



# 化学通讯

CHEMICAL NEWSLETTER

## No.6

2026年03月30日



图片来源 · www.freepik.com



CHINESE  
CHEMICAL  
SOCIETY



中国化学会 主办  
中国科学院长春应用化学研究所



06



## 新闻快递

- 全球单体最大煤制乙二醇项目开工，千亿级煤化工产业集群落地新疆 01  
来源：中国化工报公众号
- 2026年度化学生物学学科发展战略研讨会在北京召开 01  
来源：国家自然科学基金委员会
- 北京大学焦宁团队借助百年硒蒽试剂攻克烯炔制炔烃世界难题 01  
来源：北京大学公众号
- 国际能源署称全球石油市场面临史上最严重供应中断 02  
来源：中国化工报公众号
- 我国科学家用AI破译月球背面化学密码，成果登《自然·传感》封面 02  
来源：科技日报

## 封面文章

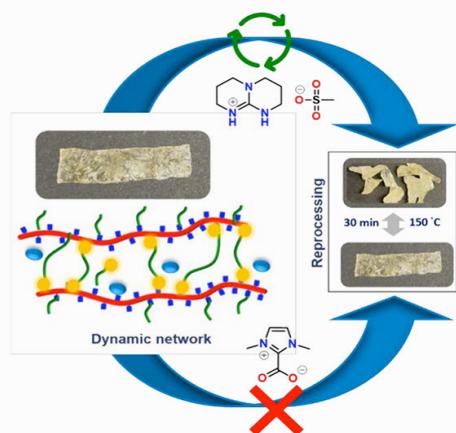
- ※ 你的废旧电池还深深地躺在抽屉里吗？3分钟了解回收黑科技 03  
作者：舒海平，谢汶呈，罗泽龙，张剑豪，曲兵

## 科技新闻

- “大胆闯、大胆试”！省委书记试乘体验氢能列车 12  
来源：政知见公众号
- 两会建议：将部省合建高校纳入教育部直属 14  
来源：软科公众号
- 上新！又发现 4 个新矿（有稀土） 16  
来源：人民日报公众号
- 先别急着戒碳水！这种“宝藏碳水”吃对了，有助减肥、护肝 17  
来源：人民日报健康客户端公众号
- 血清素在心理健康中的作用，远比我们此前认知的更为复杂 20  
来源：C&EN
- 科普解读：什么是热敏纸 27  
来源：chemistryworld

## 科普大赛

- ※ 食品防腐剂肉桂酸变味之谜 31  
作者：解博涵，毛欢，江洪



39



17

## 科研进展

- PS&T：聚酯的潜伏性动态重塑：封端胺和 N- 杂环卡宾作为触发催化剂 38  
来源：高分子科学与技术 PS&T 公众号
- ASEM 封面文章 | 长春应化所谭乐慧团队：仿生自由基共聚合纳米薄膜实现脑脊液离子动态的长期在体监测 41  
来源：先进传感器与能源材料 ASEM 公众号

**主办单位：**中国化学会 中国科学院长春应用化学研究所  
刊 期：半月刊  
主 编：杨小牛（中国科学院长春应用化学研究所）  
副 主 编：刘正平（北京师范大学）  
编辑部主任：王重洋  
总 编 辑：孙智权 副 总 编 辑：余婉宁  
编 辑：陈雨婷、朱真逸 版 面 设 计：许 霞  
联系电话：0431-85262016  
电子邮箱：hctx@ciac.ac.cn  
公 众 号：Chemical Newsletter  
投稿网址：<https://www.scicloudcenter.com/CN/>  
电子版网址：<https://www.chemsoc.org.cn/library/newsletters/>

**中国化学会秘书处**  
地 址：北京市中关村北一街 2 号  
联 系 人：郝江涛、王亚茹  
联系电话：010-82449177

来源：中国化工报公众号

## 全球单体最大煤制乙二醇项目开工，千亿级煤化工产业集群落地新疆

2026年3月20日，吐鲁番市千亿级煤化工新材料一体化项目一期工程——240万吨/年高品质纤维用煤制乙二醇项目，在新疆吐鲁番经济开发区正式开工建设。

该项目由浙江恒逸集团投资，总投资1500亿元，分两期打造“煤炭—乙二醇—聚酯新材料”一体化产业集群。本次开工的一期项目投资257亿元，为全球在建单体规模最大的高品质纤维用煤制乙二醇项目，采用先进煤气化与合成气制乙二醇技术，主产240万吨/年聚酯级乙二醇，副产DMC、煤基乙醇等高附加值产品，并配套CCS碳捕集封存、绿电耦合等低碳技术，推动煤炭向高端化工原料、化纤新材料转化。

原文链接

<https://mp.weixin.qq.com/s/feqOK53aCOeFk1nABOBtYA>

来源：国家自然科学基金委员会

## 2026年度化学生物学学科发展战略研讨会在北京召开

3月14日~15日，由国家自然科学基金委员会化学科学部主办、国家纳米科学中心承办的2026年度化学生物学学科发展战略研讨会在北京召开，会议以“载体化学生物学：机遇与挑战”为主题。国家自然科学基金委副主任吴骊珠、化学科学部常务副主任杨俊林出席会议，来自高校、科研院所、医院及企业的相关领域专家代表参会。吴骊珠传达了习近平总书记对自然科学基金委工作的重要指示，强调化学生物学在多学科融合中持续拓展知识边界，期待与会专家凝练关键科学问题、研判发展趋势，推动我国化学生物学研究跻身世界前列，更好服务人民生命健康。杨俊林勉励科研人员产出更多原创性、引领性、颠覆性成果，明确领域现阶段重点任务。本次会议围绕三大核心议题开展专题报告与研讨，为载体化学生物学高质量发展奠定了坚实基础。

原文链接

<https://www.nsf.gov.cn/p1/3381/2821/121131.html>

来源：北京大学公众号

## 北京大学焦宁团队借助百年硒蒽试剂攻克烯炔制炔炔世界难题

3月16日，北京大学药学院焦宁教授课题组在《自然》在线发表研究成果，借助尘封130余年的硒蒽试剂，攻克了困扰科学界160余年的烯炔合成炔炔化学难题。传统烯炔制炔炔方法需高温强碱、适用范围窄，而团队基于“级联活化”策略，利用硒蒽试剂在弱碱温和条件下实现烯炔向炔炔的高效转化，该试剂制备简单、可回收循环使用，还能兼容多种敏感官能团，甚至实现烯炔顺反异构体的互相转化与精准分选。这一突破首次实现以商品化和天然来源烯炔快速制备炔炔，拓宽了炔炔合成路径，有望优化精细化学品供给结构，为医药、农药、材料等领域提供更经济的炔炔来源，也为分子合成与新药研发开辟新路径。该研究由2022级直博生蒙骏鸿为第一作者，焦宁教授为通讯作者，获国家自然科学基金等项目支持。

原文链接

[https://mp.weixin.qq.com/s/jh-WejsONeV\\_FbYK6uM-kw](https://mp.weixin.qq.com/s/jh-WejsONeV_FbYK6uM-kw)

来源：中国化工报公众号

## 国际能源署称全球石油市场面临史上最严重供应中断

3月12日，国际能源署（IEA）在月度报告中指出，受中东地区持续冲突影响，全球石油市场正面临有史以来最严重的供应中断。因霍尔木兹海峡航运几近中断，海湾国家石油产量已削减至少1000万桶/日，超300万桶/日的炼油能力被迫关闭，而冲突前该海峡日均运输原油及石油产品约2000万桶，目前运输量已降至极低水平。报告预计3月全球石油供应将减少800万桶/日，超400万桶/日的炼油产能面临风险，柴油、航空煤油市场尤为脆弱；液化石油气与石脑油供应量的大幅下降，还将迫使石化厂削减聚合物产量，进一步加剧海湾地区石化产品供应短缺。尽管哈萨克斯坦、俄罗斯等非欧佩克+产国产量提升部分缓解了供应紧张，但无法完全抵消市场压力，IEA同时预计中东冲突将导致3~4月全球石油需求较原预测减少100万桶/天，冲突持续时间与霍尔木兹海峡航运中断时长，是影响能源市场和整体经济的核心因素。

原文链接

<https://mp.weixin.qq.com/s/YkUjRsJSiokib1BCMdWCag>

来源：科技日报

## 我国科学家用AI破译月球背面化学密码，成果登《自然·传感》封面

2026年3月19日，同济大学联合中国科学院上海技术物理研究所等单位，基于嫦娥六号月背样品数据，构建AI反演模型，首次高精度绘制月球背面铁、钛和镁等六大主量元素分布图，揭示南极-艾特肯盆地深部物质暴露特征，为未来采样选址提供科学依据。

原文链接

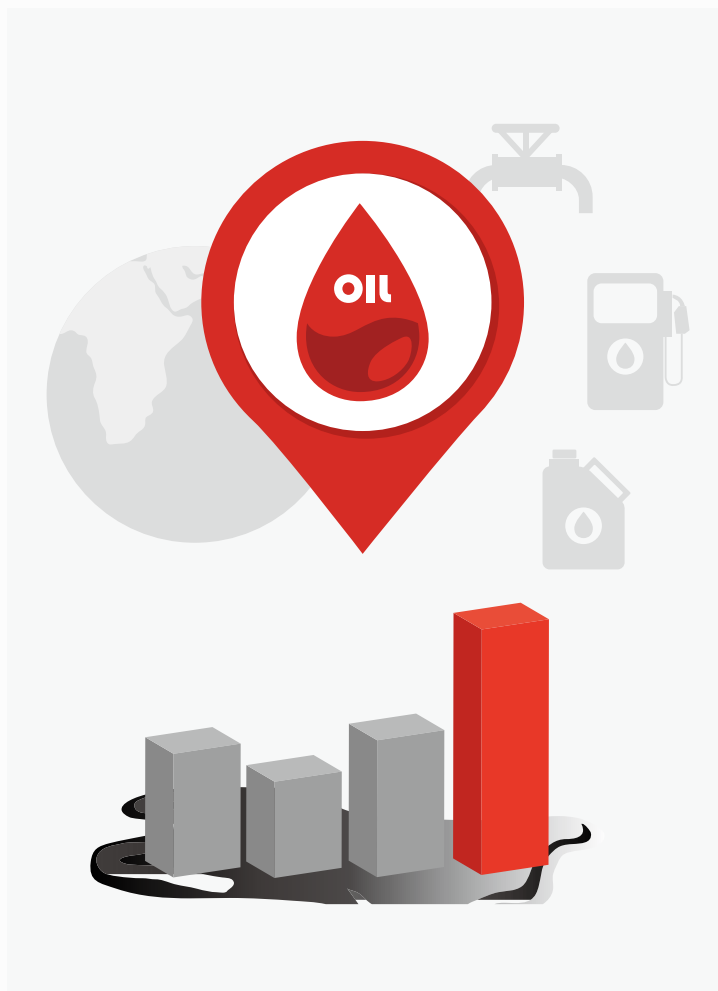
[https://app.kjrb.com.cn/app/template/displayTemplate/news/newsDetail/7/481696.html?isShare=true&qq\\_aio\\_chat\\_type=2&xyt=1773887041760](https://app.kjrb.com.cn/app/template/displayTemplate/news/newsDetail/7/481696.html?isShare=true&qq_aio_chat_type=2&xyt=1773887041760)


Image by studiogstock on Freepik

作者：舒海平，谢汶呈，罗泽龙，张剑豪，曲兵；Email: 1851655954@qq.com

# 你的废旧电池还深深地 躺在抽屉里吗？

## 3分钟了解 回收黑科技

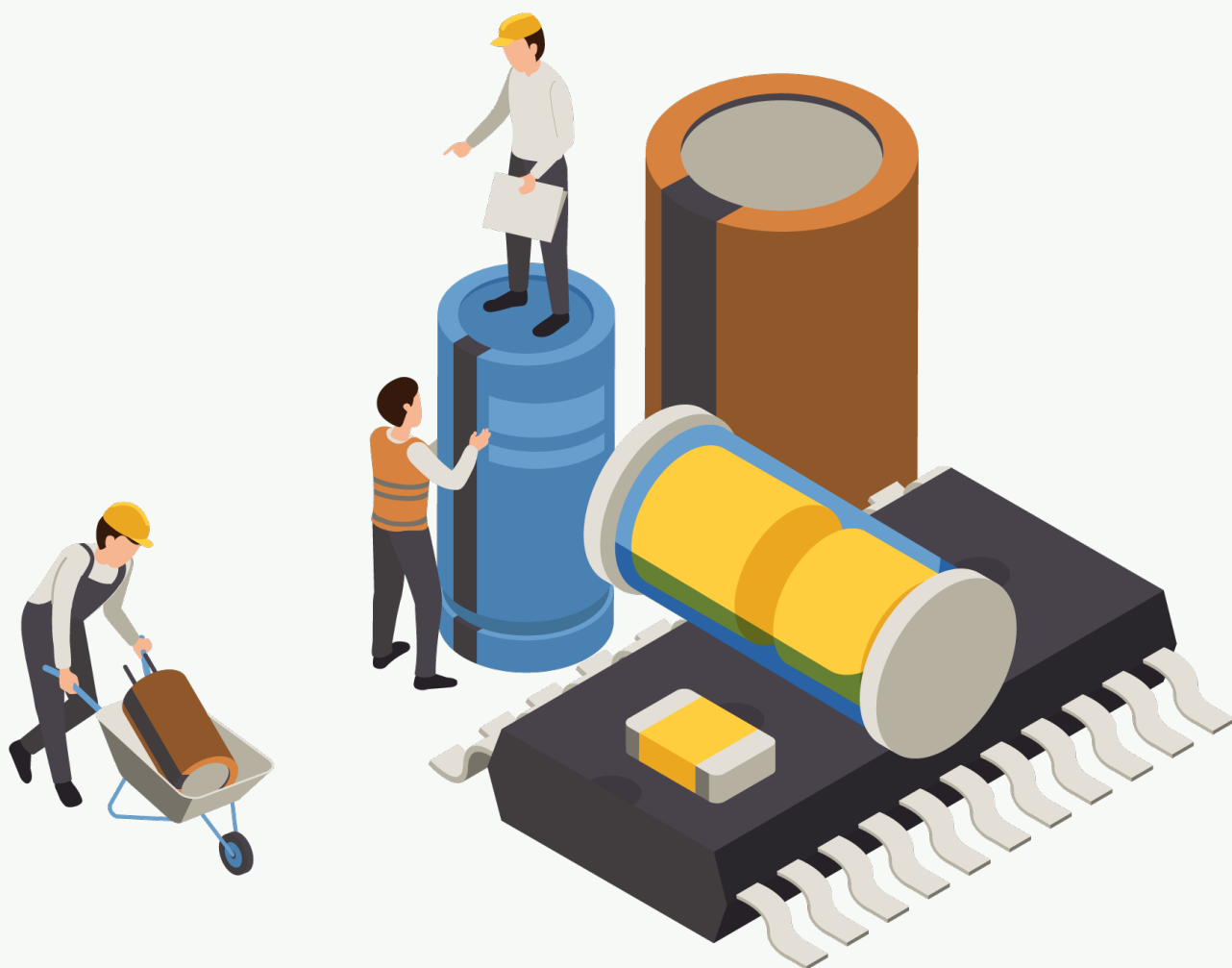


Image by macrovector on Freepik

## 引言

近期，“上海某小区因废旧充电宝自燃引发火灾”又登上热搜，废旧电池回收标语再次映入大众视野。“废旧电池应该如何处理掉？仅仅扔到抽屉或垃圾箱里吗？”。带着这样的疑问，让我们开启废旧电池回收的知识小课堂。

当前，废旧电池回收已成为新能源汽车与电池产业实现“降本增效、资源循环”的关键环节，更是支撑行业绿色可持续发展的重要抓手。在政策层面，七部委联合印发的《电动汽车动力蓄电池回收利用技术政策》已明确确立“谁产出谁负责，谁污染谁治理”的核心原则，这一纲领性文件直接将动力电池生产企业与汽车制造企业纳入回收责任主体范畴，要求其承担起从电池生产到退役回收的全生命周期管理责任<sup>[1]</sup>。

从产业实践来看，布局该领域的市场主体呈现多元化特征—除了宁德时代、比亚迪等头部电池企业，容百科技、当升科技等正极材料企业和格林美、富奥智慧能源等传统节能环保企业也凭借固废处理经验积极入局。为规范行业发展，工信部已先后公布四批符合《新能源汽车废旧动力蓄电池综合利用行业规范条件》

的企业名单，累计 88 家企业入选；2023 年 11 月，第五批名单正式进入公示阶段，新增 68 家企业，至此行业核心骨干企业数量已突破 150 家，为回收体系落地提供了重要支撑。

从未来市场潜力来看，随着新能源汽车保有量的持续攀升，动力蓄电池的退役量将进入快速增长期，这为回收产业带来了广阔的市场空间。从电池类型的回收价值差异来看：三元锂电池因含钴、镍等贵金属，回收利润率始终处于较高水平；磷酸铁锂电池虽有价金属含量较低、单吨回收利润偏薄，但近年来凭借“成本低、安全性高”的优势，在动力电池市场的占比已呈现“回归式增长”，其回收核心聚焦于锂、铁等元素—考虑到锂资源的战略重要性与铁元素的规模化需求，磷酸铁锂的长期回收潜力尤为突出；此外，干电池、钴酸锂电池（多应用于消费电子）因有价金属总含量较高，同样具备显著的回收再利用价值。

从市场规模数据来看，我国废旧动力锂电池回收市场已展现出强劲增长势头。2018 年，通过回收锂、钴、镍、锰、铁和铝等金属创造的市场规模已突破 53 亿元；工信部数据显示，2025 年中国动力电池退役量将达 78 万

吨，2030 年攀升至 230 万吨。根据行业预测，到 2030 年这一规模有望飙升至千亿元，相当于平均每个中国人每年因电池回收相关产业间接创收 75 元，这笔钱足够体验一次“星巴克”下午茶—这也意味着，废旧电池回收产业有望成为新能源领域新的增长极<sup>[2]</sup>。

在废旧电池回收的技术应用方面，国外一直走在前列，如：美国、日本和丹麦等。已有相关的学术研究和文献报道，废旧电池中金属的回收方法多集中在火法处理技术（干法）和酸洗技术（湿法），上述工艺会造成二次污染、高能耗以及成本高等难题。国内对废旧电池的处理主要侧重于“资源化回收+全过程监管”，但存在正规回收渠道窄、小作坊无序拆解导致污染、回收率偏低、监管信息断链等问题<sup>[3]</sup>。

## 1. 废旧电池环境风险

你知道废旧电池有哪些危害吗？

废旧电池对环境和人类健康危害性极大，其造成得环境污染具有长期性和隐蔽性。随意丢弃后，电池外壳破损会导致重金属（如汞、镉、铅）渗入土壤，破坏土壤结构、降低土壤肥力，严重时甚至使土地丧失种植能力。这些

重金属还可随雨水污染地表水及地下水,例如:一节一号电池足以污染 60 万升水,相当于一个人一生的饮水量;而铅酸电池中的电解

液(硫酸)泄漏会使水体呈强酸性,严重危害水生生物生存。

更严重的是,重金属通过食

物链“生物富集”,浓度逐级放大,最终通过受污染的农作物、水源和空气等进入人体,造成多器官组织损伤(具体危害见表 1)。

表 1 废旧电池成分对生物和环境的危害汇总表

电池类型	主要有毒成分	毒性	关键危害特性
传统干电池(碳锌)	汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)	剧毒	汞易挥发,通过空气扩散,损伤神经,损害消化及生殖系统;镉、铅难降解,长期沉积,蓄积伤肾脑。造成农作物减产、破坏水生生态平衡。
充电电池(镍镉)	镉(Cd)、镍(Ni)	剧毒	镉是“致癌重金属”,镍易引发过敏反应。破坏水生生态结构和土壤生态平衡。
铅酸电池(汽车/电动车)	铅(Pb)、硫酸电解液	剧毒、强腐蚀	铅是“神经毒素”,硫酸具有强腐蚀性,易灼伤生物组织。破坏水生生态平衡,污染水体。
锂电池(手机/笔记本)	锂(Li)、钴(Co)、电解液	有毒	锂伤肾脑,遇水易燃烧爆炸;钴是“潜在致癌物质”,损心肺,电解液含有机氟化物,水解产生 HF 灼肺。导致周边农作物重金属超标,危害水生生物。

特别需要注意的是,锂电池因含高活性锂金属,在破损或高温下会燃烧爆炸(相关事故时有发生),燃烧会释放一氧化碳、氟化氢等有毒气体,将进一步加剧空气污染与消防安全隐患。

## 2. 国内外研究进展

近年来,世界范围内科研工作者们就废旧电池回收开展了一系列高大上的研究,你了解其中哪些呢?

当下,全球学术圈对废旧电池回收的研究热度持续攀升,众

多顶尖学者纷纷投身其中,力求攻克这一关乎资源循环与环境保护的关键难题。说到这儿,我们找几个具体例子感受一下吧!

### 2.1 国内研究现状

#### 2.1.1 关键技术突破

中国科学院袁浩然与杨军团队<sup>[4]</sup>合作开发的焦耳高温冲击活化技术(用瞬间高温“唤醒”废旧电池里的锂,就像微波炉快速加热食物一样高效),针对退役锰酸锂电池阴极材料与浸出渣磷酸铁,实现金属锂超高速浸出(浸

出率 99% 以上),并可升级回收为高能量密度的磷酸锰铁锂正极材料;西安交通大学郗凯教授团队<sup>[5]</sup>提出基于 Li<sup>+</sup> 准 Grotthuss 拓扑化学传输机制的策略(一种让锂离子“排队”快速通过通道的技巧),引入苯甲酸锂优化熔融盐体系,提高 Li<sup>+</sup> 传输速度,实现失效正极材料高效修复,再生材料电化学性能优异;中国石油大学(华东)吴明铂、顾鑫团队<sup>[6]</sup>开发了激光诱导高温热冲击技术(用激光当“超级加热器”,对目标材料进行“闪电式加热”),可在



数秒内剥离正极材料，同步实现高价金属还原等，其中钴、镍和锰的回收率超 97%，成本降低超 50%。

### 2.1.2 相关综述研究

黄等<sup>[7]</sup>提出聚焦产业发展路径，以资源复位为方向，从加强源头设计、完善标准等方面规范回收网络，强调国际合作与技术研发；苏等<sup>[8]</sup>探讨磁分离技术在电池回收预处理中的应用；郭等<sup>[9]</sup>讨论浸出液中金属离子分离提纯技术；李等<sup>[10]</sup>和谢等<sup>[11]</sup>关注特定电池类型回收，分别针对三元锂电池和磷酸铁锂电池，分析其回收技术的现状、不足与前景；黄等<sup>[12]</sup>介绍预处理、物理、化学和生物回收等方法，分析各类回收技术，指出组合工艺是未来热点；朱等<sup>[13]</sup>涉及新兴技术，阐述生物浸出、吸附等技术的核心机制与突破，认为其有望工业化应用。

## 2.2 国外研究现状

### 2.2.1 关键技术突破

英国法拉第研究所联合多所高校研发的超声波震荡分层技术（给混合物装了无数个“隐形小锤子”），利用物理分离原理使不同材料自动分层，在 NCM 电池测试中速度比传统方法快 100 倍，材料提取率达 80%，且无需粉碎处理，降低能耗和安全风险；德国明斯特大学团队<sup>[14]</sup>开发的干法机械回收技术，采用“机械研磨分离法”剥离阴极复合材料，所有材料可保持原始形态直接再利用，实现零污染闭环。

### 2.2.2 相关综述研究

Zhao 等<sup>[15]</sup>围绕废电池再生技术，聚焦锂离子电池失效机制，分析退化行为，梳理电池直接再生研究进展，强调其重要性；Biswal 等<sup>[16]</sup>全面综述废旧锂离子电池回收技术，重点分析直接回收、火法冶金和湿法冶金

等五种技术，比较其在回收效率、环境影响等方面的表现，指出挑战与未来方向；Rasoulnia 等<sup>[17]</sup>回顾上游的火法、湿法、生物湿法冶金及下游分离技术，分析工业级回收技术现状与趋势，提出未来研究方向；Vilas 等<sup>[18]</sup>总结先进锂离子电池从颗粒到电池尺度的失效机制，为回收提供指导，同时总结材料提取和直接再生的最新进展，展望未来挑战与策略。

## 3. 现有废旧电池回收工艺

“把废旧电池扔进可回收垃圾桶就是有效处理了！”事实果真如此吗？答案是否定的，“废旧电池扔进可回收垃圾桶”≠“有效回收”，需专业技术处理。

当前，废旧动力电池的回收利用研究主要集中于“梯次利用后再进行资源循环化”（具体流程见图 1 所示）。根据核心处理原理与技术路径的差异，行业普



【图 1】废旧电池的回收思路图解

遍将回收工艺划分为物理法、化学法与生物处理法三大类别<sup>[19-20]</sup>。三类技术在操作流程、环境影响及回收效率上各具特色。

### 3.1 物理法—破碎超人

物理法主要借助高温、机械力或溶剂作用实现电池组分的分离与初步富集，常见技术路径包括哪些呢？主要分为火法、机械破碎浮选法、机械研磨法及有机溶剂溶解法等（具体流程见图2）。“划重点！”，物理法通常仅能完成“组分分离”环节，俗称“开胃菜”——可通俗理解为“预处理步骤”，若需获取高纯度金属或化合物，往往需衔

接后续化学处理工序。

#### 3.1.1 火法

火法的核心技术是通过高温焚烧分解（通常温度高达800℃）实现双重目标。一是分解电极材料中的有机粘结剂（如聚偏氟乙烯PVDF），二是促使电池内金属及化合物发生氧化、还原或分解反应。反应过程中，挥发性金属（如锂）以蒸汽形式逸出，再通过冷凝、吸附等手段收集；非挥发性金属则以合金或氧化物形式留存于炉渣中。该工艺的亮点在于工艺简单、对废旧电池预处理要求低；但存在显著的短板包括能耗高，且温度控制难度大。

若温度过高，电池铝箔会氧化生成 $Al_2O_3$ ，降低金属回收率；此外，电解质（如六氟磷酸锂 $LiPF_6$ ）与电极有机成分燃烧时，会释放 $CO_2$ 、 $P_2O_5$ 和 $NO_x$ 等有害气体，易造成大气污染，且最终得到的合金纯度较低，需额外开展多轮净化除杂，进一步推高处理成本。

#### 3.1.2 机械破碎浮选法

该技术遵循“破碎—筛选—热解—浮选”的分步流程。首先通过破碎机设备对废旧电池进行破碎，再经振动筛、气流分选等装置初步分离出电极材料粉末（同时剔除壳体、隔膜等杂质）；随后将电极粉末置于马弗炉中进行低

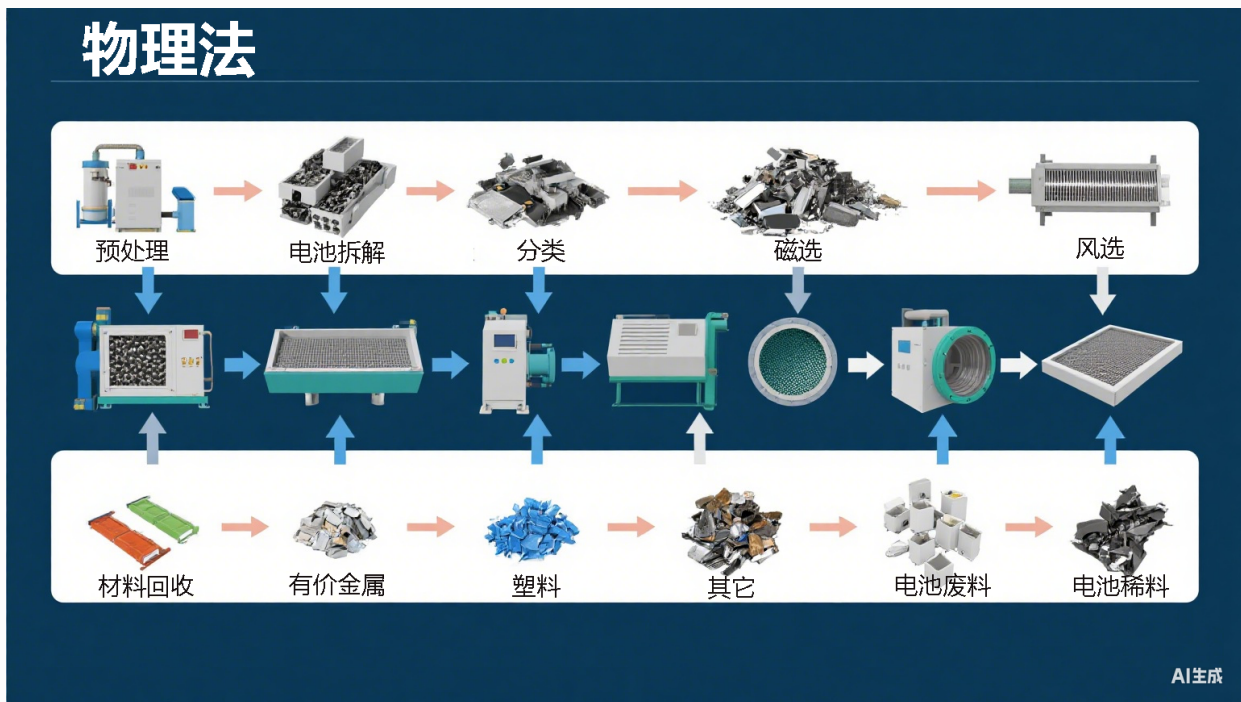


图2 物理法回收废旧电池工艺流程图（图片来源于网络 AI生成）

温热处理(通常 300~500 °C), 去除残留的有机粘结剂; 最后利用浮选技术(基于不同组分表面疏水性差异) 分离回收锂、钴、铁和锰等金属盐颗粒。该方法的亮点在于对上述金属的回收率可达 85% 以上; 但工艺局限性同样明显—机械破碎后需衔接高温热处理与多段浮选, 整体流程冗长, 设备投资与运行成本偏高, 且热处理过程中若控制不当, 仍可能产生少量有机挥发物。

### 3.1.3 机械研磨法

机械研磨法通过“机械力化学反应”实现资源回收。利用球磨机、气流粉碎机等设备使电极材料(如锰酸锂、钴酸锂、磷酸

铁锂) 与特定研磨料(如废塑料、碳酸盐、废矿渣) 在高速碰撞中发生物理化学作用, 促使电极材料转化为易分离的锂盐(如碳酸锂) 及其他金属化合物。该技术的创新点在于“以废治废”—采用常见的废塑料作为研磨助剂, 既降低了研磨料成本, 又实现了废塑料的资源化利用; 同时, 对锂盐的回收效率较高, 且无需高温或化学试剂, 环境友好性突出, 被视为极具推广潜力的物理回收技术之一。

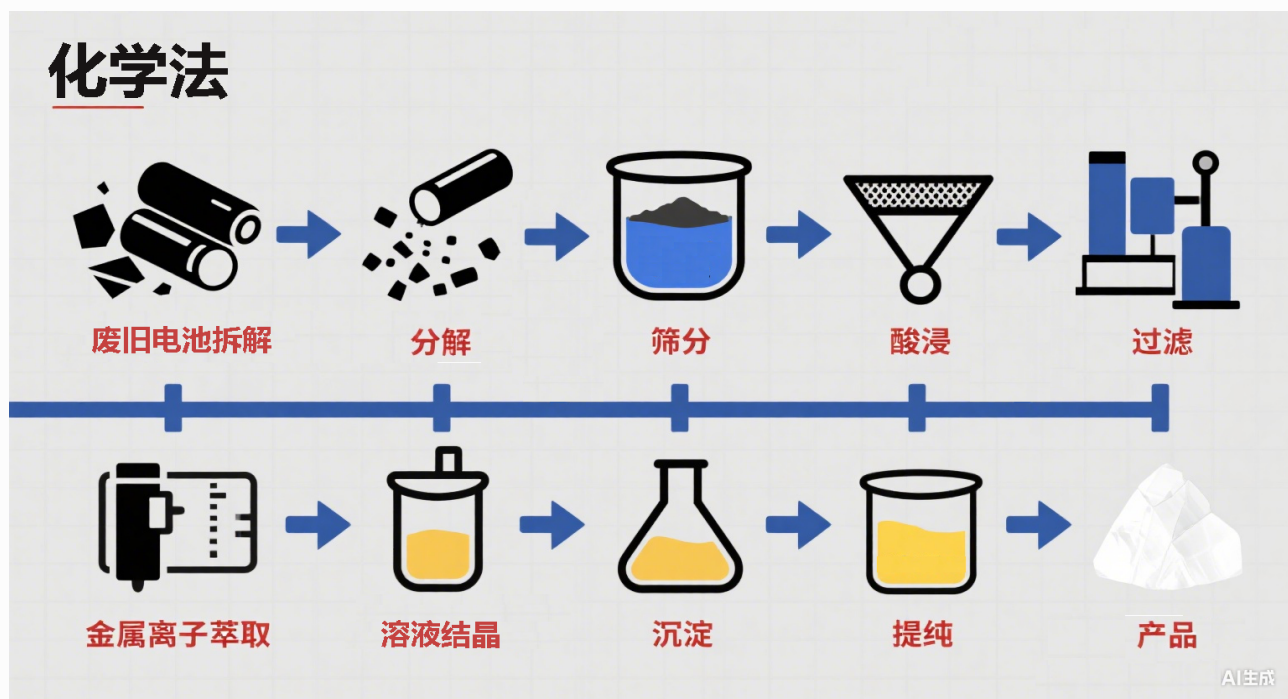
### 3.2 化学法——溶解魔法师

化学法的核心思路是“先浸出、后分离”。首先利用氢氧化钠、硫酸和双氧水等化学试剂,

将电池正极材料中的锂、锰、铁、钴和镍等金属离子溶解到溶液中(即“浸出”), 再通过沉淀、萃取、盐析和电化学等手段获得目标产品—高纯金属离子(即“分离”)。目前工业应用的是哪种方法呢? 现实中, 主流应用工艺为硫酸—双氧水混合体系, 因其浸出效率高、成本适中, 成为主流浸出方案, 俗称“C 位咖”; 此外, 电化学法和水热法等新型化学工艺凭借独特优势(具体流程见图 3), 近年来也逐步进入研究与中试阶段, 备受行业关注。

#### 3.2.1 沉淀法

沉淀法是回收废旧电池的常用湿法工艺, 核心是通过化学试



① 【图 3】化学法回收废旧电池工艺流程图 (图片来源于 ChatGPT AI 生成)

剂与目标金属离子反应，生成难溶性沉淀物，从而实现分离富集。其关键流程是对经酸溶体系浸出得到的含有价金属离子的溶液进行净化除杂，最终将铁和钴等金属以草酸盐形式、锂以碳酸锂形式沉淀下来，经过滤干燥得到相应产品。其亮点是流程简单、设备投资低、易实现规模化生产，适用性广泛（对铅酸电池、镍镉电池、锂电池均适用），劣势则包括需消耗大量化学试剂、产生需额外处理的废水，若 pH 控制不当易降低金属纯度，且不适用于单独回收锂。

### 3.2.2 萃取法

萃取法通过萃取剂对不同金属离子进行分离回收，核心是利用萃取剂的选择性，将浸出液中目标金属离子转移至有机相，实现与杂质及其他金属离子的分离提纯。该法亮点是可以取得较高的回收率，且回收产品纯度较高；但是缺点也同样突出，流程较长、设备投资高、不适用于低浓度金属溶液、对钙、镁杂质敏感，影响分离效果；大量化学试剂与萃取剂的使用不仅增加成本，还可能存在溶剂泄漏风险。因此，开发高效低毒萃取剂、引入超声辅助（降低反应温度、缩短反应时间），成为该技术的主要优化方向。

### 3.2.3 盐析法

盐析法核心是通过在溶液中加入其他盐类（高浓度电解质），使溶液达到过饱和状态，降低目标盐的溶解度、破坏溶液稳定性，最终促使目标盐类结晶析出，从而实现有价金属的回收。该工艺亮点是工艺简单、盐析剂成本低廉，可针对性解决锂盐溶解度较高、难直接沉淀的问题，且操作条件温和；缺点是选择性差，仅适用于回收锂（无法分离钴和镍等金属），需先对混合液进行除杂处理，同时会产生含高浓度盐的废水，需配套处理以避免二次污染，产物纯度也需通过后续重结晶进一步提升。

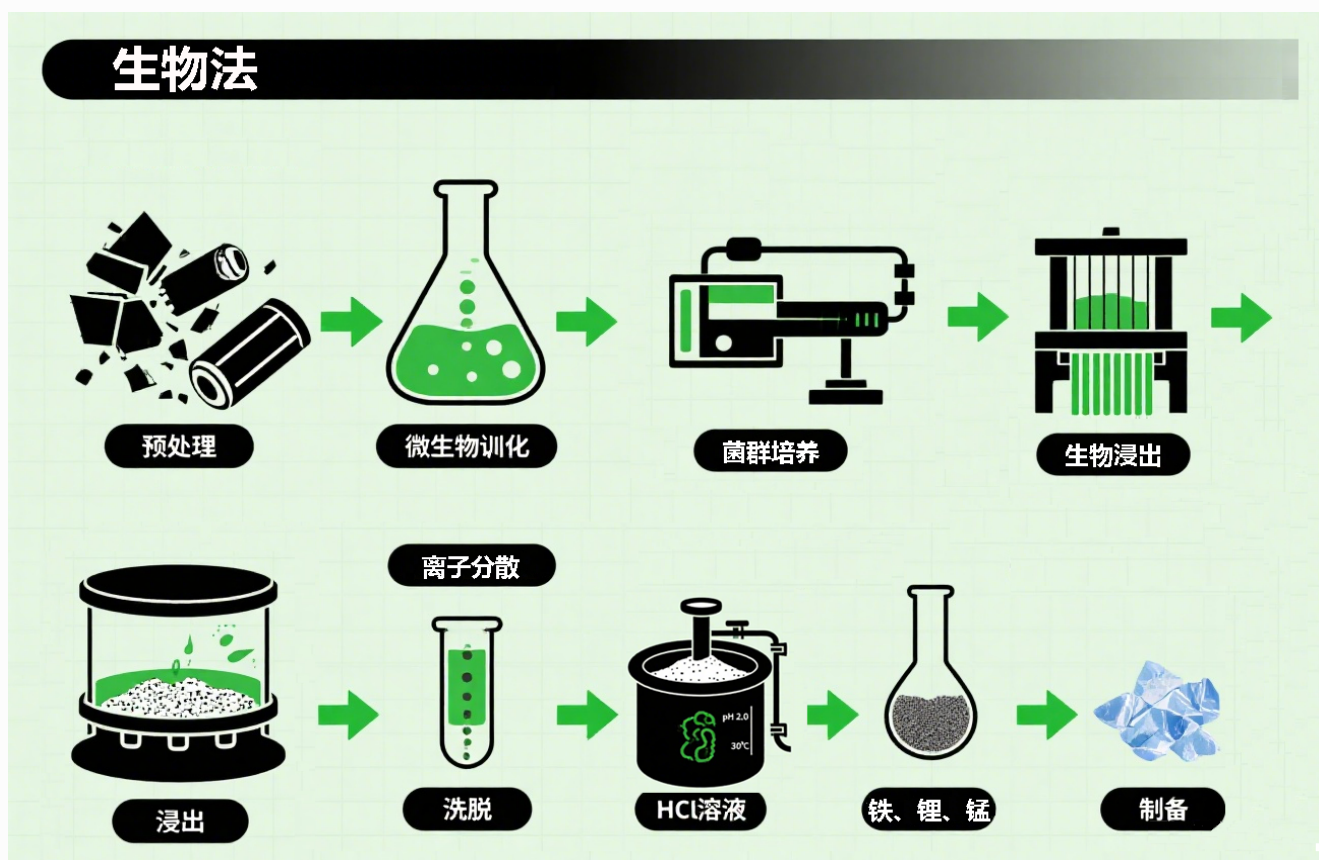
### 3.2.4 电化学法

电化学法核心是通过“电沉积”实现金属回收。首先将废旧锂电正极材料用酸溶解后，经净化除杂去除铁和铝等杂质，得到纯净的金属离子电解液；再将该电解液通入电解装置，通过施加特定电流，使铜、铁和锰等金属在阴极表面以单质形式析出，锂则留存于电解液中待后续回收。该技术的显著优势是“绿色提纯”——整个过程不引入新的化学杂质，废水排放量少，对生态环境影响小。但缺点在于能耗较高（需持续供电维持电解反应），且对浸出液纯度要求严格——若杂

质离子未完全去除，易在阴极形成副产物，影响回收有价金属品质，因此更适用于预处理工艺较为完善的高纯度浸出液。

### 3.3 生物处理法——微生物精灵

生物处理法（又称微生物浸出法）是近年来兴起的新型回收技术，俗称“小鲜肉”——“新兴技术代表”。你可能会问：“是不是类似异形一般，咔咔吃金属？”。答案是“差不多！”。其原理是利用特定微生物（如氧化亚铁硫杆菌和黑曲霉等）的代谢活动，将电池中的有价金属转化为可溶于水的化合物（如硫酸盐和硝酸盐等），实现金属离子与电极基体的分离；随后通过沉淀、吸附等手段从代谢体液中回收金属（具体流程见图 4）。该技术的最大优势是环境友好——无需高温条件与强酸强碱试剂，能耗低且污染小，符合“低碳回收”新趋势。但目前仍存在明显技术瓶颈，微生物对浸出环境（如温度、pH 值和氧气浓度等）的适应能力较弱，通常需将环境温度控制在室温（25~35℃），pH 值控制在 2~4，否则易导致微生物活性下降；同时，微生物代谢速率慢，整个浸出周期长达 12~16 天（实验室小型体系），生产效率低，这些因素共同限制了其工业化推广进程。



①【图4】生物法回收废旧电池工艺流程图（图片来源于自制+部分元件豆包AI生成）

综上所述，随着退役电池规模持续扩张，行业对经济高效、低碳环保的回收技术需求日益迫切。当前主流技术虽已实现工业化，但仍存在明显短板，物理法流程冗长、设备要求高；化学法则成本高、能耗大且易造成污染；生物法尚不成熟<sup>[21]</sup>。基于这些痛点，急需探索跨领域工艺融合的新路径，开发绿色浸出剂，在常温常压下高效溶出锂、钴、镍、锰等有价值金属，同时实现“以废治废、绿色环保”的双重目标。想象一下，如果这些金属能

回到新电池中，或许你手里的下一部手机，就藏着一颗“重生”的锂元素。

### 结语

大家日常使用的手机、汽车、家电中都藏着铜、铁、锂等多种金属。它们原本“躲”在矿石里，要靠火法冶金、湿法冶金和电冶金三大工艺才能将其“请”出来。因此，就说说其中的“黑科技”——湿法冶金。顾名思义，主要依赖“液体”发挥作用，最大本事是把废旧电池、旧电器零件这些“废品”中纯

度较高的有价值金属直接“泡”出来，转化为可再次利用的金属盐溶液。虽然过程中需要不少化学试剂，但那些“干活的液体”和副产品大多能循环使用数年，新产生的废料相对较少，符合提倡的低碳环保理念。随着新能源电池用量不断增加，国家也将出台更高的回收率法规，湿法冶金正好能大显身手，把废旧电池里的宝贵材料“变废为宝”——废旧电池并非垃圾，而是错放的“城市矿山”，而湿法冶金正助力其重返生产线、走上循环经济大道的绿色魔法师。

## 参考文献

- [1] 焦明辉. 考虑消费者回收偏好的新能源汽车废旧动力电池联合回收的决策研究[D]. 杭州; 杭州电子科技大学, 2025.
- [2] 余飞阳, 胡云云, 舒晨阳, 等. 我国废旧电池回收标准体系构建研究[J]. 质量探索, 2023, 20(2): 20-26.
- [3] 杨梦华, 岳丽宏, 王璐. 废旧电池回收工艺及模式研究现状[J]. 电源技术, 2023, 47(4): 430-433.
- [4] Zheng M T, You Y, Lu J. Understanding materials failure mechanisms for the optimization of lithium-ion battery recycling[J]. Nat Rev Mater, 2025, 10(5): 355-368.
- [5] He Y J, Jia K, Piao Z H, et al. Li<sup>+</sup> Quasi-grothuss topochemistry transport enables direct regeneration of spent lithium-ion battery cathodes[J]. Angew Chem Int Ed, 2025, 64(13): e202422610.
- [6] Cao N, Zhang Y, Gu X, et al. Efficient recycling of spent Li-ion battery cathodes by laser-induced high-temperature thermal shock[J]. Nat Commun, 2025, 16(1): 7169.
- [7] 黄晟, 杨振丽, 李振宇. 新能源汽车动力电池回收产业发展路径分析[J]. 化工进展, 2025. DOI: 10.16085/j.issn.11000-16613.
- [8] 苏晨曦, 王凯, 高磊, 等. 磁分离辅助废旧锂离子电池回收的研究进展[J]. 电源技术, 2025, 49(7): 1368-1375.
- [9] 郭战永, 任祥睿, 孙静静, 等. 废旧锂离子电池正极材料湿法冶金回收技术研究进展[J]. 材料导报, 2025. DOI:10.11896/cldb.25050168.
- [10] 李峻, 田阳, 杨斌, 等. 废旧锂离子电池正极材料有价金属回收研究现状[J]. 中国有色金属学报, 2024, 34(6): 1786-1808.
- [11] 谢玉昆, 夏宇博, 宋刘斌, 等. 废旧磷酸铁锂电池回收工艺研究[J]. 电源技术, 2024, 48(10): 2000-2006.
- [12] 黄运正, 李亮, 刘煦晴, 等. 资源化回收利用废旧锂离子电池技术[J]. 现代化工, 2025, 45(9): 44-48, 53.
- [13] 朱思羽, 赵炫烨, 虞雯静, 等. 生物法回收电池关键金属研究进展[J]. 合成生物学, 2025. DOI: 10.12211/12096-18280.
- [14] Neumann J, Petranikova M, Meeus M, et al. Recycling of lithium-ion batteries-current state of the art, circular economy, and next generation recycling[J]. Adv Energy Mater, 2022, 12(17): 2102917.
- [15] Zhao Y, Du H, Kang Y G, et al. Motor recovery after stroke: a systematic review[J]. Nat Rev Mater, 2025, 10: 722-724.
- [16] Biswal B K, Zhang B, Tran P T M, et al. Recycling of spent lithium-ion batteries for a sustainable future: Recent advancements [J]. Chem Soc Rev, 2024, 53(11): 5552-5592.
- [17] Rasoulnia P, Chen Q, Yang X, et al. Recovery of valuable metals from end-of-life Li-ion batteries: Technologies, progress, and perspectives[J]. Resour Conserv Recy, 2025, 223: 108497.
- [18] Vilas G P. Lithium-ion battery critical materials sustainability[J]. ACS Energy Lett, 2025, 10(5): 2553-2558.
- [19] 何碧红, 谢伟雪, 陈臻, 等. 废旧动力锂电池正极材料回收技术研究进展[J]. 化工环保, 2024, 44(5): 601-608.
- [20] 吴彦, 马恩. 报废锂离子电池资源化回收再生技术研究进展[J]. 电源技术, 2025, 49(7): 1337-1353.
- [21] 王乔, 李海英, 汪小琪, 等. 废旧锂离子电池正极材料有价金属回收研究进展[J]. 化学通报, 2025, 87(4): 441-448.

# “大胆闯、大胆试”！ 省委书记试乘体验氢能列车

来源：政知见公众号；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/-iagJ3EEHb0VLssQNDyp5A>

3月18日，吉林省委书记黄强到中国第一汽车集团有限公司和中车长春轨道客车股份有限公司调研。

在中车长客公司，黄强察看转向架车间生产经营情况，试乘体验中车长客自主研发的氢能列车，听取应用推广进展汇报。

他说，要积极稳妥推进氢能列车试运行，在确保安全的前提下大胆闯、大胆试。

## 什么是氢能？

与煤、石油等可以直接开采的能源不同，氢能是氢和氧进行化学反应释放出的化学能，它通过风能、太阳能、煤炭、天然气等一次能源生产，是一种二次清洁能源，也被视为“21世纪最具发展潜力的清洁能源”。



氢能应用场景广阔，可用于清洁发电，开发氢能源汽车，能与天然气混合后为供暖提供保障，可发展低碳航空等。

我国氢能资源丰富，是世界上最大的制氢国。数据显示，截至2024年底，全国氢气产能超5000万吨/年，同比增长约1.6%；全国各地累计规划建设可再生能源电解水制氢项目超过

600个。

在“双碳”目标引领下，发展氢能是保障国家能源安全、实现绿色低碳转型的必然选择。

2026年政府工作报告提到，“设立国家低碳转型基金，培育氢能、绿色燃料等新增长点”；“十五五”规划纲要也提到，推动氢能等成为新的经济增长点。

交通是氢能作为能源属性应用的先导领域。作为我国老工业基地，吉林省近年来在氢能轨道交通领域持续发力，走在全国前列。

其领跑优势，首先源于资源禀赋。作为我国九大千万千瓦级风光发电基地之一，吉林绿电资源丰富，为绿氢规模化生产提供了低成本、稳定的能源保障。

其次，政策“加码”与制度创新为产业注入动能。2025年，长春、松原、白城入选国家能源领域首批氢能区域试点。全省实施光电、制储氢等10个聚力攻坚专项，部署关键技术攻关项目459个。

再者，雄厚的装备制造业基础提供了重要支撑。

作为我国重要的老工业基地，吉林省装备制造业基础雄厚，这里曾产出过新中国第一辆汽车、第一列铁路客车，诞生了一汽、吉化、长客等诸多大型企业。

黄强此次调研的中车长春轨道客车股份有限公司，是我国知名的轨道客车研发、制造、检修及出口基地，是中国地铁、动车组的摇篮。去年2月11日，吉



林省委书记黄强、省长胡玉亭也曾到该公司调研，试乘氢能市域列车。黄强说，要“让氢能市域列车奔驰在吉林大地”。

如今，吉林省从制氢、储氢到用氢的完整产业链已初步形成，为氢能轨道交通发展提供肥沃土壤。

“经过多年发展，我省氢能产业初具规模”，在此次调研中，黄强说，“特别是中车长客成功研制生产氢能列车，为氢能应用做足了充分准备。”

这既是对企业创新成果的肯定，也释放了吉林持续深耕氢能赛道的强烈信号。

面向未来，氢能仍是吉林省布局新赛道的重点方向。

《中共吉林省委关于制定吉林省国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》提到，抢占人工智能、氢能与新型储能等未来产业发展新赛道。加快氢能产业布局，构建“氢能+”产业生态。支持氢能城际列车等推广应用，着力打造氢能交通走廊。

在此次调研中，黄强说，要加快全省老铁路和旅游专线氢能化改造，成熟一段推进一段，让游客乘坐先进环保的氢能列车，行驶在长白山下、松花江畔的百年铁轨上，感受科技、自然、历史的融合之美。

“要在长春大冬会等重大赛事活动中大力推广氢能列车，既让世界看到吉林绿色发展的最新成果，又为中车长客开拓海外市场、打造新增长点创造良好条件。”

记者：孟亚旭

# 两会建议： 将部省合建高校纳入教育部直属

来源：软科公众号；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/36ZxLaxYIUeDvRtcXqEfhQ>



据山西大学新闻网消息，近日，全国人大代表、九三学社山西省委副主委、山西大学教授双少敏为中西部高等教育“鼓与呼”，建议将部省合建高校渐进式纳入教育部直属序列。

目前，我国有 14 所部省合建高校，分别是：河北大学、山西大学、内蒙古大学、南昌大学、郑州

大学、广西大学、海南大学、贵州大学、云南大学、西藏大学、青海大学、宁夏大学、新疆大学、石河子大学。

双少敏代表围绕“深化部省合建工作、以机制创新加快中西部高等教育振兴”，提出了 3 条具体建议：

### 1. 将部省合建体系性纳入国家高等教育布局顶层设计。

将部省合建高校深度融入京津冀协同发展、西部大开发等国家重大区域战略，支持其与地方产业群、城市群建立“校城联动、产教融合”的共生发展模式，使其真正成为中西部的人才中心、创新高地和产业升级的策源地。

### 2. 探索部省合建高校渐进式纳入教育部直属序列的路径。

建议将“推动将部省合建高校纳入教育部直属高校序列”写入国家“十五五”教育发展规划。制定科学、透明的准入标准与动态评估机制。可参照“双一流”建设遴选原则，重点考察高校在服务国家重大战略、拥有国内领先学科、培养高质量人才等方面的实际贡献与潜力。设立3~5年评估建设期，对达标高校分批次、渐进式地调整管理关系。

### 3. 对现有合建高校启动以“提质扩容”为核心的精准支持计划。

**学科与人才方面：**在国家学科目录动态调整、基础学科布局、新兴交叉学科培育中给予合建高校更多自主权与重点支持。实施“合建高校人才特区”政策，在国家级人才计划、编制、薪酬等方面给予特殊倾斜，并强化与对口合作高校的联合引才与培养。

**培养规模与结构方面：**有序扩大合建高校的优质本科招生规模，并显著增加其博士、硕士研究生特别是专业学位研究生的培养指标。

**资源保障方面：**推动中央财政通过转移支付等方式，并压实地方政府投入责任，重点支持合建高校改善办学条件（如学生宿舍、科研设施），保障其规模与质量协调发展。

来源：山西大学

# 上新! 又发现 4 个新矿 (有稀土)

来源: 人民日报公众号; 原文链接: [https://mp.weixin.qq.com/s/SNe4BB18pvUL-ZFy\\_1sXNA](https://mp.weixin.qq.com/s/SNe4BB18pvUL-ZFy_1sXNA)

自然资源部消息,我国新一轮找矿突破战略行动再添新成果,四川冕宁、甘肃宕昌发现固体矿产,分别是**稀土、萤石、重晶石、锑**。

矿业权人/地质勘查单位	中稀(凉山)稀土有限公司
项目名称	四川省冕宁县牦牛坪矿区稀土矿资源储量核实勘查
矿种	<b>稀土</b>
单位	稀土氧化物量 吨
资源量	9665612
探明资源量	1567985
控制资源量	4575765
推断资源量	3521862
发布日期	2026-03-09

矿业权人/地质勘查单位	中稀(凉山)稀土有限公司
项目名称	四川省冕宁县牦牛坪矿区稀土矿资源储量核实勘查
矿种	<b>萤石</b>
单位	CaF <sub>2</sub> 量 吨
资源量	27135429
探明资源量	2747778
控制资源量	
推断资源量	24387651
发布日期	2026-03-09

矿业权人/地质勘查单位	中稀(凉山)稀土有限公司
项目名称	四川省冕宁县牦牛坪矿区稀土矿资源储量核实勘查
矿种	<b>重晶石</b>
单位	BaSO <sub>4</sub> 量 吨
资源量	37227720
探明资源量	4895232
控制资源量	
推断资源量	32332488
发布日期	2026-03-09

矿业权人/地质勘查单位	甘肃三昌矿业有限公司
项目名称	甘肃省宕昌县瓦石沟一带银洞梁矿段锑矿资源储量核实
矿种	<b>锑</b>
单位	金属量 吨
资源量	51455
探明资源量	36011
控制资源量	-9255
推断资源量	24699
发布日期	2026-03-09

据了解,“十四五”时期,我国新一轮找矿突破战略行动交出亮眼成绩单:新发现 10 个亿吨级油田、19 个大型气田,铀、铜、金、锂、钾盐等关键矿产资源量大幅增长,西藏超亿吨级铜矿、山东莱州西岭超大型金矿、四川雅江亚洲最大单体锂矿等一批世界级资源基地相继浮出水面。

来源: 人民日报微信综合光明日报、自然资源部本期

编辑: 胡程远、阮可欣

# 先别急着戒碳水！ 这种“宝藏碳水”吃对了， 有助减肥、护肝

来源：人民日报健康客户端公众号；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/Y1luvS3Lklzbu7AL0RB6Qg>

说到减肥和控糖，很多人一听“碳水”就摇头。但今天要告诉你一个颠覆认知的消息：有一种特殊的碳水，不仅不会让你胖，反而是减肥、护肝的“加速器”，它就是——**抗性淀粉**！

近年来，多项研究揭示了藏在日常食物中的“抗性淀粉”。只要你吃对了方法，米饭、土豆也能变成你减肥路上的“好帮手”。

## 减肥、护肝，这种“抗性淀粉”到底神在哪？

简单来说，抗性淀粉是一种“抗消化”的淀粉。它不会在小肠被吸收，而是直接进入大肠，成为肠道有益菌的“美食”（益生元）。它天然存在于青香蕉、放凉的米饭、全谷物、薯类和豆类



人民日报健康客户端 任璇摄

等食物中。①

越来越多研究发现，这种“特殊成分”对健康的益处远超我们的想象。

### 1. 减肥“加速器”：调节菌群，

### 轻松掉秤

2024年，上海交通大学医学院附属第六人民医院的研究团队在《自然代谢》期刊发表的一项研究发现，抗性淀粉配合均衡饮食，能通过调节肠道菌群来帮助

缓解肥胖。

在为期 8 周的研究中，补充抗性淀粉的参与者平均体重减轻了 2.8 千克，同时脂肪量和腰围也显著减少。②

## 2. 肝脏“净化器”：降低肝酶，改善脂肪肝

肝脏健康同样受益于此。2023 年，该研究团队在《细胞代谢》上发表的研究表明，富含抗性淀粉的饮食可以改变肠道菌群组成，进而降低与肝损伤相关的甘油三酯和肝酶水平，有效减轻脂肪肝。③

## 3. 血管“清道夫”：调节血脂，改善异常

研究还发现，抗性淀粉组的参与者在总胆固醇、甘油三酯以及低密度脂蛋白等方面均有显著改善，有助于缓解血脂异常。③

## 4. 代谢“稳定器”：提升胰岛素的敏感性

研究证实，仅补充 8 周抗性淀粉，不仅能帮助肥胖人群减轻体重，还能显著改善其胰岛素抵抗。这些积极变化都与肠道菌群组成的优化密切相关。

## 日常生活中哪些食物富含抗性淀粉？

上述研究参与者、上海交通大学医学院附属第六人民医院内分泌代谢科主任医师贾伟平曾在

接受人民日报健康客户端采访时表示，长期的抗性淀粉摄入并结合平衡膳食的饮食习惯，对控制体重十分关键。①

抗性淀粉存在于很多天然食物中，以下几种富含抗性淀粉的食物，升血糖慢，饱腹感强，值得推荐。

### 1. 全谷物推荐

**食物：燕麦、甜玉米、大麦、小麦、高粱等。**

市面上未经加工的全谷类、种子类，一般含有抗性淀粉。一日三餐中建议保持 1/4 或者 1/2 全谷物的摄入，三餐中至少有一餐全谷物。

**小贴士：**单纯食用全谷物不易消化，与大米搭配更容易被接受。大米与全谷物按照 2:1 的比

例做成米饭或煮粥，口感更好，还能控制血糖。

### 2. 豆类

**推荐食物：鹰嘴豆、豌豆、大豆、黑豆、小扁豆、红豆、绿豆、斑豆等。**

早上可以喝豆浆，两餐之间可以吃鹰嘴豆或豌豆作为零食。主食注意增加杂豆。比如煮米饭时加入红豆、绿豆做成红豆饭、绿豆饭等。

**小贴士：**豆类单独食用容易造成胃部胀气。可将大米与豆类按照约 3:1 的比例做成米饭或粥食用，豆类需要提前泡煮一夜。这样既保证口感，又利于消化。

### 3. 薯类

**推荐食物：红薯、土豆等。**



① 人民日报健康客户端 毛圆圆摄

一日三餐中的一餐或者两餐，可适当地加入一些薯类。同时要减少其他主食的摄入量。

**小贴士：**煮熟或者烤后可以直接作为主食，也可以切块放入大米中同煮。市面上有红薯粉或者马铃薯粉做的红薯馒头或者马铃薯馒头，也是不错的选择。

## 日常增加抗性淀粉摄入掌握4个小技巧

### 1. 主食凉一凉再吃

米饭、馒头、土豆煮熟后冷藏，抗性淀粉含量会显著增加，升糖指数也有明显下降。再加热后，抗性淀粉也会部分保留，像米饭冷藏后重新加热，血糖反应仍比新鲜热米饭要低。比如，隔夜的炒饭就是一种兼具抗性淀粉和口味的选择。

高温状态，淀粉吸水糊化，抗性淀粉含量会降低，食物会更容易消化吸收，血糖反应也会变高。

### 2. 用水少的烹饪法

烘烤、微波加热等水量较少



① 人民日报健康客户端 任璇摄

的烹饪方式，能减少淀粉糊化，如烤土豆抗性淀粉含量高于煮土豆。这也是为什么建议大家用烤或微波方式复热冷藏过的米饭、馒头、面包。

### 3. 杂粮饭别煮太烂

另外，高压烹饪也会降低抗性淀粉含量。用压力锅煮得很黏稠的杂粮粥，抗性淀粉含量小于蒸得略筋道的杂粮饭。

### 4. 避免高油的饮食

还要提醒大家一点，别吃得

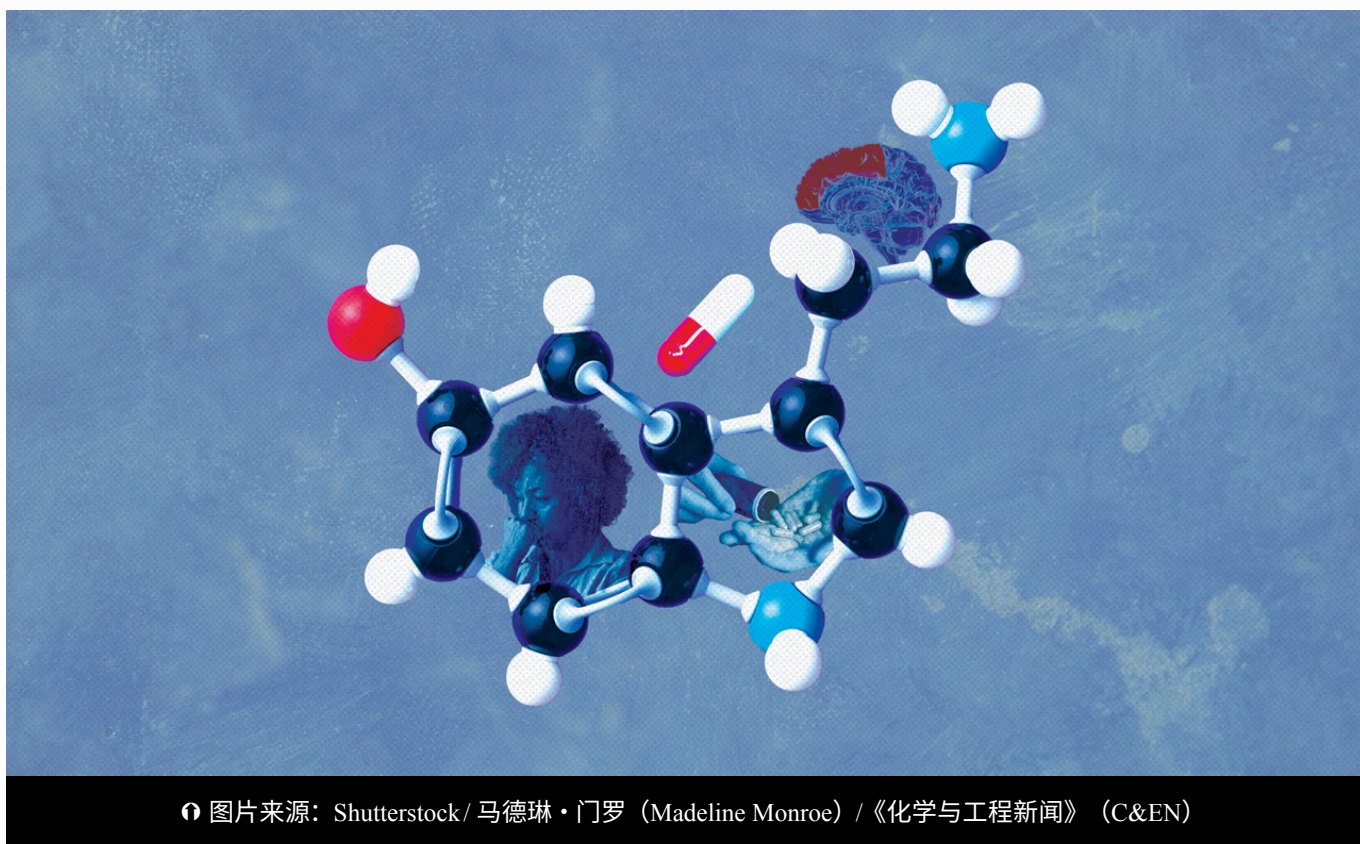
太油腻，高脂饮食会抵消掉抗性淀粉的健康益处。

同时，也要提醒大家理性对待，不要盲目摄入大量抗性淀粉，否则可能引起腹胀、恶心等肠道不适。⑤

### 写在最后：

抗性淀粉是锦上添花，我们需要的是在日常均衡饮食的基础上，有意识地选择富含抗性淀粉的食物，就能让我们的饮食更健康，改善身体状况。

本文综合自：① 2024-02-28 人民日报健康客户端《最新研究：食物中的抗性淀粉膳食纤维有望助力减肥》  
② Resistant starch intake facilitates weight loss in humans by reshaping the gut microbiota. Nature Metabolism. 26 February 2024. doi.org/10.1038/s42255-024-00988-y  
③ Resistant starch decreases intrahepatic triglycerides in patients with NAFLD via gut microbiome alterations. Cell Metabolism. SEPTEMBER 05, 2023.  
④ 2024-01-16 糖尿病之友杂志《这4类主食含有“抗性淀粉”，升血糖慢、饱腹感强，适合糖友吃》  
⑤ 2024-06-11 烟台毓璜顶医院临床营养科《一种能减肥的淀粉，你听过吗？》



图片来源: Shutterstock/ 马德琳·门罗 (Madeline Monroe) / 《化学与工程新闻》 (C&EN)

最新研究引发学界争论: 化学物质失衡是否会导致抑郁症、焦虑症及其他精神障碍

# 血清素在心理健康中的作用， 远比我们此前认知的更为复杂

来源: C&EN; 作者: Elizabeth Hlavinka; 翻译: 余婉宁;

原文链接: <https://cen.acs.org/pharmaceuticals/neuroscience/ssris-mental-health-debate/104/web/2026/03>

休斯顿 (Houston) 大半辈子都未曾经历过焦虑，一直觉得自己十分幸运。但也正因如此，2022 年惊恐发作首次出现时，他的状态从毫无异常骤然滑向彻底失控。有时发作会在工作时突然袭来，令他过度通气、呼吸困难；有时则会在深夜将他惊醒，浑

身布满冷汗。

“我之前根本不知道什么是惊恐发作。”因担心自身精神健康史会影响求职，休斯顿在接受《化学与工程新闻》采访时要求不公开其全名，“从完全无症状到骤然全面发作，这种感受难以想象。”

在一次惊恐发作后，休斯顿前往急诊就诊，接诊医生询问他是否服用过任何可能影响激素水平的物质。就在就诊约一周前，他刚停用了非那雄胺（finasteride）——一种具有激素活性的防脱乳膏。这场原本只为抑制脱发的尝试，最终演变成一场长达数年的抗争，只为让自身精神状态恢复至发病前的基线水平。

美国有相当一部分人群正受一种或多种慢性精神障碍的困扰，这类病症对美国食品药品监督管理局（US Food and Drug Administration, FDA）批准上市的药物均无治疗应答。这一群体既包括休斯顿这类药物诱导型惊恐发作患者，也涵盖了美国 280 万成年难治性抑郁症患者中的一部分。尽管精神疾病在人群中普遍高发，但多数此类病症的致病机制至今尚无明确定论，针对焦虑症、抑郁症等疾病研发的治疗药物也相对匮乏。

数十年来，神经递质血清素（serotonin）一直被认为是引发这类疾病的核心诱因之一，而选择性 5-羟色胺再摄取抑制剂（selective serotonin reuptake inhibitors, SSRIs），也是目前美国处方量最高的精神类药物。但科学界始终存在争议：血清素本身在这类疾病的发生发展中究竟参与到何种程度，甚至它是否真的与这类疾病存在关联。新的研究与治疗手段正不断揭示更精细的作用图景，让我们得以明确人体各生理系统在精神疾病发生中所扮演的角色。

长期以来，即便往最温和的方向说，“抑郁症等精神障碍由大脑内血清素的化学失衡引发”这一观点，也被认为过于简单片面。近期多项研究对这一流传已久的血清素假说（serotonin hypothesis）提出了质疑；与此同时，部分受不实信息影响，美国联邦政府正对已获批临床应用的血清素类治疗方案，开

展更为严格的审查。但另一方面，临床医生正在探索的新型疗法——比如迷幻类药物（psychedelics）——主要通过血清素系统发挥作用，这也为该神经递质在精神障碍中发挥作用的观点，提供了有力支撑。

## 关于血清素的争议

2022 年，《自然》（Nature）期刊上一篇颇具争议的综述，为这场关于血清素的争论再添热度。该论文旨在汇总血清素水平相关的研究数据，厘清各项研究的结论（DOI: 10.1038/s41380-022-01661-0）。

研究人员分析了多项对比抑郁症患者与健康人群血清素水平差异的研究。这些研究采用了多种检测手段，包括检测血液中血清素代谢产物（serotonin metabolites）的水平，以及通过脑部扫描，观察血清素受体（serotonin receptors）与 5-羟色胺转运体蛋白（serotonin transporter protein）的活性。

尽管这篇综述纳入的部分研究，确实提示血清素水平与精神疾病之间存在关联，但论文作者最终得出结论：“没有一致的证据能够证明血清素与抑郁症之间存在关联。”

**“说选择性 5-羟色胺再摄取抑制剂是靠提升脑内血清素水平起效的，这其实是个错误说法。**

**你说的到底是脑内的哪个功能区域？**

**又有谁真的测过这个区域的血清素水平？**

**根本没人测过。”**

安妮·安德鲁斯（Anne Andrews），加州大学洛杉矶分校（University of California, Los Angeles, UCLA）  
精神病学、化学与生物化学教授

“我们一直秉持这样一种假设：抗抑郁药等精神

类药物，是通过靶向作用于血清素失衡这类潜在发病机制起效的。”该研究的作者之一，伦敦大学学院（University College London, UCL）批判与社会精神病学教授乔安娜·蒙克里夫（Joanna Moncrieff）表示，“但事实上，这从头到尾都只是一个假设。”

这篇综述得到了媒体的广泛报道，同时也迅速遭到了精神病学界诸多学者的反驳。部分学者提出，该综述最终得出的结论，与其纳入的部分原始研究结论相悖；还有学者表示，业内早就清楚血清素假说是一种过度简化的理论，它从一开始就并非为了完整解释各类精神障碍。针对这篇论文结论的绝大多数反驳观点，都被系统整理进了一篇由35位研究者联合撰写的正式反驳文章中（*Mol. Psychiatry* 2023, DOI: 10.1038/s41380-023-02095-y）。

随着这场争议持续发酵，更多探索血清素与抑郁症关联的研究陆续发表，这些研究的结论与那篇综述相悖，反而为血清素假说提供了支撑。在2022年那篇论文发表后不久刊发的一项研究中，研究人员通过正电子发射断层扫描（positron-emission tomography, PET）发现，给抑郁症重度发作患者与无抑郁症的健康对照组志愿者同时服用一种通常能提升血清素水平的药物后，前者释放的血清素更少（*Biol. Psychiatry* 2022, DOI: 10.1016/j.biopsych.2022.10.012）。

尽管这项PET研究仅纳入了17例患者——且其中多数同时患有帕金森病，这一因素可能影响研究结果——但这种成像技术，能够帮助科学家更准确地观察抑郁症等疾病状态下，大脑内血清素水平的动态变化。

无论血清素是否为精神疾病的核心致病因素，值得注意的是，SSRIs已经帮助许多受抑郁症、惊

恐发作等疾病困扰的人群回归正常生活——这些疾病曾让他们难以正常工作、社交，甚至无法寻求进一步的治疗帮助。与单胺氧化酶抑制剂（monoamine oxidase inhibitors, MAOIs）、三环类抗抑郁药（tricyclic antidepressants）等更早的治疗药物相比，SSRIs的耐受性更好，过量服用致死的风险也更低。

但这类药物并非对所有人都有效。研究人员估算，至少30%的抑郁症患者对各类SSRIs均无治疗应答，这一数据清晰表明，血清素系统之外的机制，同样在疾病发生中发挥作用。

“血清素很可能在抑郁症的发生中起到了一定作用，但它并非核心致病因素。”上述反驳论文的合著者之一，牛津大学（University of Oxford）精神药理学教授菲利普·考恩（Philip Cowen）表示。

如今，围绕SSRIs的争议已经进入大众视野，随之而来的还有大量不实信息。2025年2月，唐纳德·特朗普（Donald J. Trump）政府甚至启动了一项针对SSRIs及其他精神类治疗手段的调查，暗指这类药物存在安全风险。

然而，这项调查似乎并未探究血清素在抑郁症中发挥的作用。相反，美国卫生与公众服务部（Department of Health and Human Services, HHS）部长小罗伯特·弗朗西斯·肯尼迪（Robert F. Kennedy Jr.），一直在传播与SSRIs相关的不实言论，夸大抗抑郁药的成瘾性，还将其与暴力行为进行错误关联。

## 化学失衡理论的起源

1967年，英国精神病学家亚历克·科彭（Alec Coppen）提出了抑郁症的血清素理论，认为大脑内血清素水平不足是该病的致病原因之一。这一观点部分基于他与两位同事4年前开展的一项研究。

该研究发现，服用当时最常用的抗抑郁药 MAOIs 的患者，在补充血清素的前体物质色氨酸 (tryptophan) 后，抑郁症状有所减轻。科彭据此提出假说：补充色氨酸提升了血清素水平，进而缓解了抑郁症状。

如果这一假说成立，那么减少色氨酸摄入理应该会诱发抑郁。但考恩在 2005 年开展的多项研究中发现，即便受试者的色氨酸水平被降至极低，无抑郁症病史的人群并未出现抑郁症状的变化，仅那些有抑郁症病史的受试者，出现了更剧烈的情绪波动。

“如果你本身存在抑郁症的其他风险因素，且曾有过抑郁发作史，那么血清素才可能产生影响。”考恩表示，“但单靠血清素水平偏低这一点，并不足以诱发抑郁症。”

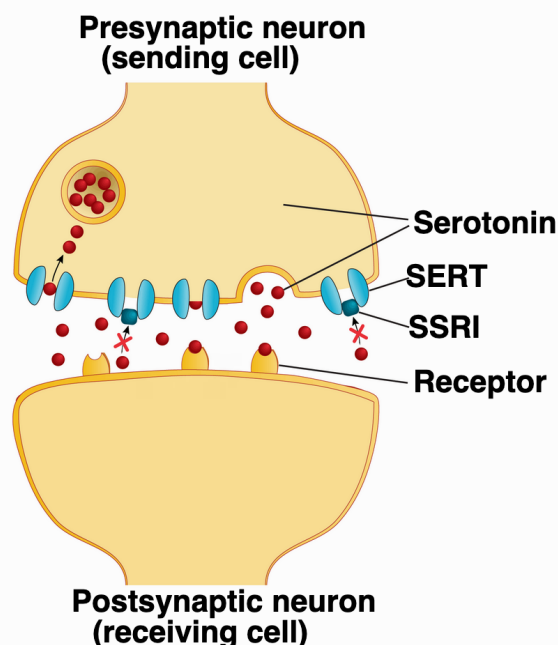
尽管血清素系统的作用机制复杂且精细，但“血清素缺乏导致抑郁症”这一简化的观点，却成了 SSRIs 营销宣传的核心内容。

MAOIs 类药物会提升血清素、去甲肾上腺素 (norepinephrine)、多巴胺 (dopamine) 等多种神经递质的水平，与之相比，SSRIs 的“选择性”更强，仅靶向作用于血清素系统。这类药物会阻断负责让血清素进入神经细胞的受体，使血清素在细胞外滞留，从而更长时间地激活血清素受体。

这一作用机制常被解读为 SSRIs 能提升血清素水平，但实际情况远比这复杂。例如，部分研究显示，经 SSRIs 治疗后，受试者血浆中的血清素水平反而出现了下降。

### 普遍认为的 SSRIs 起效机制

血清素相关争议的核心分歧之一，是直接检测大脑内神经递质 (neurotransmitters) 的活性，长期



① 选择性 5-羟色胺再摄取抑制剂被认为通过阻断 5-羟色胺转运体发挥药效。SERT 是一种蛋白质，可将突触间隙内剩余的血清素重摄取回神经元中。人们普遍认为，该过程会升高突触间隙内的血清素水平，进而发挥抗抑郁作用。图片来源：杨·H·库 (Yang H. Ku) / 《化学与工程新闻》/ Shutterstock

以来一直是一项技术难题。因此，多数研究依赖于对血清素的间接检测，例如通过检测色氨酸水平进行评估。但大脑就像一张相互连接的网络，增减某一种神经化学物质 (neurochemical)，都会触发一系列连锁反应，这使得我们很难将某一种生理结果归因于单一的生理系统。

“说选择性 5-羟色胺再摄取抑制剂是靠提升脑内血清素水平起效的，这其实是个错误说法。你说的到底是脑内的哪个功能区域？又有谁真的测过这个区域的血清素水平？根本没人测过。”加州大学洛杉矶分校精神病学、化学与生物化学教授安妮·安德鲁斯表示，“在这些复杂的适应性过程中，我们并不清楚究竟发生了什么。”

## 抑郁症的多种潜在发病通路

休斯顿的案例清晰表明，精神障碍的发病通路远比我们此前认知的更多。休斯顿使用的非那雄胺，原本并非设计用于影响血清素水平，目前也尚无明确结论证实其对血清素水平存在影响。这种防脱药物的作用机制，是阻断双氢睾酮（dihydrotestosterone, DHT）向睾酮（testosterone）转化的代谢通路。

休斯顿停用这款乳膏后，出现了非那雄胺后综合征（postfinasteride syndrome, PFS）——这是一组持续性的精神症状，已于2015年被美国国立卫生研究院（National Institutes of Health, NIH）正式收录确认。他表示，由于这是药物诱发的病症，他的精神科医生并未推荐使用SSRIs进行治疗。

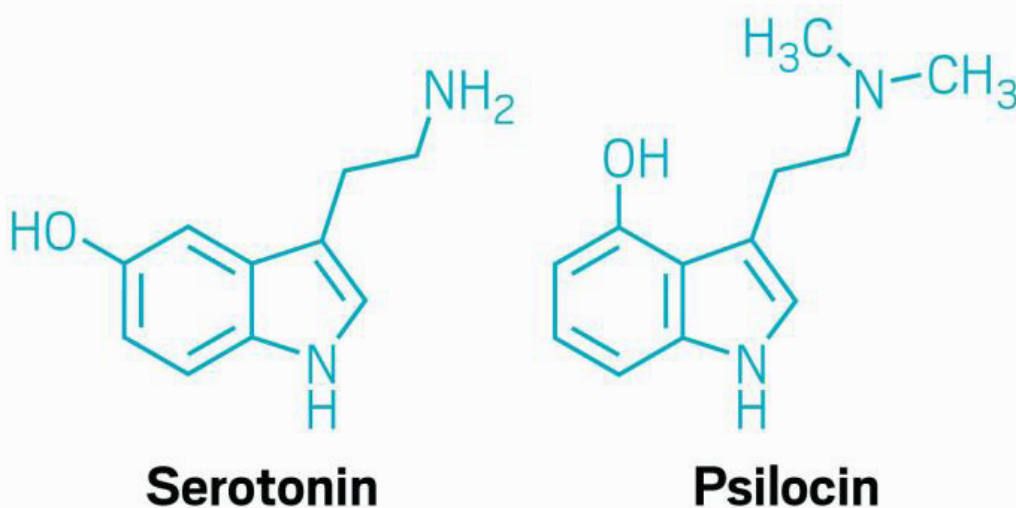
随着科学家开始探索可能影响抑郁症及其他精神障碍的替代治疗方案与神经化学通路，他们发现了这些疾病与大脑神经可塑性（neuroplasticity）的关联——神经可塑性是指大脑形成并重新组织新的突

触连接（synaptic connections）的能力。

例如，人们普遍认为长期使用SSRIs主要通过血清素系统起效，但研究也发现，该疗法可提升一种名为脑源性神经营养因子（brain-derived neurotrophic factor, BDNF）的蛋白活性，而这种蛋白具有促进神经可塑性的作用。其他具有抗抑郁作用的迷幻类药物，如氯胺酮（ketamine）与赛洛西宾（psilocybin），同样能提升BDNF的活性。

这一发现与抑郁症的临床表现相契合：抑郁症患者往往会陷入难以摆脱的负性思维模式。尽管这只是关于抗抑郁药起效机制的又一项假说，但其核心观点是，提升神经可塑性能够帮助大脑摆脱这类固有的思维模式。

基于这一思路，还有一项替代假说提出：SSRIs的抗抑郁作用，并非来自对血清素再摄取的抑制，而是源于我们的大脑对药物产生的适应性变化。



① 血清素与赛洛辛（psilocin）可结合同一种受体，二者的分子结构也具有相似性。抗抑郁候选药物赛洛西宾进入人体后，会代谢转化为赛洛辛。

即便神经可塑性与 BDNF 活性是精神疾病的核心驱动因素，也无法否定血清素的重要性。啮齿类动物研究显示，大脑内血清素的形成、功能发挥与存活，均依赖于 BDNF。其他精神疾病治疗手段也同样与血清素相关。学界早已证实，赛洛西宾可直接靶向作用于血清素受体，而氯胺酮可提升谷氨酸能系统 (glutamate system) 的活性，进而升高细胞外的血清素水平。

想要将血清素与人体其他生理系统完全剥离开来几乎是不可能的，因为它的核心作用，正是连接人体内各个相互独立的生理系统。血清素负责将大脑的信号传递至全身，指导身体对各类刺激做出反应。例如，它既参与机体对威胁的识别与应答，也参与调节情绪、血液中的血小板功能以及消化过程。

更让其作用机制变得复杂的是，目前已知人体细胞中存在 15 种血清素受体，数量是大脑内多数其他神经调质系统 (neuromodulator systems) 的两倍。但人体内仅有 2% 的血清素分布于大脑，8% 分布于血小板，剩余 90% 均存在于肠道中。

## 肠道血清素与精神疾病

消化道常被称为“第二大脑”，其结构极为复杂，所含神经元数量至少与脊髓相当。

许多心境障碍都伴随有肠道相关症状。以休斯顿为例，他惊恐发作时，还同时出现腹泻、胃酸反流与食欲减退的症状。

关于肠道菌群 (gut bacteria) 如何影响心境障碍 (反之亦然) 的相关理论认为，肠道内神经递质与激素的失衡，可能引发精神健康相关症状。精神病学界正围绕肠道菌群能否影响免疫系统这一问题开展大量探索，近期多项研究显示，肠道菌群可产生

短链脂肪酸 (short-chain fatty acids, SCFAs) 等物质，这类物质能够对大脑活动产生影响。

关于微生物群 (microbiota) 如何影响精神疾病的相关探索，源于一项名为《Transferring the blues》(《传递抑郁》) 的标志性研究。在这项研究中，爱尔兰科克大学 (University College Cork) 的研究团队将抑郁症患者的微生物群移植到啮齿类动物体内，观察到了与抑郁症相关的行为学改变 (*J. Psychiatr. Res.* 2016, DOI: 10.1016/j.jpsychires.2016.07.019)。这项研究也引出了反向验证的问题：将健康受试者的微生物群移植给抑郁症患者，能否改善其抑郁症状？

2023 年，休斯顿的状态陷入了绝境。饮食调整已经将他的惊恐发作频率从每天数次降至每周约 1 次，但症状始终没有完全消失。在首次出现惊恐发作约 1 年后，他决定尝试一种名为粪便微生物群移植 (fecal microbiota transplant, FMT) 的疗法。

FMT 的实施方式包括服用含有健康供体粪便的胶囊，或通过结肠镜 (colonoscopy)、鼻肠管 (nasal tube) 手动移植粪便微生物群。该疗法已被用于治疗消化道疾病，同时部分病例报告显示，其可缓解抑郁症与双相情感障碍 (bipolar disorder) 的症状。目前已有多项临床试验正在验证该疗法对抑郁症与强迫症 (obsessive-compulsive disorder, OCD) 的治疗效果，但仍缺乏大样本研究数据。“我知道这种疗法尚未获得 FDA 批准，但当初给我造成这一切的，恰恰是一款 FDA 批准的药物。”休斯顿说。

休斯顿对该治疗产生了免疫应答 (immune response)，治疗最初几天出现了发热、寒战，后续约一周内伴有腹泻。而在接受 FMT 治疗约 1 个月后，他的惊恐发作完全消失了。

由于微生物组 (microbiome) 的构成极为复杂, 研究人员正在肠道中寻找能够改善情绪的更特异性靶点。在 2025 年的一项研究中, 研究人员发现, 提升啮齿类动物肠上皮 (gut epithelium) 中的血清素水平, 与焦虑、抑郁症状的缓解相关 (*Gastroenterology*, DOI: 10.1053/j.gastro.2024.11.012)。

“通过靶向作用于肠上皮, 我们无需直接影响肠神经系统 (enteric nervous system, ENS) 或大脑即可治疗焦虑症与抑郁症, 从而避免可能出现的脱靶效应 (off-target effects)。” 该研究的作者、纽约大学疼痛研究中心 (New York University Pain Research Center) 主任、纽约大学朗格尼医学中心 (New York University-Langone Medical Center) 儿科胃肠病学家卡拉·格罗斯·马戈利斯 (Kara Gross Margolis) 表示。

科学家们再次发现了一种颇具应用前景的潜

在疗法, 而该疗法的作用机制, 很可能同样涉及血清素。

如果一项假说的价值, 是以它所催生的研究数量来衡量的, 那么可以说, 科彭提出的理论无疑是极具影响力的。

“很长一段时间以来, 我一直想跳出血清素相关的研究。” 2016 年那篇微生物群移植研究的作者约翰·F·克莱恩 (John F. Cryan) 表示, “但我根本做不到, 因为每次我刚把目光从血清素上移开, 它就会再次出现在我的研究中。”

本文作者伊丽莎白·赫拉温卡 (Elizabeth Hlavinka) 是美国得克萨斯州的自由撰稿人, 报道领域聚焦药物研发与精神健康。本文的早期版本首发于 (*ACS Central Science*), 原文链接: [cenm.ag/ssri](https://cenm.ag/ssri)。



Image by pch.vector on Freepik

# 科普解读：什么是热敏纸

来源：chemistryworld；作者：MASON WAKLEY；翻译：余婉宁

原文链接：<https://www.chemistryworld.com/news/explainer-what-is-thermal-paper/4023088.article>

热敏纸 (thermal paper) 被广泛用于收银小票、票据等场景。为了在不使用油墨的情况下显示文字，部分热敏纸材料会使用有毒化学物质，目前许多国家已开始逐步淘汰这类物质。为此，科学家们正研发替代方案——例如，瑞士洛桑联邦理工学院 (École Polytechnique Fédérale de Lausanne, EPFL) 的一个研究团队近期开发出一种生物质基热敏纸 (biomass-derived thermal paper)，其毒性显著更低。

那么，究竟什么是热敏纸？它为何有时会含有害的双酚类物质？又有哪些替代方案？

## 什么是热敏纸？

“热敏纸是一类在社会中应用非常广泛的纸张，适用于需要快速打印、易于使用的场景。”洛桑联邦理工学院研究团队的研究员克莱尔·布尔莫 (Claire Bourmaud) 表示。这类场景包括收银小票、登机牌、标签和票据等。在这些场景中使用油墨可能会出现沾污、晕染等问题，而频繁更换墨盒还会增加成本。

热敏纸中含有热激活染料 (heat-activated dye)，可通过变色显现文字，通常由白色变为黑色。这种纸张由多层结构组成：纸基层、包含染料与显色剂的热敏层，以及一层保护涂层，用于阻挡紫外线、水分和天然油脂对含染料层的破坏。

热敏纸受热时，热敏层会熔化，使染料与显色剂相互接触。大多数热敏纸使用隐色染料 (leuco

dye)，这类染料在受热或受光时会在无色与有色状态之间转换。热敏纸中的许多隐色染料含有内酯环 (lactone ring)，在被弱酸性显色剂质子化时会发生开环，形成可吸收并传递可见光的共轭  $\pi$  体系 (conjugated  $\pi$ -network)。

## 为何许多热敏纸含有双酚类物质？

双酚类物质在许多热敏纸中被用作显色剂 (colour developer)。双酚 A (bisphenol A, BPA) 和双酚 S (bisphenol S, BPS) 是目前热敏纸中最常用的两种双酚类化合物。

EPFL 团队的另一位成员马农·罗兰 (Manon Rolland) 解释说，这类化合物来源于原油，价格低廉且易于获取。她补充道，它们与染料的反应效率高，作用机制也已研究清楚；而且由于是白色粉末，不



① 热敏纸常被用于收银小票、票据和标签。图片来源：© Kobitler/Shutterstock

会在纸张上留下可见残留。

2020年，英国和欧盟规定，热敏纸中BPA含量不得超过纸张总质量的0.02%。瑞士紧随欧盟发布禁令，一项针对该禁令影响的研究显示，使用BPA的热敏纸比例从2013年的82%降至2022年的10%。但同期，作为替代品的BPS使用率却从3%上升至19%，尽管BPS在热敏纸中同样被禁用。

加斯曼（Gassman）表示，如果消费者从尚未禁用或管控较松的国家购买商品，仍可能接触到双酚类物质。例如，美国仅有康涅狄格、伊利诺伊和华盛顿州禁用热敏纸中的BPA；而包括中国、加拿大和印度在内的许多国家仍在使用的含BPA的热敏纸。

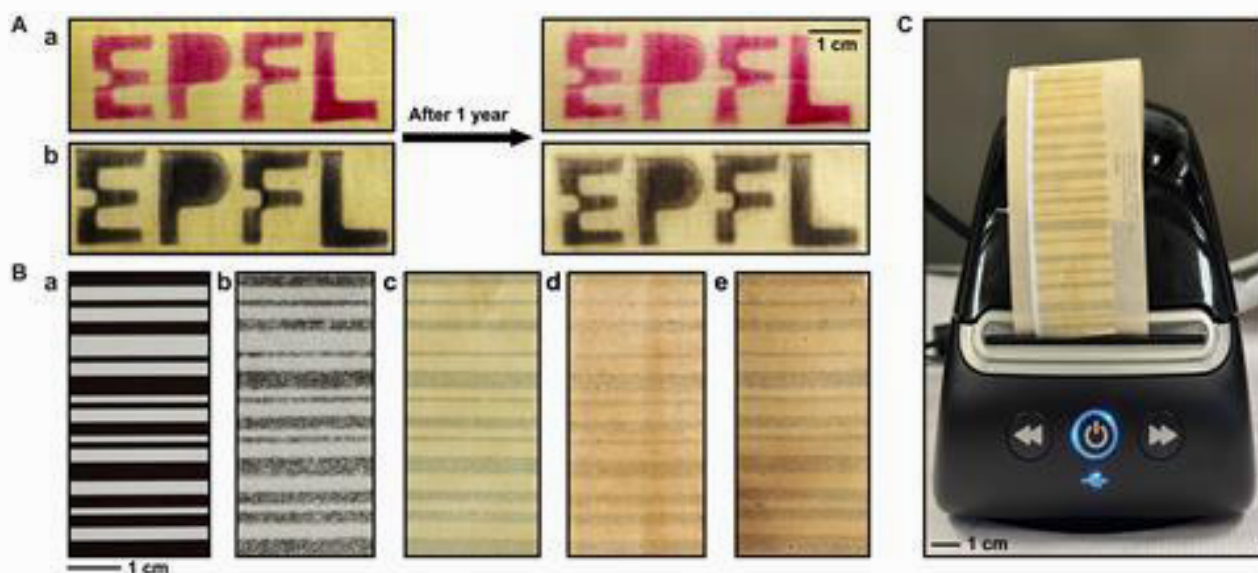
### 双酚类物质为何存在危害？

“最主要的问题是它们具有内分泌干扰作用

(endocrine disrupting properties)。”美国阿拉巴马大学伯明翰分校毒理学家娜塔莉·加斯曼（Natalie Gassman）表示。她解释道，这类物质会与雌激素、雄激素、甲状腺激素等受体结合，干扰激素的正常结合过程。“这会改变这些激素原本应调控的下游生理过程。”她补充说。内分泌干扰可能影响生育能力、免疫系统、代谢功能与认知功能。

另一个问题是，主要存在于肝脏中的细胞色素P450酶（cytochrome P450 enzymes）会将双酚类物质氧化生成醌类（quinones）。加斯曼指出，这类分子可直接损伤DNA，或引发影响基因表达水平的表观遗传改变。

双酚类物质还会产生活性氧，损伤细胞内的线粒体并加速其老化。加斯曼解释，这一过程既会干



图片来源：© Tom Nelis 等，《科学进展》（Science Advances）2026

扰脂肪酸代谢，也会促进脂肪细胞增殖，因此这类物质也被称为致肥胖物（obesogens）。

她补充说，双酚类类似物既可作为激动剂增强某种激素效应，也可作为拮抗剂发挥作用。“不同的双酚衍生物，其下游效应往往难以预测。”加斯曼说。不同企业、行业与国家使用的 BPA 类似物种种类繁多，也让这类化合物的效应研究变得更加困难。

### 哪些人群受热敏纸中双酚类影响最大？

大多数人接触含双酚类热敏纸的频率不高，接触量也在每日安全限值内。

但长期、反复接触会导致这类物质在体内蓄积，超出每日安全限值——欧洲食品安全局设定的 BPA 每日安全限值为每千克体重 0.2 ng。因此，收银员、航空公司登机牌打印人员、处理热敏面单包裹的物流人员等，都属于高暴露职业人群。

加斯曼表示，这类人群常会使用护手霜、免洗洗手液等护肤品，这会使双酚类物质经皮肤吸收的速率提高最高可达 100 倍。

土耳其一项研究显示，这类职业人群的平均暴露量约为欧洲食品安全局 2020 年设定的每日限值的 10 倍，不过该数据仅为单日暴露水平，并非长期整体暴露评估。该分析假设工作人员每次手持含双酚类热敏小票约 5 秒，这大致是这类物质渗入皮肤所需的时间。

### 有哪些替代方案？

尽管许多国家仍在使用的双酚类物质，但已有多种替代品。例如，目前常用的 Pergafast 201 是一种脲基显色剂（urea-based alternative），作用机制与双酚类相似，但风险更低。加斯曼补充说，卤代衍生物或高度共轭的衍生物（理想分子量超过 500 道尔顿）也是潜在选择，因为它们更难经皮肤吸收。但她也

指出，全面评估这类化合物的短期与长期健康影响仍需多年时间。

布尔莫表示，Blue4est 纸是另一种采用“完全不同技术”的方案。纸张蓝色表层中的微小气囊受热后塌陷，露出下方的黑色底层。该过程完全依靠物理变化，无需任何化学反应，从而避免了使用双酚等有害物质。

洛桑联邦理工学院团队开发出了生物质基热敏纸，其显色剂来源于木质素 (lignin)。研究人员使用商用热敏打印机对样品进行打印，并通过将样品置于阳光下暴晒一整年，评估其显色稳定性。

但她解释称，目前尚无同时满足无毒、生物质基、可持续三大要求的替代方案。洛桑联邦理工学院团队试图通过合成源自木质素的聚合物 (polymers)

与双酚酯 (bisphenol esters) 来解决这些问题——木质素是植物细胞中的一种结构物质。

这类化合物仍含有激活染料分子所需的酚基 (phenol group)，但与双酚类物质相比，聚合物的大分子量，以及酚基邻位甲氧基取代基 (methoxy substituents) 的存在，有助于降低化合物的毒性。

“我们的核心目标，是找到一种仅替换有毒双酚类物质，而热敏纸其余组分基本保持不变的配方。”布尔莫表示，“我们希望这能推动我们的技术落地应用，因为现有生产产线无需改变其生产工艺。”

“我们必须在社会发展中做好平衡：我们需要推广更可持续化学 (sustainable chemistry) 工艺，以规避这类暴露风险，但与此同时，我们也必须承担这类替代方案带来的成本。”加斯曼表示。

## 参考文献

1. T Nelis et al, *Sci. Adv.*, 2026, DOI: 10.1126/sciadv.adw9912.
2. A-L Demierre et al, *Reg. Toxic. Pharma.*, 2024, 146: 105526. DOI: 10.1016/j.yrtph.2023.105526.
3. A M Hormann et al, *PLoS One*, 2014, 9: e110509. DOI: 10.1371/journal.pone.0110509.
4. M O Akcetin et al, *Environ. Sci.: Adv.*, 2025, 4: 489. DOI: 10.1039/D4VA00132J.



# 食品防腐剂 肉桂酸变味之谜

作者：解博涵，毛欢，江洪；Email: [jianghong@mail.hzau.edu.cn](mailto:jianghong@mail.hzau.edu.cn)



## 引言

日常生活中常常见到食品腐败现象，例如面包因霉菌滋生出现霉斑、果蔬因酶促褐变与微生物侵染而腐烂变质。食品腐败不仅造成资源浪费，还常常引发食源性疾病。为防止食品腐败，食品防腐剂如苯甲酸钠、山梨酸钾等曾被广泛用作食品防腐剂，然而近年研究发现，这些防腐剂存在致敏、致癌风险<sup>[1-2]</sup>，导致其被多国严格限制或禁用。在此背景下，天然香料肉桂酸因其出色的抑菌能力、低毒性和可降解性脱颖而出。

尽管肉桂酸防腐能力优异，但实际使用中偶现异味问题<sup>[3]</sup>。有研究发现，某些耐酸酵母菌（如酿酒酵母）在含糖食品中可通过脱羧酶催化反应，将肉桂酸非氧化脱羧，使其转化为具有塑料气味的苯乙烯<sup>[4]</sup>。肉桂酸的降解不仅降低了其防腐效果，还会引发消费者对食品安全的疑虑。因此，阐明肉桂酸变味机制并寻求抑制策略，对提升肉桂酸应用价值至关重要。

本文通过实验验证了肉桂酸具有抑菌效果，同时从市售面条中分离得到了霉菌，探索了其肉桂酸的降解作用，并可视化验证了苯乙烯的生成。另外，探索了肉桂醛对抑制肉桂酸产生异味的可行性。

## 2. 肉桂的抑菌作用

肉桂是生活中常见的香料，在料理各种肉类和茶叶蛋时，常加入肉桂来增加食物香气。经肉桂料理过的茶叶蛋通常比未经肉桂料理的熟鸡蛋可以保存更长时间，这一现象揭示了肉桂除增香外，还具有抑菌防腐作用。

### 2.1 肉桂粉活性成分提取及抗菌效果测定

称取 2 g 左右肉桂粉置于索氏提取器中，乙醇作为提取剂，水浴温度设定为 90 °C，提取至虹吸流下的提取液基本无色。提取液冷却后，45 °C 旋蒸去除乙醇，残留粘稠物在冰箱保存。使用时取 10 mg 上述粘稠物溶于 5 mL 二甲基亚砜（DMSO）水溶液（体积比 1:1），然后稀释至 0.1%。

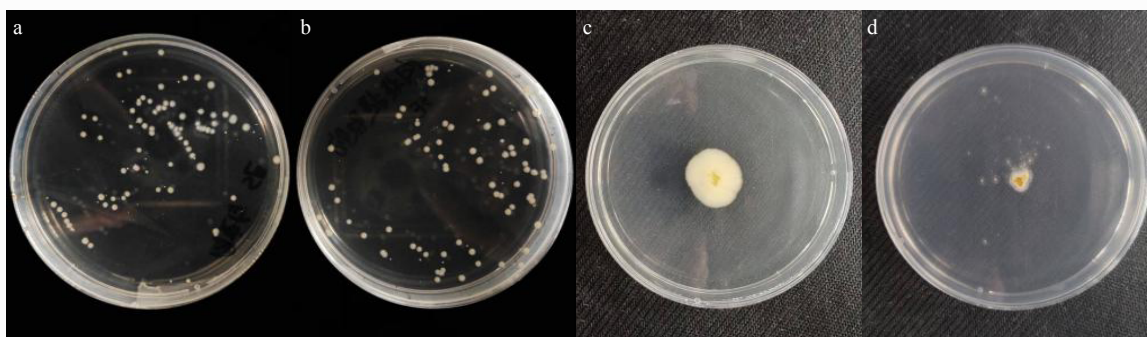
向 7 mL LB 培养基中加入 100 μL 浓度为 0.1% 肉

桂粉提取液，空白对照组加入 100 μL DMSO，混匀后倒入培养皿。取 100 μL 沙门氏菌培养液 ( $10^3$  CFU/mL) 涂布，于 37 °C 培养箱中培养 12 h，观察菌落生长情况。

向 7 mL PDA 培养基中加入 100 μL 浓度为 0.1% 肉桂粉提取液，空白对照组加入 100 μL DMSO。接种霉菌，于 25 °C 恒温箱中培养。

### 2.2 肉桂粉提取物抑制效果

肉桂提取物为红棕色粘稠状液体。在 37 °C 培养 12 h 后，抑菌效果如图 1 所示，测得对沙门氏菌的抑菌率为 17% 左右，抑菌率低可能是由于加入的肉桂提取物浓度较低，但在低浓度下仍能显示一定的抑菌效果。从接种霉菌培养后的效果图可以看出肉桂提取物对霉菌具有较好的抑制效果。



①【图1】肉桂提取物抑制效果。(a) 沙门氏菌空白对照；(b) 沙门氏菌肉桂提取物处理组；(c) 霉菌空白对照；(d) 霉菌肉桂提取物处理组。

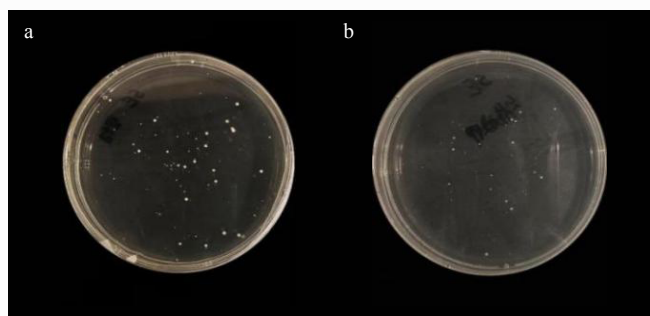
### 3. 肉桂酸的抑菌作用

上述实验证明，肉桂提取物确实具有抑菌防腐效果。肉桂富含肉桂酸<sup>[5]</sup>，肉桂酸防腐功效如何呢？为此我们进一步探索肉桂酸的抑菌活性，为促进肉桂酸的水溶性，本研究采用其钾盐进行实验。

#### 3.1 肉桂酸抑制沙门氏菌实验

分别向 7 mL LB 培养基中加入 1 mL 2.4% 肉桂酸钾的磷酸盐缓冲液 (PBS) 溶液,使其最终浓度为 0.3%,混匀,倒入培养皿;空白对照组用 1 mL PBS 溶液代替肉桂酸钾。取 100  $\mu$ L 沙门氏菌培养液 ( $10^3$  CFU/mL) 涂布,于 37  $^{\circ}$ C 培养箱中培养 12 h,观察菌落生长情况,抑菌效果如图 2 所示,抑菌率 57.9%。

$$\text{抑菌率} = 1 - (\text{样品板菌落数} / \text{空白对照板菌落数}) \times 100\%$$

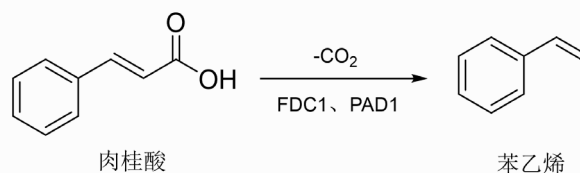


①【图2】肉桂酸钾对沙门氏菌抑制效果。(a) 空白对照板；(b) 肉桂酸钾组。

肉桂酸对大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、沙门氏菌等有很强的抑制作用<sup>[6]</sup>,这是因为肉桂酸的疏水性使其破坏菌体细胞的磷脂双分子层,增加细胞膜的通透性,使大量电解质外泄,影响菌体细胞正常代谢与生理功能。肉桂酸还可能通过抑制琥珀酸脱氢酶和苹果酸脱氢酶的活性,从而抑制菌体细胞的呼吸作用并干扰其能量代谢<sup>[7]</sup>。

### 4. 肉桂酸异味产生机理

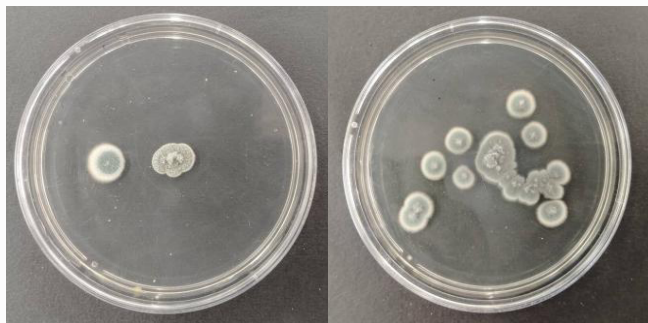
肉桂酸加入到食品中后,在贮藏运输等过程中偶尔会有异味产生现象<sup>[3]</sup>。产生原因可能与食品中的霉菌有关。霉菌中存在阿魏酸脱羧酶 (FDC1) 和黄素异戊烯基转移酶 (PAD1),可使肉桂酸脱羧,形成具有刺激性气味的苯乙烯 (图 3)<sup>[8-9]</sup>。为此,我们从市售面条中分离得到一种霉菌,并进一步研究了该霉菌对肉桂酸的作用,以及经该霉菌处理后,肉桂酸是否降解为苯乙烯。



①【图3】肉桂酸脱羧生成苯乙烯

#### 4.1 霉菌降解肉桂酸

向 7 mL PDA 培养基中加入 1 mL 2.4% 肉桂酸钾的 PBS 溶液, 使其最终浓度为 0.3%, 混匀后导入培养基; 空白对照组用 1 mL PBS 溶液代替药物。接种霉菌, 于 25 °C 恒温培养中培养一个星期。培养结果可以看出, 肉桂酸能够明显促进霉菌的生长 (图 4)。



①【图 4】肉桂酸钾对霉菌的影响。(左) 空白对照; (右) 肉桂酸钾组。

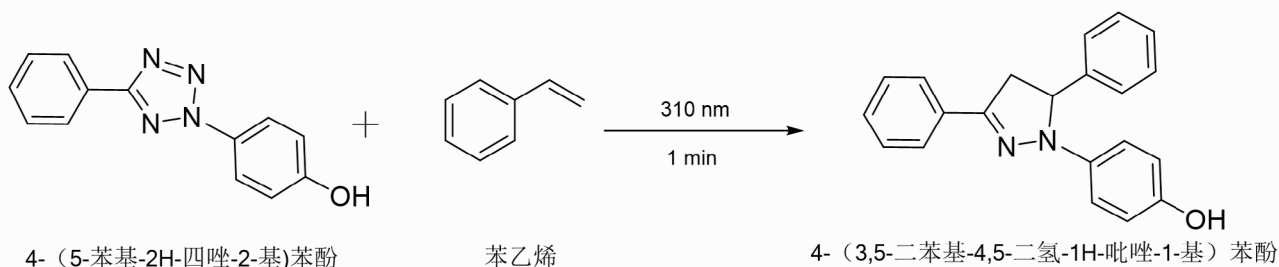
#### 4.2 检测降解产物苯乙烯

##### 4.2.1 检测原理

四氮唑在光催化下生成胍亚胺, 与苯乙烯发生 1, 3 环加成反应<sup>[10]</sup>, 本实验通过苯乙烯与四唑的光点击反应产生荧光来进行观察。具体来说, 4-(5-苯基-2H-四唑-2-基)苯酚与苯乙烯在 368 nm 照射下, 通过光点击反应生成吡唑啉产物 4-(3,5-二苯基-4,5-二氢-1H-吡唑-1-基)苯酚 (图 5), 产物在 368 nm 下显示较强的荧光, 通过检测其荧光强度, 从而可以计算苯乙烯的浓度。

##### 4.2.2 标准曲线制作

分别向 1 mL 0.2、0.3、0.4 和 0.5 mg/L 苯乙烯的 DMSO 溶液中加入 1 mL 1.2 mg/L 的 4-(5-苯基-2H-四唑-2-基)苯酚, 在 310 nm 下照射 1 min 后, 在 368 nm 激发波长下测量其荧光强度。

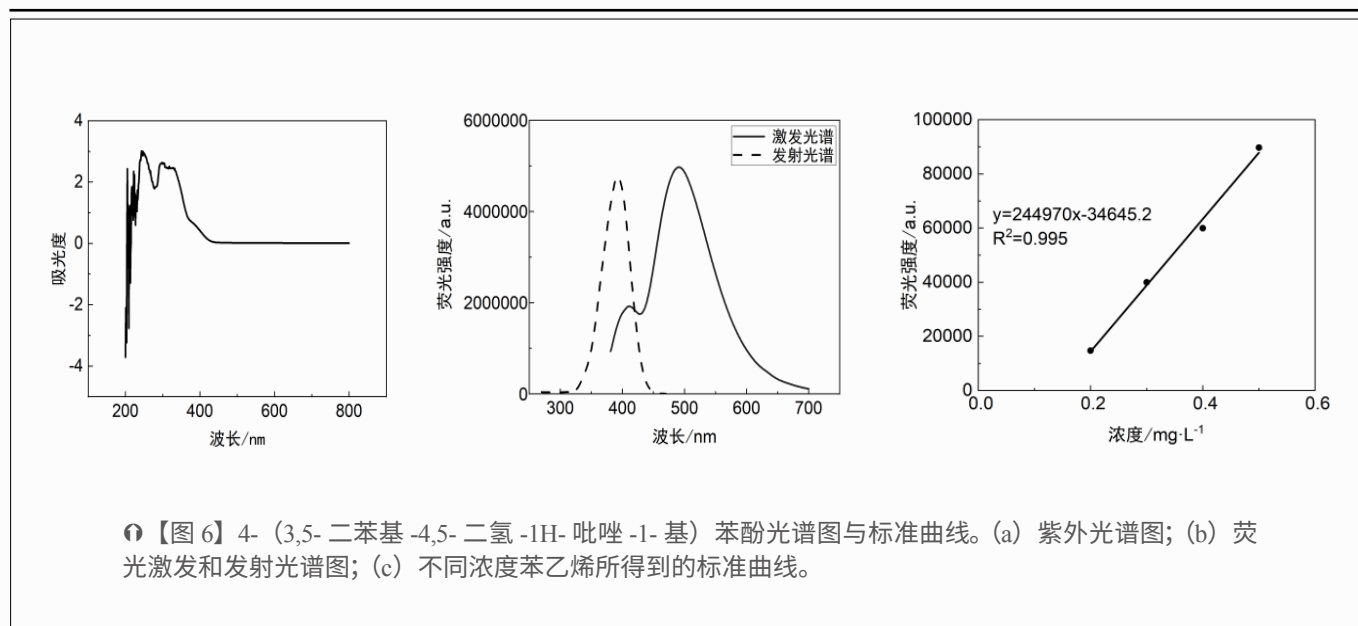


①【图 5】苯乙烯与 4-(5-苯基-2H-四唑-2-基)苯酚发生光点击反应

图 6a 为产物 4-(3,5-二苯基-4,5-二氢-1H-吡唑-1-基)苯酚在 200~800 nm 波长下紫外光谱图。据此选择 368 nm 作为激发波长, 测得发射波长为 490 nm, 如图 6b 所示。标准曲线 (图 6c) 拟合得到  $y=244970x-34645.2$ ,  $R^2$  为 0.995。

##### 4.2.3 复杂环境中标准曲线

在培养过霉菌的培养基中加入 25 mL 乙酸乙酯, 搅拌、抽滤得提取液。分别向 2 mL 提取液中加入不同量的苯乙烯, 使苯乙烯浓度分别为 0.5、1.5、2.5 和 3.0 mg/L, 然后加入 4-(5-苯基-2H-四唑-2-基)苯

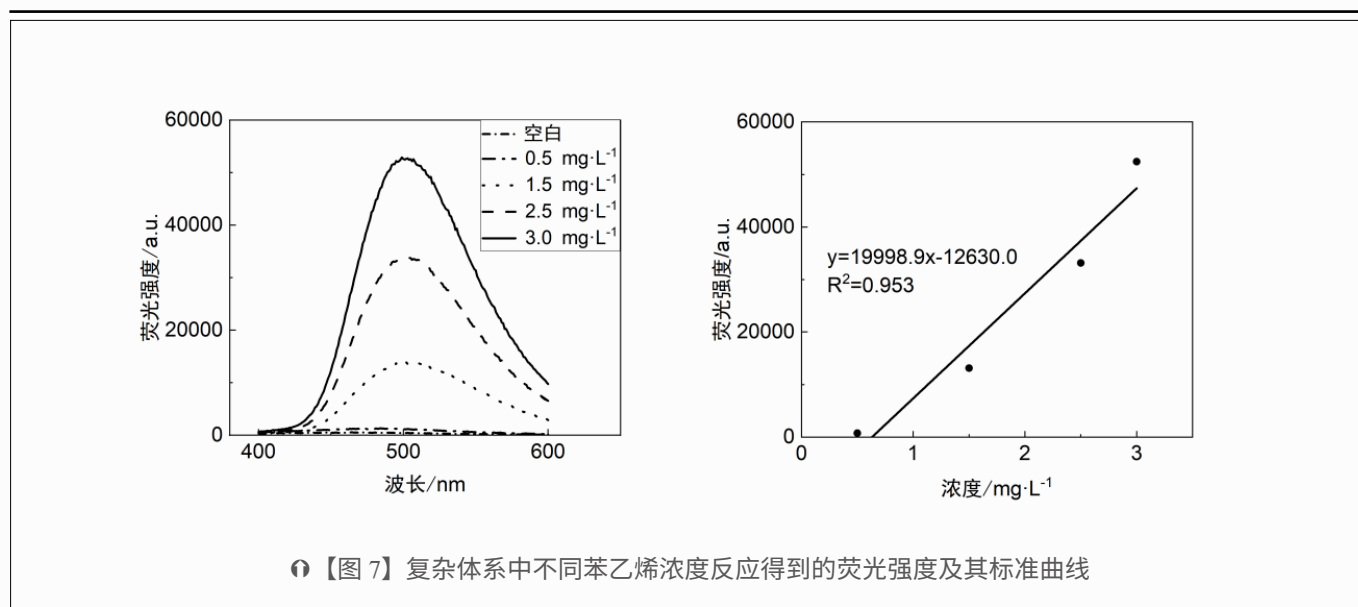


酚,使其浓度达到 3.25 mg/mL,溶液 310 nm 下照射 1 min,然后在 368 nm 激发波长下测量其荧光强度,结果如图 7 所示。进行标准曲线(图 7)拟合得到  $y=19998.9x-12630.0$ ,  $R^2$  为 0.953。

#### 4.2.4 霉菌降解肉桂酸产生苯乙烯检测

取培养霉菌后的培养基,加入 10 mL 纯水和

25 mL 乙酸乙酯,充分搅拌后抽滤,分出乙酸乙酯有机层用于苯乙烯检测。取 2 mL 上述乙酸乙酯,加入 0.5 mmol 的 4-(5-苯基-2H-四唑-2-基)苯酚,在 310 nm 下照射 1 分钟。然后在 365 nm 光照下观察是否出现荧光。在 368 nm 激发波长下测量其荧光强度,根据标准曲线计算其苯乙烯含量,测得苯乙烯含量为 2.686 mg/L。



## 5. 肉桂醛对肉桂酸降解生成苯乙烯的抑制作用

肉桂酸可被霉菌降解脱羧成为苯乙烯。但在实际使用肉桂的过程中，很少出现产生异味的现象。说明肉桂中应含有其他物质，能够阻止肉桂酸脱羧。

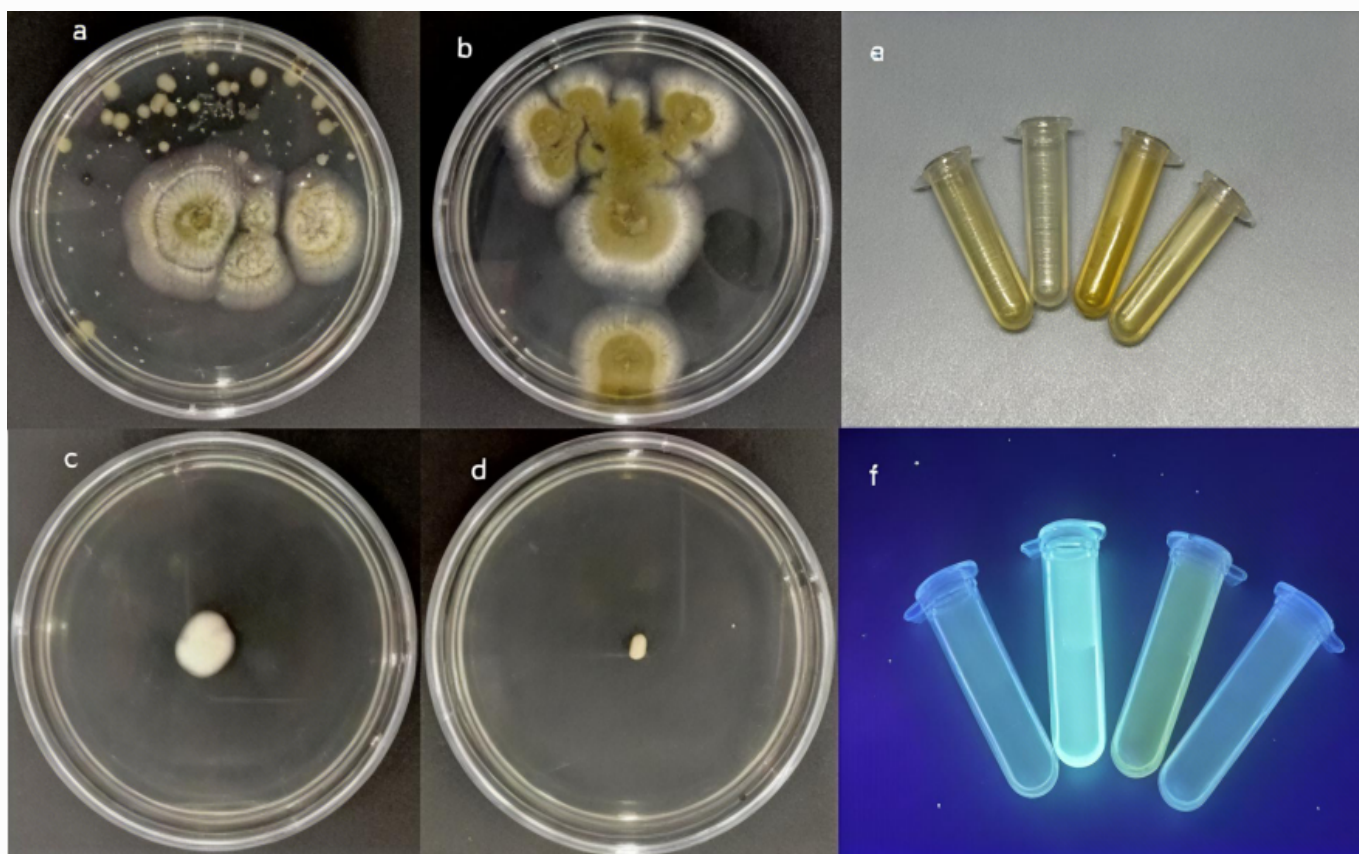
肉桂中的肉桂醛具有抗真菌活性，可以特异性抑制真菌细胞壁葡聚糖和几丁质的合成<sup>[11]</sup>，使细胞壁受损。那么肉桂醛能否抑制霉菌分解肉桂酸，本文对此展开了探索。

### 5.1 肉桂醛抑制霉菌对肉桂酸的分解

在 7 mL PDA 培养基中分别加入下列物质

1 mL:2.4 g/L 肉桂醛的 PBS 溶液；24 g/L 肉桂酸钾和 2.4 g/L 肉桂醛的 PBS 溶液；PBS 溶液（空白对照组）。接种霉菌，于 25 °C 恒温培养箱培养一个星期，霉菌生长情况（图 8）。然后向培养基中加入 10 mL 纯水和 25 mL 乙酸乙酯，充分搅拌后抽滤，分出有机层。各取 2 mL 提取液用于检测苯乙烯含量，检测方法同上。

处理后在 365 nm 下照射，加入肉桂酸的霉菌培养基提取液显示出明显荧光，加入肉桂醛的霉菌未明显产生苯乙烯。证明该霉菌可以将肉桂酸转化为苯乙烯，肉桂酸对此霉菌无抗菌作用，而肉桂醛可以抑制霉菌将肉桂酸脱羧为苯乙烯。



⑧【图 8】加入不同药物的培养基培养情况及提取液紫外照射下现象。(a) 空白对照组；(b) 肉桂酸钾组；(c) 肉桂酸钾和肉桂醛组；(d) 肉桂醛组；(e) 普通灯下效果；(f) 365 nm 紫外灯下效果：从左到右分别为空白组、肉桂酸钾组、混合肉桂酸钾和肉桂醛组、肉桂醛组。

## 6. 结语

肉桂原产于中国，作为药材和香料使用历史悠久。肉桂中肉桂酸的存在使其具有抗菌防腐特性，单独使用肉桂酸作为食品防腐剂，偶尔会有异味产生的现象，这是由于霉菌中含有的酶将肉桂酸脱羧

为具有塑料气味的苯乙烯。但大自然是充满智慧的，肉桂中除肉桂酸外还含有可以抑制肉桂酸脱羧的肉桂醛。肉桂中肉桂酸和肉桂醛的巧妙组合，使肉桂具有防腐功能，启示我们要合理利用自然资源，从自然中汲取智慧，推动科学技术的发展。

## 参考文献

- [1] Piper J D, Piper P W. Benzoate and sorbate salts: A systematic review of the potential hazards of these invaluable preservatives and the expanding spectrum of clinical uses for sodium benzoate[J]. *Compr Rev Food Sci Food Saf*, 2017, 16: 868-880.
- [2] Pongsavee, Malinee. Effect of sodium benzoate preservative on micronucleus induction, chromosome break, and Ala40Thr superoxide dismutase gene mutation in lymphocytes[J]. *Biomed Res Int*, 2015, 2015(1): 103512.
- [3] Shimada K, Kimura E, Yasui Y, et al. Styrene formation by the decomposition by *Pichia carsonii* of trans-cinnamic acid added to a ground fish product[J]. *Appl Environ Microbiol*, 1992, 58(5): 1577-1582.
- [4] Langos D, Granvogl M. Studies on the simultaneous formation of aroma-active and toxicologically relevant vinyl aromatics from free phenolic acids during wheat beer brewing[J]. *J Agric Food Chem*, 2016, 64(11): 2325-2332.
- [5] 周蕾, 雷亮, 王红静. 肉桂叶的化学成分研究[J]. *药学前沿*, 2025, 29(3): 430-436.
- [6] 梁盛年, 段志芳, 付莉, 等. 几种肉桂酸衍生物与肉桂酸的抑菌作用比较研究[J]. *食品科技*, 2005(9): 71-73.
- [7] 余春平, 许春芳. 肉桂酸钾的抑菌性能及应用研究[J]. *中国食品添加剂*, 2022, 33(9): 248-251.
- [8] Lubbers R J M, Dilokpimol A, Navarro J, et al. Cinnamic acid and sorbic acid conversion are mediated by the same transcriptional regulator in *Aspergillus niger*[J]. *Front Bioeng Biotechnol*, 2019, 7: 249.
- [9] White, M. Biochemical Characterisation of a Novel Decarboxylase System[D]. Manchester, UK: The University of Manchester, 2015.
- [10] Moisă M E, Amariei D A, Nagy E Z A, et al. Fluorescent enzyme-coupled activity assay for phenylalanine ammonia-lyases[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 18418.
- [11] 汪琨, 徐峥, 汪倩雯, 等. 肉桂醛特异性抑制酵母细胞壁合成的作用机理[J]. *食品与发酵工业*, 2012, 38(3): 68-72.

# PS&T: 聚酯的潜伏性动态重塑: 封端胺和 N- 杂环卡宾作为触发催化剂

来源: 高分子科学与技术 PS&T 公众号; 原文链接: [https://mp.weixin.qq.com/s/PrgUVQ5oj2a0VuEEfN\\_ZBA](https://mp.weixin.qq.com/s/PrgUVQ5oj2a0VuEEfN_ZBA)

## 一、研究背景

在全球“双碳”目标与环保法规收紧的双重驱动下, 聚合物材料的可持续回收成为亟待突破的关键课题。聚酯作为产量庞大、应用广泛的高分子材料, 涵盖热塑性(如 PET、PLA) 与热固性两大类, 广泛应用于包装、纺织、工程制造等领域, 其回收利用对资源节约与减碳减排意义重大。然而, 聚酯回收长期面临核心瓶颈: 纯热塑性聚酯回收易出现性能衰减, 而聚酯共聚物及交联体系因结构稳定, 难以高效重塑, 大量废弃聚酯最终沦为填埋或焚烧处理, 造成资源浪费与环境污染。

动态共价化学的发展为聚酯回收提供了新思路, 基于酯交换反应的聚酯动态交联聚合物(Vitrimers) 可通过化学键的断裂与重组实现材料重塑, 但核心难题在于催化体系的精准控制。传统催化剂存在活性不可控、易导致材料蠕变、过早激活等问题。因此, 开发“使役状态下惰性稳定、回收条件下精准激活”的潜在催化剂, 成为突破聚酯回收技术瓶颈的核心需求。这类催化剂通常需在外界刺激(如高温) 下实现活性位点的脱保护激活, 精准调控酯交换反应的发生时机与效率, 既保障材料在使用过程中的结构稳定性, 又能高效实现回收重

塑, 为聚酯材料的闭环循环提供技术支撑。

## 二、文章简介

德国哈雷-维滕贝格马丁·路德大学 Wolfgang H. Binder 教授团队针对性设计了两类核心催化剂。第一类是 TBD:MSA 胺盐催化剂, 通过三氮杂双环 [4.4.0] 癸-5-烯(TBD) 与甲磺酸(MSA) 形成稳定盐结构, 常温下保持惰性, 100 °C 以上才会解离激活。在 150 °C 下, 它能高效催化酯交换反应, 18 h 内达到反应平衡, 聚合物熔体体系中活化能仅 34-36 kJ/mol, 且热稳定性优异, 5% 失重温度达 170 °C。第二类是 NHC-CO<sub>2</sub> 催化剂, 以 CO<sub>2</sub> 屏蔽 N-杂环卡宾活性位点, 75 °C 以上脱保护激活, 120 °C 下 30 min 即可实现 50% 转化率, 但激活后不可逆, 仅能一次性重塑。

为验证效果, 研究团队以聚(2-羟乙基丙烯酸酯)(PHEA) 为前驱体, 生物基来源的戊二酸二甲酯(DMG) 为交联剂, 构建聚酯动态网络。PHEA 的高羟基密度与低玻璃化转变温度, 为动态交换提供了充足位点与更快的链段运, DMG 则平衡了网络的刚性与柔性。催化剂以保护态混入体系, 经分步固化形成均匀薄膜。流变测试和力学测试显示, TBD:MSA 催化的材料表现出优异的动态特性与回收性。在

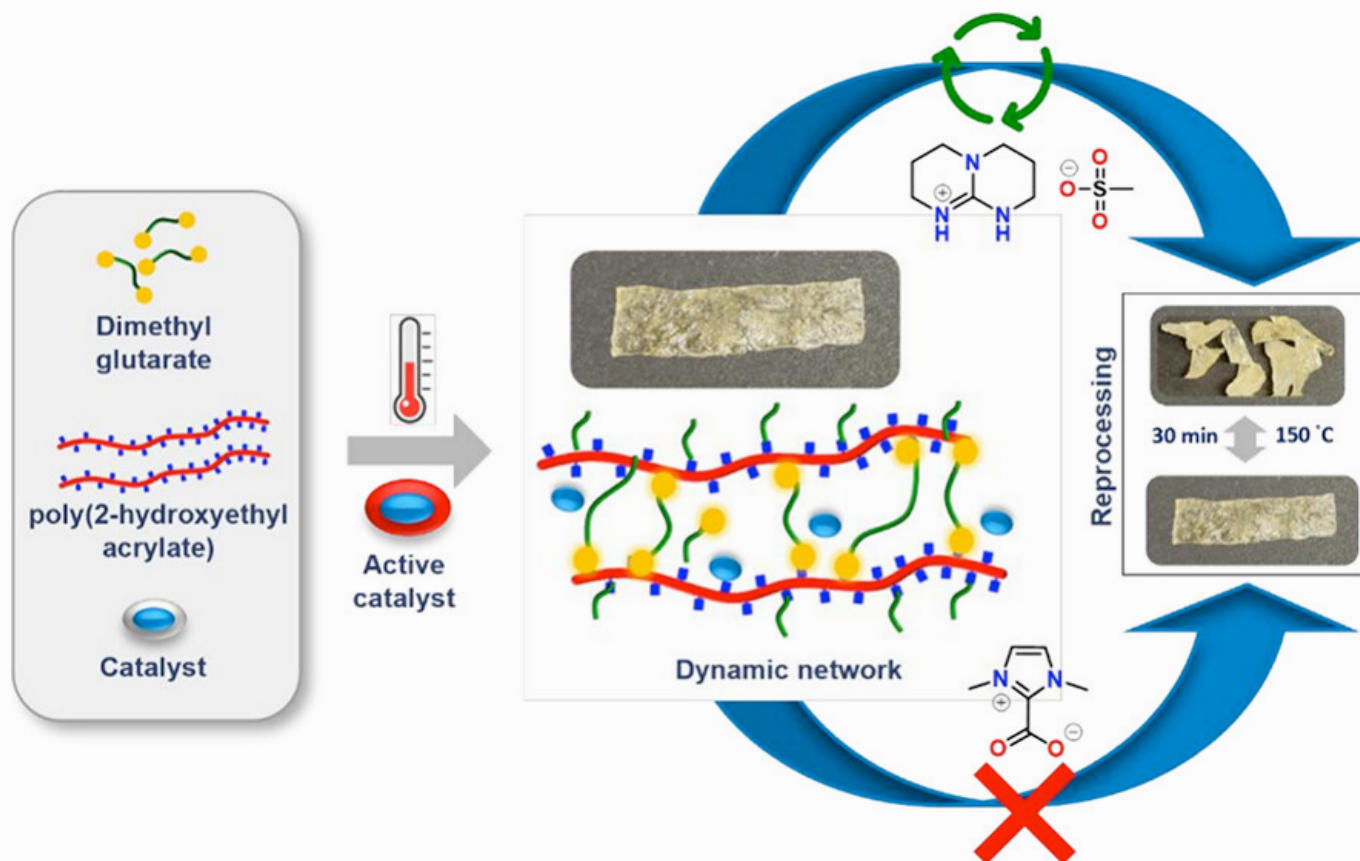


图: 两种潜伏性催化剂催化聚(2-羟乙基丙烯酸酯)(PHEA)动态交联网络

40~70 °C 范围内, 材料可快速完全应力松弛, 符合 Arrhenius 动力学规律。经过“切割-热压”循环回收, 原始材料 0.03 MPa 的弹性模量在 4 次回收后仍稳定在 0.03~0.06 MPa, 6 次回收后仅提升至 0.11 MPa, 断裂伸长率保持 220%~260%, 应力松弛行为与原始材料一致, 催化活性未受影响。相比之下, NHC-CO<sub>2</sub> 催化的材料虽固化快速, 但形成永久交联网络, 无明显应力松弛, 无法进行二次重塑, 且热稳定性较差, 5% 失重温度仅 143 °C, 适用于一次性成型场景。两类催化剂的互补设计, 为不同应用需求提供了灵活选择。

该研究的核心价值在于实现了催化活性的精准

调控, TBD:MSA 催化剂的可逆激活机制, 解决了传统催化剂的固有缺陷。这类可回收聚酯材料可广泛应用于包装、电子、汽车等领域, 其生物基成分与低毒性更契合绿色发展趋势。未来, 随着催化剂激活温度优化与产业化推进, 有望推动聚酯材料进入“闭环循环”时代, 为全球塑料污染治理提供切实可行的技术支撑。

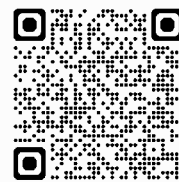
该成果以“Latent Vitrimeric Reshaping of Polyesters: Capped Amines and NHeterocyclic Carbenes as Triggered Catalysts”为题, 发表在中国科学院长春应用化学研究所与美国化学会共同出版的期刊 *Polymer Science & Technology* 上。

### 三、论文信息

#### Latent Vitrimeric Reshaping of Polyesters: Capped Amines and N-Heterocyclic Carbenes as Triggered Catalysts

Mrunal Karle, Zviadi Katcharava\*, Wolfgang H. Binder\*

<https://doi.org/10.1021/polymscitech.5c00118>



扫码阅读原文

### 四、作者团队



#### Wolfgang H. Binder

德国哈雷 - 维藤贝格马丁·路德大学教授。

于 1995 年获得有机化学博士学位，1995-1997 年跟随乔治亚州亚特兰大市埃默里大学 F. M. Menger 教授和维也纳大学 J. Mulzer 教授进行博士后研究。2004-2007 年在维也纳理工大学任副教授。

主要研究兴趣包括：聚合物合成、超分子化学、自愈合聚合物、人工膜和纳米技术，目前已在 *Angew. Chem. Int. Ed.*、*Adv. Mater.*、*Nano Lett.*、*Prog. Polym. Sci.* 等期刊发表学术论文 200 余篇。

## ASEM 封面文章

# 长春应化所逯乐慧团队： 仿生自由基共聚合纳米薄膜实现脑脊液 离子动态的长期在体监测

来源：先进传感器与能源材料 ASEM 公众号；

原文链接：[https://mp.weixin.qq.com/s/66sQPfk\\_wBThX\\_vaipx2bA](https://mp.weixin.qq.com/s/66sQPfk_wBThX_vaipx2bA)

Advanced Sensor and Energy Materials 5 (2026) 100181



Contents lists available at ScienceDirect

Advanced Sensor and Energy Materials

journal homepage: [www.sciencedirect.com/journal/advanced-sensor-and-energy-materials](http://www.sciencedirect.com/journal/advanced-sensor-and-energy-materials)



Full Length Article

Bionic radical-polymerization tailored nanofilm sensor for long-term *in vivo* monitoring ionic dynamics in cerebrospinal fluid



Chen Liu<sup>a</sup>, Yongqi Cheng<sup>a,b</sup>, Zhijie Wang<sup>a,b,\*</sup>, Lehui Lu<sup>a,b,\*\*</sup>

<sup>a</sup> State Key Laboratory of Electroanalytical Chemistry, Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 5625 Renmin Street, Changchun 130022, China

<sup>b</sup> University of Science and Technology of China, 96 Jinzhai Road, Hefei 230026, China

## 一、研究背景

脑脊液 (cerebrospinal fluid, CSF) 在中枢神经系统中不仅承担物质交换功能，其离子组成的动态变化还对神经元兴奋性及神经网络活动的调控起着关键作用。大量研究表明，CSF 中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、

$\text{Ca}^{2+}$  等离子的稳态失衡与帕金森病、癫痫及胶质瘤相关癫痫等神经系统疾病密切相关。然而，受限于检测手段，CSF 离子变化长期以来主要依赖离体或间断式采样，难以获得连续、在体、长期的动态信息。

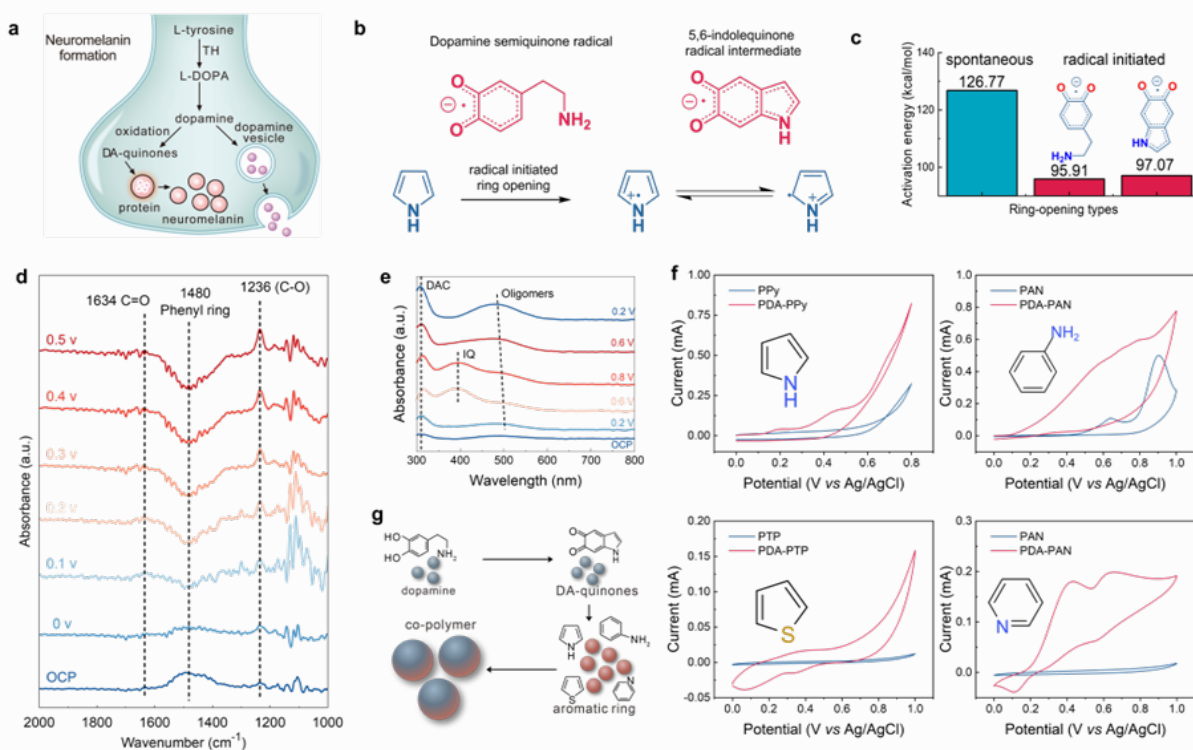
电化学传感器因其时间分辨率高、可在体使用而受到关注，但在神经系统应用中仍面临三大瓶颈：

- (1) 材料刚性大、界面失配；
- (2) 制备过程涉及强氧化剂或有机溶剂，生物相容性受限；
- (3) 长期植入后信号衰减明显。

如何在材料温和性、导电性与长期稳定性之间取得平衡，是构建在体 CSF 传感界面的核心挑战。

## 二. 研究思路与材料设计

该研究从神经黑色素 (neuromelanin) 形成机制中获得启发。在生理条件下，多巴胺可通过氧化产生自由基中间体，并驱动聚合反应，全程无需有机溶剂或剧烈反应条件。



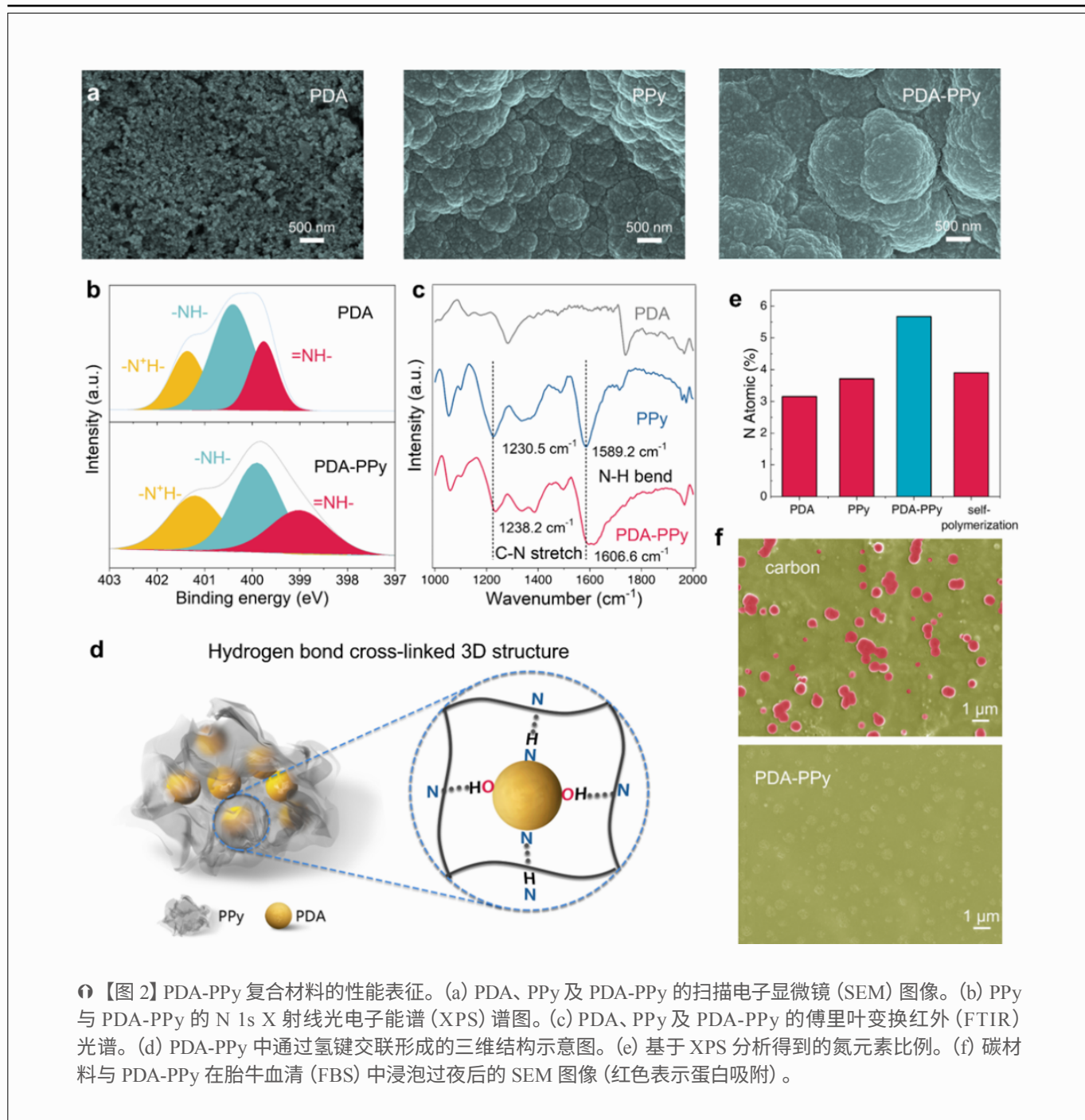
①【图 1】仿生自由基引发的共聚机理。(a) 神经黑色素形成过程的示意图。(b) 自由基诱导吡咯 (Py) 开环反应机理。(c) 基于密度泛函理论 (DFT) 计算的吡咯不同开环路径的活化能。(d) 多巴胺 (DA) 溶液在电化学氧化过程中进行的原位表面增强红外吸收光谱 (SEIRAS) 测试。(e) DA 溶液的原位紫外吸收光谱 (20 mM, 磷酸盐缓冲溶液, pH = 6)。(f) DA 与 Py、AN、TP 和 PD 的混合溶剂体系的循环伏安 (CV) 曲线。(g) 仿生聚合机理示意图。

基于这一仿生思路，作者提出一种多巴胺自由基引发的吡咯共聚合策略，在水相、温和条件下实现聚多巴胺（PDA）与聚吡咯（PPy）的原位复合，构筑出 PDA-PPy 纳米薄膜电化学界面。

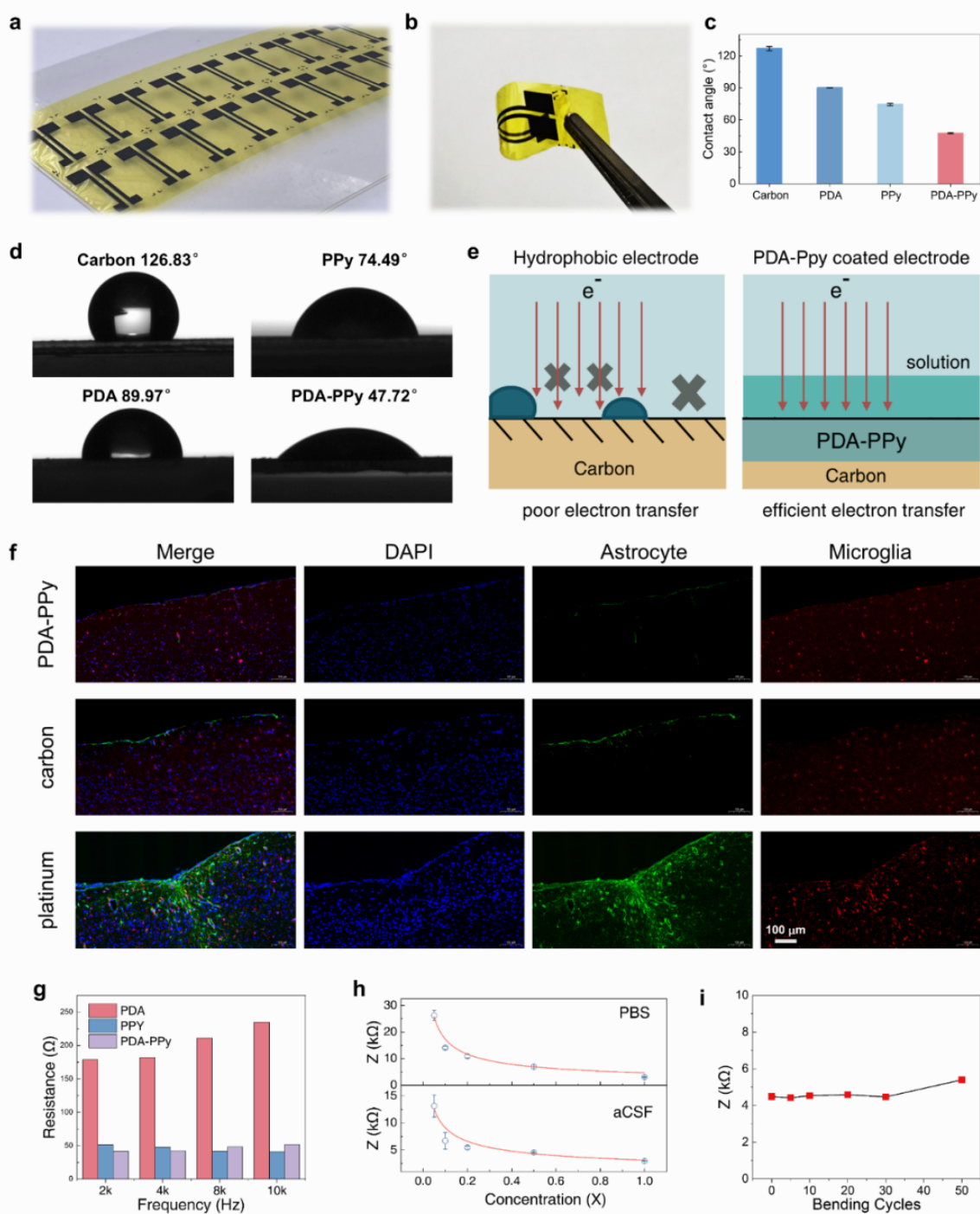
这一设计实现了功能互补：

- PDA 提供亲水性、生物相容性及组织黏附能力
- PPy 赋予体系稳定的电子传导性能
- 纳米级薄膜结构有效降低了电极——组织界面阻抗

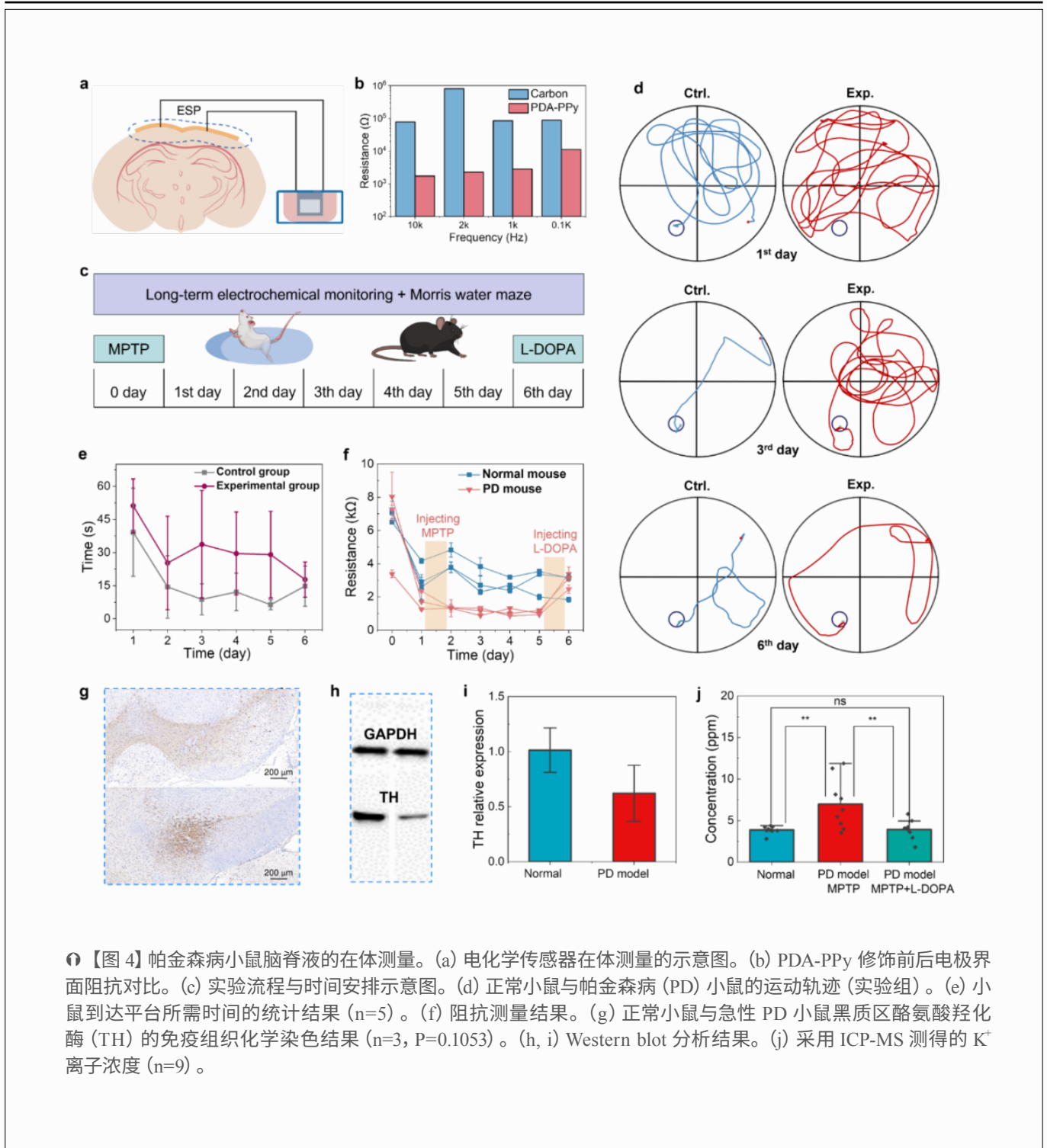
整个制备过程为一步法、无残留有机溶剂，显著降低了在体应用风险。



① 【图 2】 PDA-PPy 复合材料的性能表征。(a) PDA、PPy 及 PDA-PPy 的扫描电子显微镜 (SEM) 图像。(b) PPy 与 PDA-PPy 的 N 1s X 射线光电子能谱 (XPS) 谱图。(c) PDA、PPy 及 PDA-PPy 的傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱。(d) PDA-PPy 中通过氢键交联形成的三维结构示意图。(e) 基于 XPS 分析得到的氮元素比例。(f) 碳材料与 PDA-PPy 在胎牛血清 (FBS) 中浸泡过夜后的 SEM 图像 (红色表示蛋白吸附)。



① 【图3】 电化学传感平台的构建及其性能表征。(a, b) PDA-PPy 电化学传感器的实物照片。(c) 表面接触角测试结果。(d) 各表面接触角的柱状统计图。(e) 电极界面结构示意图。(f) 脑组织切片的共聚焦显微图像: 小胶质细胞 (红色) 和星形胶质细胞 (绿色)。比例尺: 100 μm。(g) PDA、PPy 及 PDA-PPy 在人工脑脊液 (aCSF) 中不同频率下的阻抗值。(h) 在 2 kHz 条件下, 不同浓度溶液 (PBS 和 aCSF) 引起的平均阻抗响应。(i) 电化学传感平台在反复弯折循环后的 1 kHz 电阻变化。



④ 【图 4】帕金森病小鼠脑脊液的在体测量。(a) 电化学传感器在体测量的示意图。(b) PDA-PPy 修饰前后电极界面阻抗对比。(c) 实验流程与时间安排示意图。(d) 正常小鼠与帕金森病 (PD) 小鼠的运动轨迹 (实验组)。(e) 小鼠到达平台所需时间的统计结果 (n=5)。(f) 阻抗测量结果。(g) 正常小鼠与急性 PD 小鼠黑质区酪氨酸羟化酶 (TH) 的免疫组织化学染色结果 (n=3, P=0.1053)。(h, i) Western blot 分析结果。(j) 采用 ICP-MS 测得的 K<sup>+</sup> 离子浓度 (n=9)。

### 三、器件性能与在体应用

基于 PDA-PPy 纳米复合层，作者构建了柔性电

化学传感器，并系统评估了其界面电化学特性、机械稳定性与长期工作能力。结果显示，该传感界面

在生理条件下保持稳定响应，且在长期浸泡及反复刺激后信号衰减显著降低。

在应用层面，研究进一步将该传感器植入帕金森病和胶质瘤小鼠模型，实现了脑脊液离子强度的长期、连续、在体监测。实验结果表明，CSF 离子

动态随疾病进程呈现可追踪的变化趋势，并与异常神经活动表现出相关性。

该结果不仅验证了器件的长期稳定性，也为理解神经疾病中离子环境变化的时序特征提供了新的实验手段。

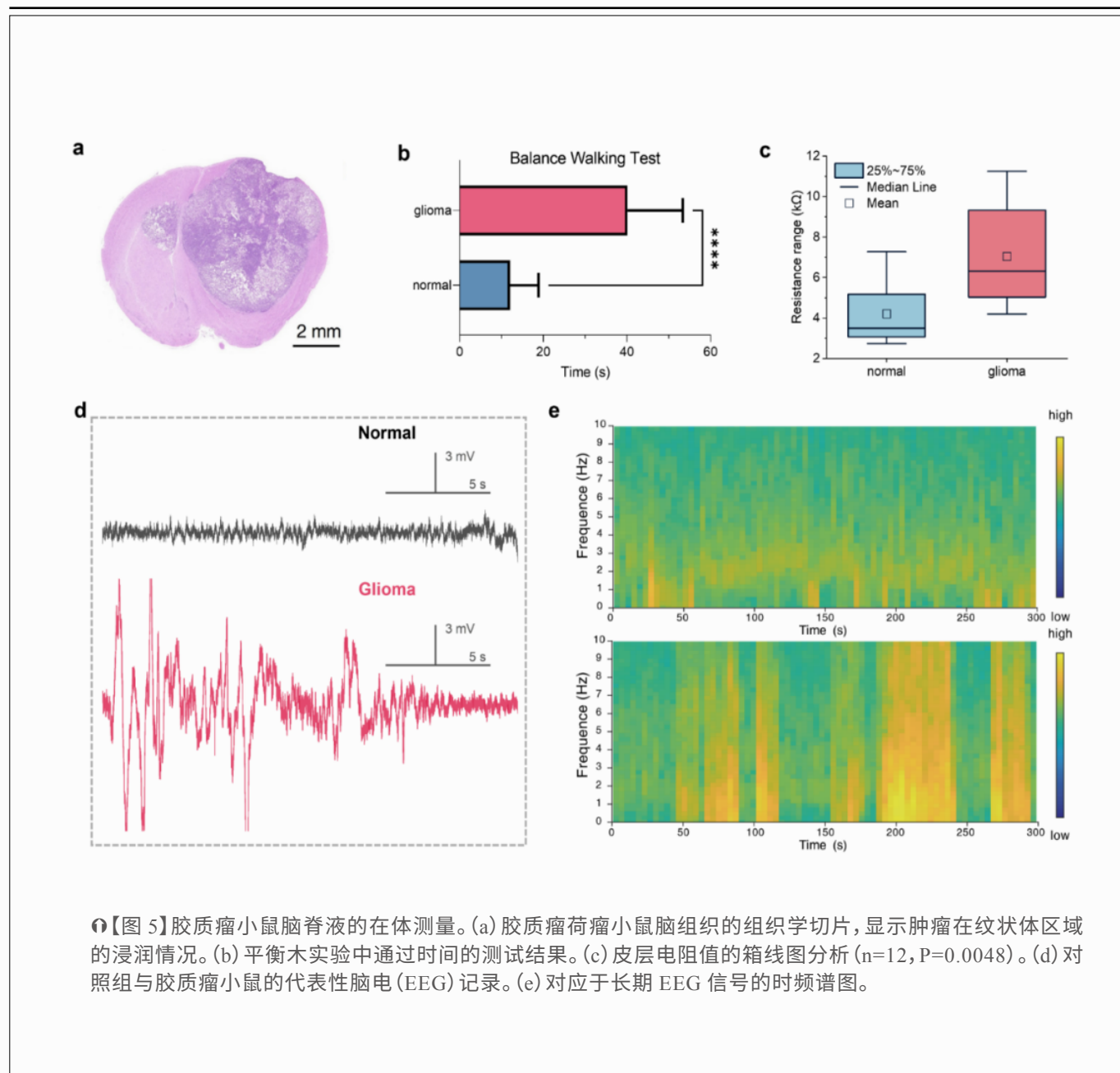


图 5 胶质瘤小鼠脑脊液的在体测量。(a) 胶质瘤荷瘤小鼠脑组织的组织学切片，显示肿瘤在纹状体区域的浸润情况。(b) 平衡木实验中通过时间的测试结果。(c) 皮层电阻值的箱线图分析 ( $n=12$ ,  $P=0.0048$ )。(d) 对照组与胶质瘤小鼠的代表性脑电 (EEG) 记录。(e) 对应于长期 EEG 信号的时频谱图。

## 四、总结与展望

从方法学角度看，该工作并未单纯追求器件结构复杂化，而是通过仿生聚合路径，在材料层面解决了生物电子界面长期存在的“温和性—导电性—稳定性”矛盾。

其主要价值体现在三点：

- 提供了一种可推广的生物启发型导电界面构筑策略
- 实现了脑脊液离子动态的长期在体电化学监测
- 为神经疾病进程研究提供了新的连续观测维度



总体而言，该研究为在体神经化学传感器的材料设计与应用拓展提供了具有参考价值的新范式。

## 五、论文信息

**标题：**Bionic radical-polymerization tailored nanofilm sensor for long-term *in vivo* monitoring ionic dynamics in cerebrospinal fluid

**期刊：**Advanced Sensor and Energy Materials 1 (2026) 100181

**作者：**Chen Liu, Yongqi Cheng, Zhijie Wang\*, Lehui Lu\*

**DOI:** <https://doi.org/10.1016/j.asems.2026.100181>



扫码阅读原文

## 六、作者团队



### 刘辰，本文第一作者

中国科学院长春应用化学研究所助理研究员。

2023 年博士毕业于中国科学院长春应用化学研究所（导师：逯乐慧研究员），同年加入逯乐慧研究员团队。

主要从事脑机接口关键器件、神经信号检测与调控、柔性传感器与设备研发及生物标志物检测等研究工作。至今已申请专利 8 项（其中 1 项已获授权），以第一作者、通讯作者在 *J. Am. Chem. Soc.* 等 SCI 期刊发表论文 7 篇。



### 王志杰，本文通讯作者

中国科学院长春应用化学研究所研究员、博士生导师。

2014年在吉林大学获得学士学位，2017年在中国科学技术大学获得硕士学位，2021年在澳大利亚伍伦贡大学获得博士学位。之后分别在澳大利亚阿德莱德大学和香港理工大学做博士后研究。2025年6月起加入长春应用化学研究所逯乐慧团队，从事电化学能源器件与生物电分析化学的交叉创新研究。在 *Nat. Commun.*、*Angew. Chem. Int. Ed.* 等期刊以第一/通讯作者（含共同）身份发表论文二十余篇。申请国际发明专利2件，中国发明专利1件。



### 逯乐慧，本文通讯作者

中国科学院长春应用化学研究所研究员。

1997年于山东聊城大学获学士学位；2000年和2003年于中科院长春应用化学研究所分别获硕士和博士学位；2003~2007年先后在德国和日本做博士后；2007年4月回国于中科院长春应用化学研究所工作至今，独立工作以来在 *Angew. Chem. Int. Ed.*、*J. Am. Chem. Soc.* 等SCI期刊上发表第一作者和通讯作者论文78篇，SCI他引13000多次，相关工作被 *Nat. Nanotechnol.*、*Nat. Chem.* 等作为研究亮点进行了报道和评述，并应邀为 *Chem. Rev.*、*Chem. Soc. Rev.* 和 *Acc. Chem. Res.* 撰写综述文章介绍。

# 《化学通讯》

科普教育类

## 编委会成员



编委：莫尊理  
西北师范大学



编委：陶胜洋  
大连理工大学



编委：姜雪峰  
华东师范大学



编委：薛斌  
上海海洋大学



编委：宋卫国  
中国科学院化学研究所



编委：李艳梅  
清华大学



编委：徐海  
中南大学



主编：杨小牛  
中国科学院长春应用化学研究所



副主编：刘正平  
北京师范大学



编委：戴伟  
北京化工大学



编委：邱晓航  
南开大学



编委：杨天林  
中国科普作家协会会员  
宁夏作家协会会员



编委：胡文兵  
南京大学



编委：卞江  
北京大学



编委：欧阳瑞镯  
上海理工大学  
材料与化学学院



编委：朱平平  
中国科学技术大学



编委：董川  
山西大学



编委：蒋尚达  
华南理工大学



编委：孙亚飞  
中国科学院自然  
科学史研究所