



中国矿业大学(北京)
CHINA UNIVERSITY OF MINING & TECHNOLOGY-BEIJING

电化学膜分离技术研究进展及其在水处理中的应用

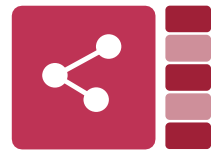
Advances in Electrochemical Membrane Separation and Its Water Treatment Applications

中国矿业大学 (北京)

China University of Mining and Technology, Beijing

张春晖

2026.05 北京



1 研究背景

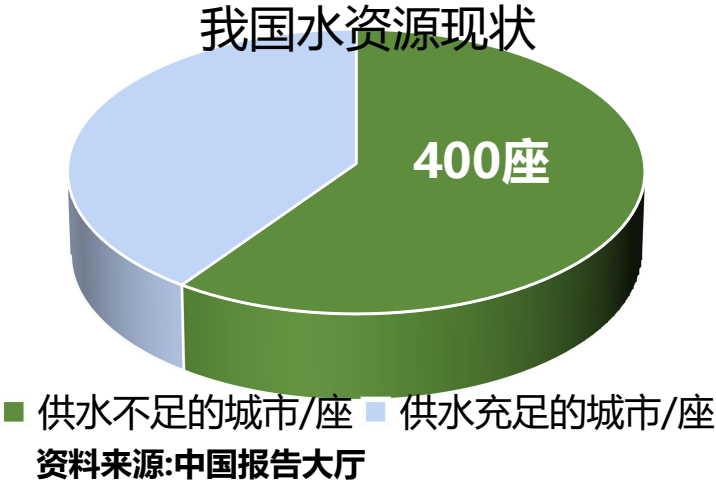
2 EMF技术研究进展

3 EMF膜污染抑制机制

4 EMF典型成果概述

5 结语

■ 面对我国水资源紧缺与工业废水处理难题，无机陶瓷膜技术展现出广阔应用前景



- 含油废水含浮油、分散油，阻隔水体溶氧，破坏水生态，危害水生生物生存
- 乳化液废水性质稳定难降解，含各类助剂，易渗入土壤造成深层水土污染

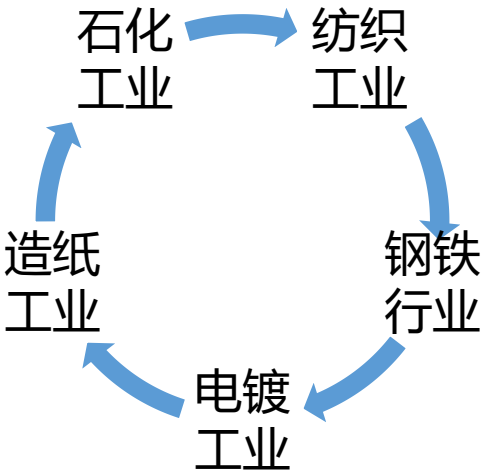
膜分离法

优点：具有油截留率高、不需要添加剂、能耗低

缺点：膜污染、膜堵塞、制约其应用

废水中油分的存在状态及特征

分类	粒径	油的特征
浮油	> 100 μm	易于漂浮于水面，含油废水的主要组成部分
分散油	10-100 μm	呈不稳定状态
乳化油	> 100 μm	由于表面活性剂的存在而在水中呈乳液状，体系稳定
溶解油	小至几nm	以分子状态分散于水中，成为均为稳定的油水均相体系



我国工业废水的主要来源

资料来源:前瞻产业研究院整理

无机陶瓷膜技术优势

✓ 机械强度高

✓ 化学性质稳定

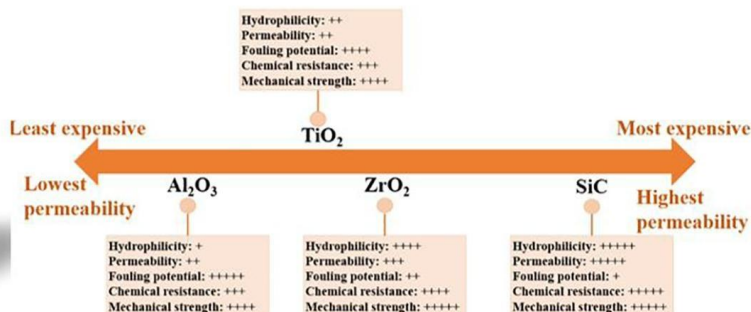
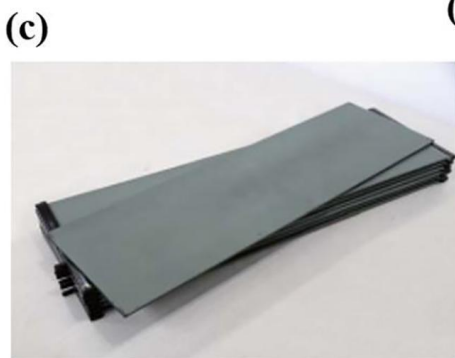
✓ 热稳定性好、

✓ 孔径分布均

✓ 易活化

✓ 使用寿命长

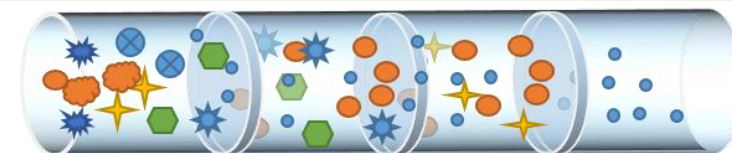
✓ 分离过程简单



➤ 优异的**机械强度、热稳定性、化学稳定性、抗污染性和过滤分离性能**

■ **亟需开发新型抗污膜材料，组建新型抗污膜处理技术，这具有重要的社会环境价值！**

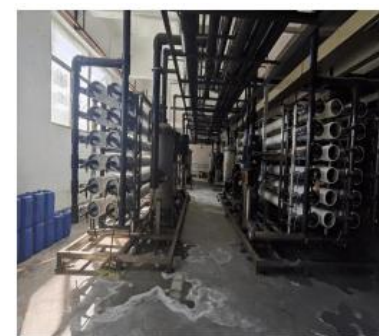
膜污染、膜堵塞制约其应用



Pressure	2~4	5~10	20~40	bar
Pore size	>0.5	0.1~0.01	0.01~0.001	μm
Molecular weight	500K	200K~100K	100K~1K	Da

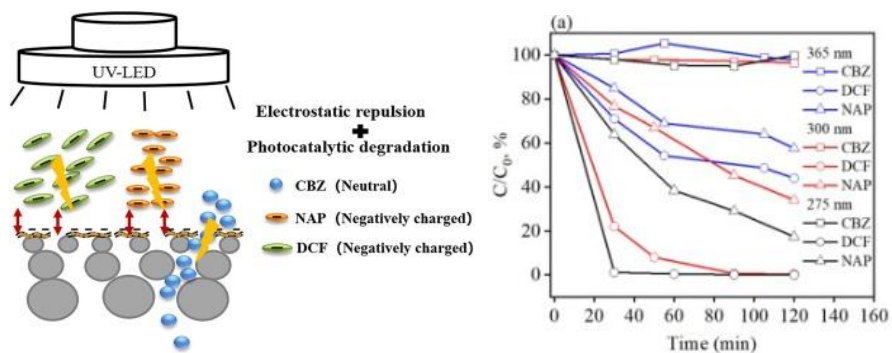
Microfiltration Ultrafiltration Nanofiltration

 Suspended solids
  Bacteria
  Protein
  Multivalent ions
 Oil emulsion
  Virus
  Small molecule organics
  Monovalent ions



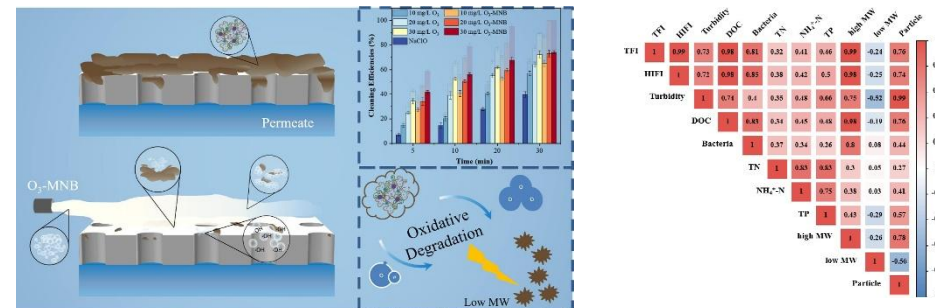
➤ **有机物吸附和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 结垢**形成致密沉积层造成的**膜孔堵塞、膜污染**问题，已成为膜分离技术应用的一大瓶颈问题

光催化耦合膜分离



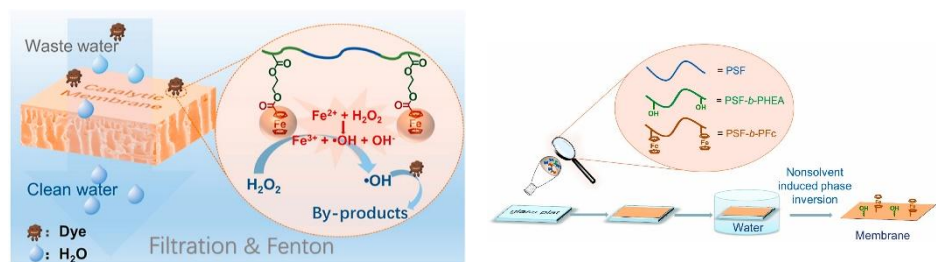
- 悬浮物和色度对光催化效率产生负面影响。

臭氧耦合膜分离



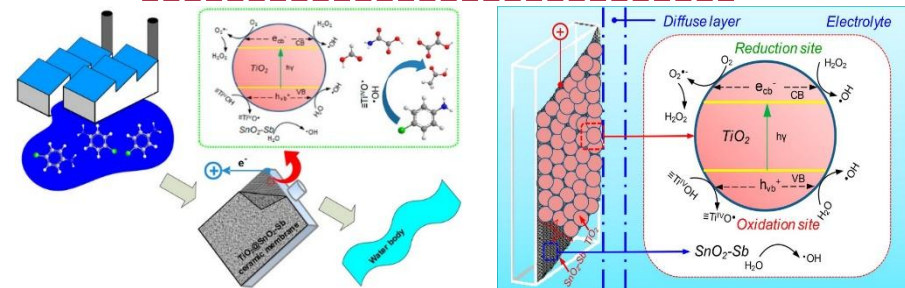
- 臭氧耦合膜分离技术需要持续提供臭氧。

Fenton耦合膜分离



- Fenton 反应耦合膜分离技术会产生铁污泥，操作 pH 值范围较窄 (2-4)。

电化学耦合膜分离



- 无外源化学品添加，具有氧化还原、电斥力 (或电吸附)、电泳等高效净化机制。

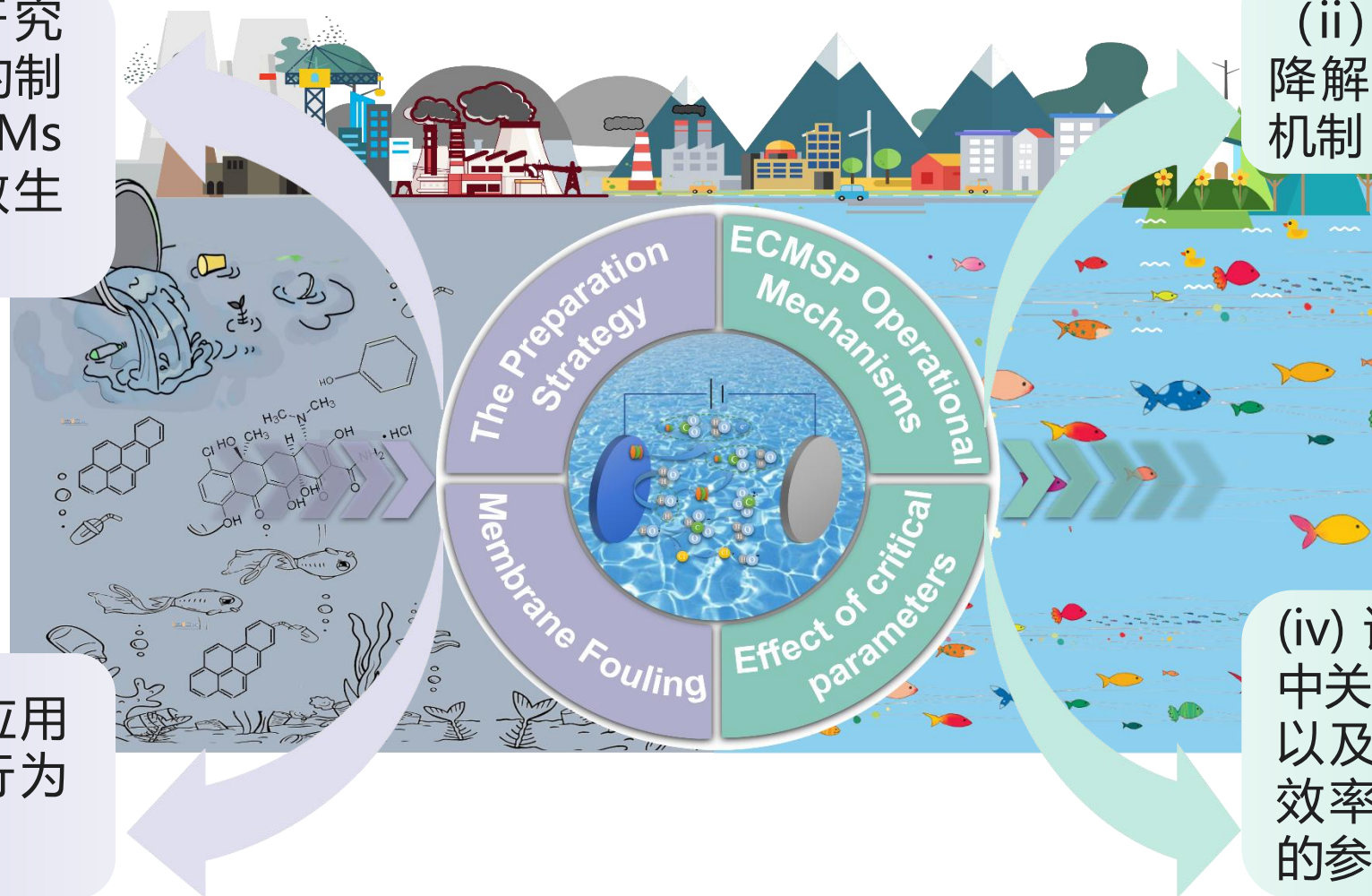
■ 基于导电陶瓷膜（CCMs）开展电化学膜水处理技术（Electrochemical membrane filtration, EMF）研究，可为新型水处理技术降本提效提供新的理论支撑与实践参考

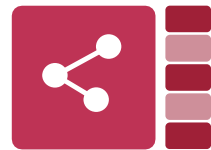
(i) CCMs的最新研究进展，分析CCMs的制备策略，以指导CCMs的成本效益和高效生产

(ii) 深入研究污染物降解和减轻膜污染的机制

(iv) 解释了CCMs应用过程中的膜污染行为和过滤模型

(iv) 评估CCMs应用过程中关键工艺参数的影响，以及其在废水处理中的效率，为应用提供可靠的参考





1 研究背景

2 EMF技术研究进展

3 EMF膜污染抑制机制

4 EMF典型成果概述

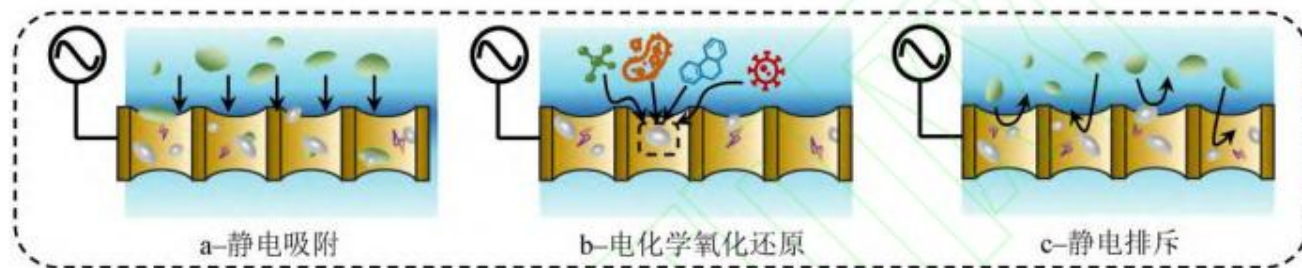
5 结语



■ 电化学膜分离技术（EMF）有机结合了膜分离与电化学优势，可实现污染物高效去除与膜污染协同控制，是极具潜力的水处理技术

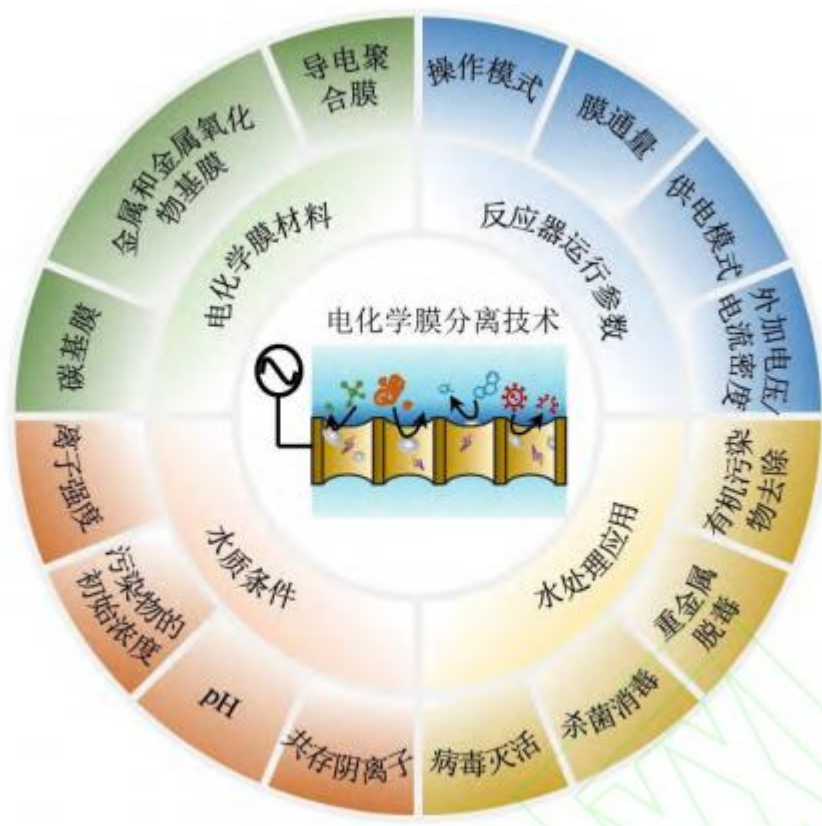
➤ 阳极导电陶瓷膜技术

- 核心机制：直接 / 间接阳极氧化，原位生成 $\cdot\text{OH}$ 、活性氯物种（RCS）高效降解污染物
- 膜污染控制：静电排斥抑制污染物粘附，电解气泡冲刷缓解膜孔堵塞
- 关键影响因素：电极电位、OEP 高低、水质氯离子浓度决定降解路径与效率



➤ 阴极导电陶瓷膜技术

- 核心机制：直接阴极还原、活性氢还原去除重金属 / 硝酸盐 / 有机卤化物；电芬顿原位生成 $\cdot\text{OH}$ 氧化有机污染物
- 膜污染控制：阴极还原环境抑制微生物生长，降低滤饼层形成风险
- 关键影响因素： H_2O_2 生成效率、 $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ 循环效率与传质速率决定处理效果

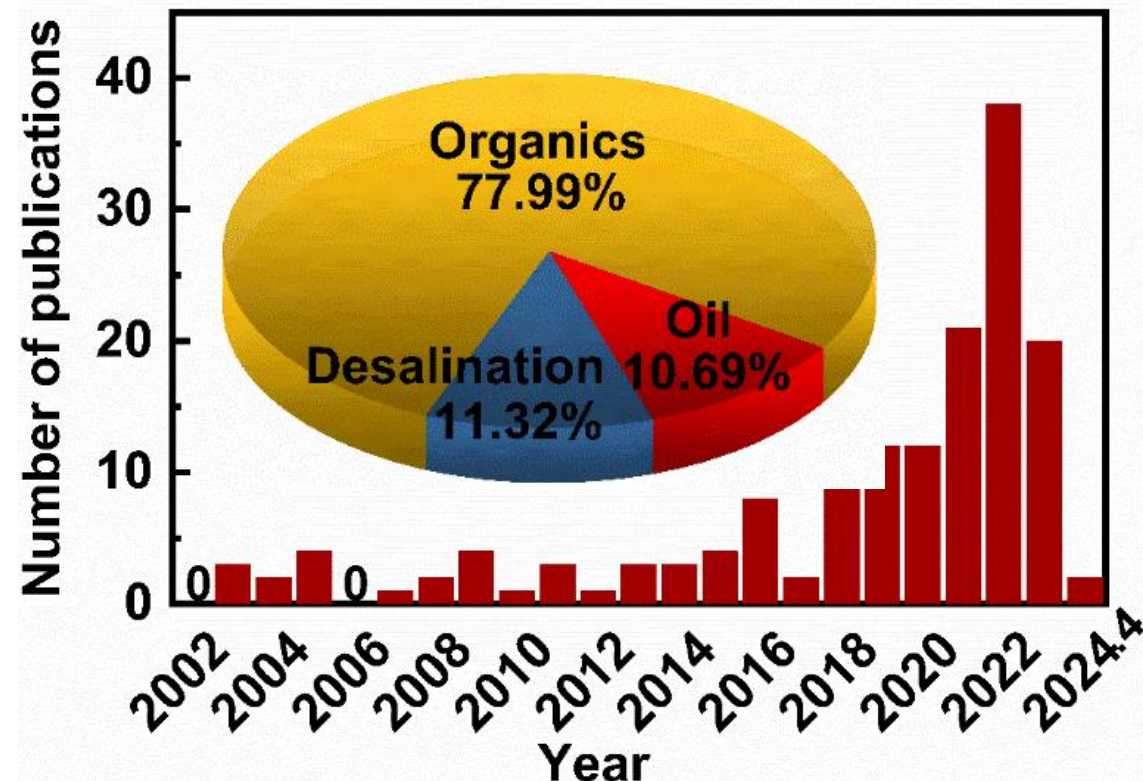
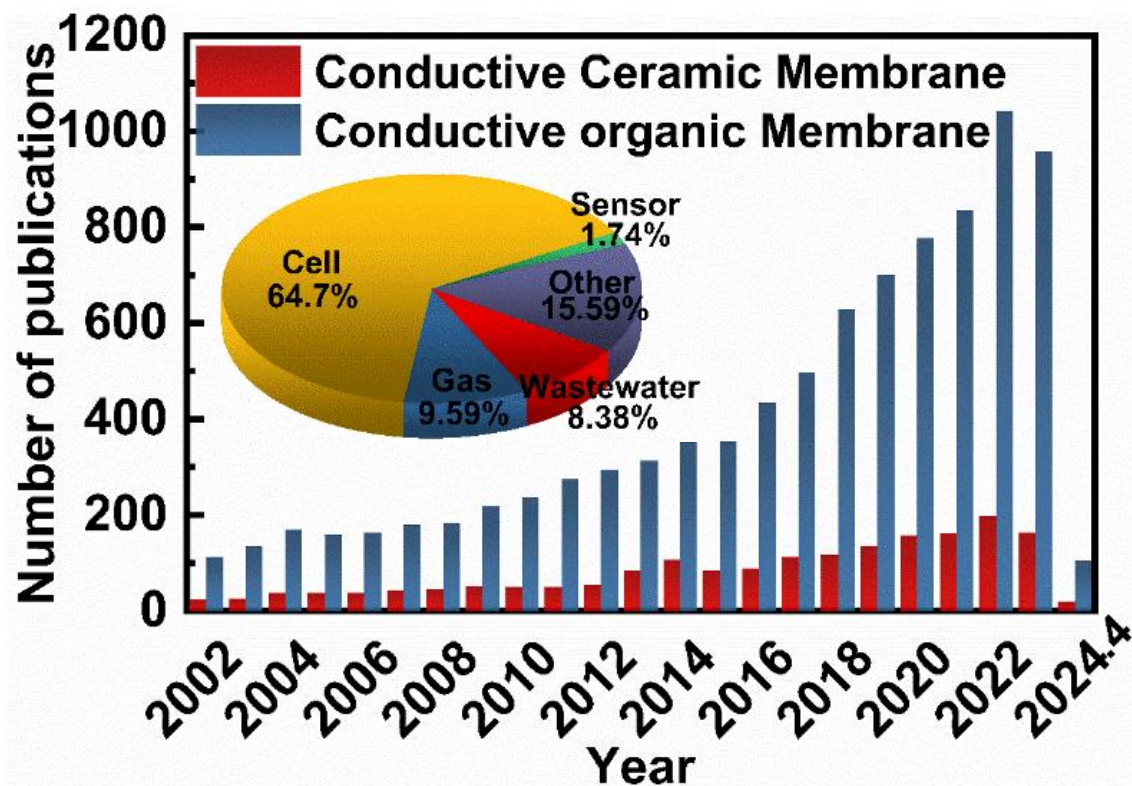


CCMs类型及应用

导电陶瓷膜电极材料 (CCMs) 是技术应用与发展的核心！

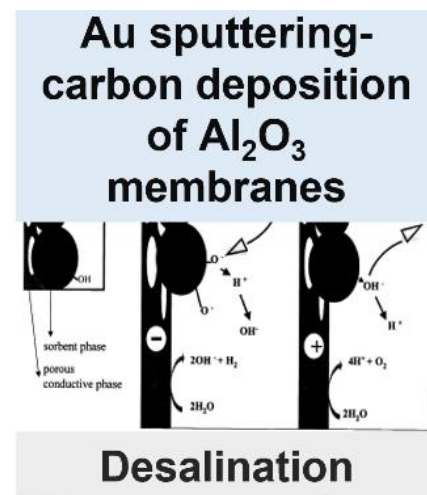


■ 作为一种极具潜力的耦合工艺，电化学膜材料的制备和应用正处于快速发展阶段

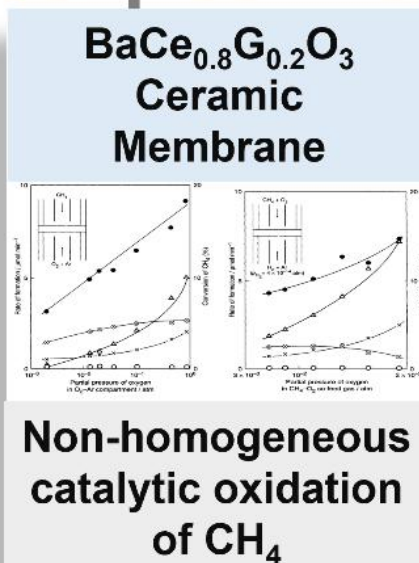


- 尽管CCMs目前在废水处理研究中所占比例较低，但已发表的论文数量呈现快速增长趋势
- 在水净化中，CCMs主要侧重于去除有机污染物，这归因于其独特的电化学高级氧化功能

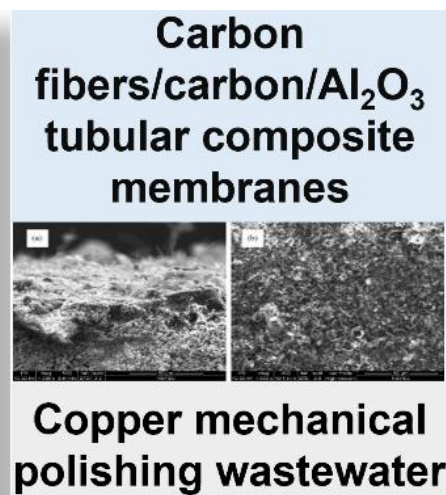
- 从 1988-2024，发展以**碳材料**、**Sn基材料**、**钙钛矿材料**、**Ti₄O₇材料**作为导电层的电催化陶瓷膜。并应用于水处理，主要含有**海水淡化**、**含油废水**、**生活污水**、**工业废水**等处理



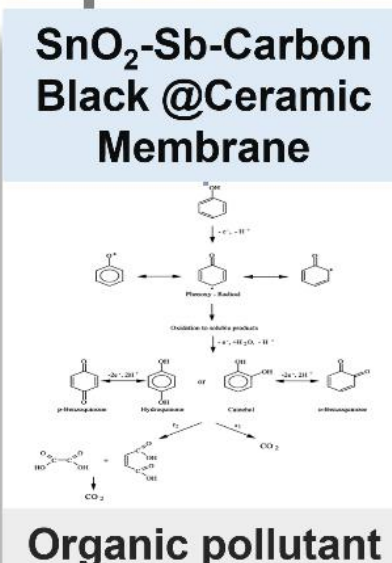
1988



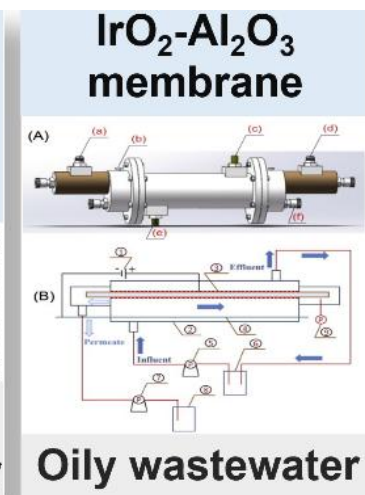
2001



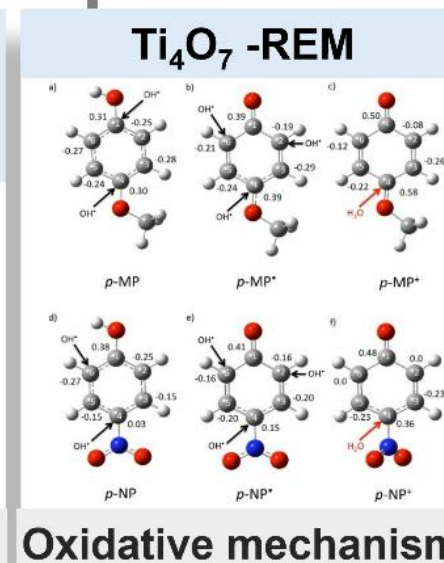
2003



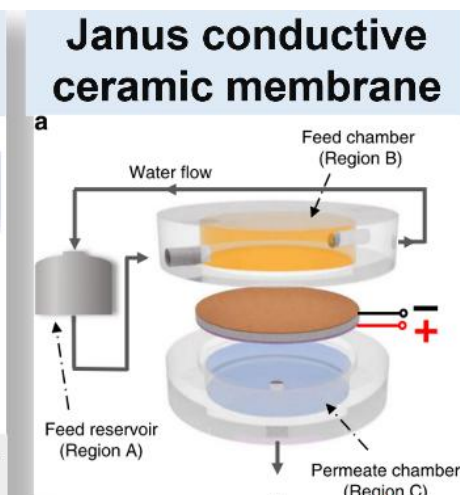
2008



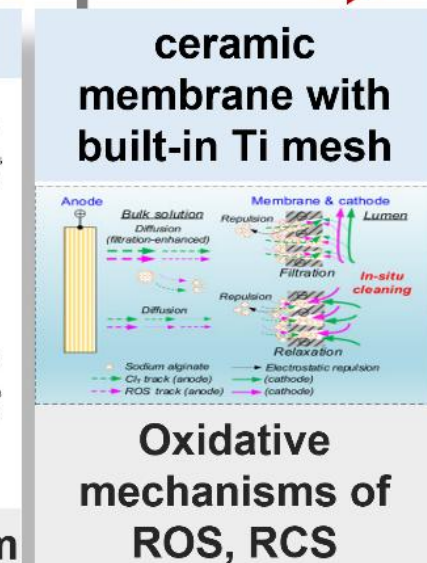
2014



2015



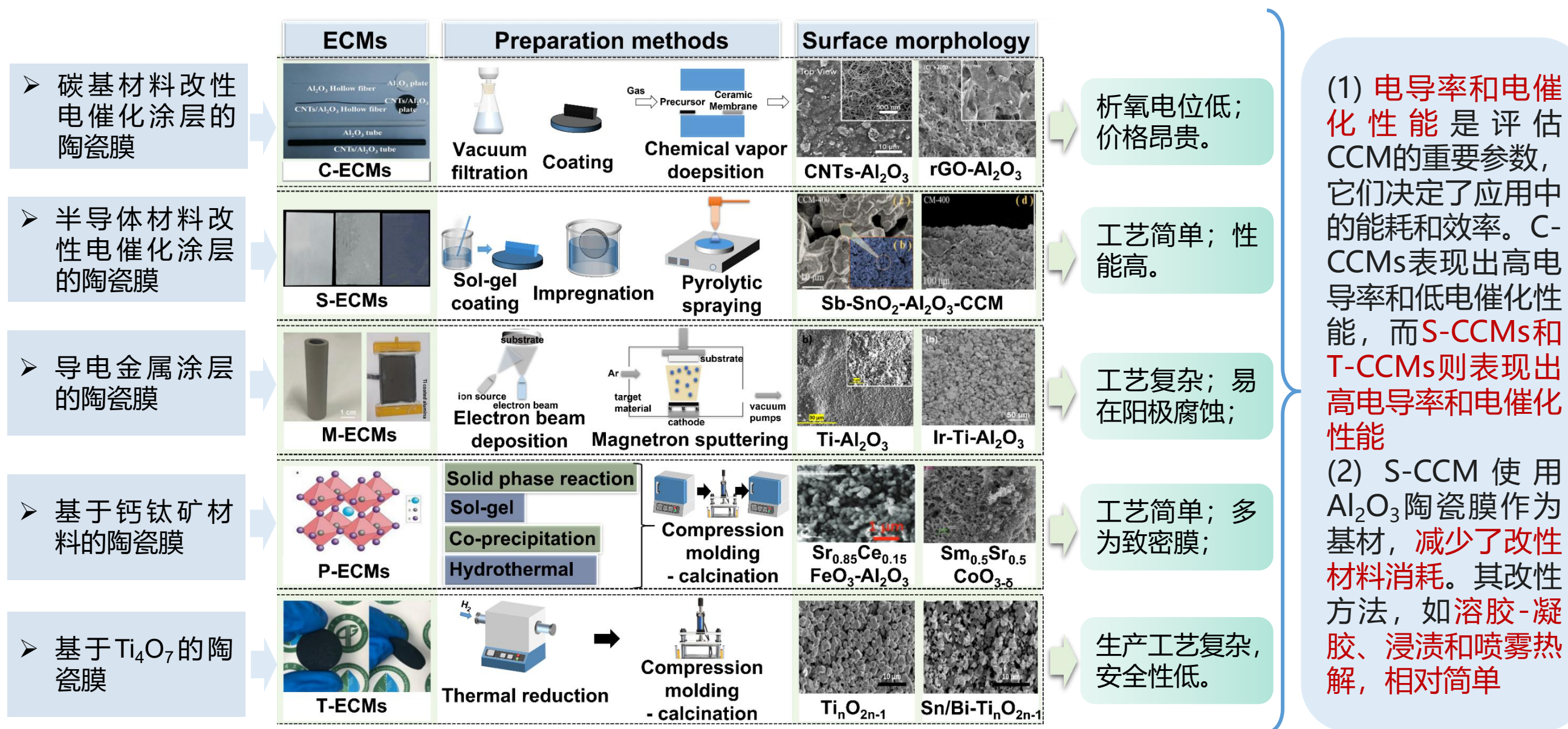
2019

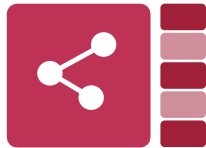


2020



通过分类梳理导电陶瓷膜电极的制备路径，对比各类改性技术的工艺优劣势与性能表现





1 研究背景

2 EMF技术研究进展

3 EMF膜污染抑制机制

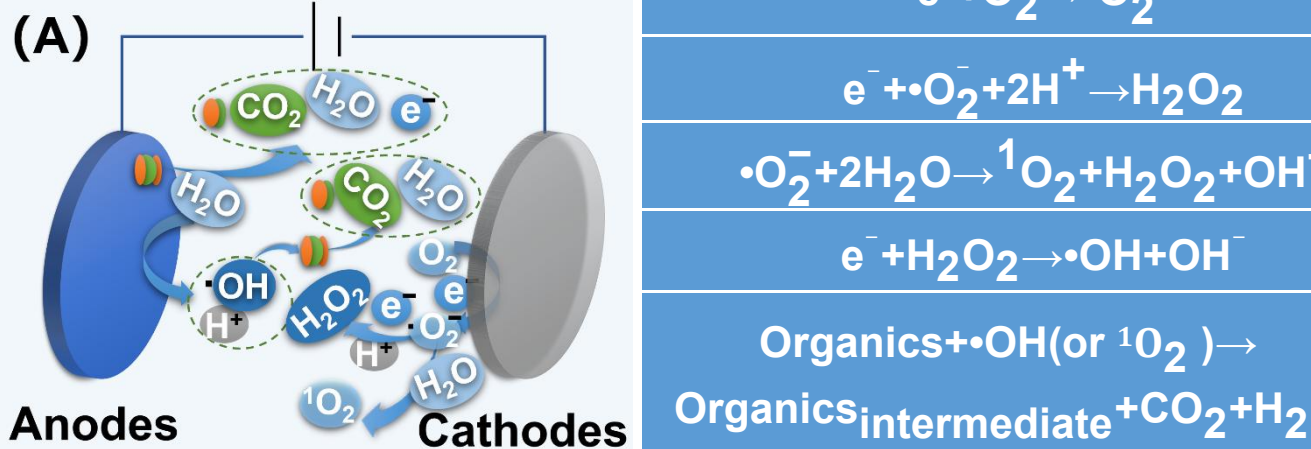
4 EMF典型成果概述

5 结语

- 电化学驱动下，导电陶瓷膜通过电化学高级氧化作用，分别介导 ROS 与 RCS 活性物种生成，实现膜界面自清洁与污染物协同降解

ROS($\cdot\text{OH}$, $\cdot\text{O}_2^-$, $^1\text{O}_2$, H_2O_2)介导的CCM膜界面氧化机理

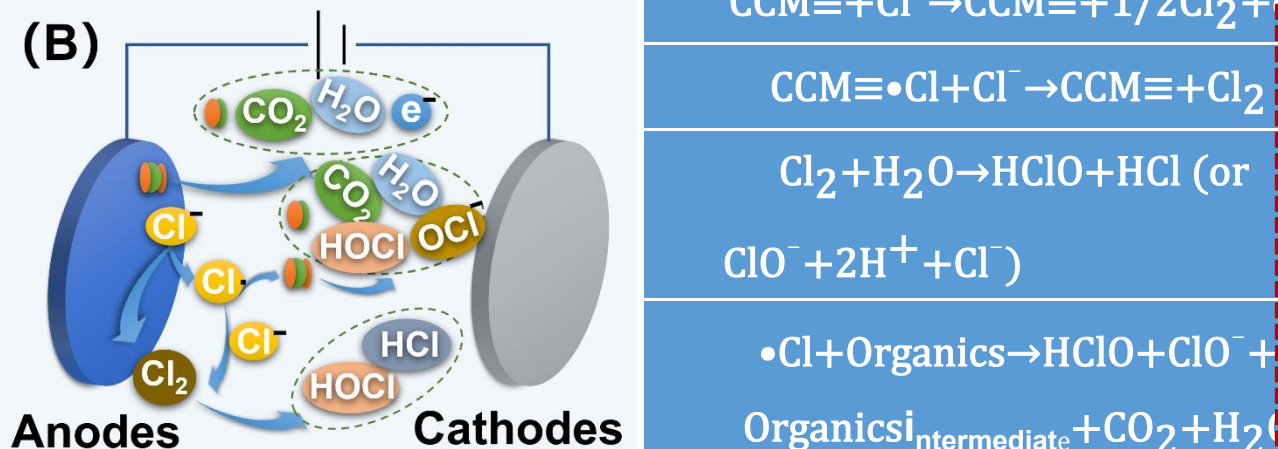
Electrochemical oxidative degradation - ROS



- $^1\text{O}_2$ 和 $\cdot\text{OH}$ 起到主要氧化作用

RCS($\cdot\text{Cl}$, $\cdot\text{ClO}^-$)介导的CCM膜界面氧化机理

Electrochemical oxidative degradation - RCS

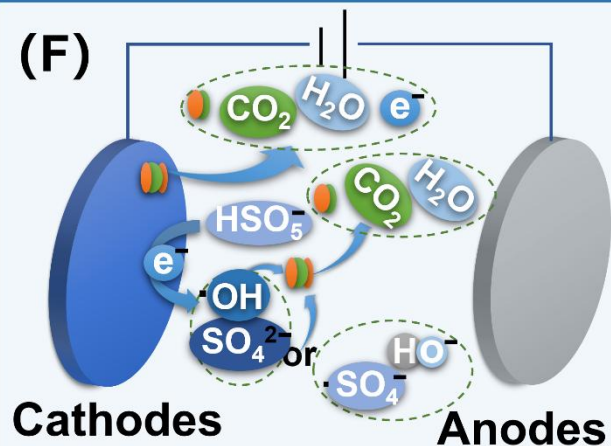


- $\cdot\text{Cl}$ 、 HClO (或 $\cdot\text{ClO}^-$) 起到主要氧化作用

■ 电化学膜耦合强化技术通过电激活 PMS、电芬顿及电絮凝等路径，实现污染物高效去除与膜污染协同控制

膜界面电激活 PMS

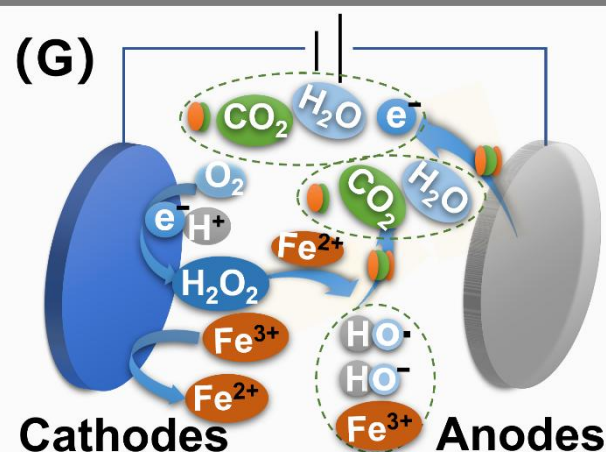
Electrochemical oxidative degradation - PMS



- PMS在阴极接受电子并产生氧化活性的 $\cdot\text{OH}$ 和 $\cdot\text{SO}_4^-$ ，增强了系统的氧化性能

膜界面电芬顿

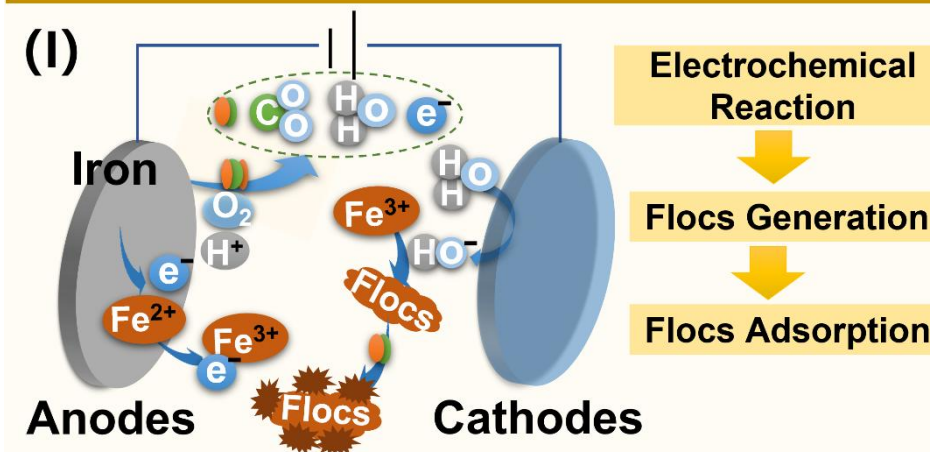
Electrical Fenton



- 电芬顿增强 $\cdot\text{OH}$ 生成，并在清除有机污染物方面起主导作用

电絮凝耦合膜分离

Electroflocculation

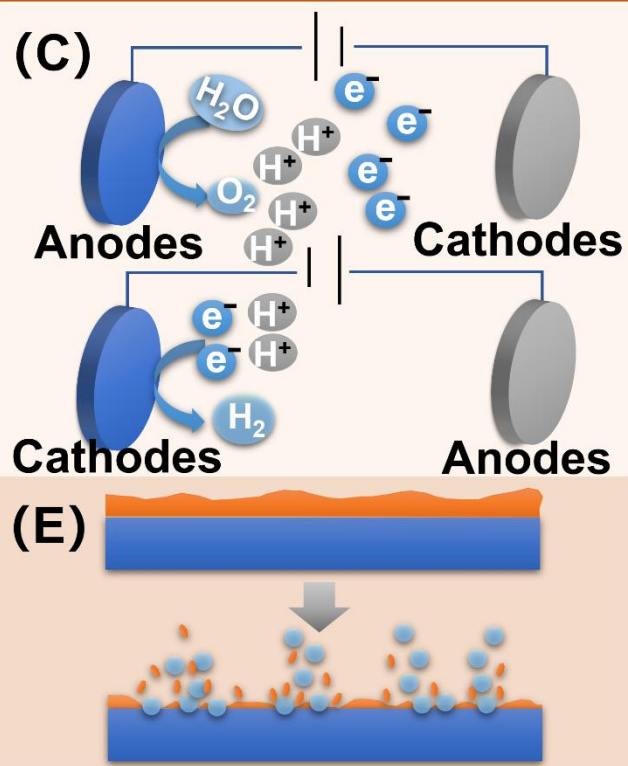


- 电絮凝形成**氢氧化物络合物**可以去除金属离子以大分子有机污染物，降低膜结垢风险

- 电化学膜通过电生气泡冲刷与界面静电斥力双重作用，协同缓解膜污染与浓差极化，保障高效过滤通量

电生气泡作用

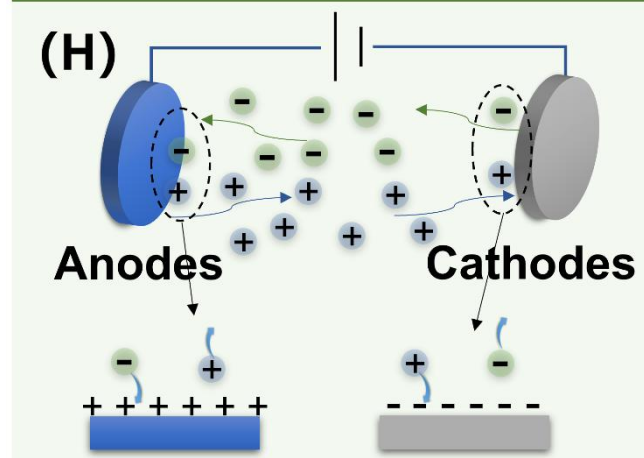
Electrolytic bubble



- 膜表面的电化学析出气泡机制是阳极膜上的析氧反应或阴极膜上的析氢反应
- 产生的气泡对污染层的影响，使污染层变得疏松，易于在交错流过滤模式下通过水流的剪切作用清除，从而降低了浓差极化效应

膜界面电作用力

Electrostatic action

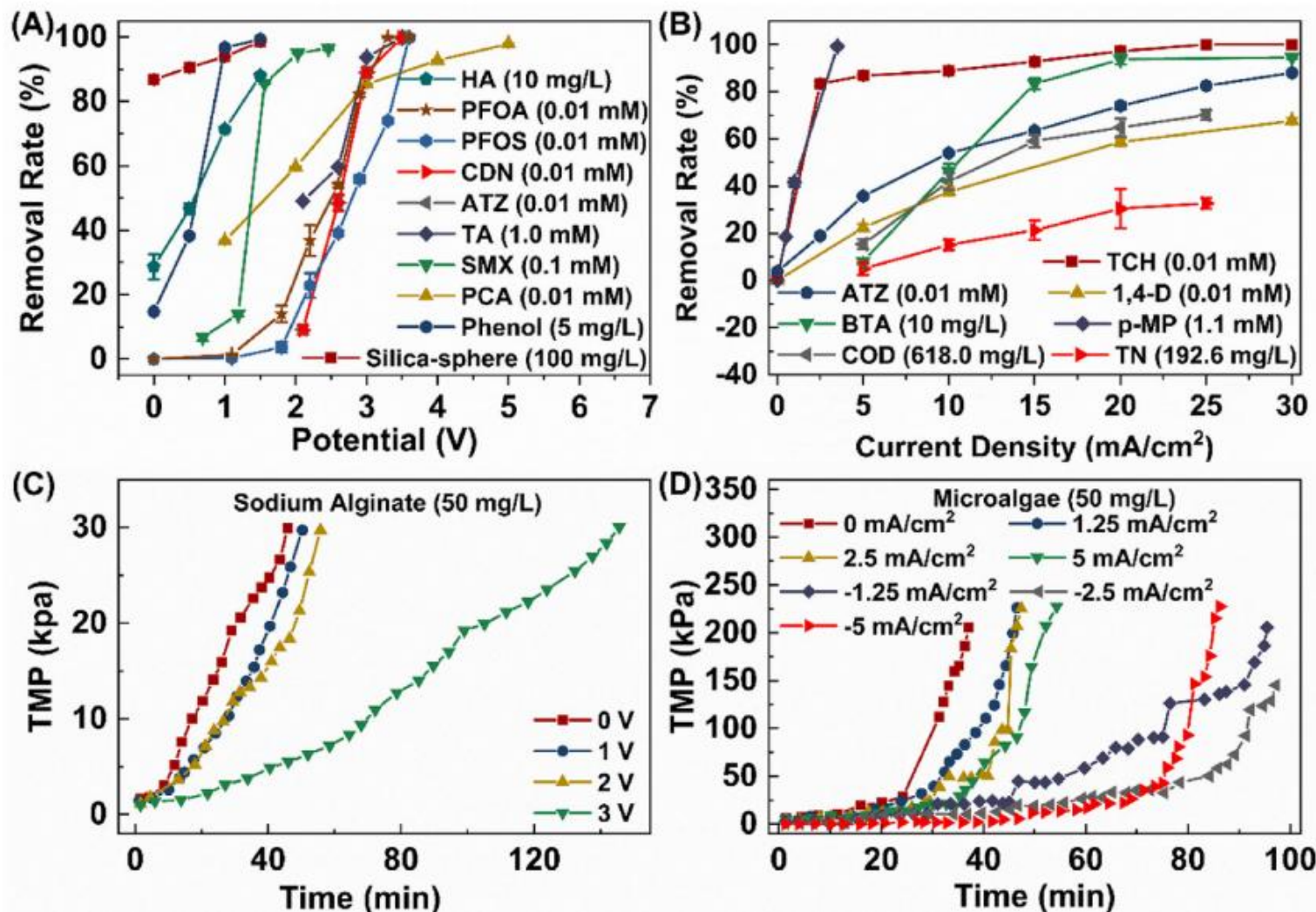


- 静电斥力效应可以有效地抑制膜表面污层的形成，从而有利于污染物的去除和减少膜通量的损失



■ 电压 / 电流密度是电化学膜系统的核心参数，直接影响污染物去除、膜污染控制与能耗水平，需优选区间实现高效低耗运行

- 随着工作电压(或电流密度)的增加，有机污染物的去除效率得到了有效的提高。归因于反应性自由基(如 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{Cl}$ 、 $\cdot\text{SO}_4^{2-}$ 等)的产生量增加
- 当操作电位太高时，OER和HER分别发生在阳极和阴极，降低了电流效率，增加了能耗
- 合适的电压区间为1~5V（或电流密度5~30 mA/cm）
- 此外，还影响了电吸附或电排斥作用力





膜通量、pH 与电解质浓度通过界面与传质调控，显著影响电化学膜系统的处理效能

膜通量的影响

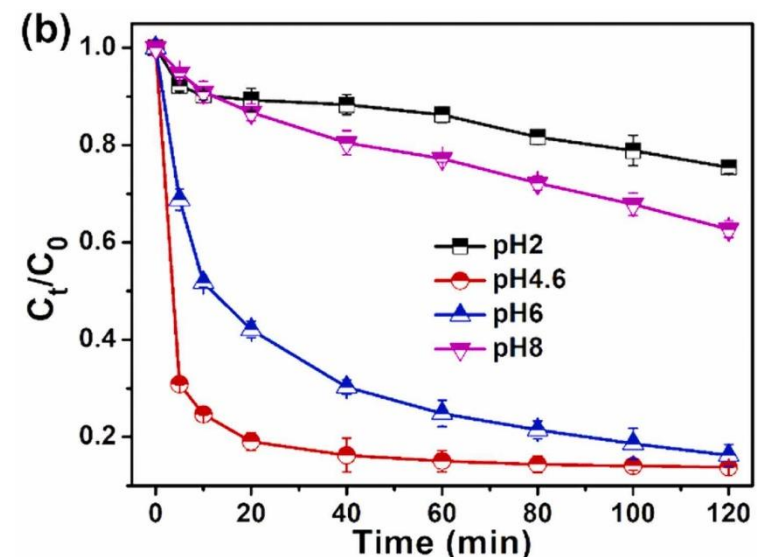
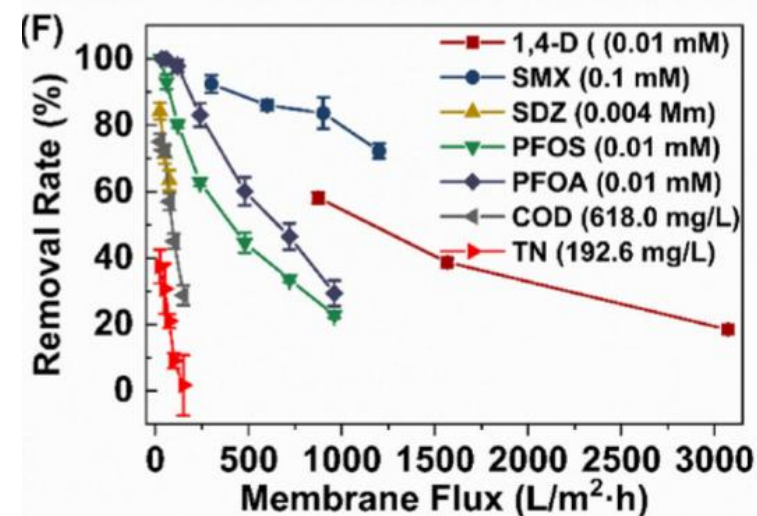
- 降低膜通量可以增加了污染物在膜电极上的**直接氧化**和**活性自由基与污染物的间接氧化**

pH的影响

- 中性的pH**有利于电化学耦合膜分离系统去除有机物

电解质的影响

- 过低的电解液浓度会增加**电子传输阻力**。
- 较高的电解液浓度压缩了电荷双层，减弱了界面上的静电排斥效应，从而抑制了电化学反应。
- 废水中的电解液电导率一般控制在**2~10 ms/cm**



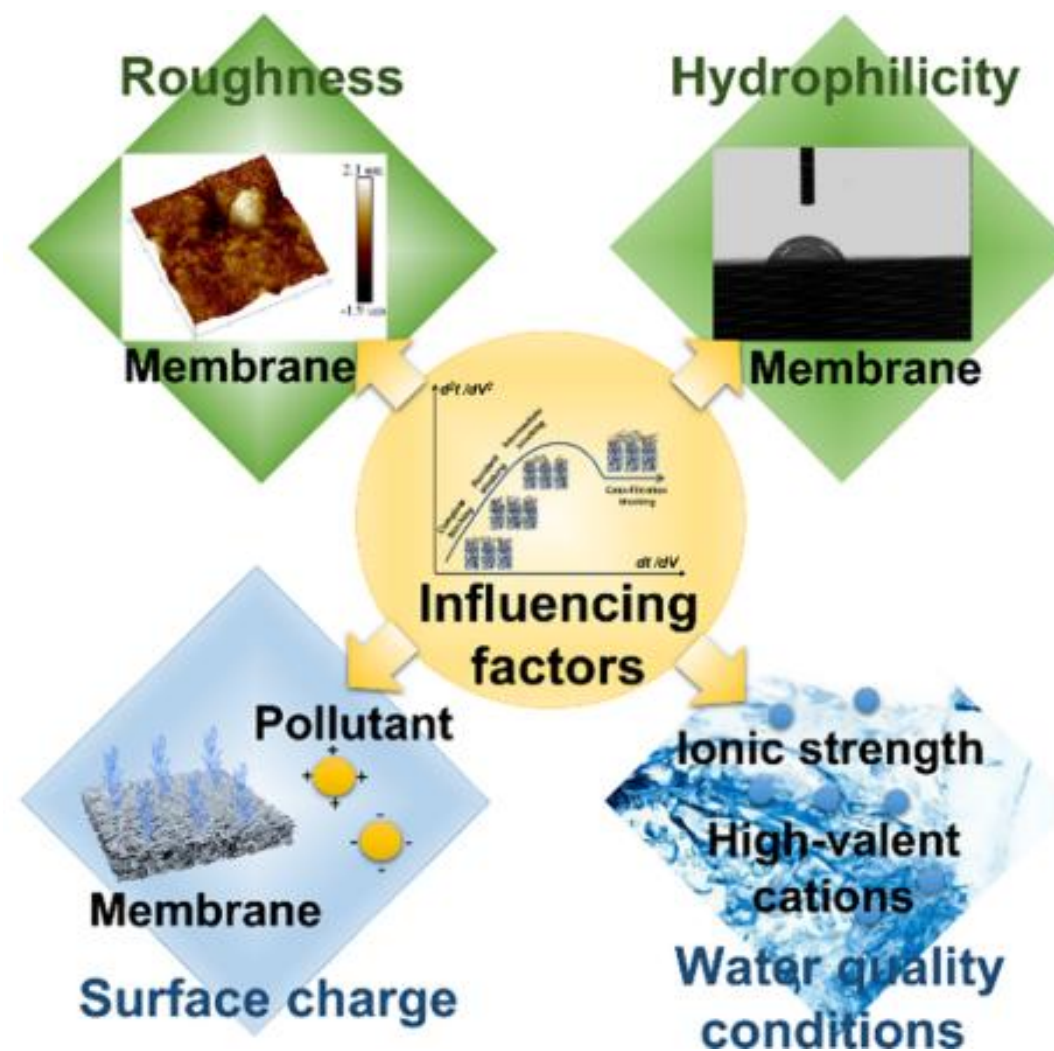
■ 膜表面特性与水质条件，是调控电化学生膜污染行为及过滤效能的关键因素

膜特性影响

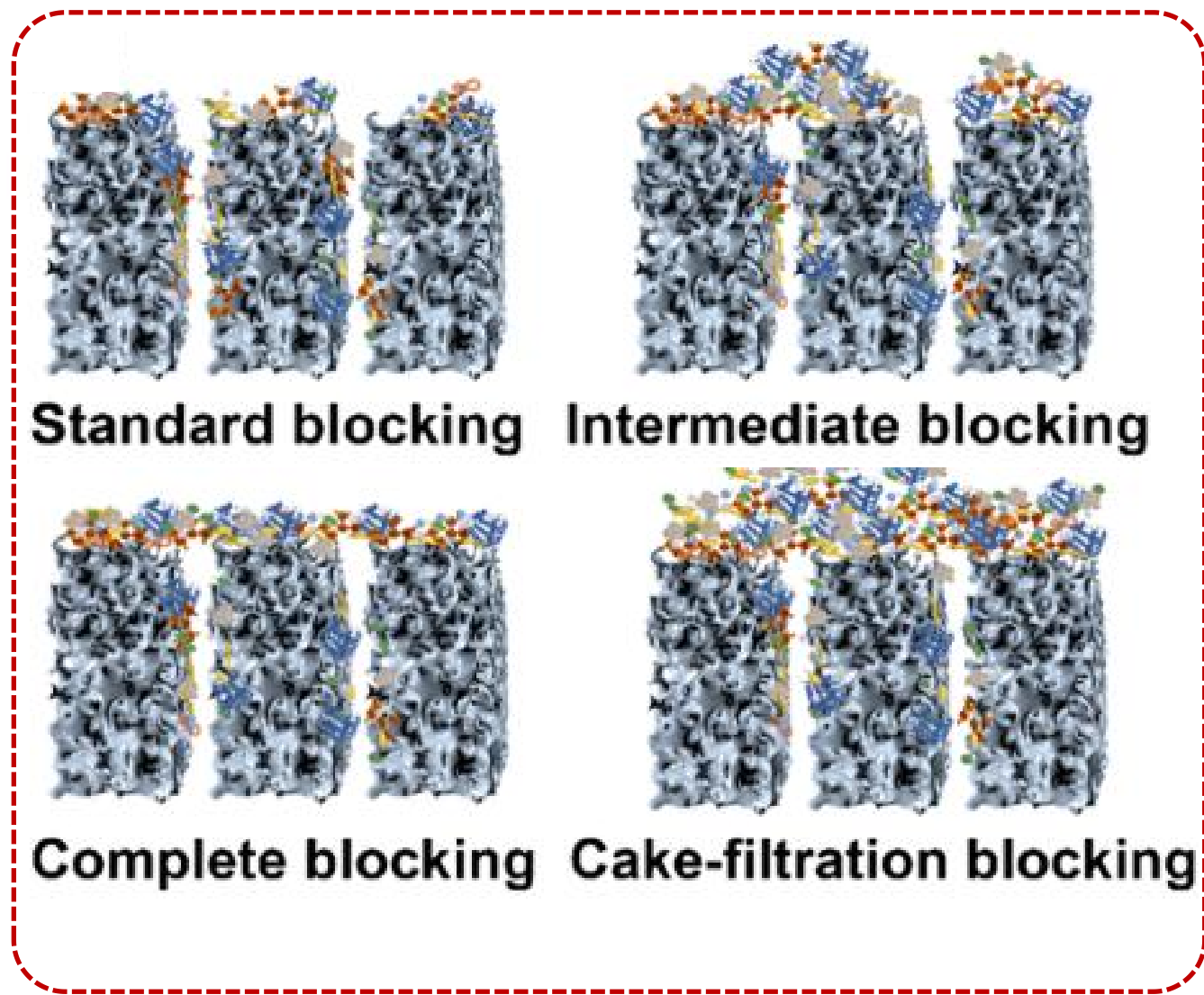
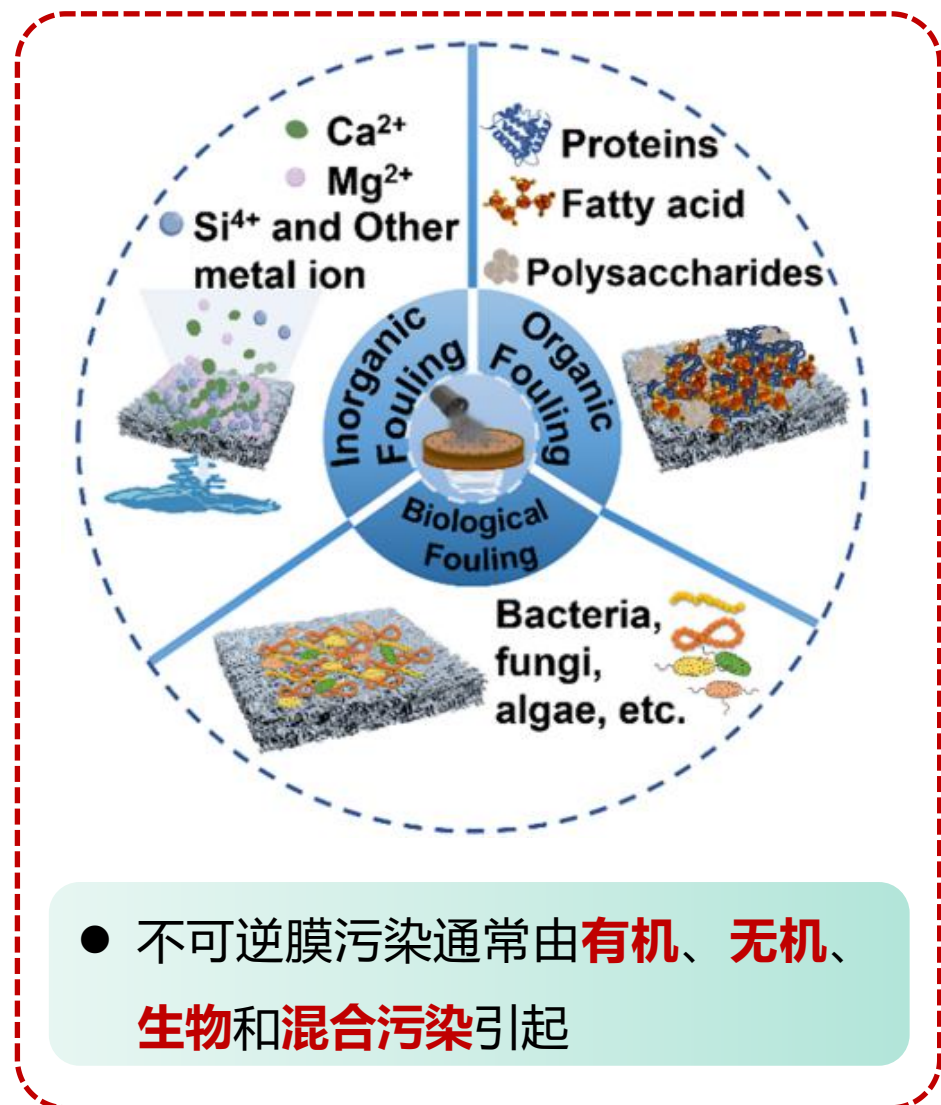
- **粗糙度**：膜表面粗糙度越高，膜污染越严重。可以通过调整表面沉积或功能化改性颗粒的颗粒尺寸可以实现表面粗糙度可控，颗粒尺寸越小，粗糙度越低。
- **亲水性**：亲水性越强，越有利于水在膜两侧的迁移，从而提高膜的渗透通量
- **表面电荷**：水体中的大多数天然有机物具有负表面电荷，因此膜表面电荷通过影响静电力来改变膜污染趋势

水质的影响

- 在**低pH**、**高离子强度**和**高价阳离子**存在的情况下，会增加天然有机质对超滤膜的污染

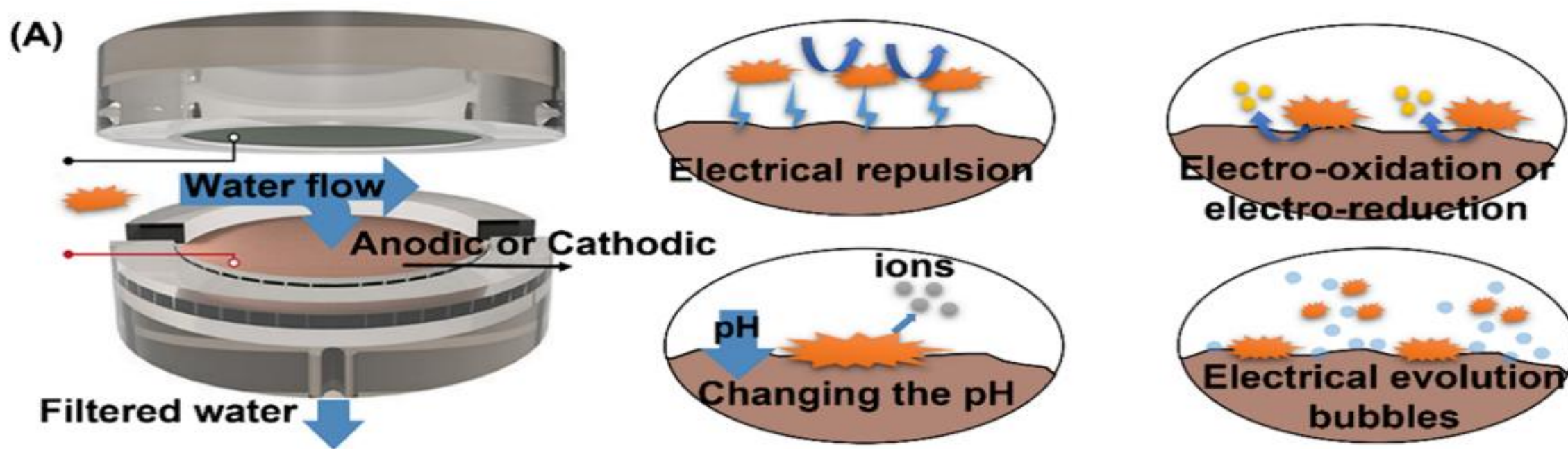


- 电化学膜污染由有机、无机、生物及混合污染物引发，呈现多种膜孔堵塞形式，是制约系统效能的核心瓶颈

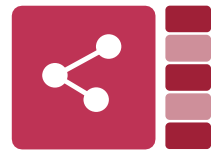




- 电化学膜通过静电排斥、电氧化还原、pH 调控及电生气泡冲刷多重路径，协同实现膜污染抑制与界面自清洁



- 通过**静电排斥**减少在膜表面沉积的污染物；通过**电氧化**或**电还原**反应促进污染物降解
- 通过**改变膜表面局部区域的pH值**来减少膜界面无机污垢
- 通过**HER(或OER)**产生**H₂(或O₂)气泡**抑制膜界面污垢层的累积



1 研究背景

2 EMF技术研究进展

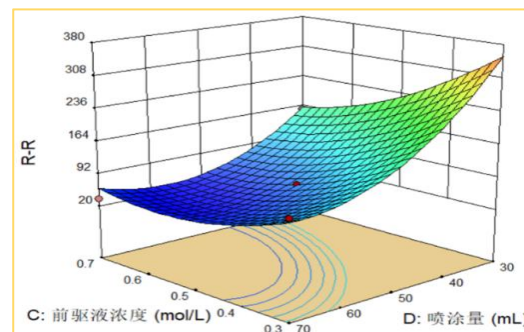
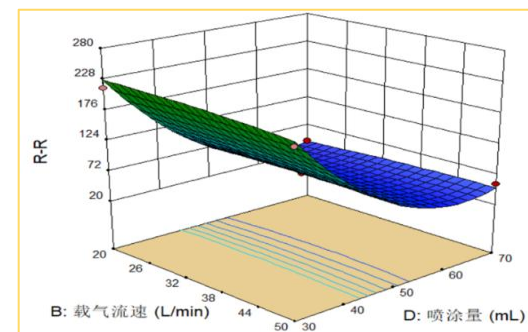
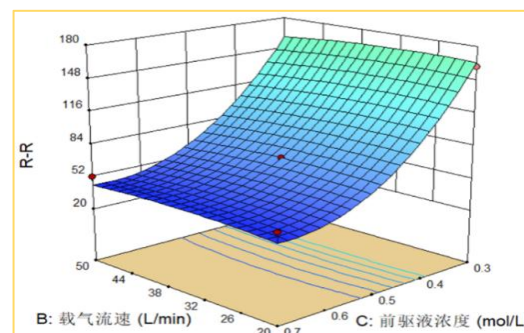
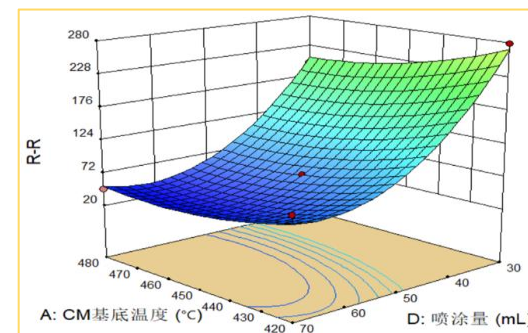
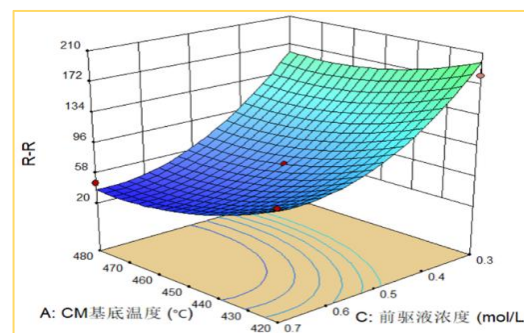
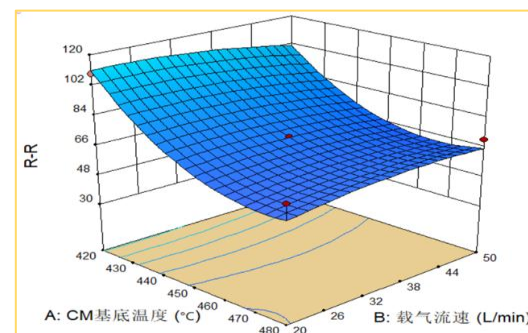
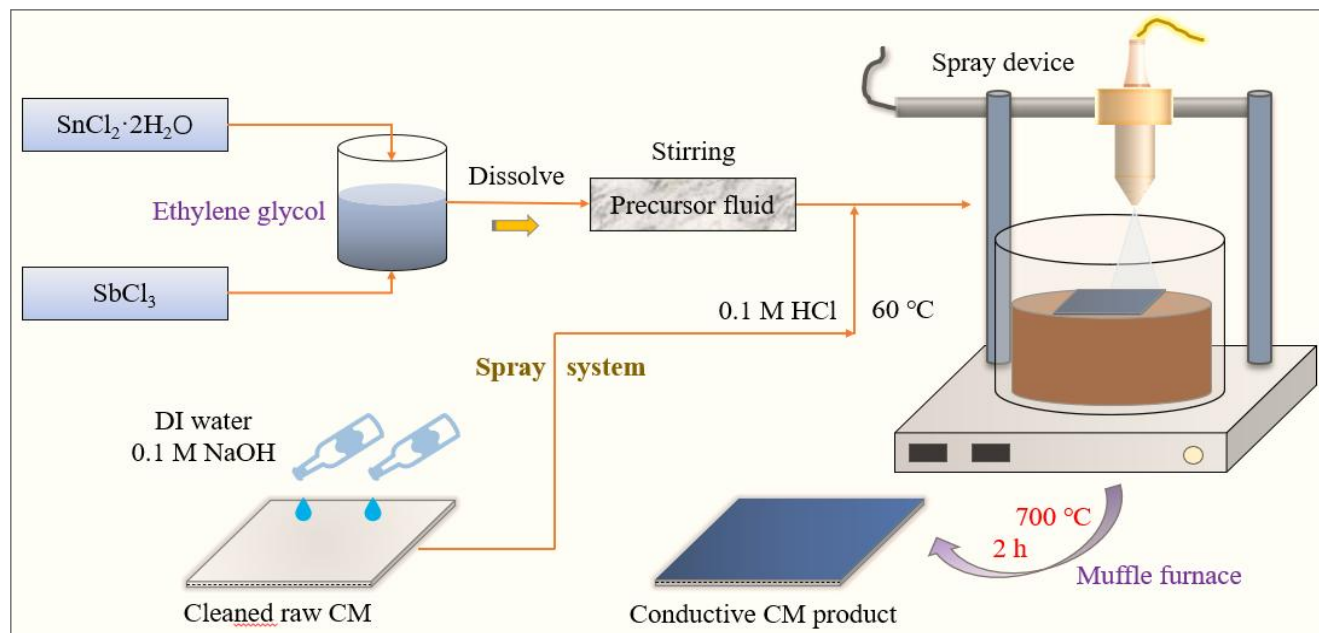
3 EMF膜污染抑制机制

4 EMF典型成果概述

5 结语

■ 成果一：Sb-SnO₂改性陶瓷膜制备、表征与应用评价

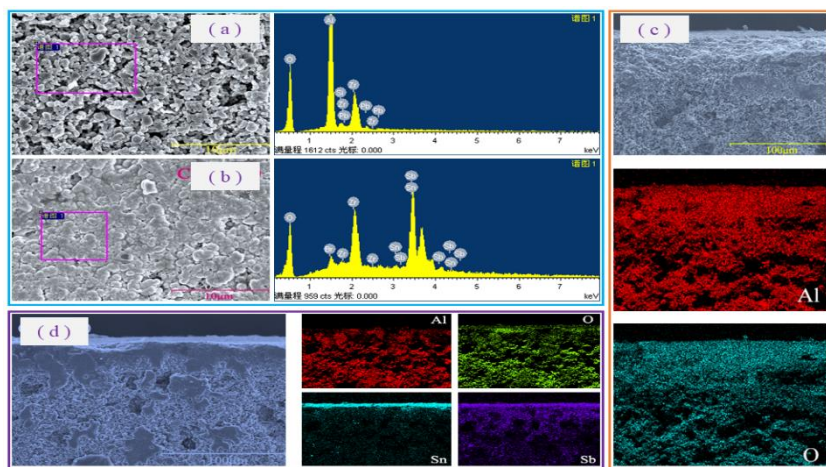
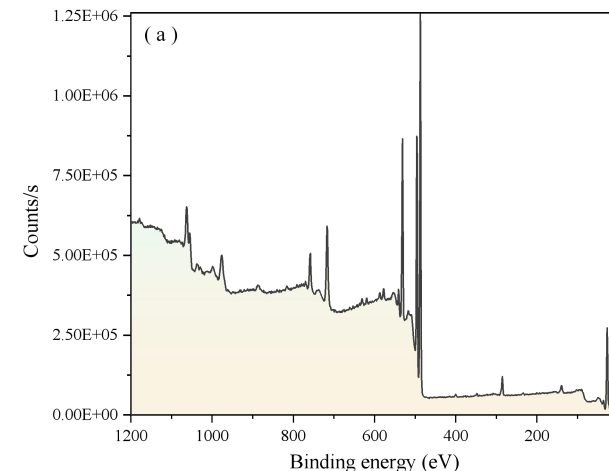
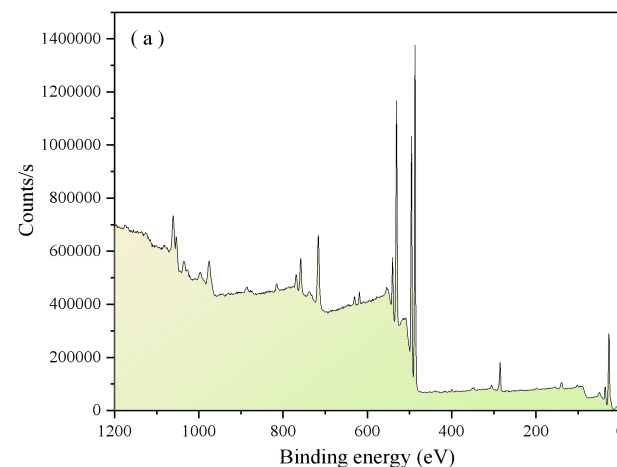
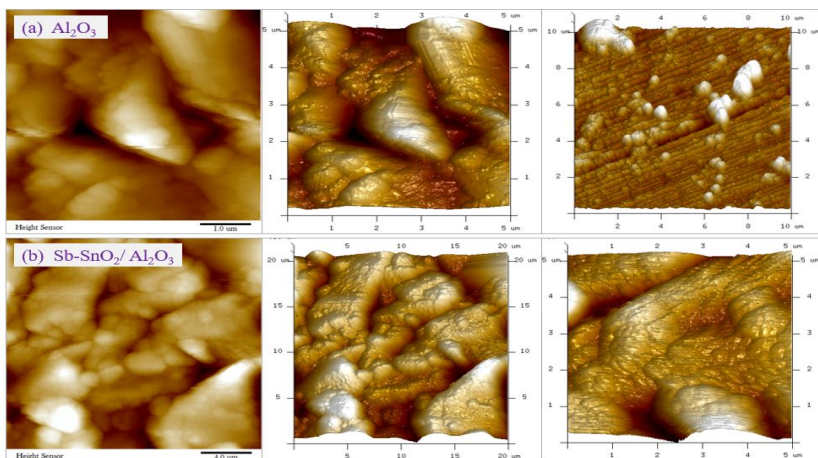
➤ 采用喷雾热解-原位沉淀工艺制备Sb-SnO₂/Al₂O₃改性导电陶瓷膜，膜表面方块电阻低至3.9 Ω/sq



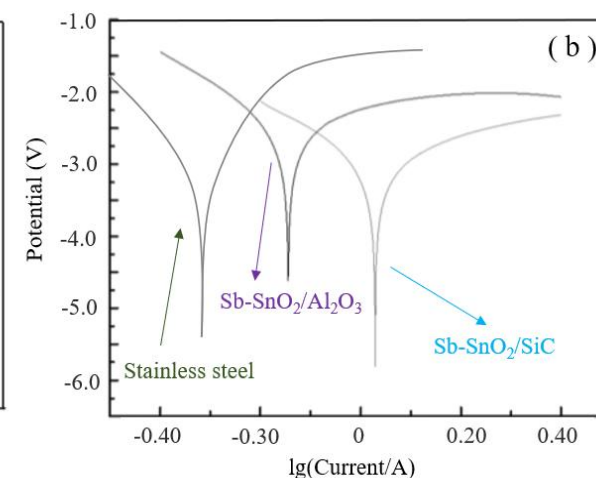
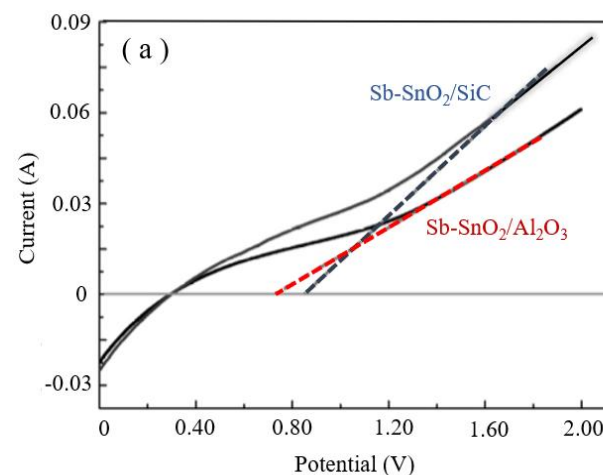
影响因素	标志	单位	水平		
			-1 (Low)	0 (Central)	+1 (High)
膜基底温度	A	°C	420	450	480
载气流速	B	L/min	20	35	50
前驱液浓度	C	mol/L	0.3	0.5	0.7
喷涂量	D	mL	30	50	70

■ 成果一：Sb-SnO₂改性陶瓷膜制备、表征与应用评价

- AFM、EDS、XPS 及电化学等表征证实，Sb-SnO₂/Al₂O₃改性导电陶瓷膜实现了表面粗糙度与孔径分布的优化，形成了均匀延伸的导电涂层，兼具高导电性、耐腐蚀性与优异电催化性能



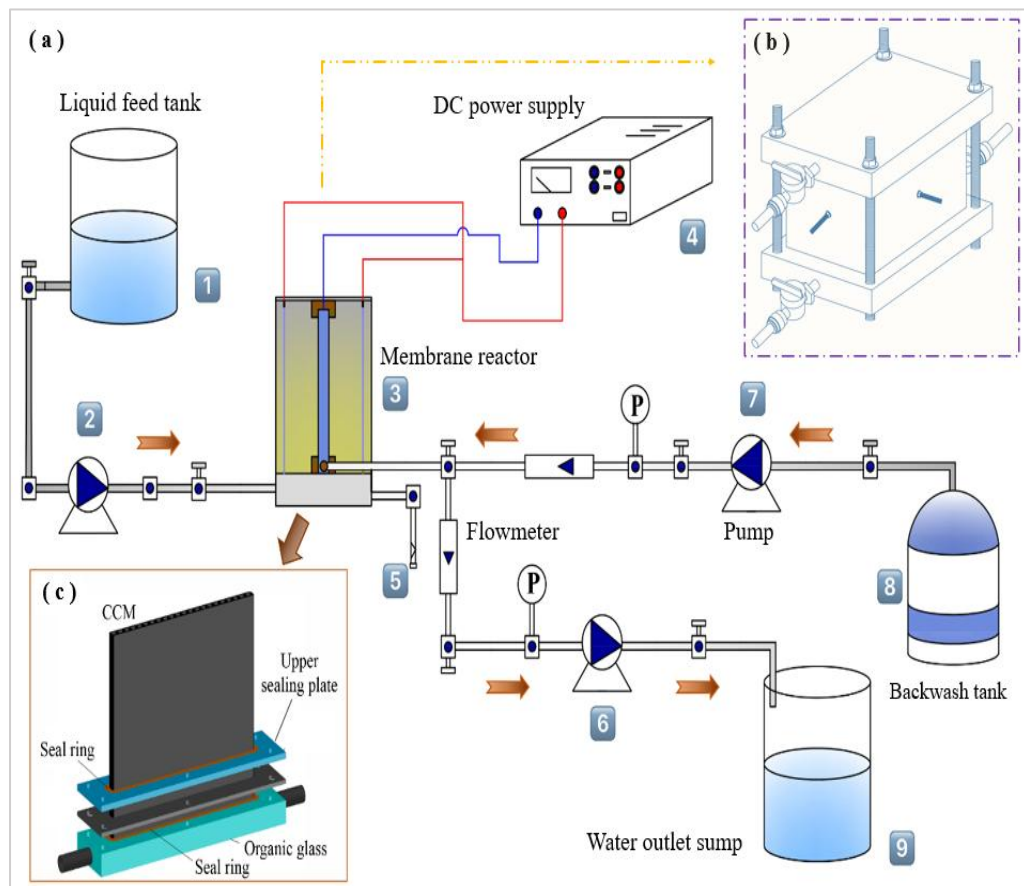
CCM表面AFM-EDS表征



CCM表面XPS及电化学性能表征

■ 成果一：Sb-SnO₂改性陶瓷膜制备、表征与应用评价

➤ 组建了EMF小试装置，开展EMF处理含油废水实验

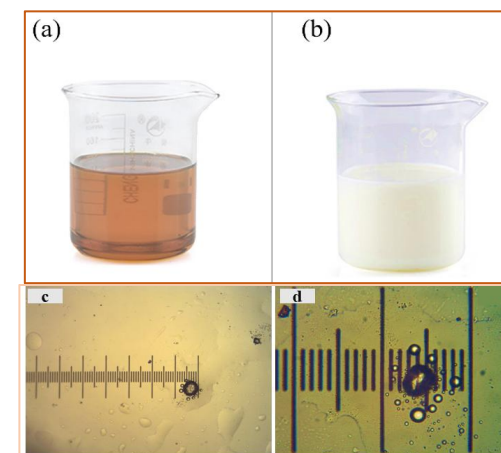


EMF处理含油废水流程示意

性质指标	水样编号	
	O-1	O-2
pH	7.8	8.6
含油量 (g/L)	0.1	0.5
COD _{Cr} (mg/L)	235	813
Zeta电位 (mV)	-16.7	-35.2
平均粒径尺寸 (nm)	121.5	308.6
电导率 (μS/cm)	96	223



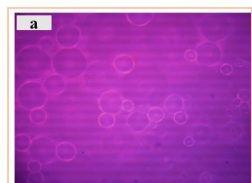
EMF小试装置



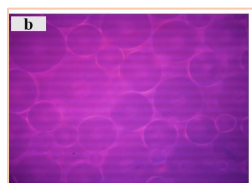
含油废水水样

■ 成果一：Sb-SnO₂改性陶瓷膜制备、表征与应用评价

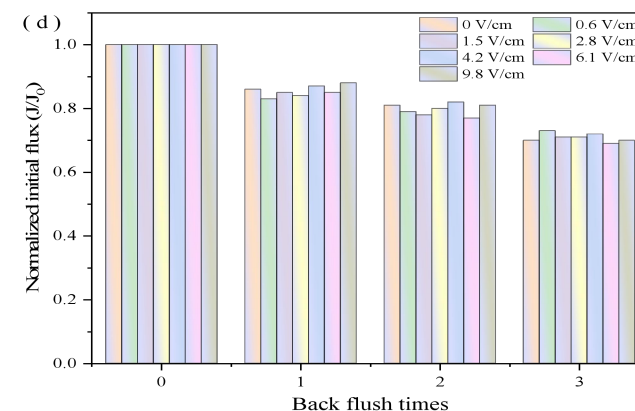
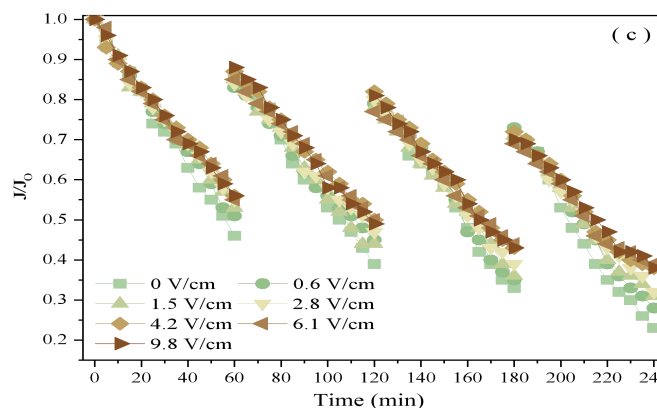
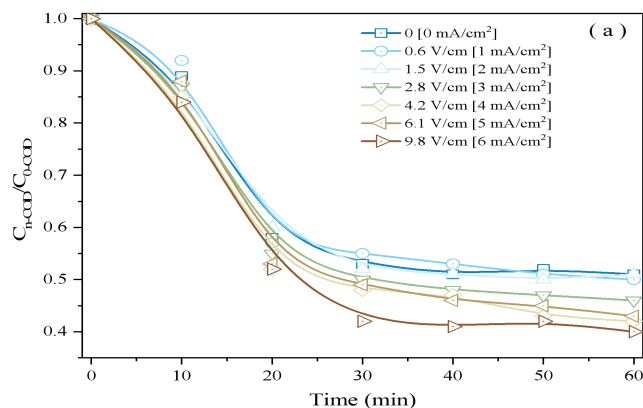
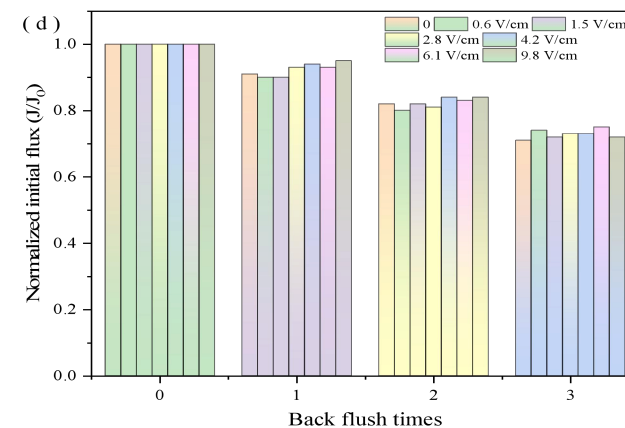
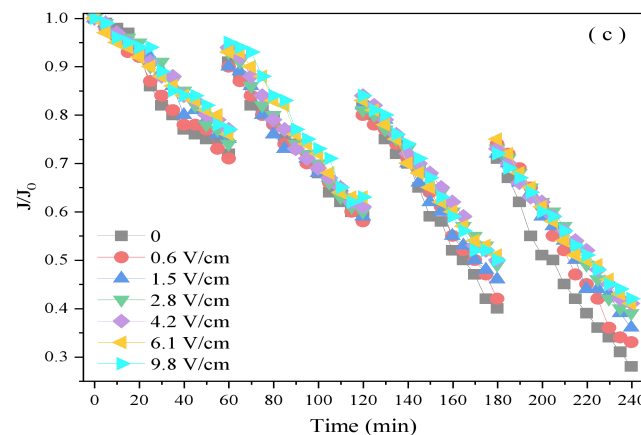
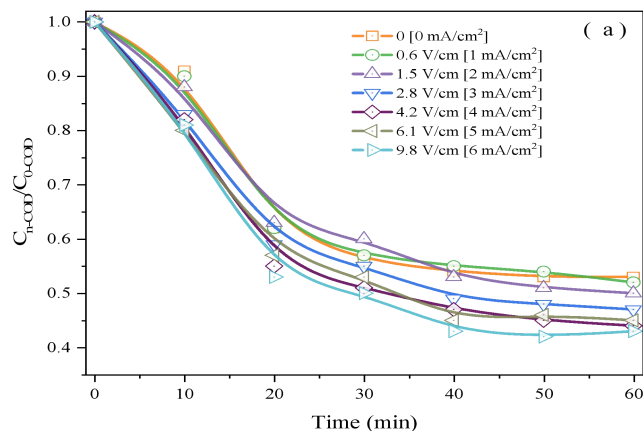
- EMF实验结果：较于无电场条件，在 0–9.8 V/cm 电场条件下，导电 Al₂O₃ 陶瓷膜运行 4 次后通量保留率提高 5%–14%，同时 COD 去除率最高可提升 10%
- 电化学辅助作用可显著优化导电陶瓷膜的含油废水处理效能：既通过抑制污染物膜面累积、优化通量衰减趋势，大幅提升膜抗污染性能与运行稳定性，又同步强化 COD 截留效果，实现处理效能与运行寿命的双重提升



低浓度含油废水



高浓度含油废水

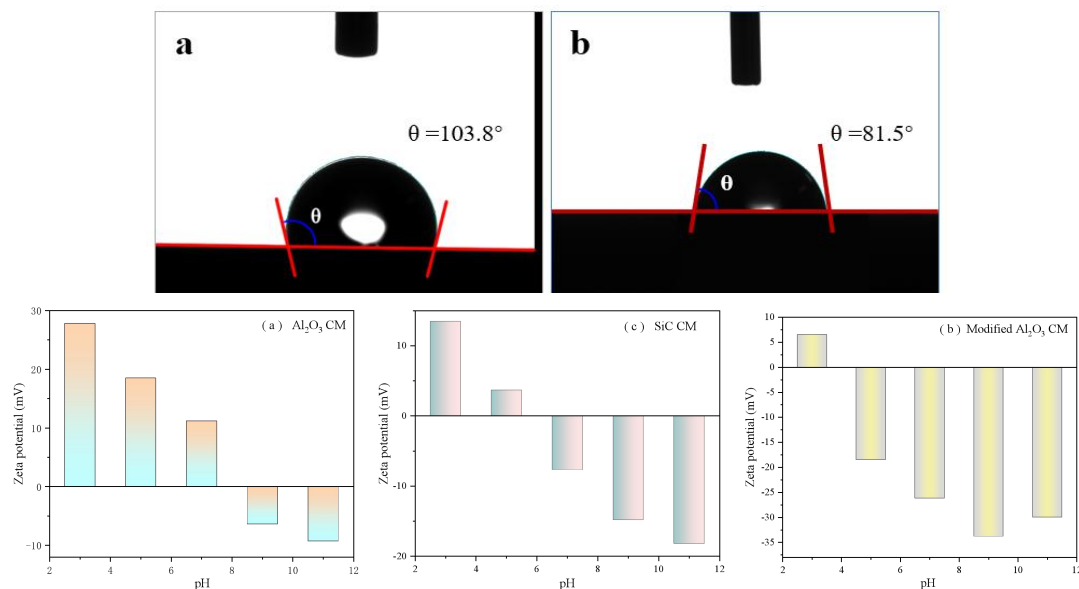


EMF处理低浓度和高浓度含油废水过程COD和通量变化

■ 成果一：Sb-SnO₂改性陶瓷膜制备、表征与应用评价

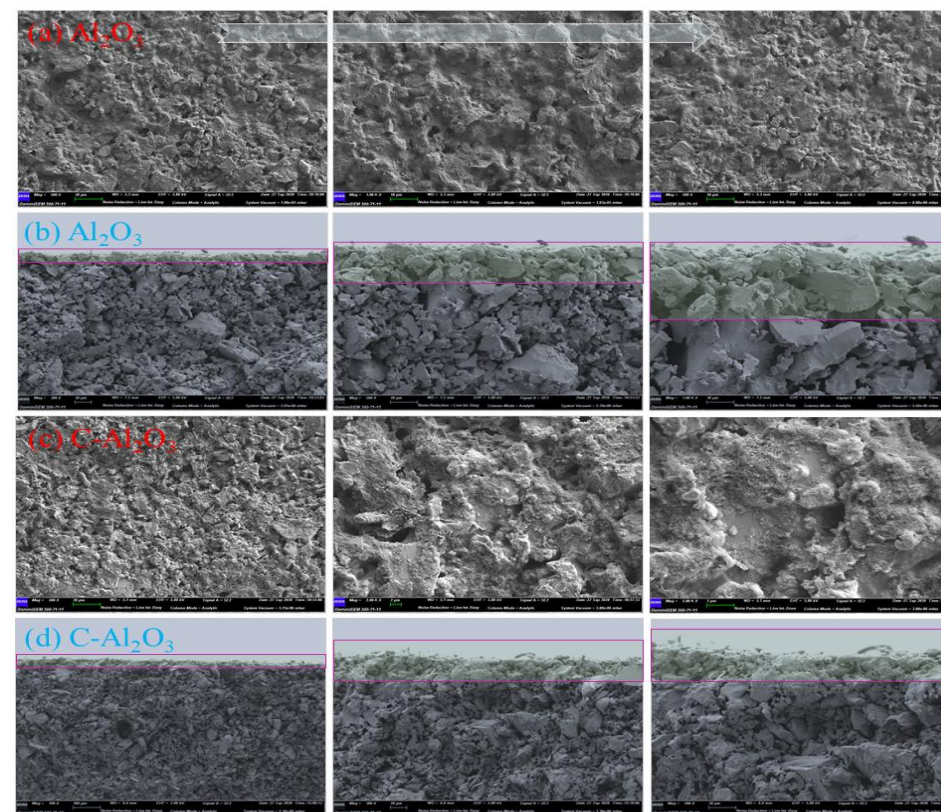
- 接触角降低、Zeta 电位负移及 SEM 形貌表征结果证实，电场辅助下导电改性陶瓷膜亲水性提升、静电排斥效应增强，有效抑制油滴吸附与膜污染

膜污染成因解析：膜表面电性分析



- Al_2O_3 和导电改性 Al_2O_3 的接触角分别为 103.8° 、 81.5°
- Zeta电位-16.7 和-35.2 mV——静电排斥作用明显

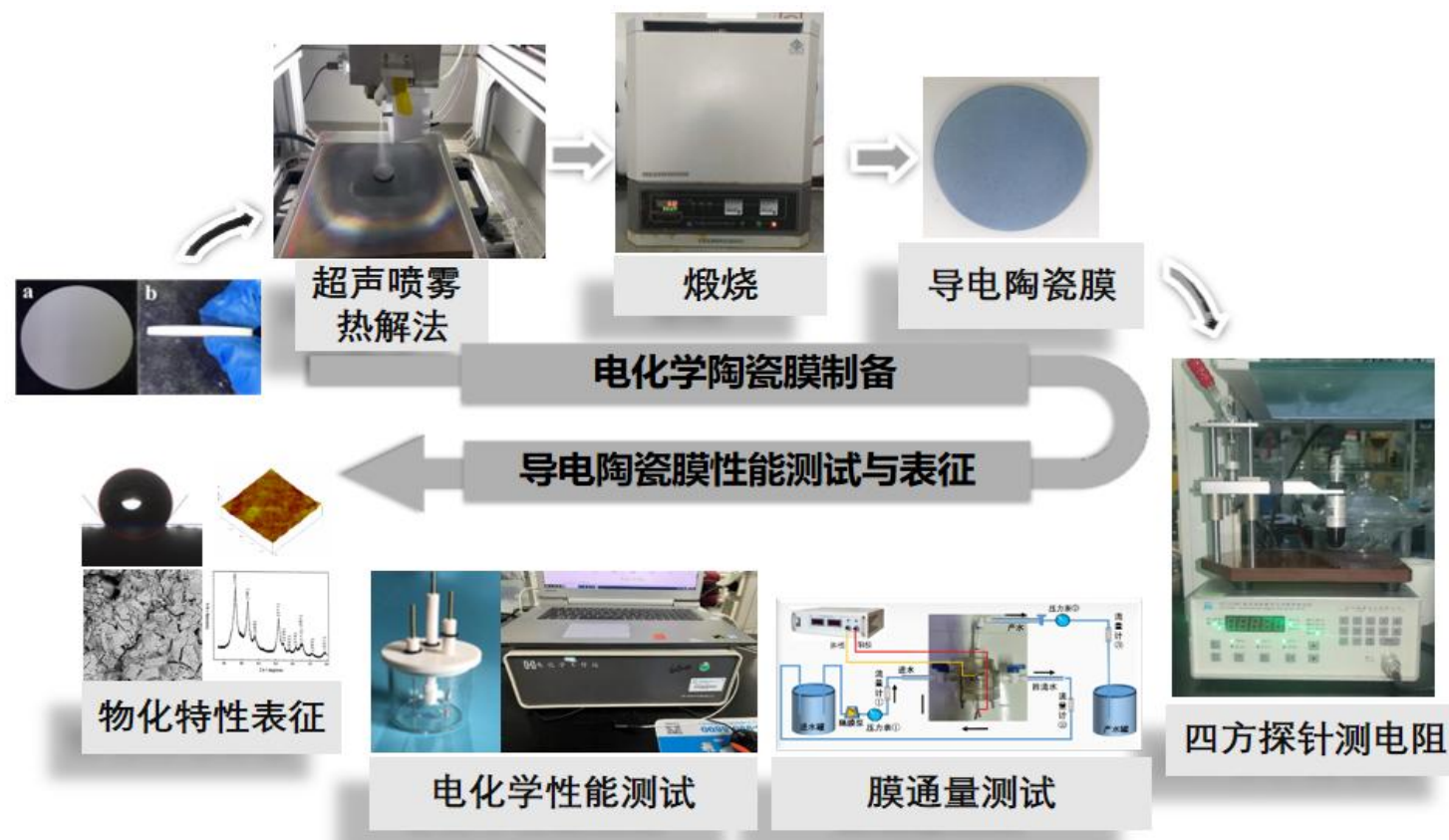
膜污染成因解析：膜表面微观形貌



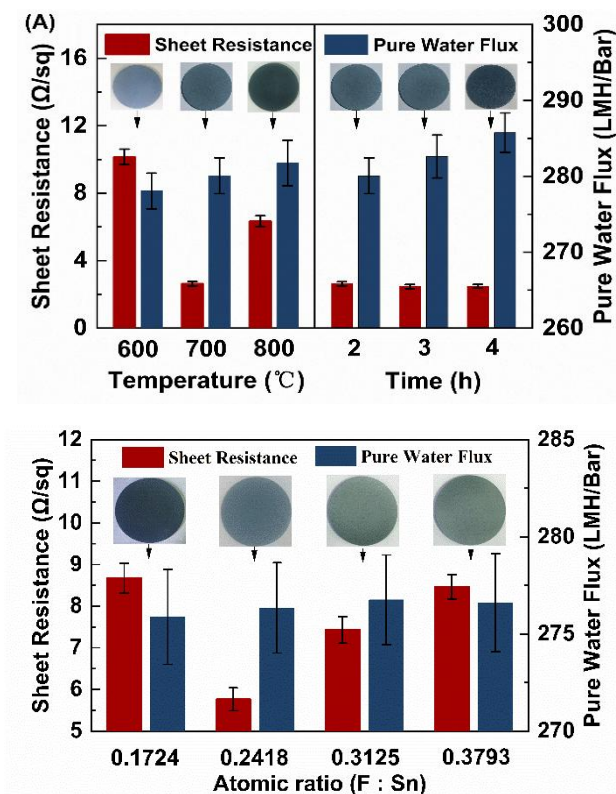
膜应用后表面SEM

■ 成果二：铈/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

- **工艺优化**：开展铈 / 氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备，以提升膜的导电性与渗透性能
- **通过优化工艺，明确了 ATFO-CM 的最优制备条件**：F/Sn 原子比 24.18 at%、负载量 42.18 mg/cm²、700°C煅烧 4 h，方块电阻低至 2.47 Ω/sq，揭示了关键参数对膜性能的影响规律



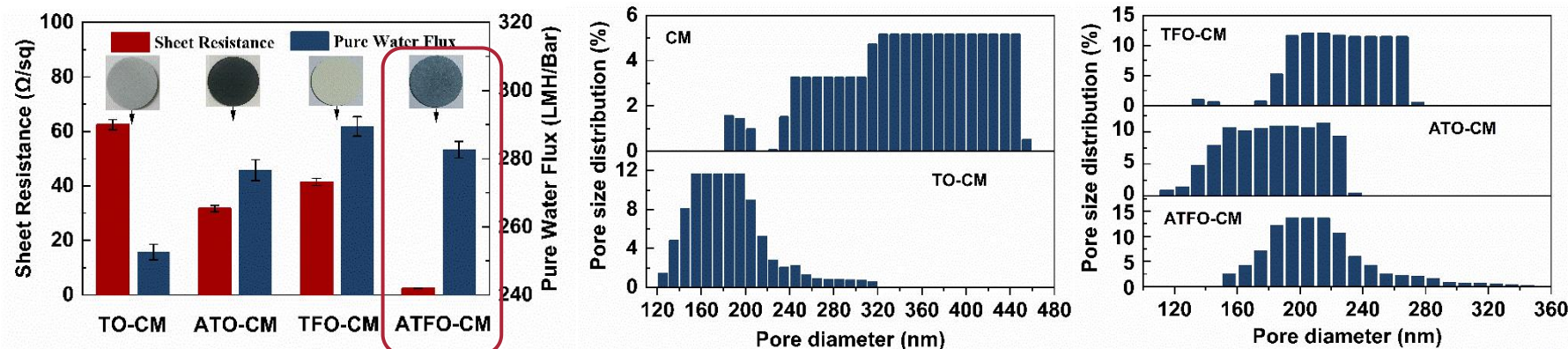
ATFO-CM电极制备表征过程示意



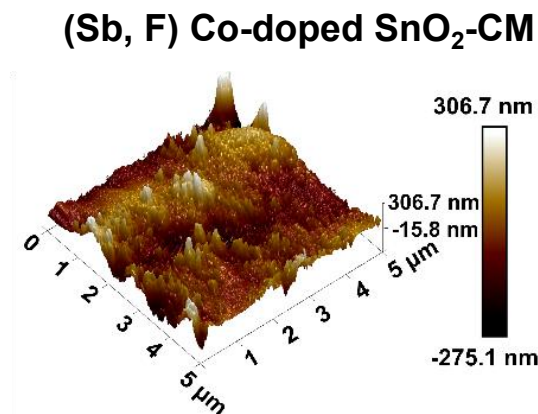
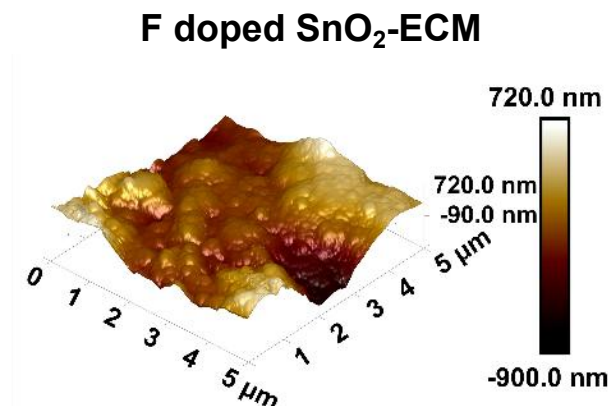
膜材料通量结果

■ 成果二：锑/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

➤ 明确锑 / 氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）的界面特性与性能优势



Membrane	Mean flow pore diameter (nm)	Mean flow pore pressure (psi)	Bubble point diameter (nm)	Bubble point pressure (psi)
CM	393.2	23.441	451.4	20.439
TO-CM	192.6	42.286	315.6	30.491
TFO-CM	232.1	39.694	270.4	34.072
ATO-CM	188.4	42.689	238.6	37.875
ATFO-CM	218.5	39.802	357.7	26.453

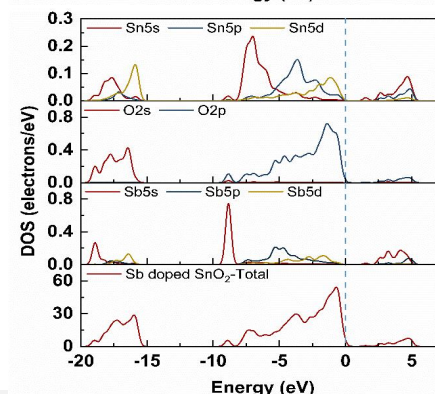
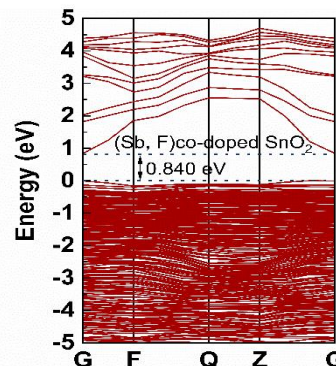
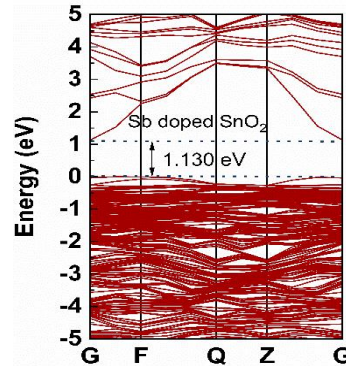
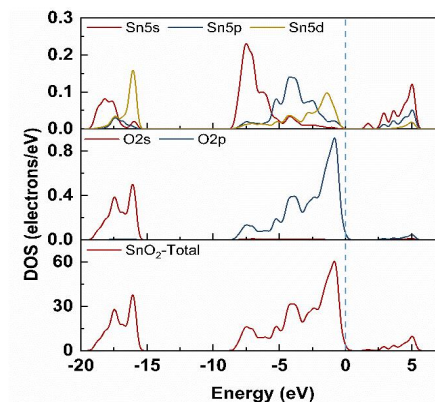
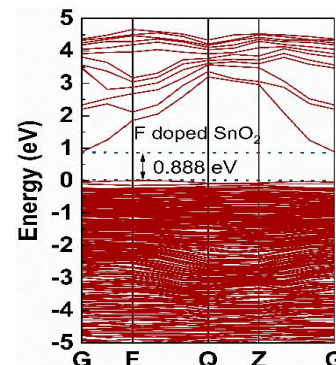
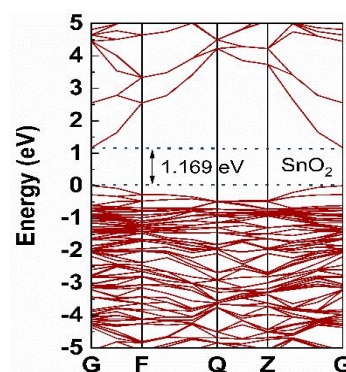
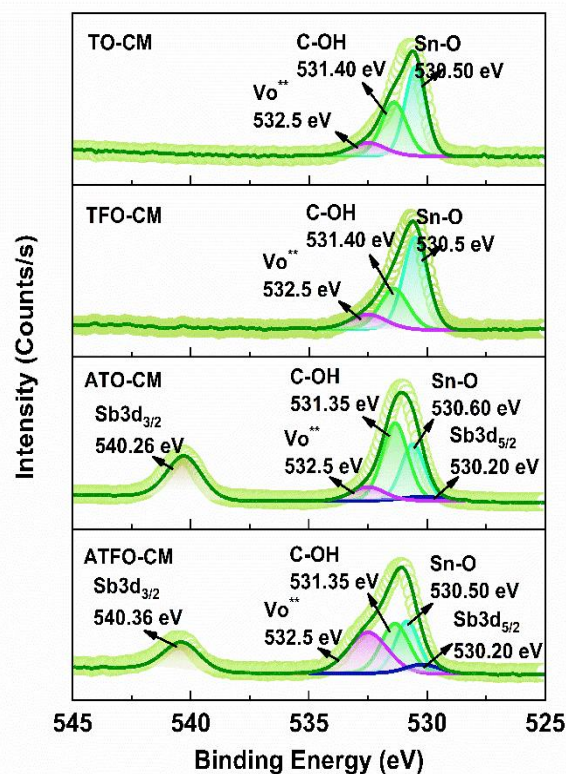
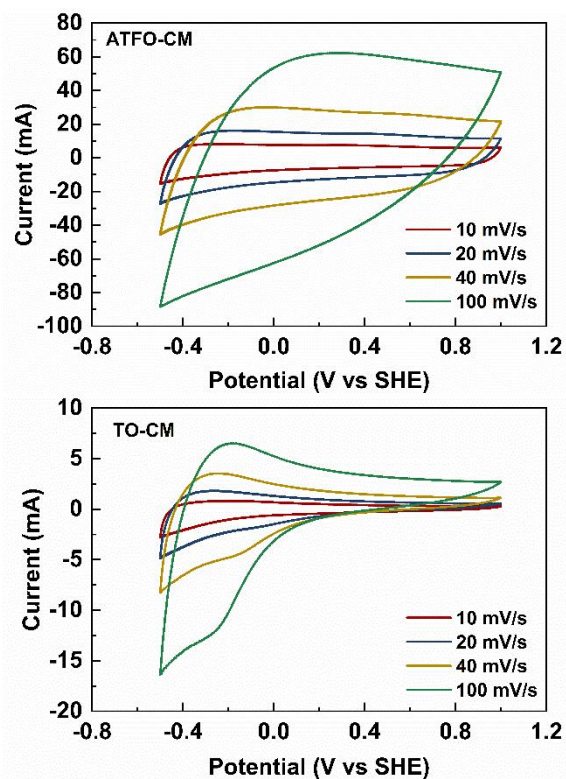


- 电性能与孔结构优化结论：ATFO-CM 方块电阻低至 $2.47 \Omega/\text{sq}$ ，纯水通量达 282.61 LMH，平均孔径从原膜的 393.2 nm 降至 188.4 nm，实现了导电性与渗透性能的协同提升
- 表面形貌与抗污染潜力结论：ATFO-CM 表面平均粗糙度 R_a 仅为 58.5 nm，显著低于单氟掺杂改性膜，可有效降低膜面污垢累积风险，为抗污染性能提升提供了结构基础

■ 成果二：锑/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

➤ 超声喷雾热解法制备的ATFO-CM膜，导电性 ($2.47 \Omega/\text{sq}$) 及膜渗透性 (282.61 LMH/Bar) 更优

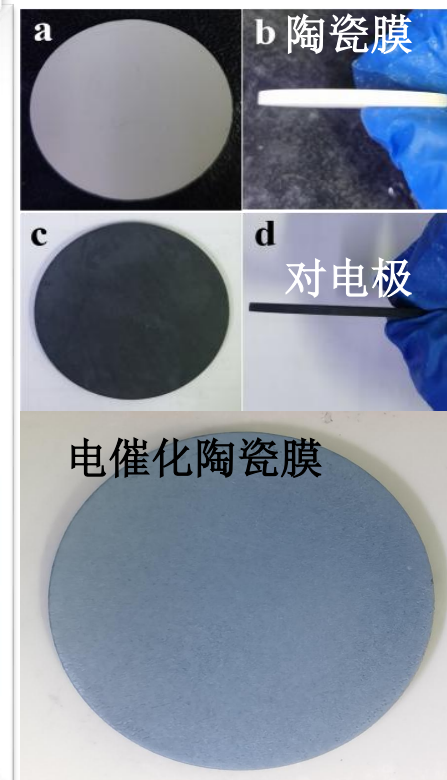
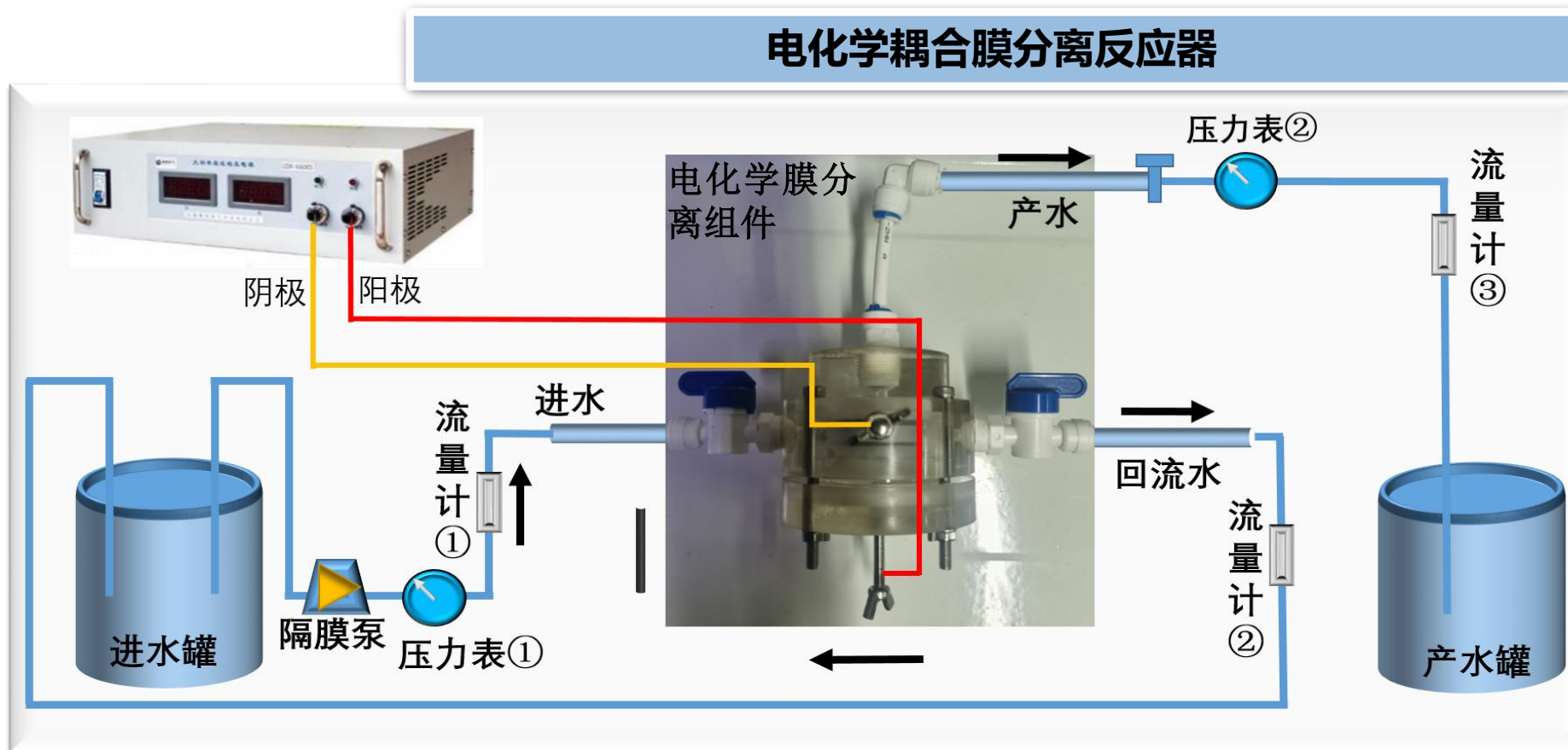
- XPS 证实 F、Sb 单 / 共掺杂成功引入氧空位，(Sb,F) 共掺杂 SnO_2 带隙低至 0.840 eV ，双施主掺杂为膜的高导电性提供电子结构支撑；ATFO-CM 电化学活性面积最大，电荷转移电阻 降至 1.37Ω ，表现超亲水性，兼顾导电与渗透性能
- 基于化学分子结构组成的分析和电子结构的理论计算揭示了锡基改性层导电性增强的机理，即由于在 SnO_2 中掺杂了 (Sb, F)， Sb^{5+} 、F 分别与 Sn^{4+} 、 O^{2-} 发生替位式取代反应，引起自由电子浓度增加和带隙宽度减小，从而促进了导电性的增强



ATFO-CM电极电化学性能、XPS表征及电子结构分析

■ 成果二：铋/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

➤ EMF技术强化有机污染物去除的效能及界面机制研究：装置搭建

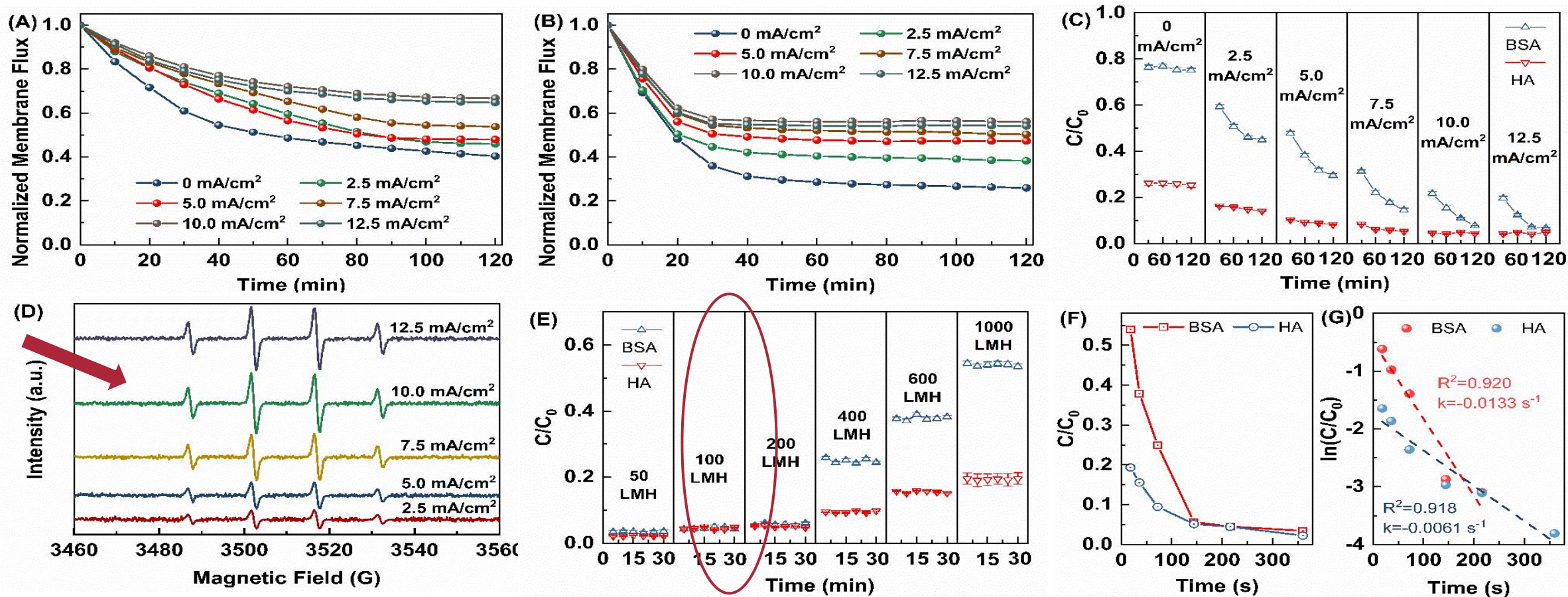


- 构建电化学耦合膜分离反应系统：分析**有机**污染物的去除效能
- 优化工艺参数：**电流密度、膜通量、电解质浓度和电解质种类**；评价指标为**归一化膜通量**与**截留率**的影响



■ 成果二：铋/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

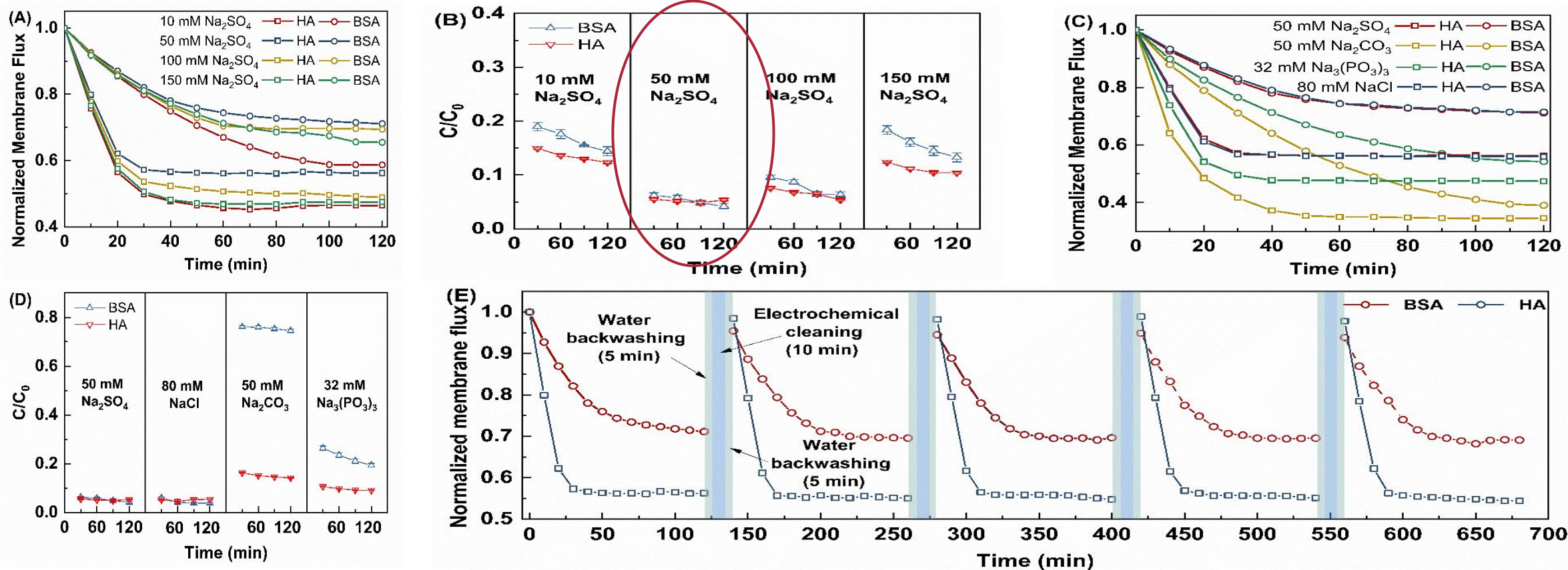
➤ 关键因子调控：电流密度及初始膜通量



- 当电流密度为 10 mA/cm^2 时，牛血清白蛋白（BSA）和腐殖酸（HA）的膜通量衰减和 C/C_0 最低。归因于产生的 $\cdot\text{OH}$ 量最高
- 在膜通量为 200 LMH 时（HRT 为 90 s ），BSA 和 HA 的去除率达到最大值，去除率分别为 92.90% 和 94.86%

■ 成果二：锑/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

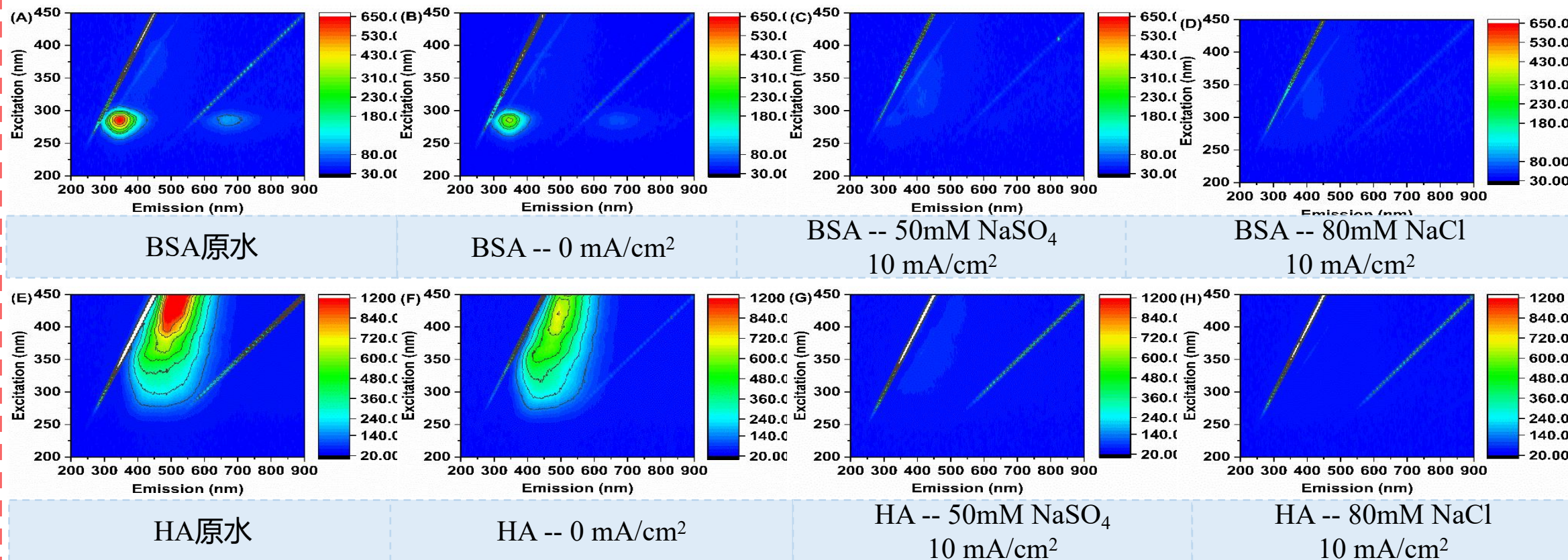
➤ 关键因子调控：电解质及稳定性分析



- 结果表明，在**50 mM Na_2SO_4 电解质溶液（或80mM NaCl）**中，BSA和HA的去除率和稳态归一化膜通量最高。归因于电化学反应的速率随着电导率的升高而增加。过高的电解质浓度会导致电极极化，从而降低电化学反应的效率和速度
- EMF系统中使用的膜在经过长时间过滤和电化学再生循环后表现出**良好的重复使用性**

■ 成果二：铈/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

➤ 关键因子调控：三维荧光分析

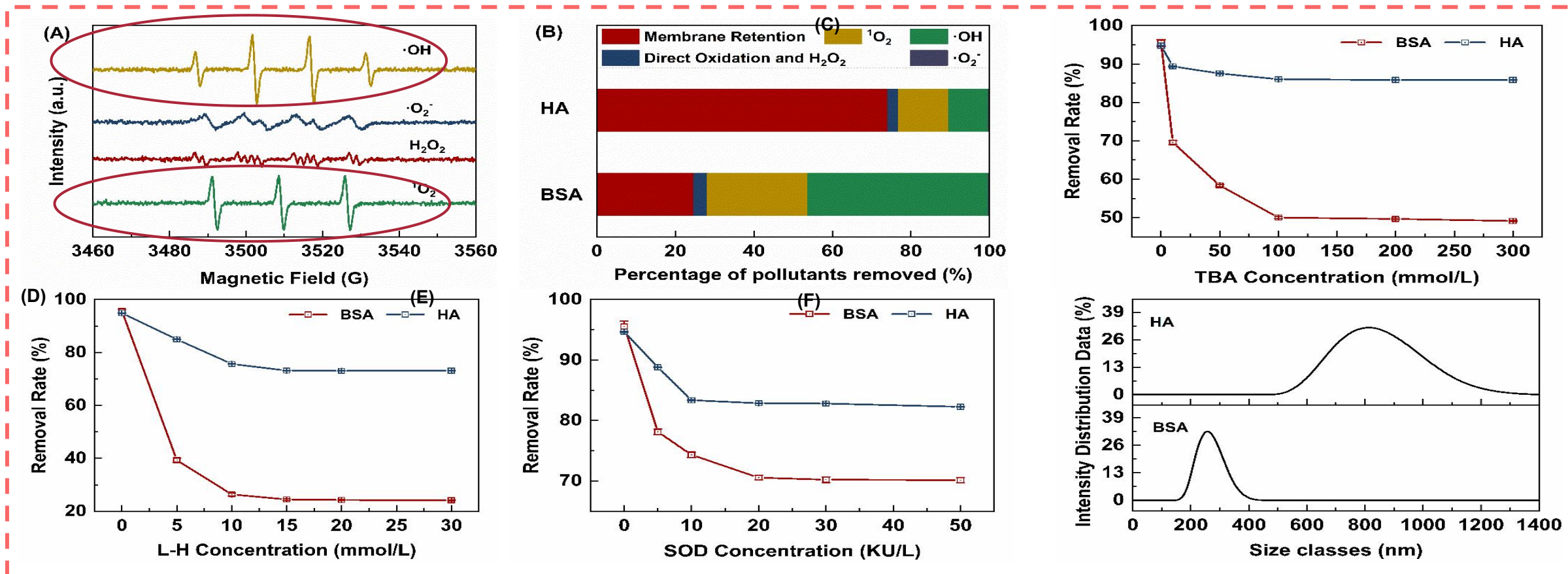


- 三维荧光分析的结果进一步证实了在50 mM Na₂SO₄电解质溶液（或80mM NaCl）能有效去除BSA和HA



■ 成果二：铈/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

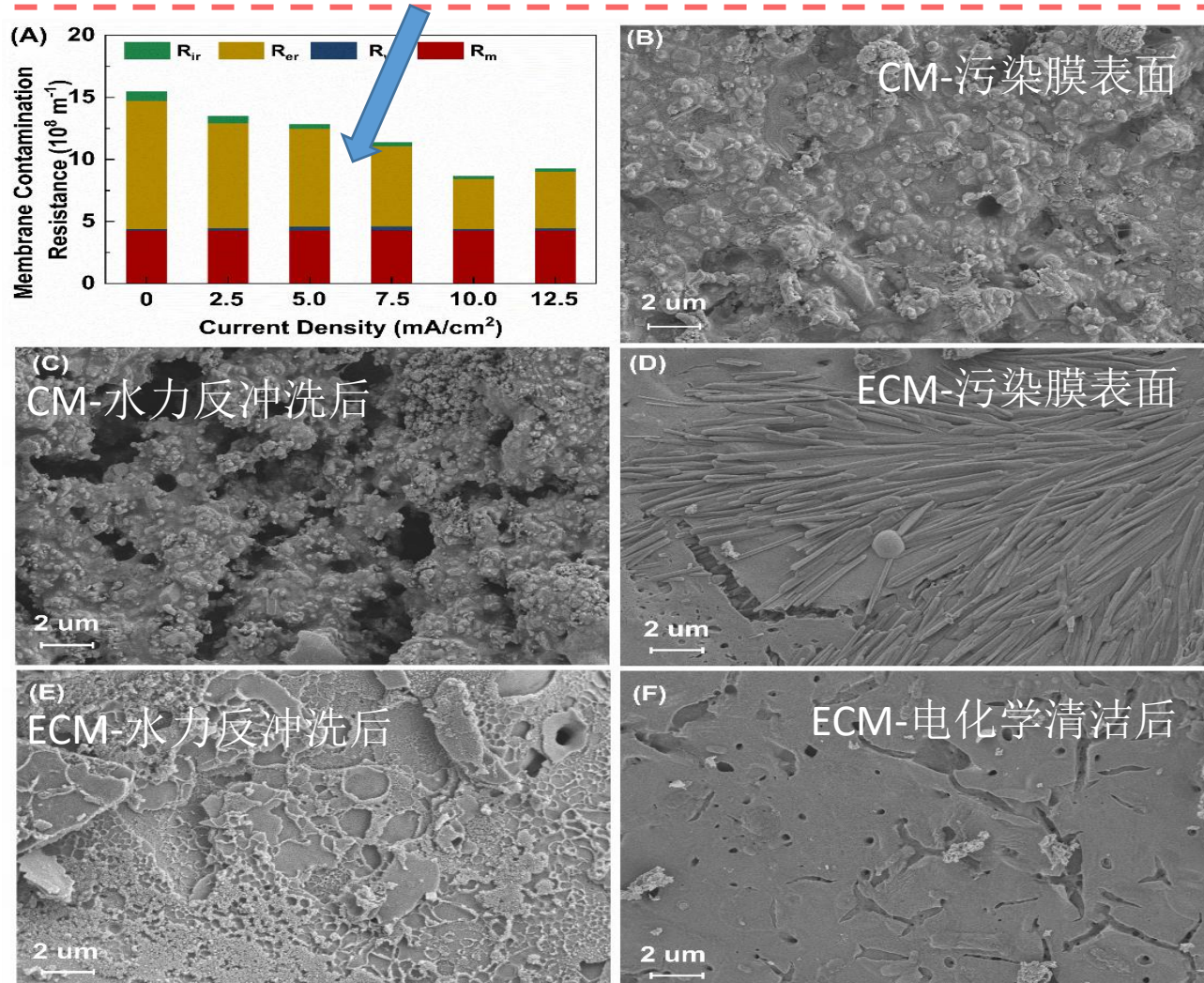
➤ 膜界面机制：膜电极界面产生的ROS作用



- EMSP中的ROS生成涉及 $\cdot\text{OH}$ 、 $\cdot\text{O}_2^-$ 、 $^1\text{O}_2$ 和 H_2O_2
- BSA和HA的去除主要依赖于 $\cdot\text{OH}$ 和 $^1\text{O}_2$ 的氧化降解以及膜截留作用

■ 成果二：铈/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

➤ 膜界面机制：膜污染分析



- 当电流密度为 **10 mA/cm^2** 时，**总膜污染电阻最低**，为 $8.66 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ ，与未施加电流的情况相比，降低了 $6.84 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$ 。**电化学反应能有效减少BSA造成的膜污染**
- 在电流密度为 $0 \sim 12.5 \text{ mA}/\text{cm}^2$ 时ECMS处理BSA后的污染膜表面，其水力反冲洗可逆膜阻力较低，为 **$0.128 \times 10^8 \sim 0.337 \times 10^8 \text{ m}^{-1}$** ，**结果表明**：水力反冲洗不能有效去除BSA引起的膜污垢。在对比图B与图C、图D与图E，进一步证实了**水力反冲洗无法清除大部分的膜表面污染**



■ 成果二：锑/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

➤ 膜界面机制：膜堵塞模型分析

$$Q/Q_0 = \exp\left(-\frac{\alpha \Delta PC_b}{\mu R_m} t\right) + \frac{R_m}{(R_m + R_{p0})} \times \left(1 - \exp\left(-\frac{\alpha \Delta PC_b}{\mu R_m} t\right)\right) \quad \text{式1}$$

$$k_1 = \frac{\alpha \Delta PC_b}{\mu R_m} \quad \text{式2}$$

$$k_2 = \frac{2f'R'\Delta PC_b}{\mu(R_m + R_{p0})} \quad \text{式3}$$

$$Q/Q_0 = \frac{2f'R'\Delta PC_b}{\mu(R_m + R_{p0})} t \times \left[\exp(-k_1 t) + \frac{R_m}{(R_m + R_{p0})\sqrt{1 + k_2 t}} \times (1 - \exp(-k_1 t)) \right] \quad \text{式4}$$

然后根据公式 8 绘制 d^2t/dV^2 与 dt/dV 的对比曲线，以进一步研究 ECMSP 期间堵塞机理的变化。

$$\frac{d^2t}{dV^2} = k \left(\frac{dt}{dV} \right)^n \quad \text{式5}$$

$$n = d \left[\log \left(\frac{d^2t}{dV^2} \right) \right] / d \left[\log \left(\frac{dt}{dV} \right) \right] \quad \text{式6}$$

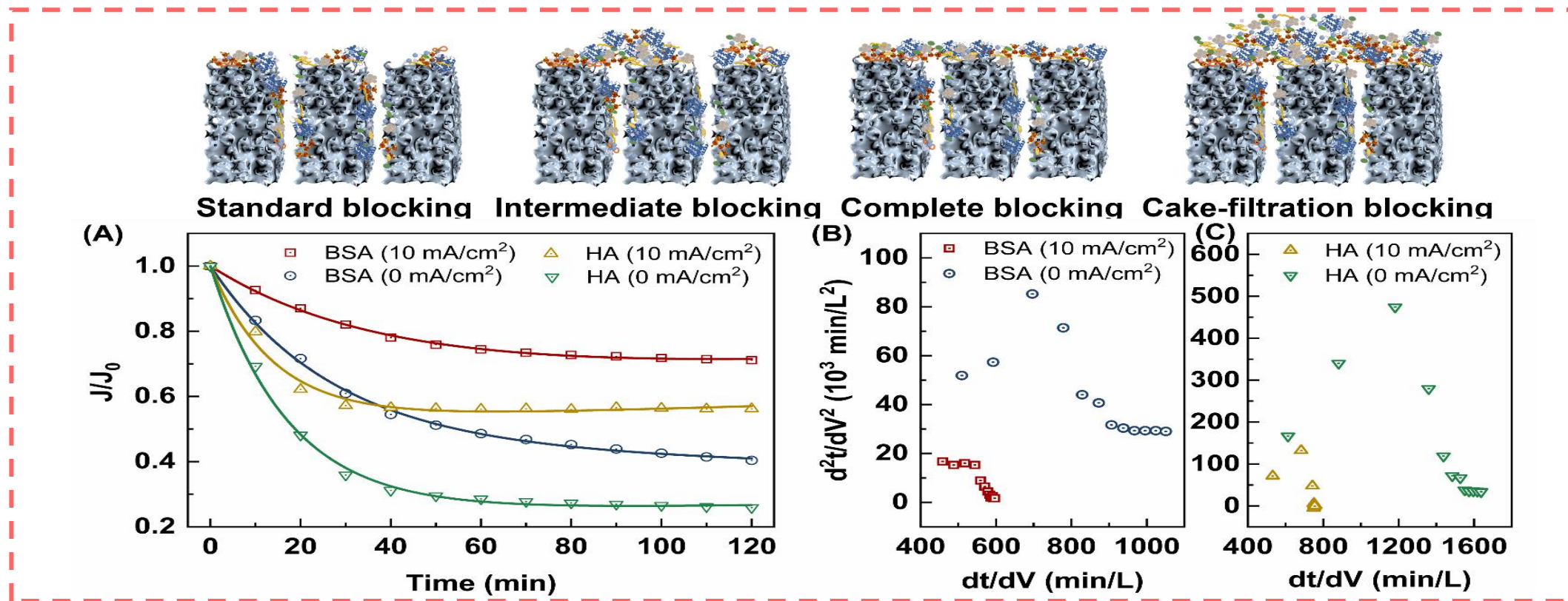
$$\frac{dt}{dV} = \frac{1}{JA} \quad \text{式7}$$

$$\frac{d^2t}{dV^2} = -\frac{1}{J^3 A^2} \frac{dJ}{dt} \quad \text{式8}$$

- 用**孔隙堵塞-滤饼过滤模型**（公式 1）分析膜通量数据，以评估污垢机理转换。公式 4 是通过公式 2 和 3 简化公式 1 得到的，其中第一项是**经典的孔隙堵塞模型**，第二项是**滤饼堵塞模型**。利用非线性优化法将过滤后的数据与公式 4 拟合，得出最高的 R^2 值（或最小的残差平方和）以及其他拟合参数

■ 成果二：铈/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

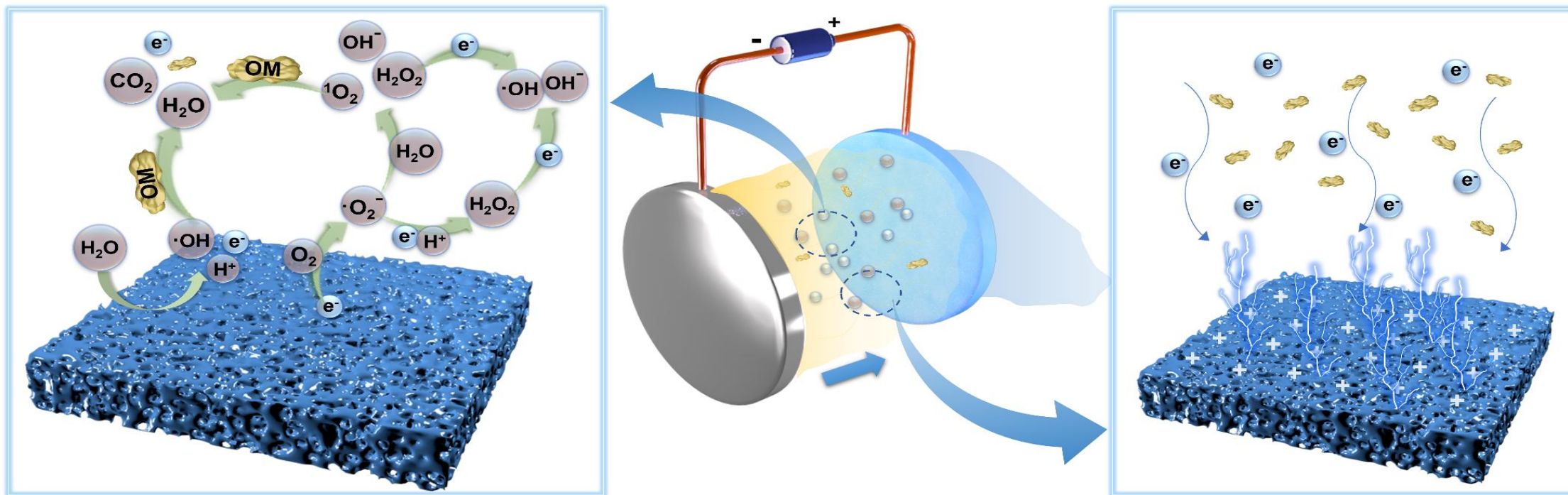
➤ 膜界面机制：膜堵塞模型分析



- 模型拟合十分吻合，表明在**先是形成孔隙堵塞，然后是滤饼堵塞的演变**
- 传统陶瓷膜过滤BSA和HA的初始阶段，分别以中间孔堵塞和完全孔堵塞为主
- 在EMSP过滤BSA的过程中，初始阶段 $n < 0$ ， d^2t/dV^2 呈下降趋势。在ECMS过滤HA的过程中，初始阶段 n 约等于1.5，然后 n 值变为负值， d^2t/dV^2 不断减小。 d^2t/dV^2 的减小意味着通量下降（ dJ/dt ）^[38]的减小，因此可以认为**施加的电流减少了膜污垢**

■ 成果二：铈/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

➤ 膜界面机制：膜污染抑制机制分析

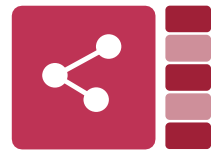


- H_2O 在阳极被氧化生成 $\cdot\text{OH}$ ，阳极表面呈现**酸性**；溶解氧接受电子生成 $\cdot\text{O}_2^-$ ，然后与 H^+ **反应生成** H_2O_2 ；此外， $\cdot\text{O}_2^-$ 在水溶液中的寿命很短，很容易转化为 $^1\text{O}_2$ **和** H_2O_2 ；溶液中的 H_2O_2 容易接受电子并被还原生成 $\cdot\text{OH}$ **和** OH^-
- 有机污染物的去除主要依赖于 $\cdot\text{OH}$ **和** $^1\text{O}_2$ 的氧化降解
- **电吸附**作用增加了膜堵塞，降低了膜通量



■ 成果概述：铋/氟改性锡基导电陶瓷膜（ATFO-CM）制备与膜污染抑制机理

- ✓ 在最佳条件下，ATFO-CM能有效减少有机污垢的积累，并将**稳态归一化膜通量提高30.31-30.74%**。这些条件包括电流密度为**10 mA/cm²**、初始膜通量为**200 LMH**，以及使用50 mM 的**Na₂SO₄（或NaCl）** 电解液
- ✓ 在EMSP中使用的ATFO-CM在长时间过滤和电化学再生循环中表现出良好的**重复使用性、金属掺杂层无溶出风险**
- ✓ 牛血清白蛋白（BSA）和腐殖酸（HA）的去除主要依赖于**·OH和¹O₂的氧化以及膜截留作用**。膜的分离传质及静电吸附作用增强了膜表面有机物的积累，强化了有机物在膜电极界面的氧化去除。在膜污染清洁实验中，基于膜阻力模型分析，**电化学过程可以有效去除有机污垢**
- ✓ 传统陶瓷膜过滤BSA和HA的初始阶段，分别以**中间孔堵塞和完全孔堵塞为主**。施加电流后的电化学陶瓷膜过滤牛血清白蛋白（BSA）和腐殖酸（HA），**堵塞机制处于不断转换之中，膜污垢累积率与电化学除垢率达到平衡，从而达到稳态归一化J₀**



1 研究背景

2 EMF技术研究进展

3 EMF膜污染抑制机制

4 EMF典型成果概述

5 结语



■ 结论

- 在成本(原料和制备成本)、效能和工艺成熟度方面，我们认为**半导体涂层改性陶瓷膜**是非常有潜力的导电陶瓷膜
- 在污染物去除机制研究中，有机污染物的降解主要依赖于膜电极的直接氧化和间接氧化，其中**ROS**和**RCS**氧化作用最为显著
- 可以通过调控膜电极**粗糙度、亲水性、表面电荷、废水离子强度和阳离子类型**抑制膜污染的形成

■ 展望

- 建议研究**Janus导电陶瓷膜**设计，它允许阴极和阳极合并导电膜上，避免外部电化学组件、简化反应器
- 利用**原位表征技术**，多尺度研究膜污染缓解机制
- 研发**智能水处理系统**，基于对进水和滤液的传感，自动检测关键参数(如，pH、浊度、LSI、颜色、气味、EIS等)，通过响应水质的变化和膜表面的污染程度来实时控制ECMS



请您不吝指正!

谢谢!