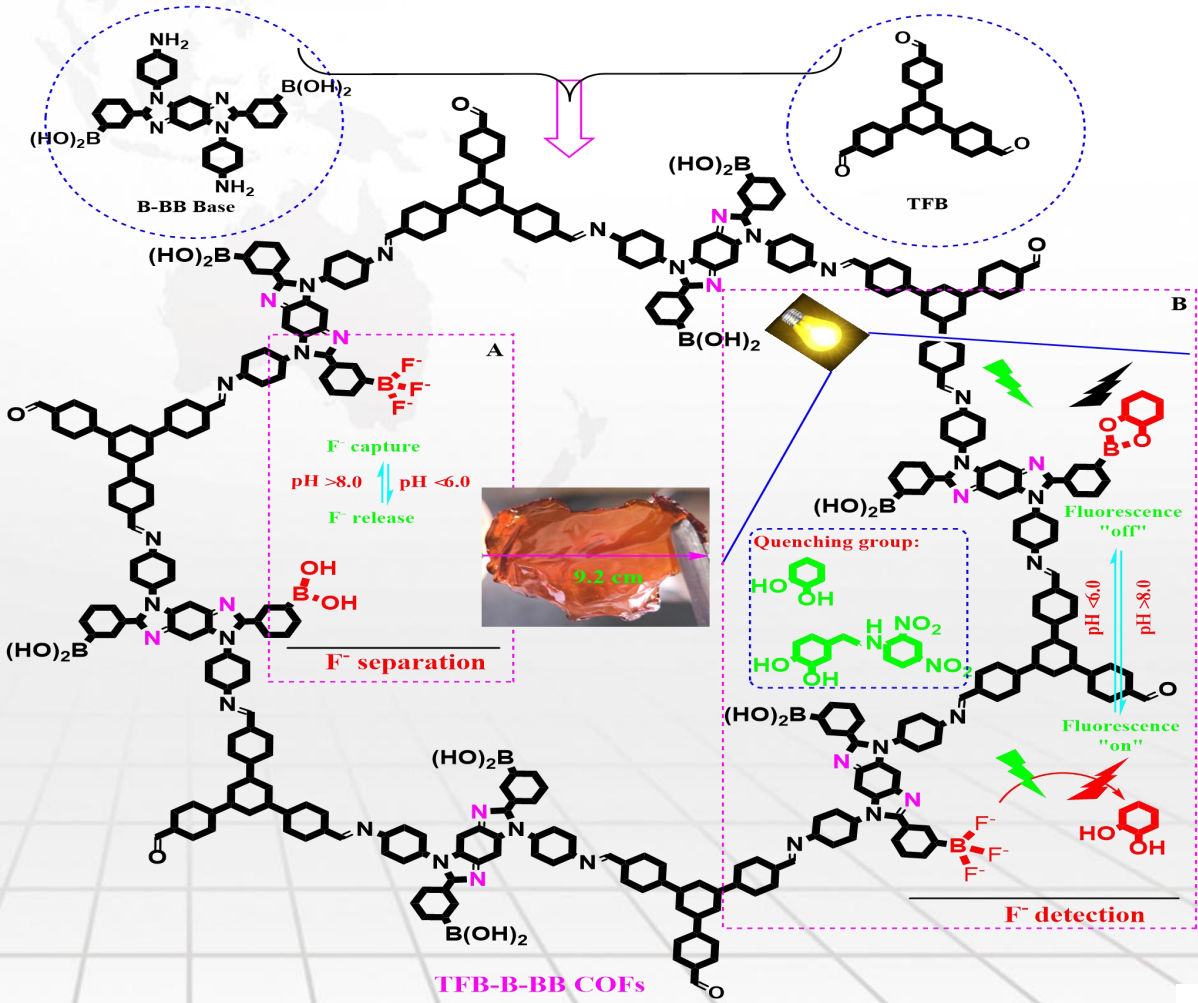
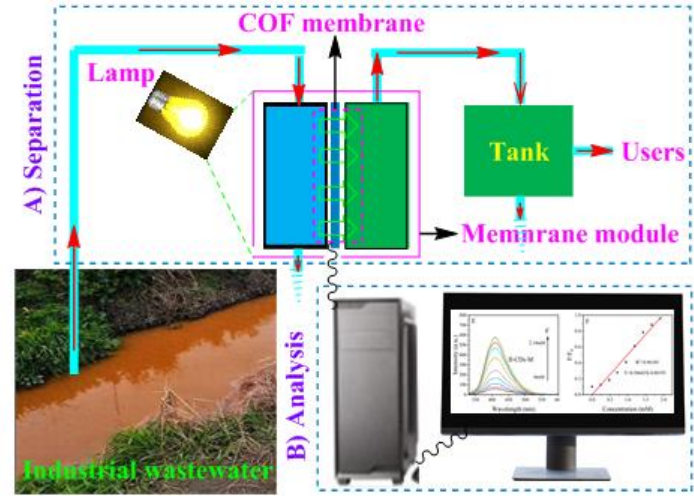
分离性能+在线监测

COFs膜的同时F-分离（A）与在线动态监测（B）示意图

3 展望

3.2 根据含氟水组成和分离要求精准筛分膜开发

TFB-B-BB COFs膜的F-捕获 (A) 与传感 (B)



3 展望

3.3 含氟水的资源化



致谢



会议主办方：工业环保网



国家自然科学基金



安徽省高校自然科学基金



中科润蓝环保技术（北京）股份有限公司



**安徽建筑大学
先进功能膜材料创新团队**



团队主要成员



王亚琴
教授、博导

负责人，省化学学会理事；发表SCI论文40余篇，获授权发明专利4项



吴世彪
教授、硕导

发表学术论文20余篇，其中第一作者/通讯作者SCI论文10余篇



李琼光
副研究员、硕导

Materials杂志客座编辑，在EES等国际知名期刊发表SCI学术论文30余篇，其中高被引论文3篇，获授权发明专利5项



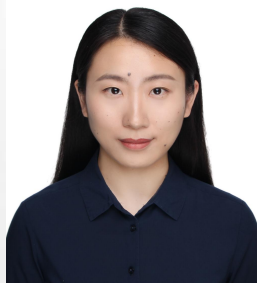
张劲辉
副研究员、硕导

发表高水平学术论文20余篇，获授权PCT国际专利1项并与著名国际科技公司日东电工完成成果转化



邹文生
教授、硕导

发表学术论文40余篇，其中中科院1区20篇，获授权发明专利2项



陈霞
副教授、硕导

发表学术论文30余篇，授权专利3项，其中第一作者/通讯作者论文7篇；获安徽省教学成果三等奖1项



苏鹏程
副研究员、硕导

发表SCI论文24篇，其中以第一和通讯作者在TOP期刊发表论文10篇，获授权发明专利2项

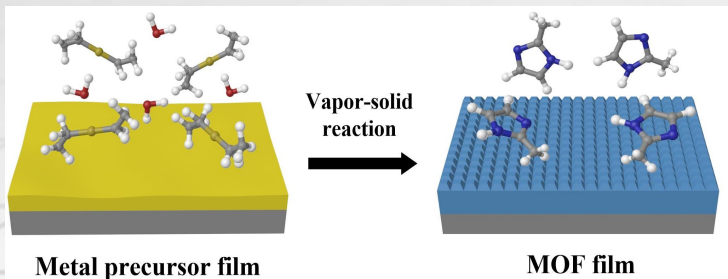


徐琼
副研究员、硕导

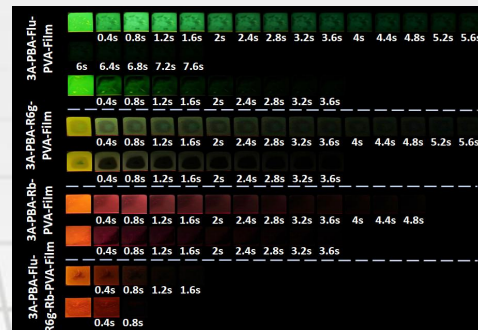
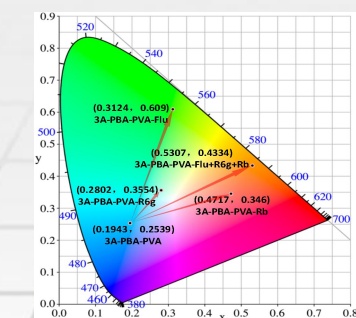
在Materials Science and Engineering A等期刊上发表学术论文10余篇，授权发明专利2项。

研究方向

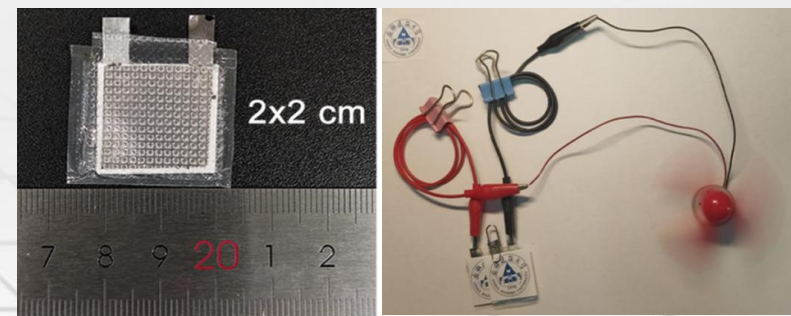
分离膜材料与膜过程研发



量子点合成与显示膜器件研发



离子电池电极膜材料与器件研发



先进功能膜材料团队

代表性成果

1. Journal of the American Chemical Society, 2025, 147, 24317–24325
2. Analytical Chemistry, 2023, 95, 1985–1994.
3. Small, 2024, 2407079.
4. Journal of Membrane Science, 2025, 717, 123581.
5. Journal of Membrane Science, 2024, 696, 122542.
6. Journal of Membrane Science, 2024, 691, 122246.
7. Acc. Chem. Res. 2022, 55, 186.
8. AIChE J. 2022, 68, e17576.
9. Chemical Engineering Journal, 2024, 485, 150077.
10. Journal of Colloid and Interface Science, 2023, 633, 754-763.
11. Chemical Engineering Journal, 2022, 437, 135340.
12. Sep. Purif. Technol., 2025, 359, 130499.
13. Journal of Membrane Science, 2022, 663, 121032.
14. Journal of Materials Research and Technology, 2021, 15:5244-5251.
15. Desalination, 2020, 492, 114598

科研项目

- 国家自然科学基金青年基金项目
(21506002, 22408002)
- 安徽省自然科学基金 (2308085QB66)
- 安徽省高校自然科学基金重点项目
(2023AH050193, 2023AH050190,
2023AH050166, 2023AH050189,
2022AH050239)
- 功能分子固体教育部重点实验室开放课题
(FMS2023004)
- 安徽建筑大学易海精英学者项目
- 广东省青年基金项目



感谢关注 欢迎合作

安徽建筑大学 王亚琴

