

单原子亚纳米电极 及环境应用效益分析

柳丽芬
大连理工大学

CONTENTS

目录

01

背景与意义

Background And Significance Of The Selected Topic

02

研究方法

Research Methods And Processes

03

研究成果

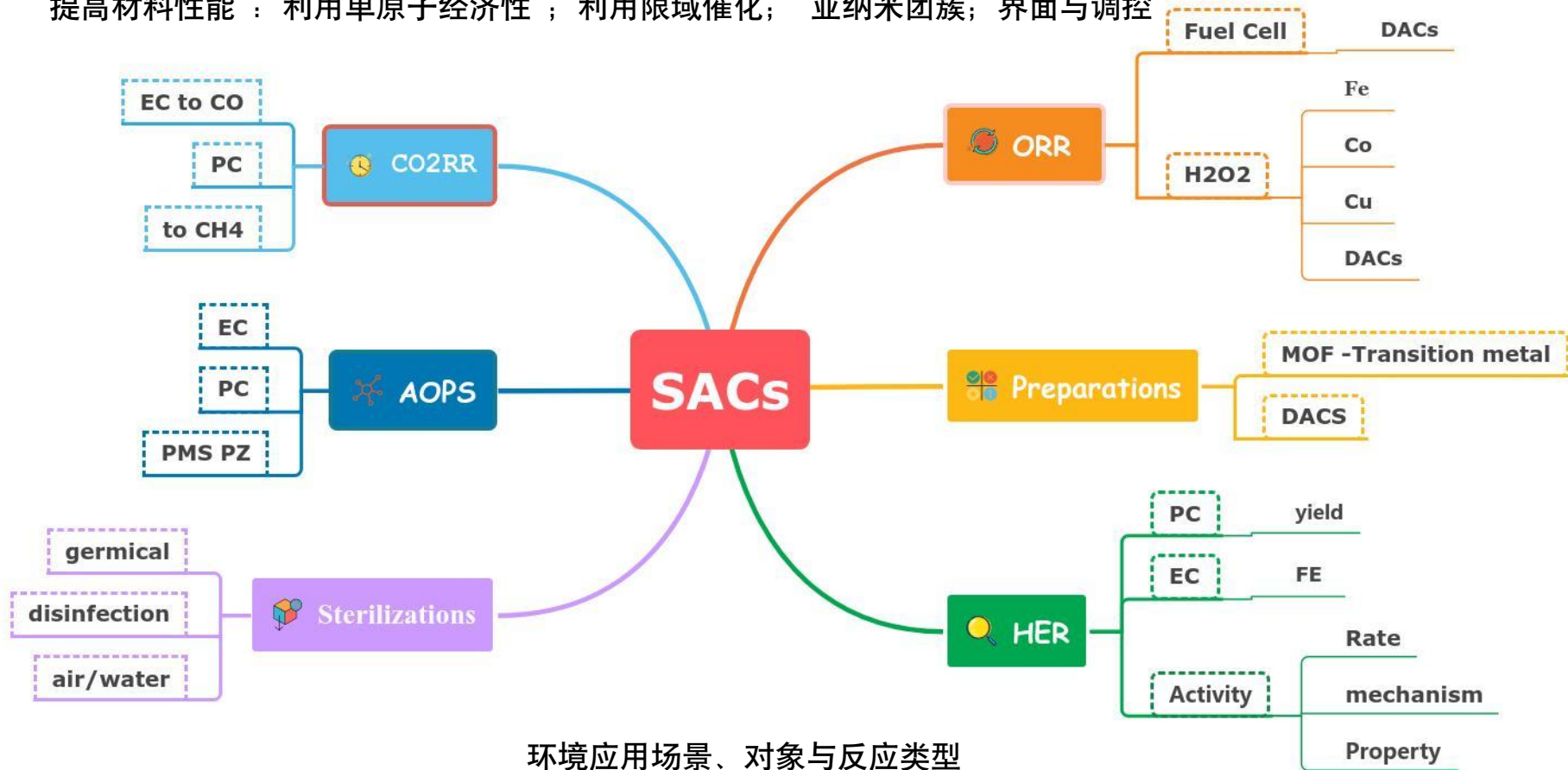
Demonstration and application of research results

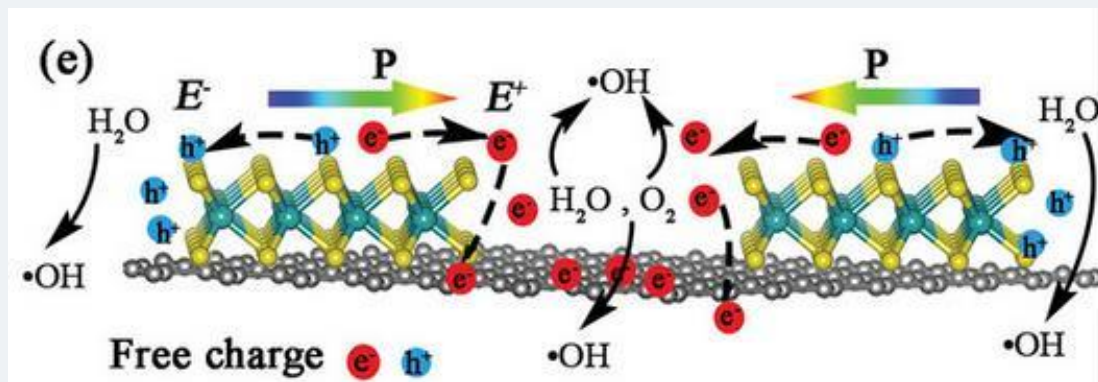
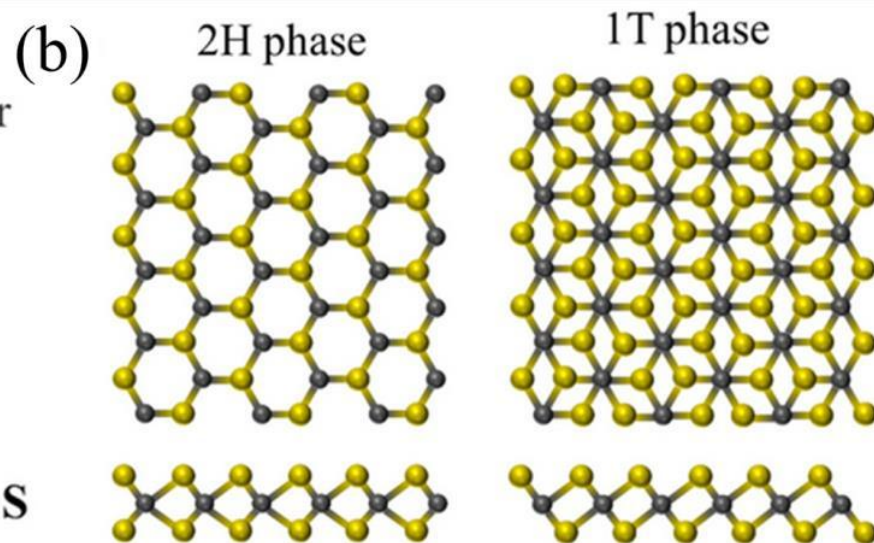
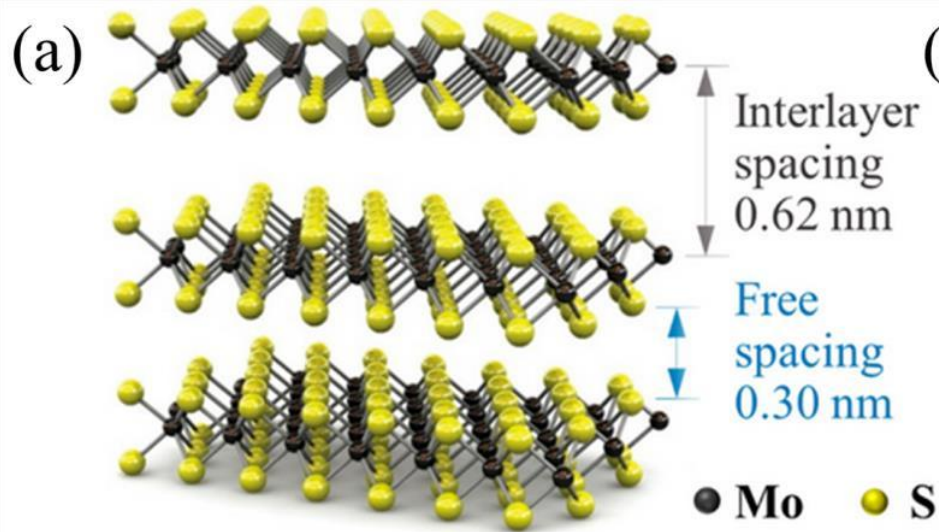
04

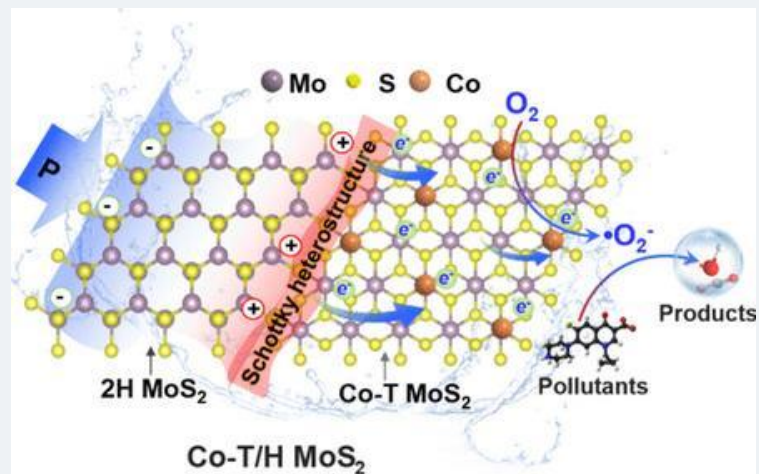
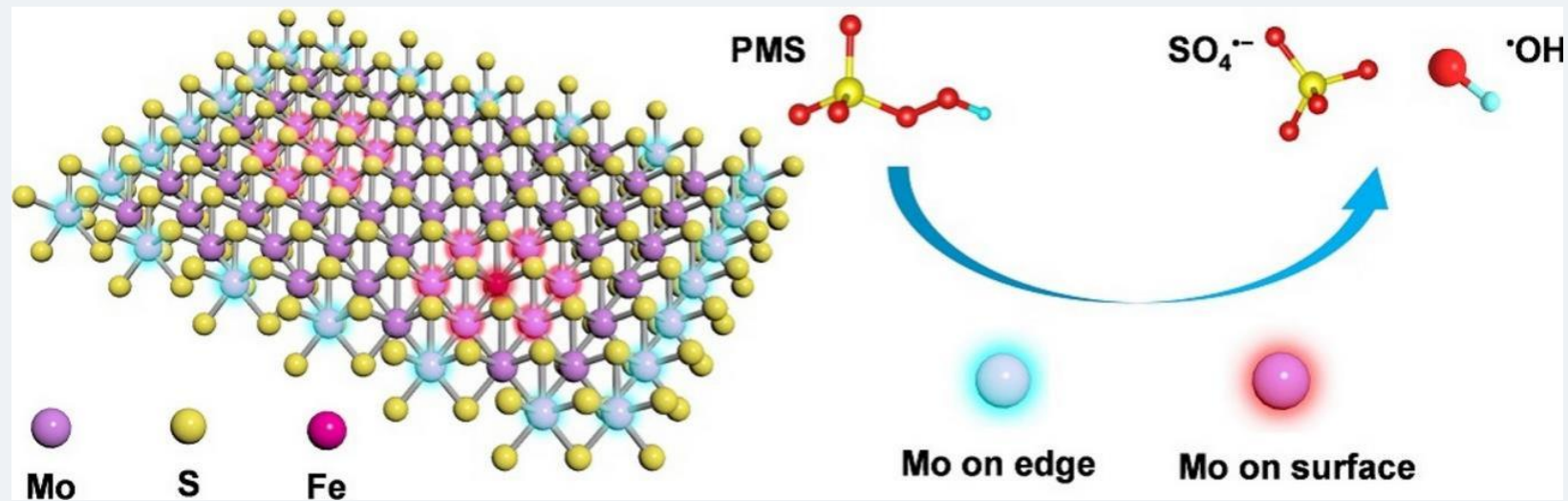
总结与致谢

Paper Summary And Thanks

提高材料性能：利用单原子经济性；利用限域催化；亚纳米团簇；界面与调控







硫化物电极
资源化
压电催化
催化剂
吸附剂



单原子
亚纳米
限域
催化



AOP
活化氧气
产活性物种
过氧化氢
PMS
压电催化
单原子



环境应用
水气有机物
S无机物
污染控制
转化资源化
还原氧化



降本与增效：污染物资源化及单原子/亚纳米电极

01 电极制备原料

1. 原料消耗-替代

水热法

烧结法

MOF COF

时间成本

2. 废弃物

废塑料

废污泥

3. 循环利用

02 电极制备方法

1. 条件维持-简化

加热 200 度

烧结 500-1000度

耗电 耗能

2. 产率 低 提升方法

3. 再生方法 降耗

03 资源化方法 稳定性与循环利用

1. 资源化： 污染物-产电 高附加值产品

2. 稳定性 延长寿命

粘结剂替代

固定化效率提升

3. 循环利用再生方法

□ 高级氧化技术及活化PMS应用

高级氧化技术

➤ 臭氧氧化
➤ 芬顿氧化

➤ 过硫酸盐氧化



羟基自由基

硫酸根自由基

氧化电势

1.9 ~ 2.7 V_{NHE}

2.5 ~ 3.1 V_{NHE}

半衰期

20 ns

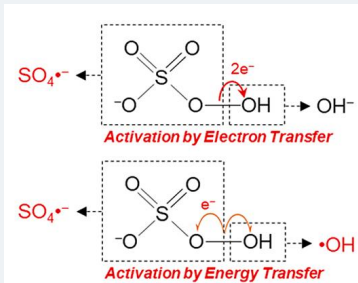
30 ~ 40 μs

pH

3 ~ 5

2 ~ 9

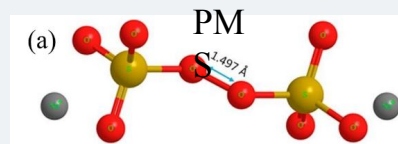
活化方式



➤ 能量/化学活化
热/辐射活化
碱活化
电解活化

➤ 材料催化活化

光催化活化
过渡金属活化



➤ PMS活化优势
易被过渡金属活化
易储存运输
pH适用范围广

一、研究背景



□ 硫化物 (S^{2-}) 的来源及危害

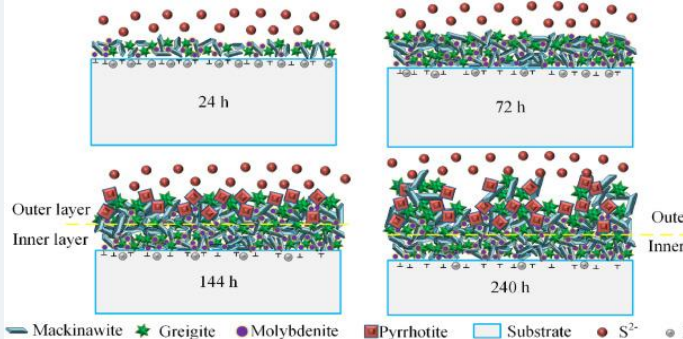
石油化工、皮革制造、造纸、焦炭炼制等工业废水

石油化工: $150 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 皮革工业: $360 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 排放

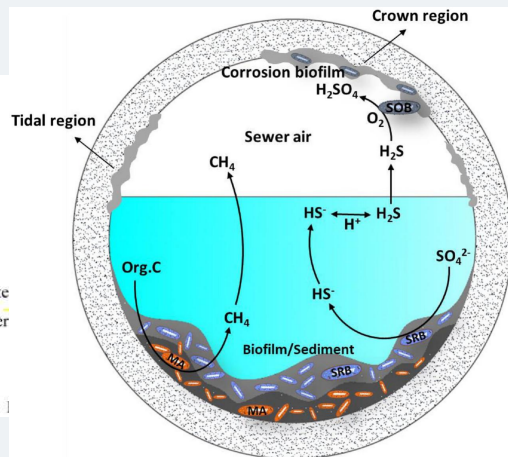
标准: $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (GB 31571-2015)

- 腐蚀管道、设备
- H_2S 恶臭 (占大气投诉 >40%)
- 毒害水生生物

去除硫化物,
控制硫化物排放



腐蚀钢铁



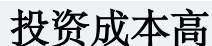
腐蚀混凝土

Concentration (ppm)	Symptoms/Effects
0.00011-0.00033 ^[2]	Typical background concentrations ^[2]
0.01-1.5 ^[2]	Odor threshold (when rotten egg smell is first noticeable to some). Odor becomes more offensive at 3-5 ppm. Above 30 ppm, odor described as sweet or sickeningly sweet. ^[2]
2-5 ^[2]	Prolonged exposure may cause nausea, tearing of the eyes, headaches or loss of sleep. Airway problems (bronchial constriction) in some asthma patients. ^[2]
20 ^[2]	Possible fatigue, loss of appetite, headache, irritability, poor memory, dizziness. ^[2]
50-100 ^[2]	Slight conjunctivitis ("gas eye") and respiratory tract irritation after 1 hour. May cause digestive upset and loss of appetite. ^[2]
100-150 ^[2]	Loss of smell (olfactory fatigue or paralysis). ^[2]
200-300 ^[2]	Marked conjunctivitis and respiratory tract irritation after 1 hour. Pulmonary edema may occur from prolonged exposure. ^[2]
500-700 ^[2]	Staggering, collapse in 5 minutes. Serious damage to the eyes in 30 minutes. Death after 30-60 minutes. ^[2]
1000-2000 ^[2]	Nearly instant death ^[2]

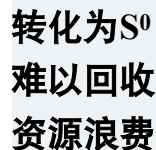
1 生物法



2 物理法



3 电化学氧化法



能耗高，电极易钝化

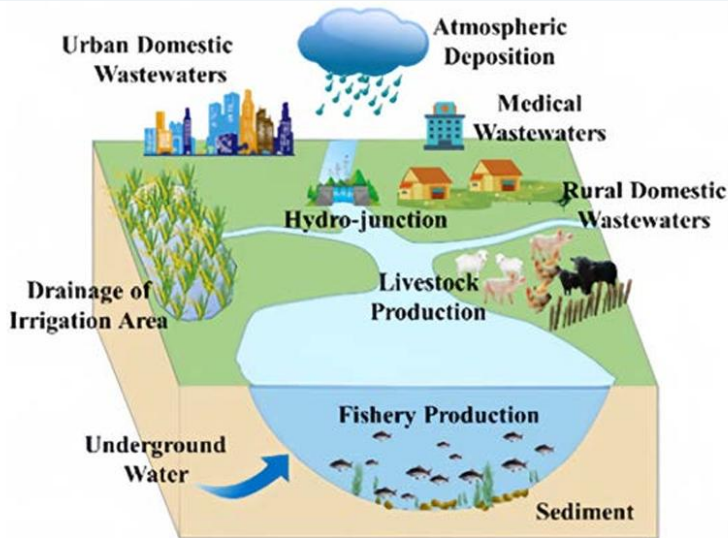


如何以新方法、低成本降解含硫废水 制备成硫化物催化剂的可行性

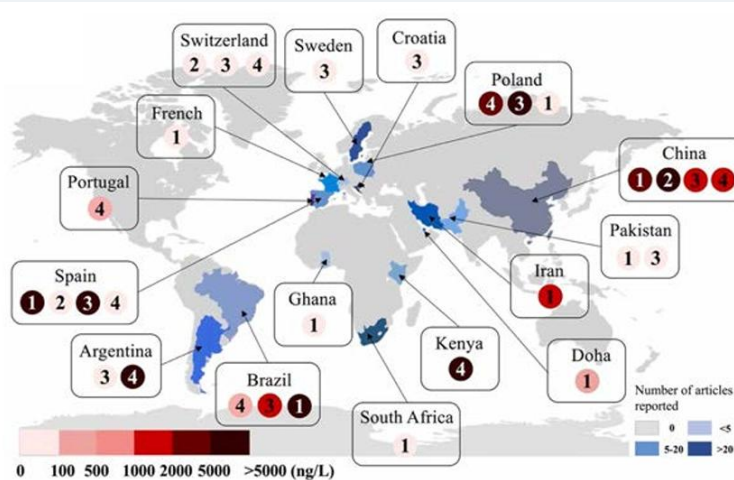
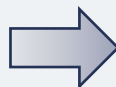
一、研究背景

□ 抗生素污染

四环素类抗生素是全球第二大类抗生素，大约60%至80%会通过尿液和粪便排出到环境中，这导致了环境污染问题，并引起了公众和专业机构的广泛关注。



环境中抗生素的来源和迁移



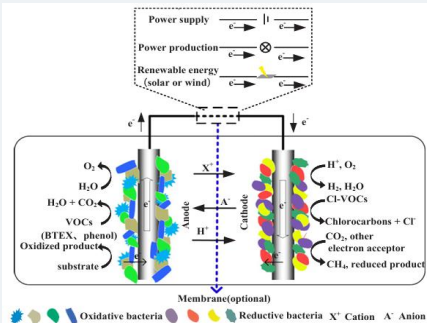
① Tetracycline ② Chlortetracycline ③ Oxytetracycline ④ Doxycycline

TCs 报告数量和环境中TCs的最大检测浓度

生物电化学技术 (BES)、光电催化 (PEC)、微生物燃料电池 (MFC) 耦合光电催化

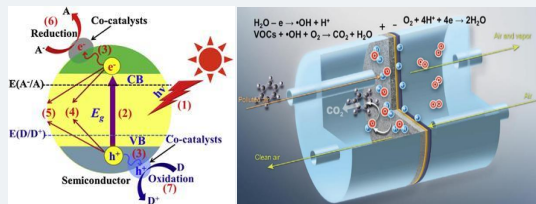
生物电化学技术

- (1) Power supply
(外加电源 → 微生物电解池 MEC)
- (2) Power production
(自发发电 → MFC)
- (3) Renewable energy
(外接光伏 / 风电 → 耦合型 BES)

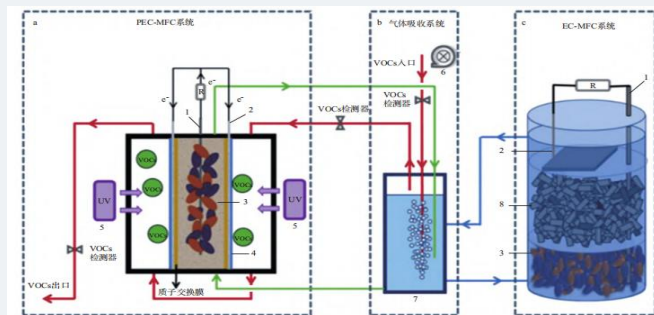


光电催化

- (1) PC = Photocatalysis
光催化 (只有光, 无电场)
- (2) EC = Electrocatalysis
电催化 (只有电场, 无光)
- (3) PEC = Photoelectrocatalysis
光电催化 (光 + 电)
- (4) CEC = Contact Electrocatalysis
接触电催化
(载体 - 污染物 - 电极界面接触式)



MFC耦合光电催化



双循环光电催化耦合微生物燃料电池系统

阴极强氧化断链

阳极低能耗矿化并产电

气-液一体化自适应降解

▶ **单原子复合催化剂**是当前VOCs降解领域的研究热点，这种技术将金属以单个原子的形式固定在支撑材料上，这种独特的结构让金属原子的利用率接近**100%**。

贵金属单原子催化剂

如Pt、Pd、Au、Ru等贵金属单原子催化剂是VOCs催化氧化领域研究最早且最深入的体系。

成本高、易中毒
资源稀缺

过渡金属单原子催化剂

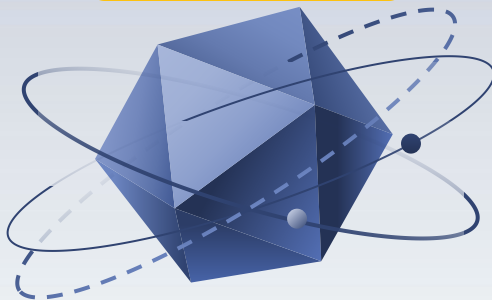
如Fe、Co、Mn、Cu等单原子催化剂已成为近五年的重点研究方向。

成本低、易制备
适配性强

单原子合金催化剂

单原子合金是近五年涌现的新型复合催化体系，将孤立的活性金属原子嵌入到高丰度的母体如Cu、Ni、Ag等金属表面晶格中。

制备难、成本高
不稳定、放大难



研究方法

水热制备 Fe/MoS₂
烧结法CeCoW/CN/AC

研究方法

Sulfide removal
VOC removal
效益分析

研究 方法

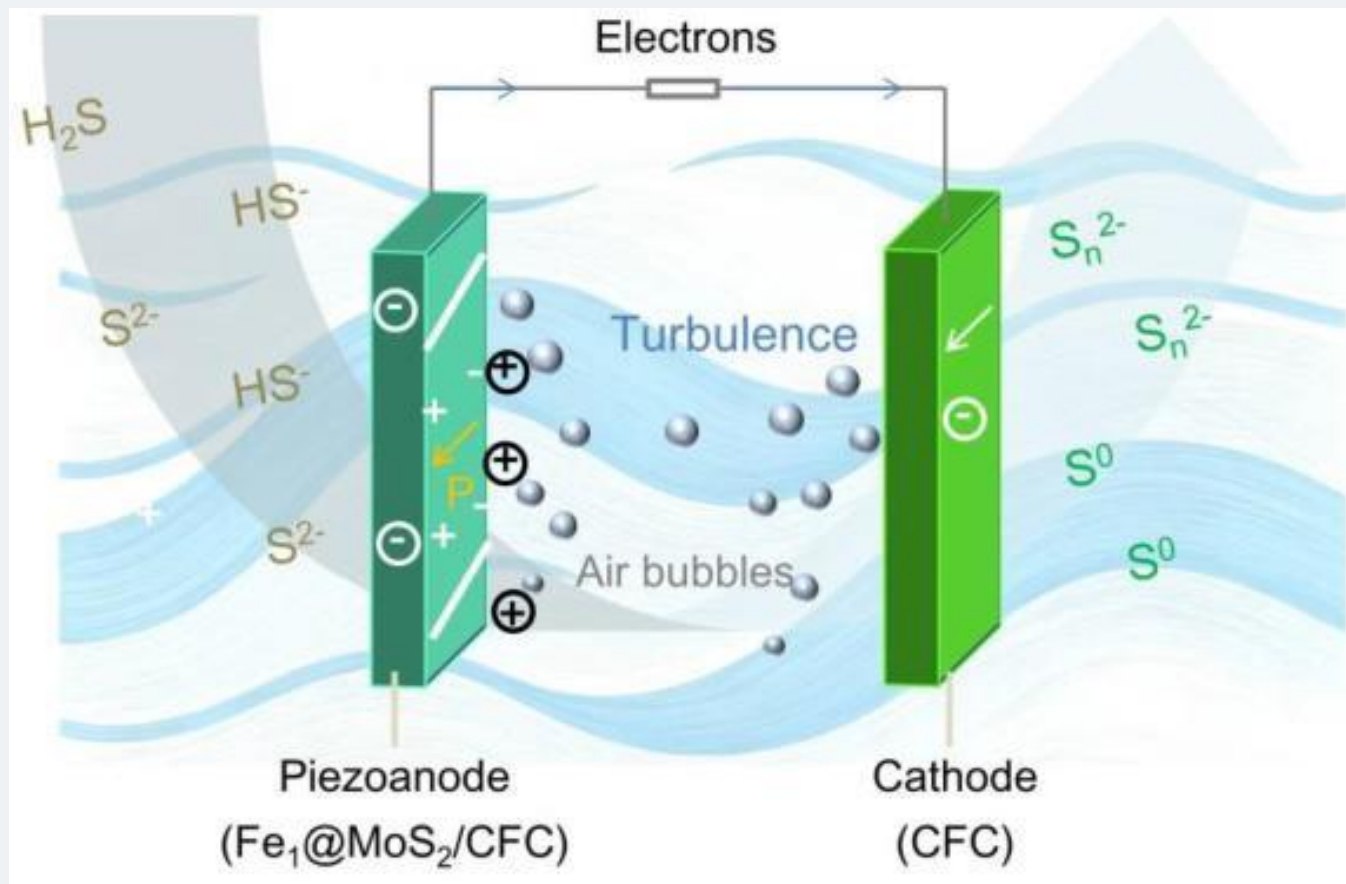
研究方法

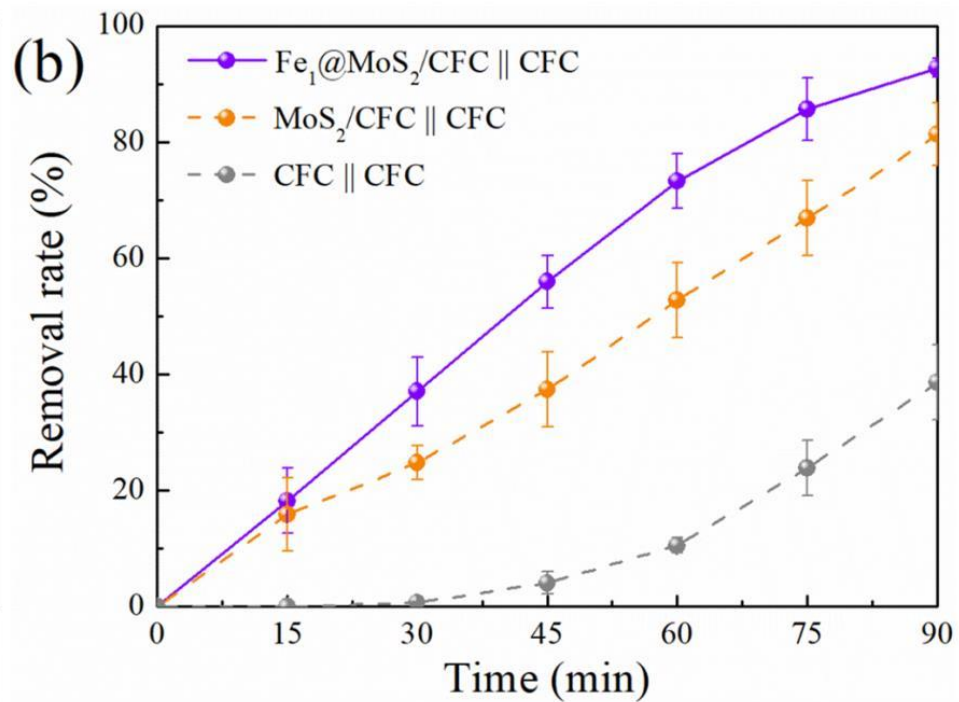
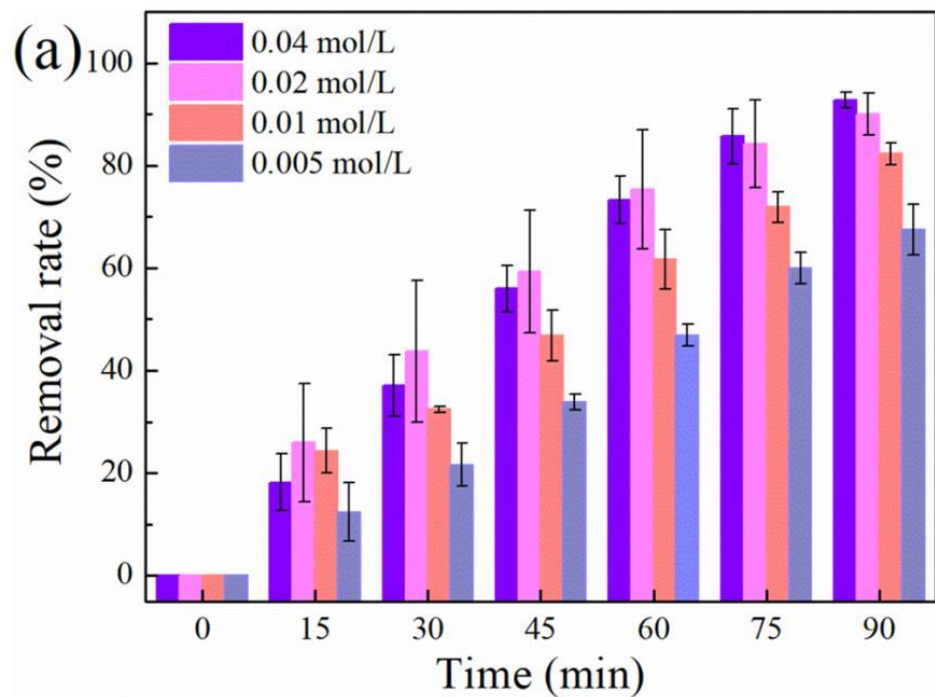
I吸附硫以及金属离子
活性炭
纤维
效益分析

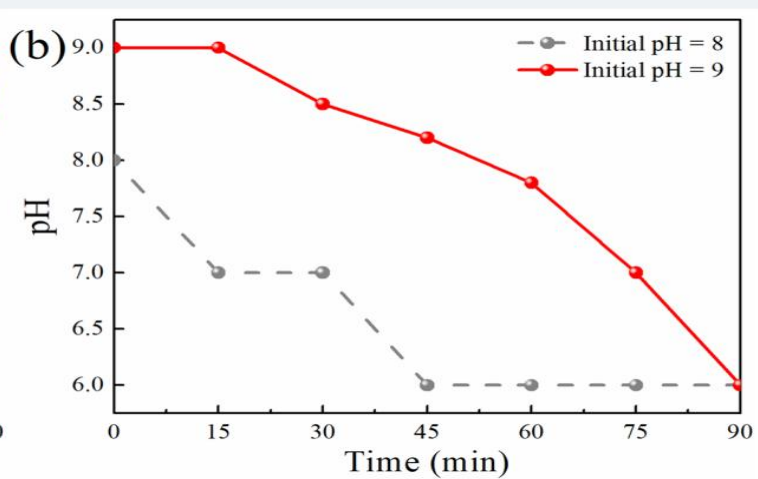
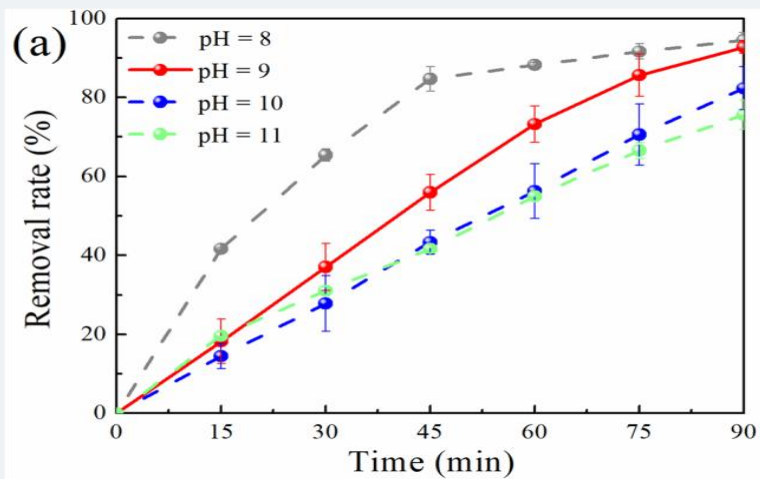
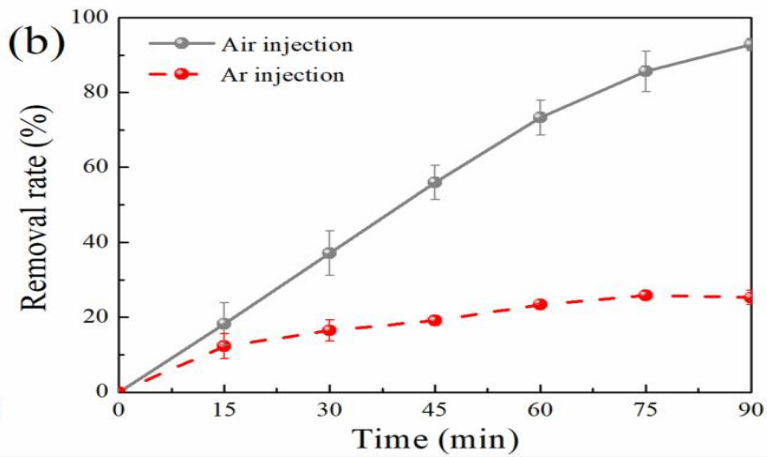
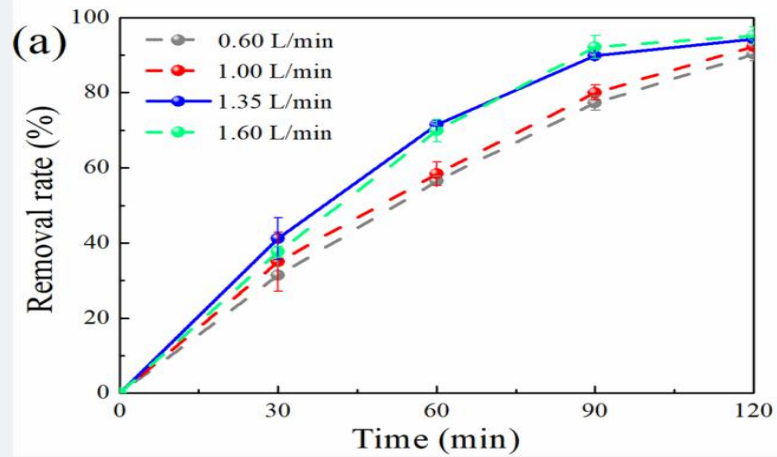
研究方法

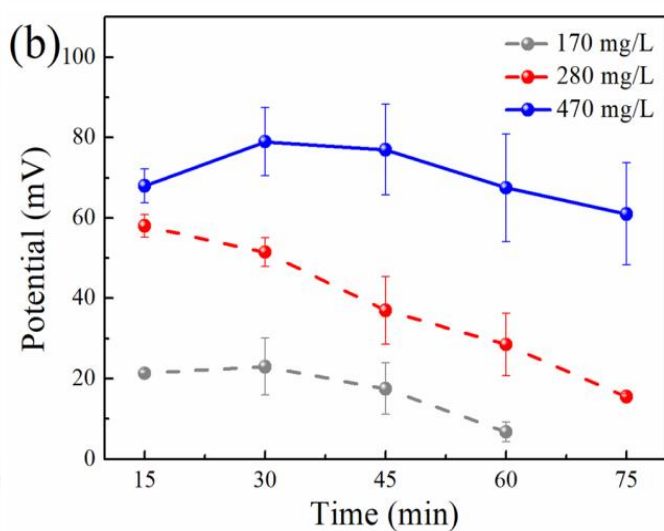
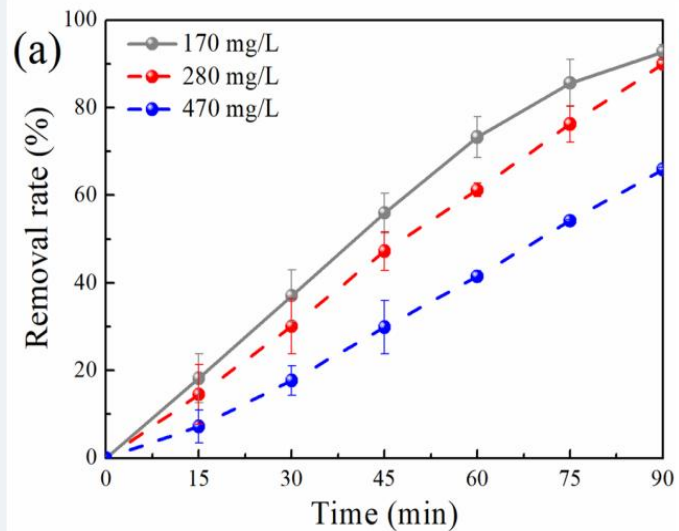
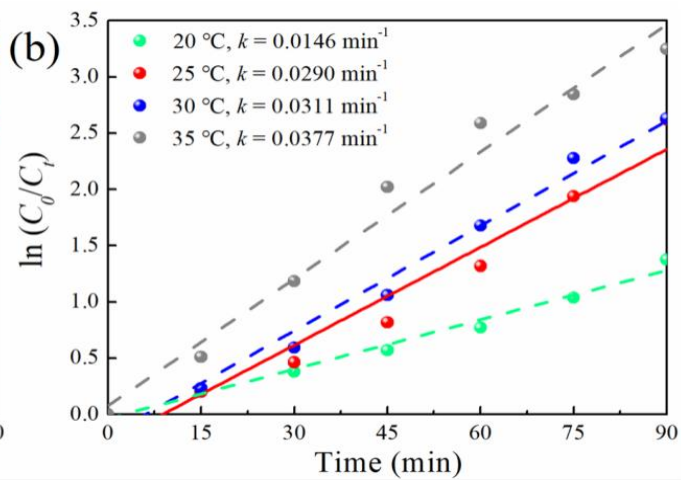
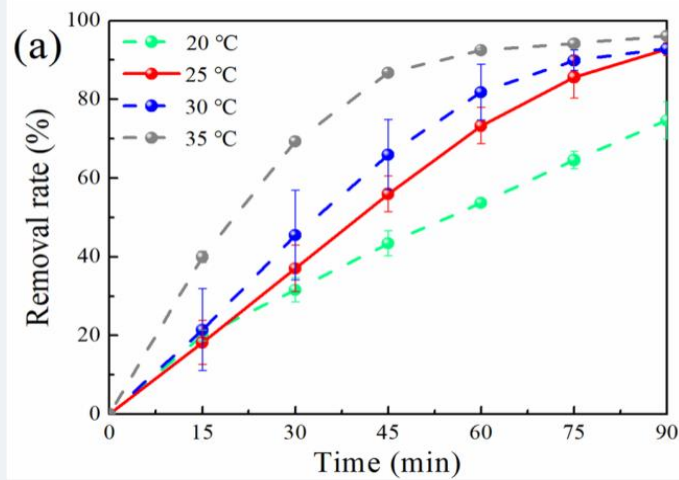
S离子转化去除
催化VOC
效益分析

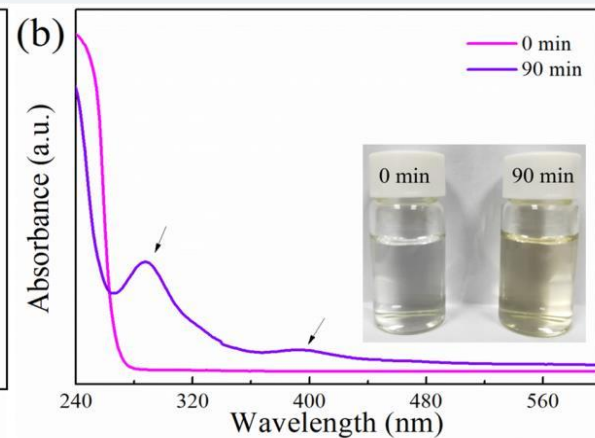
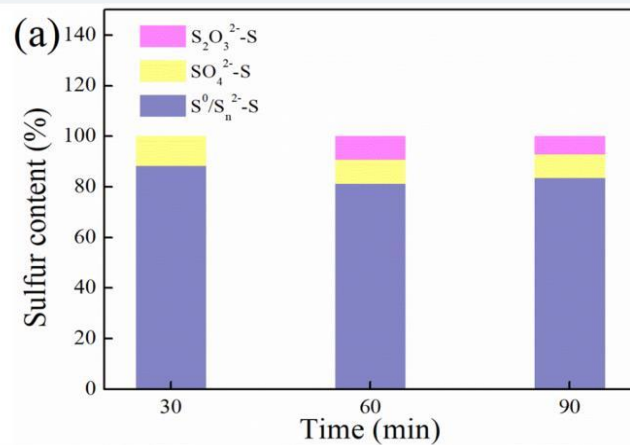
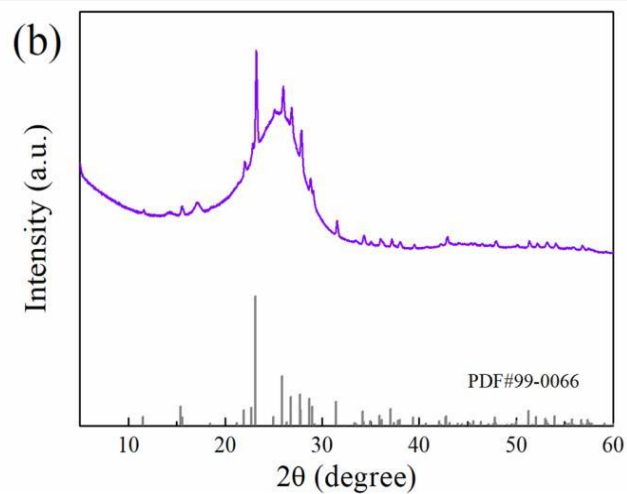
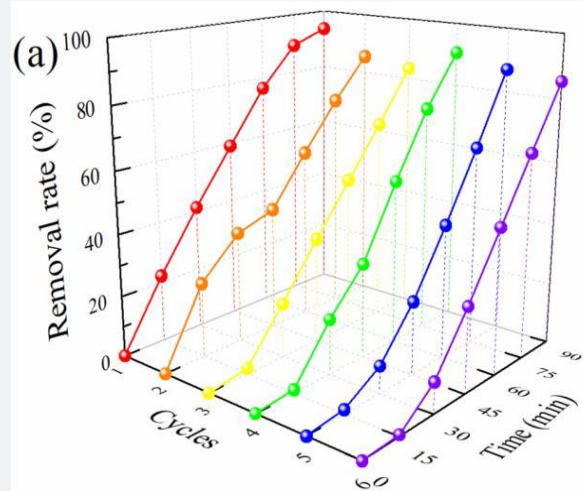
研究进展1





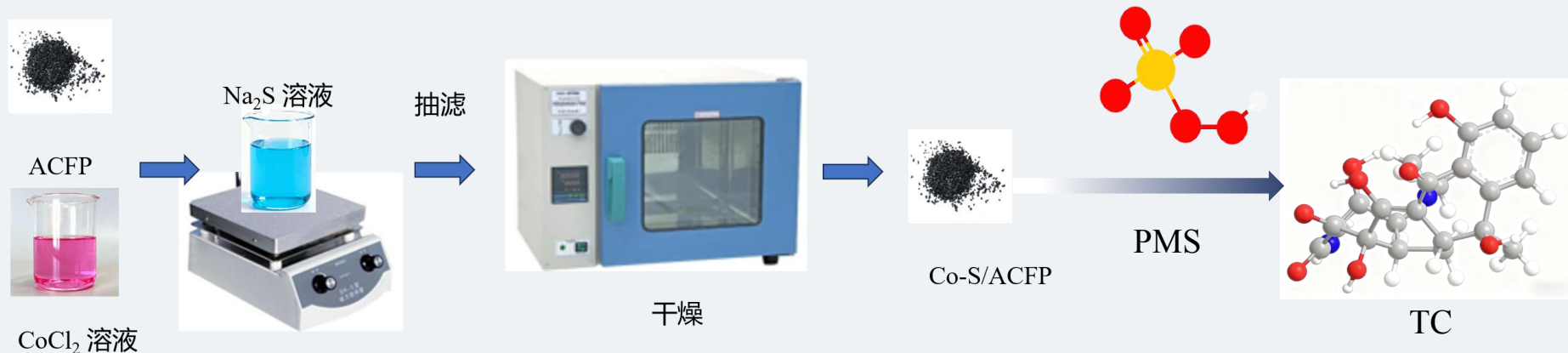






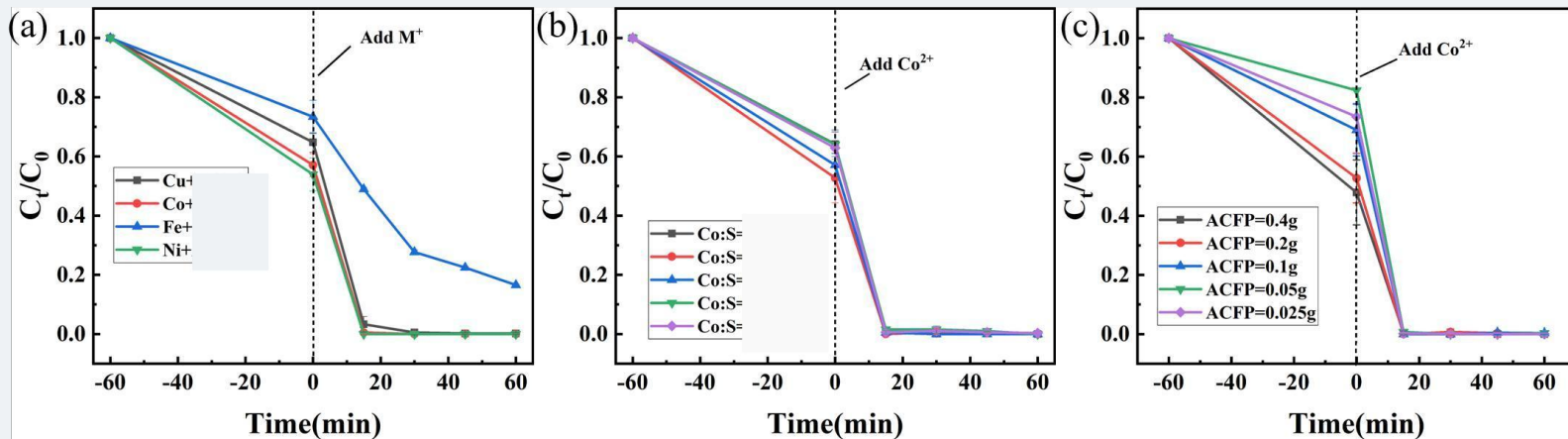
处理技术	硫化物浓度	反应 时长	去除率	外加电势	支持电解质	参 考 文 献
PzFC	S^{2-} , 170 mg/L	90 min	93%	无	无	本章
PzFC	S^{2-} , 280 mg/L	90 min	90%	无	无	本章
Electrocatalysis with TiO ₂ NTA Mn _x O _y -Mo-PANI anode	HS ⁻ , 2 mM	120 min	35%	1.4 V vs. SHE	100 mM NaCO ₃	[260]
Electrocatalysis with surface oxidized stainless steel anode	Na ₂ S·9H ₂ O, 5 mM	≈ 24 h	100%	2.02 V vs. RHE	0.1 M phosphate buffer	[258]
Electrocatalysis with SS-15 anode	Na ₂ S·9H ₂ O, 10 mM	45 h	72.82%	2.02 V vs. RHE	0.1 M phosphate buffer	[263]
Electrocatalysis with <i>in-situ</i> generation of HO ₂ ⁻ and oxygen	S^{2-} , 25 mg/L	60 min	77%	10 mA/cm ⁻²	sewage in anode chamber, 10 g/L and 20 g/L NaCl in cathode and middle chamber	[264]
Alternating current-powered bioelectrode	S^{2-} , 100 mg/L	24 h	93.2 ± 1.5%	V _{peak} = ± 0.46 V vs. SCE	COD: 800 mg/L	[256]

□ 硫化物催化剂制备及PMS活化和催化性能



- 提出配位化学指导的一体化策略。
- 利用活性碳毡粉末 (ACFP) 将废水中的 S^{2-} ($320 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$) 净化并转化为高附加值催化剂。

□ S²⁻去除与资源化

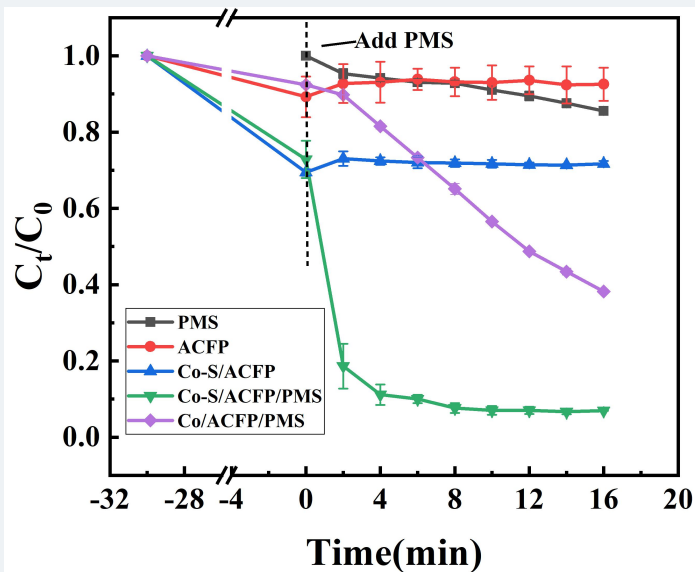


S²⁻的去除曲线

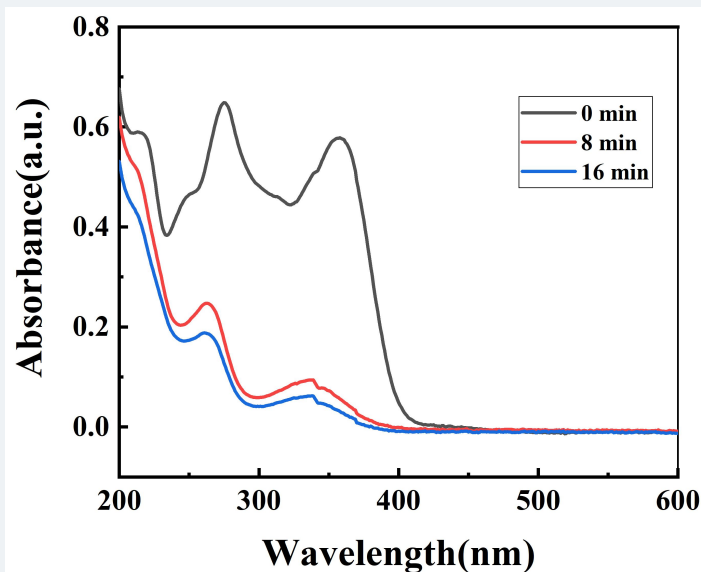
- Co²⁺、Fe³⁺、Ni²⁺、Cu²⁺四种过渡金属离子均能有效去除水溶液中的 S²⁻并形成相应的硫化物沉淀。
- 在不同C:S比例以及不同 ACFP 添加量条件下, S²⁻均能被完全去除, 催化剂合成可控, 可直接用于后续的污染物降解研究。

□ 体系对比

不同体系对比

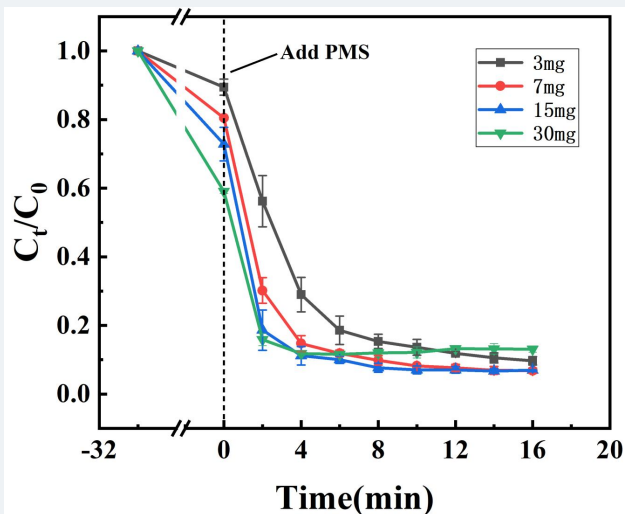


全波谱扫描

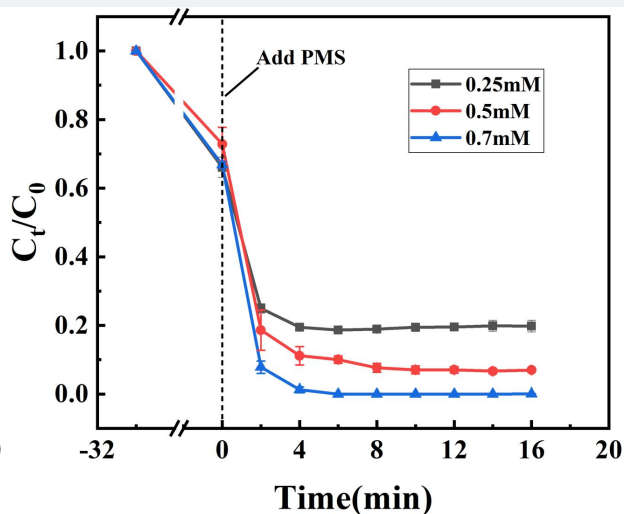


- CS/ACFP可高效活化PMS，CS配位可加速 $\text{Co}^{3+}/\text{Co}^{2+}$ 氧化还原循环、促进强氧化活性物种 (ROSs) 生成。
- CS/ACFP/PMS体系发生了有效的氧化降解。

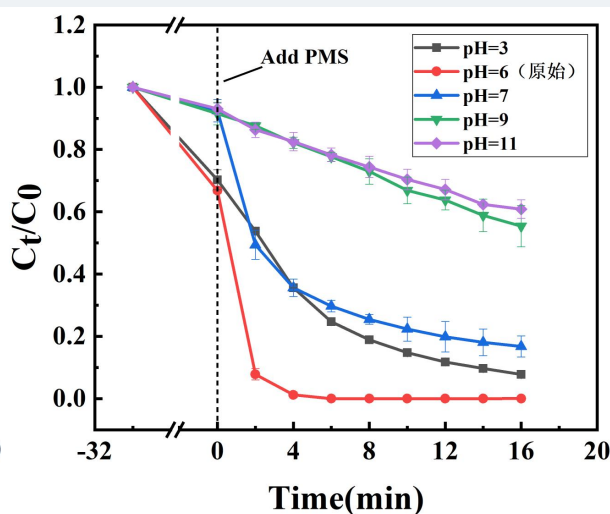
□ 参数优化



催化剂投加量



PMS添加量



初始酸碱度

- 最佳催化剂投加量: 0.17 g/L (15 mg)。
- 反应速率常数: $54 \text{ L} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

- 最佳PMS添加量: 0.7 mM 。
- 较宽的pH适用范围。

□ 性能对比

催化体系（文献来源）	TC浓度 (mg·L ⁻¹)	TC去除率	催化剂用量(g·L ⁻¹)	反应时间 (min)	PMS用量	制备方法
CoFe ₂ O ₄ @BC(Zhang et al., 2023)	20	99.8%	0.5	30	0.997 mM	水热法
Co ₃ O ₄ /CPANI(Jin Qian et al., 2023)	20	92.1%	0.15	40	0.15 g/L	溶剂热合成-煅烧法
CuCo@GCN-3(Lei Liu et al., 2023)	20	95.3%	0.5	30	0.1 mM	MW 辅助加热法
CuCe _{0.05} Co _{0.95} O ₂ (Fan Li et al., 2023)	20	96.7%	0.1	40	1 mM	水热法
Fe-MOFs/CuS(Rui Ma et al., 2023)	20	91.0%	0.05	40	0.5 mM	溶剂热法
CS/ACFP(本研究)	20	100%	0.17	16 min 反应	0.7 mM	吸附-配位沉淀法

- 本研究催化剂活性较高，且反应时间更短。

➤ 催化剂用量较少。

➤ 合成方法更温和绿色。

小结

- 采用“吸附-配位沉淀-原位转化”策略，以模拟含硫废水中的 S^{2-} 为硫源，在ACFP上原位合成CS/ACFP复合材料。反应15 min内 S^{2-} 去除率达99%，同步实现了 S^{2-} 的高效去除与高活性PMS催化剂的资源化制备。表征分析表明，高Co/S比驱动形成小尺度结构，高度分散于ACFP表面和孔内。该催化剂在宽pH范围内表现出卓越的PMS活化能力，在ACFP 0.2 g、催化剂 $0.17\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 、PMS 0.5 mM、pH=6.0的条件下，表观反应速率常数为 $54.2\text{ L}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 。机理研究表明， $^1\text{O}_2$ 为主导、 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 协同路径，表面 $\text{Co}^{2+}/\text{Co}^{3+}$ 与硫物种循环对维持催化活性至关重要。
- 将硫资源化策略拓展至膜耦合体系，构建了ZnNi-S/A-P催化膜。表征表明，Zn、Ni、S元素高度共定位，形成了ZnS/NiS与ZnO/NiO共存的多元复合结构，同时实现 S^{2-} 的100%去除。优化条件下(Zn: Ni=1:1, 催化剂 $0.53\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, PMS 1 mM, pH=6.0), 反应90 min后TC去除率达87.3%。机理研究表明， $^1\text{O}_2$ 为主导、 $\text{SO}_4^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$ 协同。该催化膜经10次循环后活性保留率为82.6%，稳定性好。

催化剂制备
(SACs/AC)



耦合体系构建
(MFC+电催化)



VOCs去除测试
(丙酮/丁醇/正己烷)



数据分析
(去除率/产电)



工程化设计
(10-10000倍)

构建微生物燃料电池耦合电催化
水循环的反应体系

利用微生物作为阳极和催化阴极构建生物耦合催化系统，阴极水循环滴滤至阳极，阳极溢出流向阴极，构成回路，形成电流

制备CTO、CC/W和CS的负载活性炭的单原子复合催化剂

制备不同金属负载活性炭的单原子复合催化剂

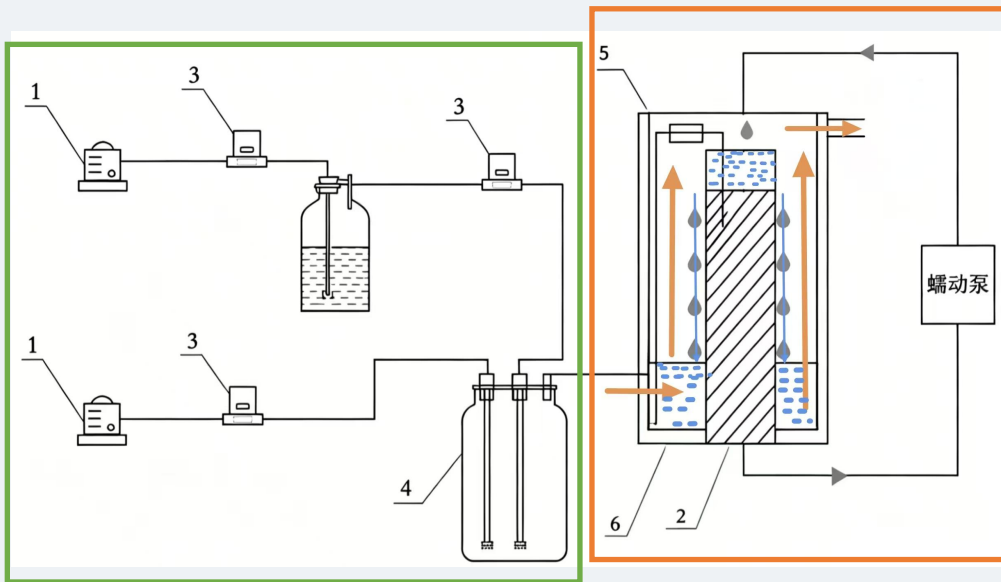
对目标污染物的进行连续
考察不同实验条件下的去除效果

连续流分别通入目标污染物，对其进行连续去除，考察气体流速、催化剂种类、阴阳极比例、VOCs种类、阴极材料等不同实验条件的去除效果，对比并优化反应条件达到最佳去除效果

针对单一反应体系开展串联处理，放大概念化设计，形成处理单元组合的一体化装置，预测估计串联反应器的净化去除VOCs的效率

单元反应体系放大及讨论

生物耦合电催化体系装置示意图



生物耦合电催化降解VOCs示意图

(1.气泵 2.阳极室 3.气体流量计 4.混气瓶 5.碳纤维布 6.阴极室)

配气系统

精准配气单元

采用**双路气泵与精密转子流量计**协同工作，可独立调节VOCs模拟废气与空气的进气流量。利用**鼓泡法**通入目标污染气体的动态配比实现进气浓度与总流速的精准控制，为后续电催化反应提供稳定的底物输入条件。

反应系统：阴极室+阳极室

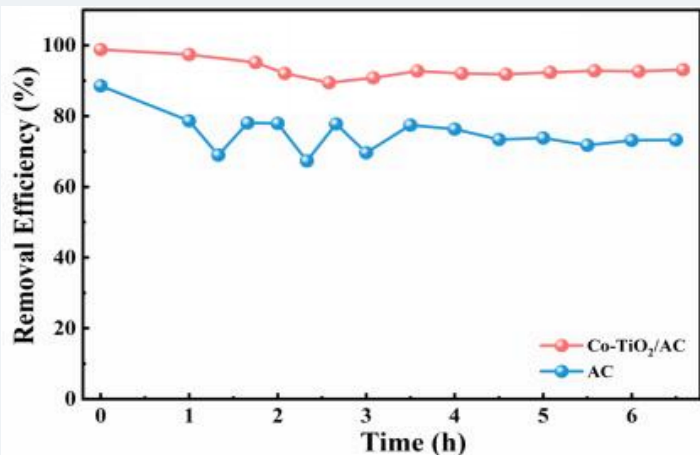
阴阳极协同反应区

阳极填充负载产电微生物的颗粒活性炭，构建厌氧生物微环境；阴极采用碳纤维布负载单原子复合催化剂，形成有氧催化界面。循环水从装置顶部滴落入阳极装置中，阳极装置内**液体满后溢出**再流入阴极装置构成**回路**

工艺技术优势

系统实现了**生物功能与电催化活性的有机融合**，解决了传统单一技术处理效率低、运行不稳定的痛点，为**VOCs治理**领域提供了一种高效、节能且环境友好的新型耦合技术解决方案。

空白对照



CTO/AC 与 AC 对丙酮的去除效率对比

实验结果显示，在6小时连续运行周期内，Co-TiO₂/AC 催化剂（红色曲线）的丙酮去除效率始终高于纯活性炭 AC（蓝色曲线），且抗衰减能力显著优于AC，体现了单原子催化位点对有机污染物的高效降解作用。

核心指标一：丙酮去除效率稳态对比

73% (纯活性炭 AC)

吸附饱和后效率快速下降，对高浓度丙酮气体净化能力有限。

92% (单原子催化剂)

协同催化作用显著，吸附-催化循环稳定，净化效果提升近26%。

核心指标二：动态传质与处理负荷能力

体积去除负荷 (SRCv)

168.14 g/m³ · h

较AC (131.59) 提升 27.8%，空间利用率更高

质量去除负荷 (SRCw)

0.414 mg · g⁻¹ · h⁻¹

较AC (0.324) 提升 27.8%，单位材料效能优异

产电
性能

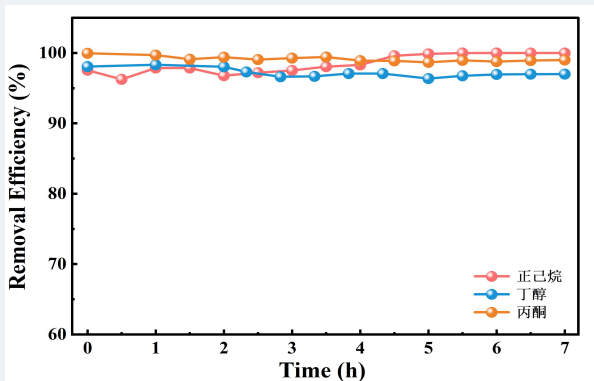
AC 体系

电压波动大 0.537→0.624mV，无持续催化产电能力，能量输出不稳定。

CTO/AC 体系

稳定在 0.495-0.529mV，微电流持续，为电化学协同净化提供有效能量支撑。

C-C-W/AC催化剂对不同VOCs的去除性能分析



目标污染物

去除效率

产电范围 (mV)

正己烷

100%

0.309 - 0.404

丙酮

99%

0.218 - 0.320

叔丁醇

97%

0.278 - 0.359

构效关系与去除机理解析

正己烷 (100%)

非极性 · 强疏水
低位阻

极易在疏水催化界面吸附富集，电催化与生物降解协同作用强，反应动力学快，可实现污染物的彻底矿化。

丙酮 (99%)

强极性 · 高水溶
无位阻

部分组分稳定留存于水相，难以在固液界面有效富集；虽易被降解，但传质过程受限导致微量残留。

叔丁醇 (97%)

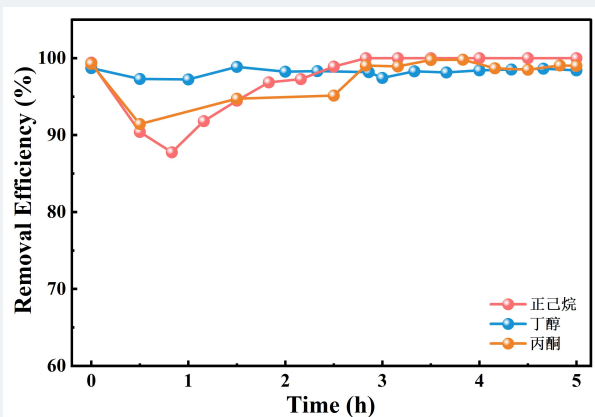
大位阻 · 中水溶
难生化

空间位阻阻碍了与活性位点的接触，加之化学稳定性高，导致降解动力学速率显著低于其他两种物质。

核心机制：分子特性的协同调控作用

污染物的分子极性、水溶性、空间位阻及可生化性共同决定了其在体系中的行为。非极性、低水溶性且结构简单的底物更易在疏水界面发生反应；而极性分子或存在大位阻的分子，受传质限制和反应能垒影响，去除效率呈现梯度下降。这为针对特定VOCs优化催化剂表面性质提供了重要理论依据。

C-S/GAC催化剂对不同VOCs的去除



目标污染物	去除效率	产电响应情况
-------	------	--------

正己烷

100%

启动期 0.150 mV
稳定期 0.243 mV

丙酮

99%

启动期 0.181 mV
稳定期 0.232 mV

丁醇

98%

高效稳定区间
0.552 mV - 0.582 mV

实验现象与结论

VOCs 去除效率特征

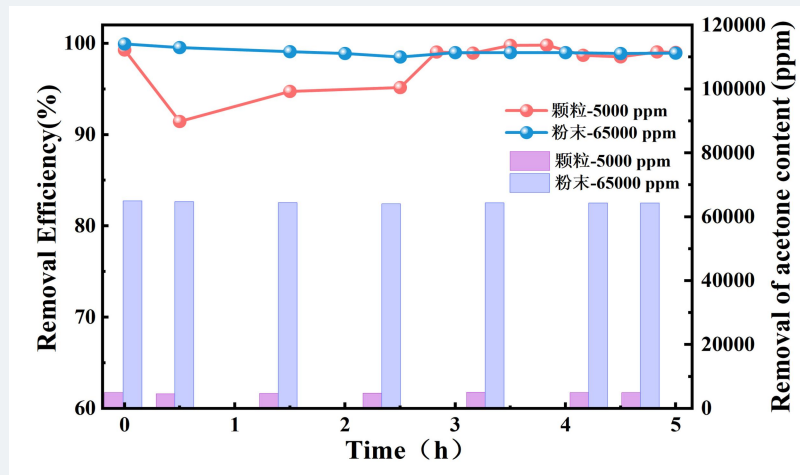
该催化剂对目标VOCs表现出优异的降解效果，反应初期受传质过程影响效率略有波动，随后快速趋于稳定。其中**正己烷实现完全降解（100%）**，**丙酮去除率达99%**，**丁醇去除率保持在98%**，整体性能满足工业应用的稳定性要求。

微生物产电性能演变

受限于微型反应器规模，反应启动阶段输出电压较低。随着微生物在载体表面的富集与定殖，胞外电子传递效率显著提升。针对丁醇的测试中，系统产电已稳定在0.55mV以上的较高水平，证实了体系在污染物降解与能源回收方面的双重潜力。

实验数据证实，**C-S/AC复合催化剂在处理多种VOCs时兼具高效性与稳定性**。丁醇降解体系展现出最高的产电活性，表明其在难降解有机废水处理与生物电化学系统耦合应用中具有显著的工程价值。

颗粒度对C-S/AC催化剂性能的影响



催化剂颗粒度是调控传质阻力与有效表面积的核心要素
较小颗粒度的C-S/AC能够提供更庞大的比表面积和更高的活性位点暴露密度，从而使丙酮废气的去除效率和单位质量催化剂去除速率得到显著提升。

实验设计与核心发现

选取粉末活性炭(PAC)与颗粒活性炭(GAC)为载体负载CS活性组分，在60 mL/min气体流量条件下，分别测试**高浓度 (65000 ppm) 与中低浓度 (5000 ppm) 丙酮废气**的催化去除性能，重点对比不同颗粒度载体对传质效率与反应活性的影响机制。

C-S/PAC-1

高浓度**65000 ppm**进气下去除量达64300 ppm，去除效率稳定在**98.89%**。粉末载体大幅降低了内扩散阻力，保障了高负荷下的持续催化活性。

体积去除负荷 (SRCv)

PAC-1: **3685.99** g/m³ · h
较GAC提升约**13倍**

CS/GAC-1

仅在**5000 ppm**进气浓度下，去除量为4950 ppm。较大的颗粒尺寸导致传质受限，活性位点利用率低，在高浓度工况下性能显著衰减。

质量去除负荷 (SRCw)

PAC-1: **17.275** mg · g⁻¹ · h⁻¹
较GAC提升约**13倍**

	丙酮	丁醇	正己烷
	131.59 g/m ³ ·h	—	—
	131.59 g/m ³ ·h	—	—
	283.76 g/m ³ ·h	282.04 g/m ³ ·h	286.62 g/m ³ ·h
	3685.99 g/m ³ ·h	—	—
	131.59 g/m ³ ·h	—	—

性能总结 (SRC): 实验数据的定量分析

体积去除负荷 (SRCv) 领先

CS/PAC-1 在丙酮、丁醇、正己烷三类典型VOCs去除实验中, 体积处理能力显著高于参比样, 表现出单位体积内最强的污染物转化效率。

质量去除负荷 (SRCw) 优异

单位质量催化剂的有效处理量远超传统负载型催化剂, 意味着在同等材料成本下, 该催化剂能实现更大规模的废气净化通量。

核心结论

CS/AC 单原子复合催化剂在VOCs处理中展现出最优的综合性能与最高性价比, 是传统金属氧化物催化剂的理想替代方案。

单原子催化剂的量子优势 (SACs): 结构与效能的突破

孤立原子锚定

活性组分以原子级分散形式固定于载体缺陷, 避免团聚失活。

极致原子利用

利用率接近100%, 大幅降低贵金属用量与原料成本。

量子尺寸效应

独特的电子结构赋予材料超常的吸附与催化转化活性。

工业应用潜力

适配非贵金属体系, 符合“减污降碳”的绿色制造趋势。

应用价值: 在**极低金属投入**下实现**高通量降解**, 为开发下一代低成本、高效率的工业废气净化材料提供了坚实的理论依据与技术路径。

多级并列式反应体系

以**管状生物阳极作为独立功能单元平行阵列**，
阴极材料填充于阳极外侧形成闭路。VOCs废气由底部切向进入，配合外置**滴滤装置与循环泵**，**实现电解液的高效循环更新，强化气-液-固三相界面的传质效率**，解决了传统**固定床传质受限**的痛点。

高容错与抗风险能力

并联配置允许在不中断整体工艺流程的情况下，对单一反应单元进行离线检修或催化剂更换，从而保障了**生产的连续性**。此外，并联结构有效地**分散了高放热反应中的热失控风险**。

该图展示了模块化管状生物阳极单元的空间排布方式，以及液体循环系统与气路的集成逻辑，是实现技术从实验室迈向工程化的核心构型。

设计理念核心

突破传统反应器的空间限制，采用“即插即用”的模块化堆叠策略。这种结构不仅保证了反应效率的均一性，更实现了处理量的线性可扩展，为不同规模的VOCs治理场景提供了标准化的工程解决方案。

实测单元容积负荷达**3685 g/m³ · h**，证明了该技术极高的反应速率。基于此，我们构建了从实验室基础研究到万吨级工程落地的全尺度梯次应用路线。

基础研究阶段

× 1 - 10 倍

低风量实验室小试
工艺参数深度优化

中试验证阶段

× 100 倍

现场工况实地测试
稳定性与可行性确认

标准化设备

× 1000 倍

撬装式一体化机组
中小产线尾气治理

巨型工程应用

× 10000 倍

石化/涂装大流量
集中式环保工程治理

耦合体系构建与多元去除机制

成功搭建**气-液一体化水循环耦合反应系统**，确立了“物理溶解-活性炭快速吸附-单原子/微生物协同电化学降解”的三重净化路径。该装置利用**微生物耦合电催化技术**，有效克服了传统生物法处理效率低、抗冲击能力弱的技术缺陷，为复杂VOCs废气的高效处理提供了全新的技术范式。

减污降碳协同增效

反应体系在高效净化VOCs有机污染物的同时，能够**自发产电并实现能量自给**，部分补偿了阴极电催化过程的能量消耗。这一特性完美契合当前绿色低碳的工程技术发展理念，在实现环境净化目标的同时，兼顾了能源利用效率，具备显著的环境效益与应用潜力。

单原子催化填料的高效筛选

通过系列对比实验筛选出综合性能最佳的**CS/AC单原子催化剂**，对VOCs目标污染物的降解率极高。该填料不仅具有充分暴露的催化活性位点，从材料层面大幅提升了对VOCs的降解。

工业多级层级放大工程蓝图

基于详实的实验数据，提出了**从实验室小试到工业规模化应用的放大设计路径**，验证系统在动态负荷变化下极强的抗冲击能力。这一工程化蓝图解决了技术落地的关键参数匹配问题，为该技术走出实验室、实现工业化推广应用提供了坚实且可落地的工程理论支撑。

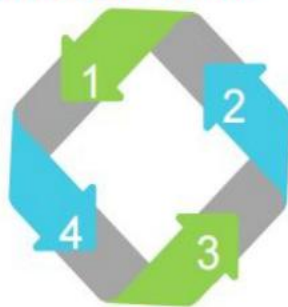
强传质 - 协同吸附再生
富集千倍
气相 mg-g/m^3 水相 mg-g/L

产电资源化
突破途径限制

电极电催化
产电反应器

Methane

由气到水-
突破浓度限制



亚纳米催化电极
突破活性限制

多孔 3D 气凝胶
SAC sub nano

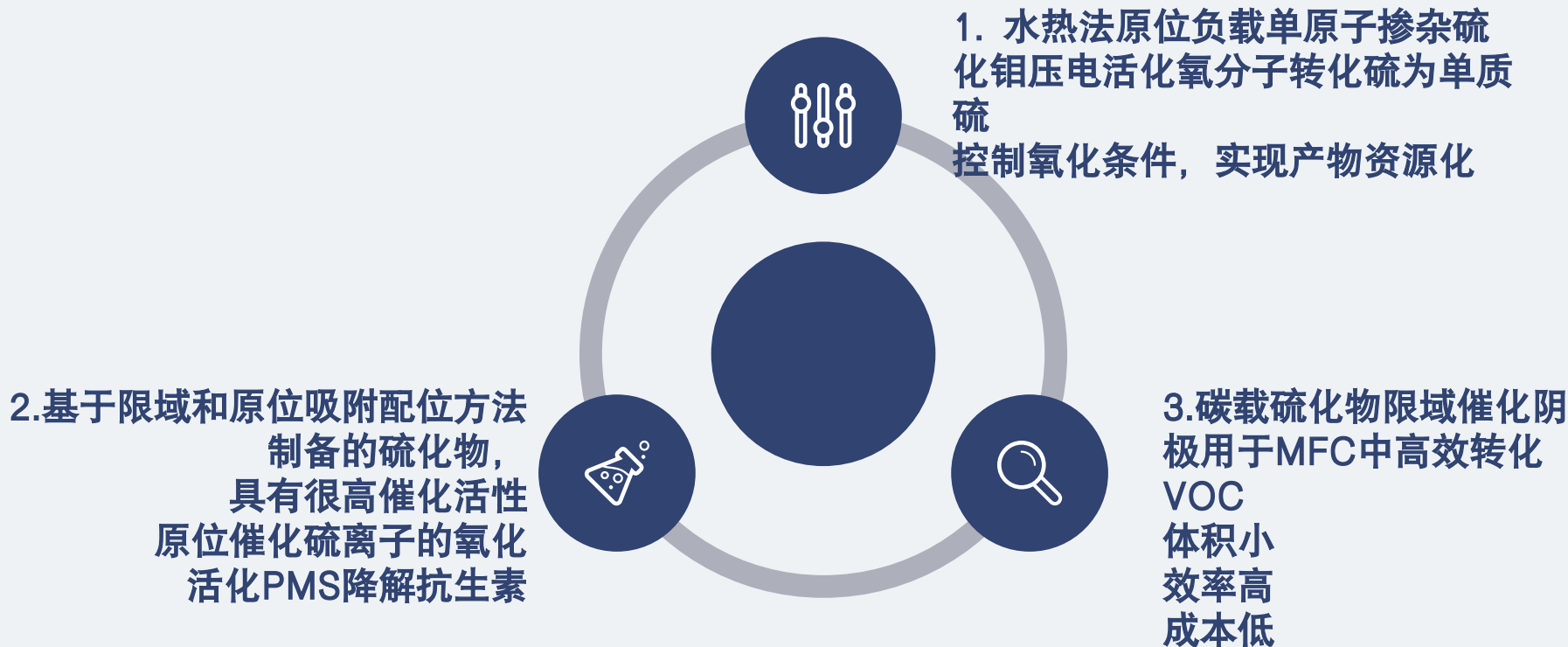
化学+生物 协同
突破技术壁垒

生物法 成本低, 燃料电池产电驱动催化,
协同作用 协同多种 污染控制









感谢国家自然科学基金支持！
感谢参与科研的研究生！

感谢关注！