



化学通讯

CHEMICAL NEWSLETTER

No.2

2026年01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



05



新闻快递

- 南京大学化学学科首次进入 ESI 全球前万分之一 01
来源：澎湃新闻·南京大学
- 厦大团队在《科学》发表钙钛矿电池稳定性突破成果 01
来源：央视网·福建频道
- 五部门启动零碳工厂建设，2030 年覆盖传统高载能行业 01
来源：光明日报
- 长庆油田“十四五”油气当量超 3 亿吨，非常规开发技术筑牢能源安全屏障 02
来源：中国化工报
- 贵大联合复旦等高校启动化学化工教师培训，化工实验教学中心同步启用 02
来源：贵州大学新闻网

封面文章

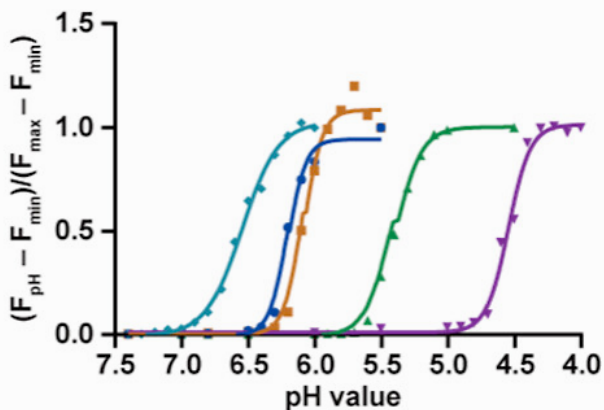
- 塑料回收行业遇全面危机 03
来源：chemistryworld

科技新闻

- 上海涌现一批“科学家合伙人” 05
来源：第一财经公众号
- 加州杏仁废料可助力处理酿酒厂废水 09
来源：C&EN
- 肠道微生物，如何影响脑的运作 11
来源：原理公众号
- 字节跳动跨界冷冻电镜：从 AI 专利、战略投资到千亿科学仪器市场布局 13
来源：仪器信息网

科普大赛

- ※ “如鲠在喉”将成往事，无刺鱼让你“大快朵颐” 16
作者：马劲，赵灿，李小巨，何赛君
- ※ 海鲜 + 水果 = 砒霜？背后的化学真相 23
作者：张怡如，郭奕含，代玉，李雪精，和晓琴，李有梅
- ※ 伤口会“报警”、机器人能“追光”？这种“智能凝胶”正在改写科技生活 30
作者：王孟朝，周迅，刘余敏，李雪龙
- ※ 美发车间奇遇 35
作者：胡奕妍，李雨馨，邓红梅，谢丽，陈万平



47



30

科研进展

- 【CCS Chem.】吉林大学窦传冬：硼杂 Z 型及双 41
层并苯
来源：CCS Chemistry 公众号
- PS&T：具有优异生物相容性的 pH 超敏聚酯纳 46
米探针用于高对比度肿瘤成像
来源：高分子科学与技术 PS&T 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：澎湃新闻·南京大学

南京大学化学学科首次进入 ESI 全球前万分之一

2026 年 1 月 8 日，科睿唯安发布最新 ESI 统计数据，南京大学化学学科排名全球第 21 位，首次进入全球前万分之一行列，标志着该学科已迈入世界顶尖水平。

这一突破是南大实施“奋进行动”和“一流学科培优行动”的标志性成果。目前，南大化学学科已建成多个国家级平台，在新能源材料、催化化学等前沿领域取得系列原创成果，为解决国家战略需求提供关键技术支撑。

原文链接

<https://thirdpage.thepaper.cn/h5/jrt/32347326>

来源：光明日报

五部门启动零碳工厂建设，2030 年覆盖传统高载能行业

2026 年 1 月 19 日，工信部等五部门联合印发指导意见，启动零碳工厂培育建设，通过技术创新和结构调整等实现厂区碳排放趋向近零。

意见明确：2027 年在汽车、光伏、电子电器等行业培育标杆零碳工厂，构建产业生态；2030 年拓展至石化化工、钢铁等传统高载能行业，推广脱碳解决方案。建设将聚焦碳排放核算、用能转型和碳足迹分析等关键路径，配套制定相关标准与市场化机制。

原文链接

https://epaper.gmw.cn/gmrb/html/content/202601/20/content_4516.html

来源：央视网·福建频道

厦大团队在《科学》发表钙钛矿电池稳定性突破成果

2026 年 1 月 9 日，厦门大学材料学院张金宝教授团队与西安交通大学梁超教授合作，在《科学》（Science）发表题为“分子压印退火法精准调控钙钛矿缺陷”的研究成果，这是厦大 2026 年首篇 Science 论文。

团队开发的“固态分子压印退火”（MPA）技术，通过在钙钛矿薄膜表面压印吡啶基分子模板，无需额外溶剂即可实时约束缺陷演化。优化设计的 2-吡啶乙胺分子与钙钛矿表面铅离子形成双齿配位结构，从源头阻止碘空位缺陷产生。

实验显示，采用该技术的小面积器件效率达 26.6%，16 cm² 组件效率达 24.9%，在 85 °C 高湿环境下稳定运行超 1600 h，为解决钙钛矿太阳能电池商业化瓶颈提供新思路。

原文链接

<https://local.cctv.com/2026/01/10/ARTIxRhQ5sFzUCKqHnLow9Tk260110.shtml>

Image by brgfx on Freepik

来源：中国化工报

长庆油田“十四五”油气当量超3亿吨，非常规开发技术筑牢能源安全屏障

2026年1月19日消息，我国第一大油气田——长庆油田在2021~2025年“十四五”期间，累计生产油气当量超3亿吨，且已连续第6年实现年产油气当量稳定在6000万吨以上，生产经营势头强劲，为国家能源安全提供坚实保障。

面对低渗、低压、低丰度“三低”油气藏这一世界级开发难题，长庆油田聚焦页岩油、致密气和深层煤岩气等非常规油气领域持续开展科技攻关。经过五年持续勘探，成功形成5个十亿吨规模含油区和5个万亿立方米整装含气区，为产量稳步攀升筑牢资源根基。在开发实践中，油田建成我国最大页岩油生产基地，页岩油产量连续五年保持30万吨以上规模增长，2025年更是创下历史新高；苏里格气田实现致密气规模效益开发，成效显著；同时创新实施煤岩气“无砂”压裂作业，为我国煤岩气的效益开发开辟了全新路径，助力非常规油气开发革命深入推进。

原文链接

<http://www.ccin.com.cn/detail/3afc33b10bd52219e93c3a762c3ff664/news>

来源：贵州大学新闻网

贵大联合复旦等高校启动化学化工教师培训，化工实验教学中心同步启用

2026年1月15日，复旦大学-贵州大学专业建设研讨会暨贵州大学化学与化工学院“教师教学能力提升”培训在该校西校区开班，同时举行化工实验教学中心启动仪式，标志着该校化学化工领域教学改革与实践硬件建设同步升级。

本次培训为期3天，聚焦化学化工课程建设、人才培养和思政融合等核心议题，汇聚复旦大学、四川大学和南京工业大学等高校的知名专家学者，以及行业学会、企业代表和贵州大学化学与化工学院全体教师。培训以“名校经验共享、教学能力提质”为目标，通过专题讲座、分组研讨和案例交流等形式，针对性解决课程深度建设、教学方法创新及产教融合衔接等教学共性难题。新启用的化工实验教学中心，将为实践教学提供硬件支撑，助力提升学生实操能力与工程实践素养。

活动旨在通过校际合作与资源整合，深化化学化工教育改革，优化人才培养体系，为区域化学化工产业高质量发展输送高素质专业人才。

原文链接

<http://news.gzu.edu.cn/2026/0115/c11066a264457/page.htm>

塑料回收行业 遇全面危机

来源 : chemistryworld ; 作者 : PHILLIP BROADWITH ; 翻译 : 余婉宁

原文链接 : <https://www.chemistryworld.com/opinion/plastic-recyclings-perfect-storm/4022760.article>



Image by pch.vector on Freepik

为满足欧盟即将生效的法规要求——提高包装、汽车零部件及其他产品中的再生塑料用量，欧洲亟需提升再生塑料处理产能。然而行业实际情况却截然相反，再生塑料处理厂迎来集中关停潮：2024 年欧洲再生塑料年处理产能减少超 30 万吨，2025 年的关停规模至少持平于此。

多重因素叠加，给再生塑料处理企业带来了严峻挑战。全球乙烯产能持续过剩，拉低了原生聚合物价格；而欧洲的高能源价格，又推升了再生塑料的处理成本。与此同时，各国政府虽出台政策，试图弥补再生塑料与原生聚合物的部分价差，鼓励生产企业在包装中添加更多再生料，但这些政策的推进速度未能跟上价差变化，导致生产企业直接使用原生聚合物并缴纳罚金，反而更具成本优势。业内亦有声音指出，部分进口原生聚合物被假冒成再生料流入市场，进一步挤压了欧洲本土再生塑料处理企业的生存空间。

美国的情况也类似。此前在各州政策支持，以及客户承诺在包装中使用再生料的双重推动下，美国再生塑料产能有所提升，但由于再生塑料企业难以与低价原生聚合物竞争，各品牌纷纷撤回了上述承诺，产能扩张计



❶ 受廉价原生聚合物的竞争冲击，成本攀升且需求下滑，欧洲各地（在一定程度上还包括美国）的再生塑料处理厂纷纷关停或缩减业务规模。
来源：© Biffa

划陷入停滞。各国领导人未能就塑料条约达成共识——尤其是未能承诺限制原生聚合物产量，这进一步加重了再生塑料企业的压力。

多数再生材料需求低迷，企业不仅没有理由投资建设新设施，部分情况下甚至难以维持现有设施的正常运营。此外，再生塑料的原料供应也存在问题。在英国，企业处理塑料包装废弃物的方式有多种，包括焚烧发电，或出口到其他地区进行回收处理。英国约一半的塑料废弃物用于出口，且出口目的地越来越多地转向印度尼西亚等非经合组织国家。出于对出口废弃物去向

的担忧，欧盟已禁止向非经合组织国家出口塑料废弃物。

减少出口或能为本土再生塑料企业提供更稳定的原料供应——但与此同时，还需降低废弃物供应链中的污染物含量。食物残渣、油墨、标签及分类不当的物料，不仅会增加回收处理的难度（进而提高成本），还会影响高等级塑料的生产。这类高等级塑料（如食品包装用塑料）正是市场需求最旺盛的品类。

英国及欧洲正在讨论多项政策措施，这些措施或能在一定程度上解决上述部分问题，但能否尽快落地、扭转再生塑料企业的困境，目前尚不明朗。



上海涌现一批 “科学家合伙人”

来源：第一财经公众号；作者：金叶子；原文链接：https://mp.weixin.qq.com/s/aAom-oOBHVyS2ID6x6h_iA

在新旧动能转换的关键节点，有一个长期存在的问题困扰着产业界：中国拥有庞大的专利申请量和科研经费投入，但科技成果转化——这一衡量创新效率的核心指标，相较于欧美发达国家仍有差距。

“我国科技成果转化已从2010年的25%提升至35%，但与发达国家仍有差距。”国家科技成果转化引导基金理事长马蔚华今年在一场论坛上公开表示。

从实验室的“样品”到生产

线上的“商品”，中间存在一条被称作“死亡之谷”的鸿沟。而在上海，一个被称为“技术经理人”的专业群体和一批新型科技服务机构正在试图填平这道鸿沟，成为连接创新链和产业链的关键“摆渡人”。

从“科技红娘”升级为“科学家合伙人”

专业化技术转移机构，是促进科技成果转化和推动技术要素市场化配置的关键主体。但传统技术转移机构由于专业能力不强、收入来源单一等共性问题，在推动科技成果转化与促进自身发展等方面均面临诸多困境。如何形成自身的良性循环，是上海这几年正在探索的。

目前，上海正推动技术交易场所、科技成果转化功能型平台以及市场化、专业化技术转移机构等多类型服务主体“百花齐放”，开展“孵投结合”“服务换股权”“技术经理人兼任CEO”等模式创新，破解服务价值瓶颈。

第一财经调研发现，上海正涌现一批新型服务机构，这些机构已超越传统“科技红娘”的简单对接模式，升级为“科学家合伙人”，扮演创新发现、价值共创、风险投资与资源整合等角色，全程陪跑科研人员成果转化，有效突破传统科技服务的价值瓶颈。

以上海国科新研国际技术转移有限公司（下称“国科新研”）和上海探九技术转移有限

公司（下称“探九”）为代表的典型机构，正突破传统技术转移机构服务边界，探索设立“成果转化门诊”，创新“孵投结合”模式，以及委派技术经理人下沉项目等做法，有效打通成果转化关键堵点。

探九技术创始合伙人邹涛对第一财经介绍，他们在5年多时间里服务的成果转化、技术转移和孵化投资案例涉及AI、机器人、先进制造、新材料、生物制造、生命健康、环保ESG等领域，项目超过300个；其中，促成成果转化合同登记、技术交易总额近20亿元，孵化项目企业累计实现市场化融资额超26亿元，项目合计估值超120亿元。

以他们促成的天然产物合成生物项目为例，虽然该项目技术创始人是两位院士，经过十余年的研发打磨，掌握了国际领先的生物合成技术，但由于创始团队均为知名院士、技术专家，在产品化、商业化落地能力和精力上呈现明显短板。

“我们作为项目孵化方和商业运营团队，参与了项目全链条的落地孵化和运营赋能，并担任

公司董事，主导负责公司成果转化、技术转移、概念验证、历次融资、商业运营以及中试平台建设。”邹涛介绍，自2021年公司成立至今，他们协助公司先后完成3轮融资，累计融资额近亿元，完成全国首个天然产物生物制造示范线建设，并入选首批国家级生物制造中试能力建设平台，生产产物已进入多家龙头企业的实际产品应用中。

他对记者解释，一个完全由技术团队构成的主体，即使初步完成成果转化，形成了落地主体公司，但没有后续以投行视角审视产业化进程的孵化赋能，依然无法跨越技术成果转化过程中的“达尔文之海”。技术、商业、资本是技术转移转化中不可或缺的铁三角，光有技术实力，或者即便产学研能相结合，但没有技术经理人和项目经理人的双管齐下，以及陪跑孵化的科技投行团队的深度介入，科研团队依然很难独立、快速、有效地让技术形成高价值产品进而实现技术商品化。

随着专业化技术转移机构介入加深，上海科技服务业的商业模式正在发生质变，告别依赖技

术交易收入与财政补贴的传统模式，向以价值要素为核心的科技投行模式加速转型。这种聚焦早期科创项目育成的专业服务路径，正通过“技术价值发掘+孵化赋能+运营执行+3C人才派遣+资本运作”的闭环，破解科技成果转化难题。

“成果转化需要跨越从技术到产品、从产品到商业化的两道‘死亡之谷’，必须构建‘技术经理人+概念验证+金融赋能+产业引爆’的四位一体投行服务平台。”国科新研创始人佟艳辉表示。针对行业普遍缺乏复合型转化人才的痛

点，公司将技术经理人定位为“投行项目负责人”，推出“技术经理人兼任CEO”模式——让技术经理人从项目筛选阶段就与科研团队建立深度协作关系，全程主导技术价值评估、专利布局和转化路径设计，并直接担任创业企业代理CEO，统筹团队组建、商业计划制定、运营架构搭建等核心管理事务，成为连接科研端与资本端的“科创投行创业合伙人”。

在创新药技术平台项目的投后赋能中，这一科技投行模式的优势得以显现。除了完成专利打包转让的基础服务，他们还从顶

层架构设计、管线规划，到匹配商业化、临床、技术、资本等多维度要素，再到后续基础设施搭建与产品推广，护航技术从实验室走向资本市场。

这种科技投行模式不仅为科研人员创业缓解了初期资金压力，更发挥了投行的信用背书与资源整合作用，助力企业对接更多风投资本。数据显示，自2020年成立以来，国科新研已投资孵化早期项目近二十个，年均新增3~4个持股标的，孵化项目估值实现10~20倍增长，累计助力企业融资近20亿元。

技术经理人是核心资产

升级换代的科技服务机构背后，是上海坚持市场化机制构造的科技成果转化生态。

传统的科技成果转化模式，曾长期受困于效率低下的怪圈。一家科技成果转化服务机构负责人形象地比喻：“过去，高校和医院的成果转化往往靠‘缘分’，或者是行政指令式的‘拉郎配’。”

这种低效首先体现在供需对接的错位上：科学家手握技术寻找买家，企业虽有需求，却因晦

涩的专利文档和未经验证的实验室数据而不敢下手。

同时，比对接更核心的痛点在于“定价与合规”的制度枷锁——公立机构的无形资产如何定价才不涉及国有资产流失？科学家的收益如何分配才合法合规？

如何打通这些堵点，给专业服务机构入场提供契机。

“我们现在做的，是给技术

‘洗澡’和‘包装’。”上述负责人解释道。一项原始技术，需要经过知识产权的清洗（确保无纠纷）、技术成熟度的评估、商业场景的验证，甚至需要服务机构先行垫资进行概念验证，才能变成一个可被市场交易的“标的”。

在这一生态中，技术经理人是核心资产。

在上海推进科技成果转化“全链条”改革的背景下，技术经理人不再是简单的“牵线人”，而

是复合型的“产品经理”。依托国家技术转移人才培养基地等平台，上海交大、同济大学、国家技术转移东部中心等单位为技术转移方向学历教育、非学历技术经理人培养提供专业课程和实训基地，为改革试点单位优先配备实习技术经理人。

东部中心执行总裁邹叔君告诉第一财经记者，上海这两年成果转化的数据攀升背后，除了赋权改革的作用，还有大批技术经理人的成长。他介绍，

这两年，东部中心加大对技术经理人的培育力度，目前已与上海8所高校展开合作，开设了技术转移相关学历教育课程，同时为了更好与市场化、企业中的技术经理人合作共赢，还申请在上海成立第一家技术经理人事务所。“科学家和企业家谈的方向还是不太一样的，我们（技术经理人）要做好翻译，一项项去落实。”

上海也对这群从事专业服务的人员作出倾斜，为培育发

展专业的技术经理人队伍，打出一套“组合拳”：在2025年“东方英才计划”中，首次单设技术转移领域，形成“青年——拔尖——领军”的完整人才梯队；在上海市经济、自然科学、工程系列职称评审中，均设立了与技术经理人相关的学科或方向，打通职业发展路径；同时，将取得市场显著业绩的技术经理人直接纳入人才引进落户范围，系统提升技术经理人的职业认同与社会地位。



图 图为东部中心 金叶子 / 摄



在美国加利福尼亚州莫德斯托市的一家加工厂里，堆积如山的杏仁壳随处可见，这类物料往往会被送至垃圾填埋场处理。
图片来源：摄图社

杏仁壳吸附酚类物质效果佳，成本低于合成化学品

加州杏仁废料可助力处理酿酒厂废水

来源：C&EN；作者：Payal Dhar；翻译：余婉宁

原文链接：<https://cen.acs.org/environment/pollution/Californias-almond-waste-help-clean/104/web/2026/01>

加利福尼亚州盛产杏仁与葡萄酒两类物产。一项最新研究中，研究人员开发出一种利用其中一类物产的废弃物提升另一类物产生产工艺环保性的方法。

杏仁壳粉 (almond shell powder, ASP) 为酚类化合物的天然吸附剂，可作为葡萄酒厂废水处理的低成本处理材料 (*ACS Food Sci. Technol.*, 2026, DOI: 10.1021/

acsfoodscitech.5c00652)。

加利福尼亚州葡萄酒年产能超 20 亿升，每生产 1 L 葡萄酒将产生 0.2~4.0 L 废水；该州每

年杏仁壳产量亦逾 100 万公吨，且大部分杏仁壳被直接送至垃圾填埋场处置。本研究首席作者、加州大学戴维斯分校食品化学家 Alyson Mitchell 指出：“我们正通过一种废弃物净化另一种废弃物的方式，提升农业生产的可持续性。”

葡萄酒厂废水中含有多种物质，其中高浓度酚类化合物的存在，使其无法直接排入城市污水处理厂。此类废水常规处理方式引入蒸发塘静置，塘内通过微生物降解、机械撇渣及曝气工艺实现废水减容与有机物去除，但该过程中酚类化合物易渗入地下水，对水生生物产生毒性；同时酚类化合物会抑制微生物降解效率，进而延缓废水二级处理进程。

酚类化合物的脱除方法一直是研究热点，合成树脂吸附法为其中一种潜力技术，但其应用成本过高，难以规模化推广。

杏仁壳具有含水率低、机械强度高及化学性质稳定的理化特性，是性能优异的生物吸附剂，此前已有相关研究证实其可

用于废水中重金属与有机染料的脱除。从成本角度分析，杏仁种植户的杏仁壳产量大且处置难度高，部分种植户甚至需支付费用完成杏仁壳的处理。

杏仁壳表面天然分布大量孔隙，赋予其较大比表面积，成为捕获水体中化学物质的理想材料。研究人员将杏仁壳研磨为粒径 0.2~2.0 mm 的粉末，进一步提升其比表面积与吸附性能。

Mitchell 从化学组成角度解释，杏仁壳中木质素含量约为 30%，而木质素本身含多酚类物质；该成分可通过氢键、偶极-偶极相互作用、 π -堆积等弱键相互作用，实现对废水中酚类化合物的吸附。

研究人员分别以实验室配制的模拟废水、葡萄酒厂实际工业废水为研究对象，测定 ASP 的生物吸附性能。结果表明，吸附接触 1 h 后，ASP 对酚类化合物的吸附率约为 80%，换算得吸附速率为 $0.4\sim 3.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ ，该性能与合成树脂吸附剂 ($2\sim 18 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$) 存在重叠；且 ASP 的粒径越小，对酚类化合物的吸附量

越高。

Mitchell 表示：“本研究的目标并非实现酚类化合物的完全脱除——该目标在实际应用中难以达成，而是将其含量降至可采用二级过滤工艺处理的水平。”即该方法可有效缩短废水在蒸发塘中的静置处理时间，提升废水处理效率。

Mitchell 团队还通过溶剂萃取法，从吸附饱和后的 ASP 中实现酚类化合物的回收，且回收后的 ASP 可重复用于吸附过程。该团队透露：“目前正探索将回收所得酚类化合物作为土壤改良剂，应用于温室各类蔬菜的种植生产。”

莫纳什大学有机化学家 Antonio Patti 未参与本研究，其对该研究评价道：研究团队证实了杏仁壳在葡萄酒厂废水处理中的应用可行性，“若运输成本可控，杏仁壳废弃物可成为低成本的废水处理材料”；但同时指出，该研究仍需补充技术经济评估分析，尤其应纳入酚类化合物回收过程中的溶剂成本核算。

肠道微生物，如何影响脑的运作

来源：原理公众号；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/j6z6MkG0ISmCyffGQnC5CQ>

脑与能量

在所有灵长类动物中，人类拥有相对于体型而言最大的脑容量。事实上，许多灵长类物种，都进化出了相对于体型而言异常巨大的脑。这些大型的脑与一系列增强脑部能量供给的代谢适应共同进化，其中包括循环血液中葡萄糖水平的升高。

尽管过去已有研究表明，肠道微生物能够影响宿主的代谢。但科学家对于肠道微生物组在灵长类的脑进化中所起的作用仍不甚清楚。

为了探究这一问题，一个研究团队将来自三种拥有不同脑大小的灵长类物种的肠道微生物接种到无菌小鼠体内。他们的研究结果首次提供了实证证据，表

明肠道微生物组在塑造不同灵长类物种之间的脑功能差异中发挥着直接作用。

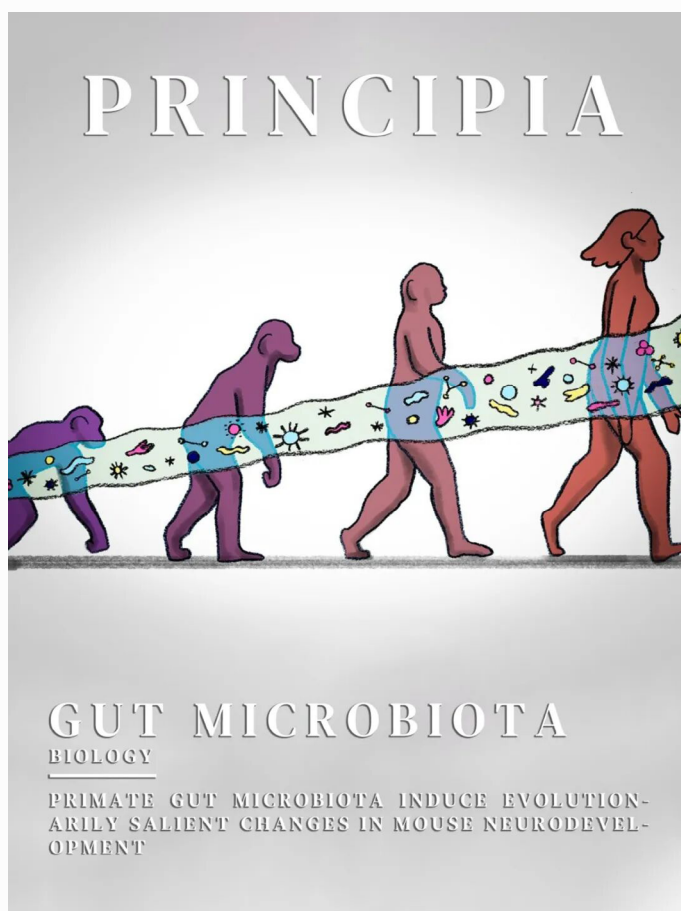
无菌小鼠的微生物实验

此前，研究人员已经发现，当将拥有较大的脑的灵长类动物的微生物，引入宿主小鼠体内时，会在宿主的微生物组中产生更多的代谢能量——而这正是脑变得更大的一个先决条件，因为脑的发育和运作都需要消耗大量能量。

这一次，他们将目光直接投向脑本身，希望探究：来自脑大小不同的灵长类物种的肠道微生物，是否会改变宿主小鼠脑的运作方式。

在实验中，研究人员选择了三种拥有不同脑尺寸的灵长类物种，分别是相对脑尺寸较大的人类和松鼠猴，以及相

对脑尺寸较小的猕猴。他们将这三种灵长类物种的肠道微生物接



研究结果已发表于近期的《美国国家科学院院刊》上。

种到无菌小鼠体内。

在改变了宿主小鼠的微生物组的八周内，研究人员观察到：接种了猕猴的肠道微生物的小鼠，其脑的运作方式不同于接种了人类和松鼠猴的肠道微生物的小鼠。

首先，他们发现接种了人类和猕猴的肠道微生物的无菌小鼠，其脑中出现的基因表达差异，竟然与真实的人类与猕猴的脑差异高度相似。换言之，在某种程度上，研究人员让这些接种了不同微生物的小鼠的脑，呈现出了这些微生物原本来源的灵长类动物的脑特征。

进一步的比较揭示了一个更耐人寻味的现象。尽管人类和松鼠猴在进化上相距甚远，但它们都属于相对脑尺寸较大的灵长类动物。研究发现，那些接种了来自这两个物种的肠道微生物的小鼠，会以非常相似的方式，上调小鼠脑中与能量产生相关的基因表达水平。

而尤为引人注目的是，接种了来自人类的肠道微生物的小鼠，其体内的与氧化磷酸化过程相关的基因表达得到了特异性的增强，而这些基因表达变化与肠道微生物组中和葡萄糖代谢以及糖异生相关的代谢通路的丰度增加显著相关。

肠道微生物与精神疾病

此外，这项研究还发现，人类的肠道微生物组会下调一些在进化上高度保守、并与孤独症等神经发育障碍相关的基因表达。而在接种了猕猴的肠道微生物的小鼠中，其基因表达模式中出现了与注意力缺陷多动症(ADHD)、精神分裂症、双相障碍以及孤独症相关的信号特征。

此前已有研究显示，孤独症等疾病与肠道微生物的组成之间存在相关性，但能够直接证明肠道微生物对这些疾病具有因果贡献的数据仍然不足。而这项研究提供了更多证据，表明微生物可能在因果层面上参与了这些疾病的形成——更具体地说，肠道微

生物组在发育过程中塑造了脑的功能。

基于这些发现，研究人员推测：如果人类的脑在发育过程中暴露于“错误的”微生物作用之下，那么其发育轨迹就可能发生改变，从而出现这些疾病的症状。也就是说，如果一个人在生命早期没有接触到“正确的”人类微生物，那么其脑的运作方式就会有所不同。

对临床的启示

这项研究在临床上具有重要启示意义：它有助于进一步探索某些心理疾病的起源，并促使研究人员从进化视角重新审视微生物会如何影响脑的生理功能。

研究人员表示，从物种和个体两个层面来思考脑的发育是非常关键的。未来，他们希望探究是否能够通过比较不同物种、不同个体在同一时间点上的差异模式，来发现微生物与脑相互作用的普遍规律，以及这些规律是否同样适用于个体发育过程。

参考来源：

<https://news.northwestern.edu/stories/2026/01/microbes-may-hold-the-key-to-brain-evolution?fj=1>

<https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.2426232122>

图片来源：封面图 & 首图：Annelise Capossela via Northwestern.edu

字节跳动跨界冷冻电镜： 从 AI 专利、战略投资到千亿 科学仪器市场布局

来源：仪器信息网；原文链接：<https://www.instrument.com.cn/news/20251230/865156.shtml>

导读：这份专利是字节跳动在“AI for Science”领域的深度布局，其背后是从基础算法研发、战略资本投入，到云平台服务落地的完整产业协同链条。

仪器信息网讯 12 月 26 日，字节跳动旗下公司的一项名为“冷冻电镜图像处理方法、装置、终端和存储介质”的发明专利授权公告，这家以短视频和人工智能闻名全球的互联网巨头，正将其技术触角悄然延伸至一个高度专业化的科研工具领域。

结构生物学领域正经历一场深刻的范式转移。根据第三方市场研究，全球冷冻电镜市场规模预计到 2035 年将超过 40 亿美元。这个曾由精密仪器和复杂物理模型主导的领域，如今正被数据和算法重新定义。

冷冻电镜图像处理方法、装置、终端和存储介质【2023112743606】

事务数据类型： 授权

事务数据公告日： 2025.12.26

授权



这份专利是字节跳动在“AI for Science”领域的深度布局，其背后是从基础算法研发、战略资本投入，到云平台服务落地的完整产业协同链条。

市场拐点

冷冻电镜技术凭借其解析大型、动态生物分子复合物的独特能力，已成为结构生物学和现代药物发现的基石。

然而，技术瓶颈同样突出：实验产生的海量图像信噪比极低，传统数据处理流程复杂、耗时且高度依赖专家经验。将二维投影图像转化为可靠的三维原子模型，成为限制该技术普及和效率的关键障碍。

这个价值百亿的尖端仪器市场，其困境正是整个千亿规模科学仪器市场智能化转型的典型缩

影。科学仪器的竞争，正从硬件参数的比拼，全面转向数据智能化处理能力的较量。

技术破壁

字节跳动旗下公司获得的“冷冻电镜图像处理方法”专利，正是针对上述核心痛点提出的一种全新解决方案。

与传统主流软件(如 RELION)基于物理模型的反向重建分步流程不同，该专利采用了深度学习中的“变分自编码器”框架。其核心创新在于，模型通过编码器-解码器结构，尝试端到端地将原始电镜图像直接映射为蛋白质的粗粒度原子模型。

尤为关键的是，它通过引入“键长约束”、“碰撞约束”和“弹簧约束”作为损失函数，将生物结构的物理化学规则内嵌于 AI 模型之中。这种方法旨在让 AI “理解”图像并直接推理三维结构，尤其专注于捕捉蛋白质的动态构象变化。

从构想到验证

这项于 2023 年公开的专利，迅速从技术构想走向了方法论验证。2024 年 11 月，字节跳动研究院的相关成果 CryoSTAR 在《自然·方法》上发表。

Article | Published: 29 October 2024

CryoSTAR: leveraging structural priors and constraints for cryo-EM heterogeneous reconstruction

Yilai Li, Yi Zhou, Jing Yuan, Fei Ye & Quanquan Gu 

Nature Methods (2024) | [Cite this article](#)

757 Accesses | 29 Altmetric | [Metrics](#)



研究团队在包括膜蛋白、大型复合物在内的多个真实实验数据集上证明，CryoSTAR 能够有效解析生物大分子的动态构象。从专利到顶刊论文，标志着其技术路径完成了关键的可行性证明，展示了扎实的技术纵深。

这向业界清晰地表明，字节跳动的跨界并非浅尝辄止的概念探索，而是有能力产出经得起同行评议的严肃科学成果。

CryoSTAR 的成功验证，其意义不止于冷冻电镜。它证明了一套 AI 驱动的、从原始数据端到端直接生成科学洞察的新范式，具备了颠覆传统分析流程的潜力。这种范式或可以迁移至其他产生复杂数据的科学仪器领域。

资本布局与生态闭环

字节跳动的布局远不止于内部的研发与论文。早在 2021 年，字节跳动就连续两次战略投资了

冷冻电镜领域的重要企业——水木未来（北京）科技有限公司。

这家公司正是国内领先的冷冻电镜结构解析与药物发现服务平台。这笔早期的投资，清晰地揭示了字节跳动跨界布局的战略思维：“技术研发”与“产业落地”并行。

通过资本纽带，字节跳动不仅深入了解了冷冻电镜实验端到端的真实痛点与 workflow，更为其后续的技术成果铺就了产业化通道。这一布局的协同效应在随后迅速显现：字节跳动自身的云服务品牌“火山引擎”与水木未来达成合作，推出了基于云平台的冷冻电镜智能计算解决方案，旨在将数据处理成本降低 50% 以上。

由此，一个清晰的“AI 技术 - 产业投资 - 云平台”三角生态闭环已然形成。字节跳动将自研的先进算法，通过战略伙伴的行业专长进行产品化与验证，最终借

由自身的云计算基础设施推向市场，提供从算力到智能分析的完整服务。

重塑中的行业格局

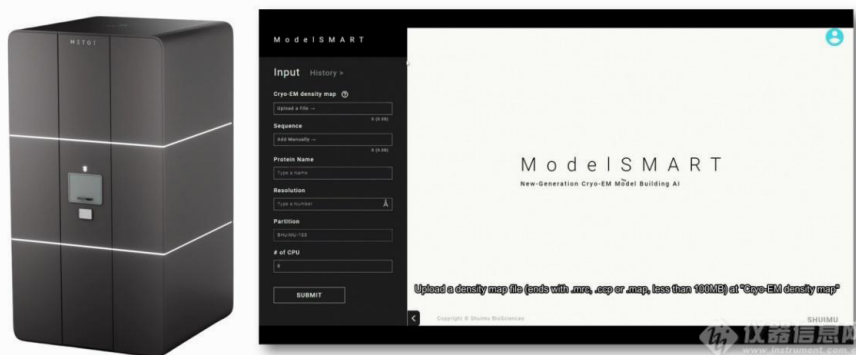
字节跳动的动作，是全球科技巨头以“AI+ 计算”重塑科学工具浪潮的一部分。

谷歌通过 AlphaFold 解决了结构预测问题，成为了冷冻电镜结构解析的“上游”；英伟达提供了不可或缺的算力心脏；微软的云平台则承载着海量数据的处理。

在国内，产学研界也在积极推动融合。2025 年 7 月，苏州发布了整合软硬件的“冷冻电镜与 AI 双引擎平台”。

谷歌、英伟达、微软、字节跳动等科技巨头的涌入，正在根本性地改变冷冻电镜领域的竞争维度。

竞争已不再是单一软件的功能对比，而是升级为“传统软件套件”与“AI 原生工作流”的范式之争，更是“孤立工具”与“云



AI+ 冷冻透射电子显微镜（左）、SMART 软件界面展示（右）

端一体化智能平台”的生态之争。

对于传统的硬件与软件厂商，挑战在于其核心价值可能被更上层的智能算法和更底层的算力平台所重构。机遇则在于主动融合，将顶尖 AI 能力深度集成，完成从“工具提供商”到“智能解决方案提供商”的转型。

一个明确的趋势是，AI 正从自动化图像处理等外围环节，快速渗透至三维重构、构象解析与原子模型构建等核心环节，重新定义科研工作的效率边界。

小结

当互联网世界最强大的数据、算法与资本力量，与前沿生命

科学产生的海量数据相遇，一场静默而深刻的变革已全面启动。

字节跳动通过一项专利、一篇顶刊论文、两笔关键投资和一个云平台，勾勒出了一幅清晰的战略地图。这不再是单点技术的突破，而是一次系统的、多层次的产业跨界布局。

它迫使科学仪器产业链上的每一位参与者重新思考自己的定位。行业的未来，正在从‘软件定义仪器’加速迈向‘智能驱动发现’。字节跳动的布局揭示，下一个十年的核心竞争，在于谁能更早、更深地构建‘AI+ 仪器 + 云’的生态能力，从而主宰从数据生成到科学发现的完整价值链。

“如鲠在喉”
将成往事，
无刺鱼让你
“大快朵颐”

作者：马劲，赵灿，李小巨，何赛君；Email: 15366538080@qq.com

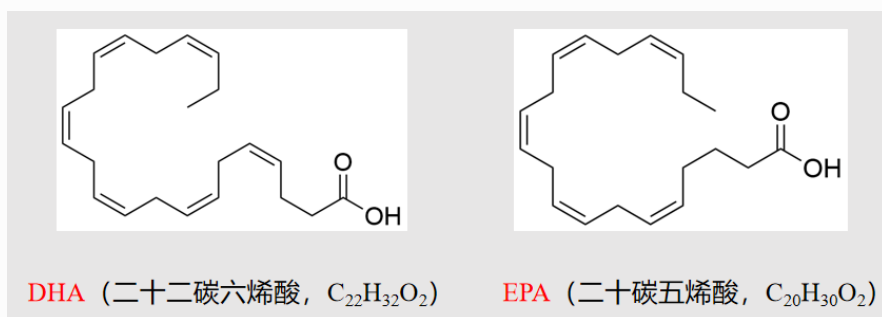


中

国人年夜饭的餐桌上，总是会有一道跟鱼有关的美食。这不仅象征着“年年有余”的美好寓意，更因鱼肉中富含优质蛋白、多不饱和脂肪酸以及丰富的维生素和矿物质而备受欢迎。《中国居民膳食指南（2022）》推荐，每天鱼、禽、肉和蛋摄入总量达到 120~200 g，每周至少摄入 2 次水产品。鱼肉作为优质选择之一，其推荐摄入量占有一席之地。

从化学角度看，鱼肉的营养奥秘藏在分子里。鱼肉中的蛋白质是由氨基酸构成的长链分子，包括赖氨酸、蛋氨酸和色氨酸等必需氨基酸，这些氨基酸在体内通过复杂的化学反应参与组织修复与能量代谢。鱼肉中的多不饱和脂肪酸，如 DHA（二十二碳六烯酸， $C_{22}H_{32}O_2$ ）和 EPA（二十碳五烯酸， $C_{20}H_{30}O_2$ ），在分子结构上含有多个双键，使其保持较高的流动性和生物活性，有助于降低血脂、保护心脑血管健康（图 1）。正是这些活跃的“化学小分子”，让鱼肉成为高价值的营养佳品。

鱼肉凭借鲜嫩的口感、丰富的营养和美好的寓意博得人们的青睐。然而，鱼肉虽然鲜美，却常常伴随着“难吃”的困扰。因为绝大多数鱼中夹杂着大量的鱼刺，尤其对于老人和儿童，往往是美食中的“隐形陷阱”，一不



①【图 1】DHA 和 EPA 分子结构式（自制）



②【图 2】鱼类美食卡通照片（左），无刺鱼肉卡通照片（右）（图片来源于豆包 AI 生成）

小心便可能引发“如鲠在喉”的危机。据报道，一位 87 岁的老

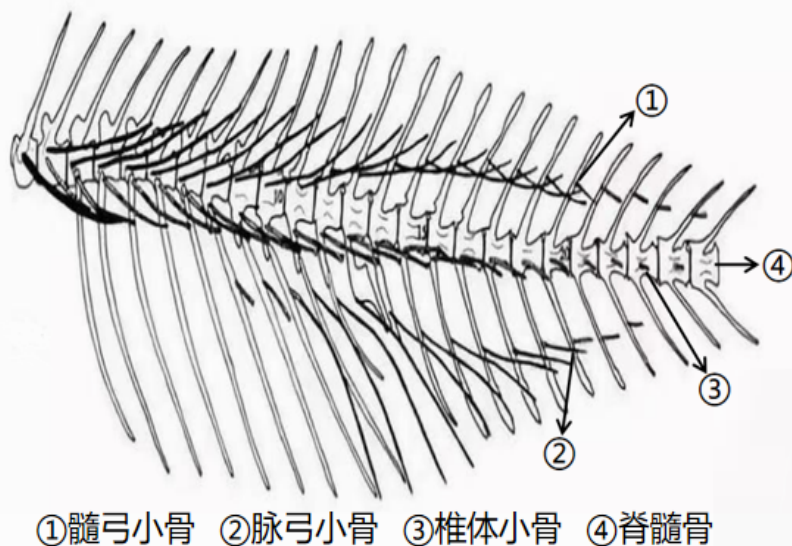
人在吃鱼时不慎被鱼刺卡住，去医院检查后发现食道已经有穿

孔，鱼刺紧邻肺动脉左侧^[1]。这对生命已经产生了重大威胁！同样，儿童因为牙齿未发育完全，自身注意力较差，吃鱼的时候都或多或少有被鱼刺卡住的痛苦经历。

幸运的是，在我国科学家们的不懈努力下，已经找到了调控鱼刺生长的主效基因（runx2b），并利用基因技术和鱼类精准育种技术，成功培育出了无刺武昌鱼、鲫鱼和草鱼等品种^[2]。这些无刺鱼类的出现，让鱼刺不再卡脖子将成为现实，让“如鲠在喉”成为往事（图2）！

1. 鱼刺是什么？

鱼刺，又称肌间骨（肌间刺），顾名思义，是指夹杂在鱼肌肉间的小骨或小刺。这些肌间骨，实际上是由肌隔结缔组织经过骨化过程形成的，它们隐匿在椎骨两侧的小骨或小刺。根据分布位置的不同，可以将肌间骨分为三类：一是髓弓小骨，从头部后方到尾柄基部连接在髓弓上；二是椎体小骨，靠近脊椎附近；三是脉弓小骨，附着于腹肋或脉弓上（图3）^[3]。鱼刺形态各异，科学家们曾对鱼刺形态学进行深入研究，发现鱼刺竟然呈现有七种独特的形状：“I”形、“卜”形、“Y”形、一端多叉形、两端两分叉形、两端多叉形和树枝



①【图3】不同位置鱼刺照片^[3]

形^[4]。就像一根藤上可以长出七种不同能力的葫芦娃，而一条鱼上也可能同时存在七种形状不同的鱼刺，不知道你享受美味的鱼肉时，发现过几种鱼刺呢？

从化学组成上看，鱼刺是个“硬骨头”，主要由两类成分构成：有机部分是胶原蛋白，这是一种由氨基酸构成的纤维状蛋白质，像是筋道的韧带，让鱼刺具备弹性；无机部分是羟基磷灰石 $[\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2]$ 等钙盐，好比石头，赋予鱼刺坚硬的质地^[5]。两者结合，就像钢筋混凝土——结实到难以咀嚼。民间流传着“鱼刺卡喉咙时喝醋能化开”的土方子，但从科学上看并不靠谱。原因在于：鱼刺中的钙盐几乎不溶

于水，普通食醋中的醋酸浓度低、酸性弱，而要真正溶解这些钙盐需要强酸、高温和较长时间反应。醋在咽喉停留的那一两秒，根本不足以“融化”鱼刺。

鱼的身体堪称“黑科技”：鱼鳃像天然呼吸机，鱼鳔是它的潜水艇，鱼鳞则是护甲。那么鱼刺呢？鱼刺其实像鱼的骨架，给侧肌撑起了坚实的框架，还和肌腱组成黄金搭档，增强身体的灵活性^[6]。肌腱负责把肌肉的力量传给骨头，而鱼刺让肌腱像弹簧一样有韧性，于是鱼儿便能灵活转身、轻松跳跃。研究发现：鱼刺越多，鱼的灵活性和跳跃性也越强。鲤科鱼类有约99~133根鱼刺，是黄颡鱼的十几倍，这或

许就是“小鲤鱼跳龙门”传说的科学基础^[7]（图 4）。

在鱼类的漫长进化过程中，随着它们由低等形态逐步演变为更高级的形态，一个有趣的现象出现了：绝大多数高等真骨鱼失去了肌间刺，但这并未影响它们的正常生存。有学者认为肌间刺是一种痕迹器官，对鱼的生长发育并无太大影响^[7]。于是，科学家们决定找到控制鱼刺生长的关键基因，并借助基因工程与精准育种技术，成功培育出无刺鱼品种。这一成果无疑为鱼类育种领域带来了新的突破！



【图 4】鲤鱼跳龙门卡通图片（图片来源于豆包 AI 生成）

2. “拔刺”的艰难之旅

表 1 “拔刺”之旅的主要标志性事件

时间	步骤	阶段性成果	重要指标
2012 年	大海捞针	开始致力于无刺鱼的研究	项目启动
2018 年	初具成效	找到控制鱼刺的有效基因	敲除后能减少 70% 鱼刺
2019 年	精益求精	找到鱼刺主效基因 runx2b	敲除后能减少 100% 鱼刺
2021 年	扩大规模	在鳊鱼、草鱼和银鲫身上试验并获得少刺鱼 (F ₀ 代)	少刺鱼生长良好，但遗传稳定性有待提高
2022 年	精准育种	利用 F ₀ 代少刺鱼繁育出没有肌间刺的武昌鱼 (F ₁ 代)	F ₁ 代完全没有肌间刺且长势良好
2023 年	无刺异育银鲫诞生	培育出无刺异育银鲫	无刺异育银鲫外观和行动与普通银鲫无差别
2024 年	无刺草鱼诞生	培育出无刺草鱼	无刺草鱼蛋白质、微量元素，氨基酸含量与普通鱼类相似
2025 年	企业合作	海大集团以 5000 万元独占“无刺草鱼技术” 20 年使用权	无刺草鱼有望走上餐桌

没有一项科学研究是一蹴而就的。“拔刺”之旅始于2012年，至今历经了13年的艰辛探索。表1记录了“拔刺”过程中的主要标志性事件。

在这场“拔刺”的科学征程中，拔刺用的“金刚钻”是基因编辑技术。那么，什么是基因编辑技术呢？基因是一段带有遗传信息的核苷酸序列，是决定生物性状的基本单位。比如一个人长得高，除了运动和摄取营养充分，体内的“长高基因”也在发挥作用。基因编辑技术依靠“分子剪刀”——核酸酶，能够对基因组的特定片段进行精准修饰，从而改变性状。控制鱼刺生长的基因，就像是一把“鱼刺之门”的钥匙。如果能用基因编辑把这扇门永远关上，无刺鱼就会随之诞生，这也成为鱼类育种的新方向。

但要找到关键基因，并不容易。在一条鱼体内有成千上万个基因，寻找它就像大海捞针。科学家最初选择武昌鱼作为研究对象，经过大量筛选，锁定了50多个可能与鱼刺生长相关的基因。为了加快进度，他们将这些基因放入模式生物斑马鱼中进行验证。斑马鱼因繁殖快、周期短，成为理想的实验对象。2018年，研究团队首次找到一个能有效减少鱼刺的基因，但

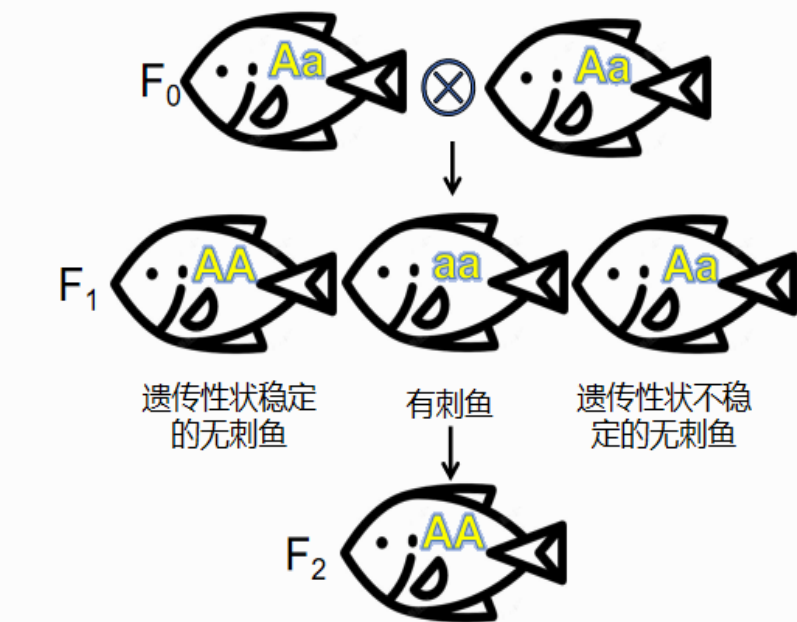


图5 无刺鱼假想杂交简图（自制）

并不彻底。又经过一年努力，科学家们终于发现了真正的“主效基因”——runx2b，能够完全去除鱼刺。

众人拾柴火焰高。中国科学家秉持着合作精神，将信息共享，分别在鳊鱼、草鱼和银鲫身上试验，成功培育出第一代杂合体（F₀代）的少刺鱼。为了获得遗传性状稳定的纯合体无刺鱼，将成熟的杂合体少刺鱼经过纯化繁殖，经过连续三代的培育，最终得到了遗传性状稳定的纯合体真正无刺鱼（F₂代）。为什么一定要培育到第三代，才能获得纯合体鱼呢？这里假设一下，杂合

体F₀代的无刺基因是Aa，那么第二代F₁代的基因型就可能是AA，Aa和aa。但需要的是AA这种遗传性状稳定的纯合体。因为Aa的杂合体表现性状虽然也是无刺鱼，但在下一代培育过程中可能会出现aa有刺鱼，这不利于性状稳定遗传，所以我们就要再培育一代，以确保筛选出遗传稳定的AA纯合体无刺鱼（图5）。

前年，科学家们又将突破应用到异育银鲫身上。异育银鲫是银鲫卵子与异源精子结合后发育的后代，不仅具有杂种优势，还能在低温、无水条件下短途运输，肉质细嫩、营养丰富，食用

价值极高。然而，它的基因结构更复杂——作为三倍体鱼类，它的每个同源基因有3个高度一致的等位基因。要想实现无刺，就必须同时敲除 Cgrunx2b-A 和 Cgrunx2b-B 两个部分及其所有等位基因^[8]（图6）。这就像一个并联电路，只有同时关闭两盏灯，整个电路才会断开。

科学家们对无刺斑马鱼的肉质进行了系统检测，结果显示其氨基酸和脂肪酸含量与普通有刺鱼无明显差异。同时，无刺鱼的生长状况良好，肌肉与骨骼发育正常，生活习性也与普通鱼类保持一致^[9-10]。此外，对无刺草鱼的检测同样表明，其蛋白质、微量元素和氨基酸含量均与常规草鱼相近。有志愿者在品尝了无刺草鱼后，发现其口感比起有刺草鱼而言，更加鲜嫩！这说明，目前并没有发现无刺鱼不利于人类健康的方面，其肉质和口感方面也不会比有刺鱼差。

而在今年，海大集团以5000万元独占“无刺草鱼技术”20年使用权，这不仅仅是一项技术转让，更意味着无刺草鱼的研究将迈入了产业化的新阶段。草鱼作为我国养殖量最大的淡水鱼之一，其肌间刺多一直是影响消费者食用体验的关键问题。而这项技术的取得，意味着未来有望培

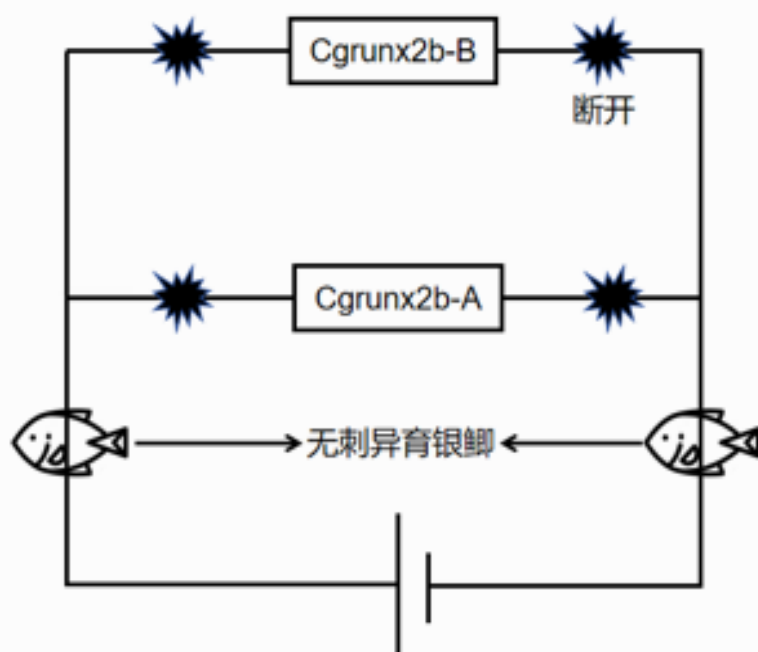


图6 无刺异育银鲫基因编辑电路简图（自制）

育出无刺草鱼，为消费者提供更加便捷、安全的食用体验。可以想象，在不久的将来，餐桌上端上一盘红烧草鱼，人们再也不用担心被鱼刺打断美食的兴致了。

3. 小结

诚然，基因编辑无刺鱼展现了令人期待的前景，但也伴随着一些争议。首先，食品安全始终是公众最为关切的问题。现有研究表明，无刺鱼在营养成分、口感和生长状态上与普通鱼类并无显著差异^[9-10]，尚未发现不利影响，但长期食用的潜在风险仍需持续跟踪与验证。其次，在生态层面，若无刺鱼被大规模养殖甚

至进入自然水域，是否会对现有物种竞争力和生态平衡造成影响，也是科学家和管理部门亟待评估的重要课题。此外，消费者对基因编辑食品接受度差异明显：有些人欢迎无刺鱼带来的便利与安全，也有人对“基因编辑”心存顾虑，希望进一步了解相关的检测和监管措施。

事实上，科学的发展就是在探索与争议中不断前进。无刺鱼的诞生，不仅是基因编辑技术的一次创新应用，也体现了人类在改造自然方面的独特智慧。“拔刺”征途的每一步，都凝结着中国科学家的坚持与付

出——他们以严谨与坚韧，将遥想变为现实。不过，无刺鱼能否最终走上大众餐桌，既需科研突

破，更赖监管完善与公众接纳。倘若未来能够实现规模化养殖，并顺利通过食品安全和社会认同

的双重考验，无刺鱼无疑将成为餐桌上的新宠，尤其为老人和儿童带来福音！

参考文献

- [1] 案例故事|87岁老人卡鱼刺6天, 食道已穿孔左侧就是肺动脉[Z]搜狐, 潮流卫生与健康 [2021-06-18]. https://www.sohu.com/a/472797710_121118804
- [2] 吴纯新. 吃鱼不“挑刺”? 鱼刺都去哪儿了[J]. 科学大众(中学生), 2023(Z1): 73-75.
- [3] Patterson C, Johnson G D. The intermuscular bones and ligaments of teleostean fishes[J]. Smithsonian Contrib Zool, 1995, 559(559): 1-85.
- [4] Danos N, Staab K L. Can mechanical forces be responsible for novel bone development and evolution in fishes?[J]. J Appl Ichthyol, 2010, 26(2): 156-161.
- [5] Zhang J, Yin T, Xiong S B, et al. Thermal treatments affect breakage kinetics and calcium release of fish bone particles during high-energy wet ball milling[J]. J Food Eng, 2016, 183: 74-80.
- [6] 马良骁, 董在杰, 苏胜彦, 等. 鱼类肌间刺的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(4): 234-235, 240.
- [7] 吕耀平, 鲍宝龙, 蒋燕, 等. 低等真骨鱼类肌间骨的比较分析[J]. 水产学报, 2007, 31(5): 661-668.
- [8] Gan R H, Li Z, Wang Z W, et al. Creation of intermuscular bone-free mutants in amphitriploid gibel carp by editing two duplicated runx2b homeologs[J]. Aquaculture, 2023, 567: 739300.
- [9] 杨建, 佟广香, 郑先虎, 等. 肌间刺缺失突变对斑马鱼胚胎发育过程中肌肉发育的影响[J]. 中国水产科学, 2019, 26(2): 296-303.
- [10] 杨建, 佟广香, 郑先虎, 等. 肌间刺缺失对斑马鱼骨骼发育的影响[J]. 水生生物学报, 2020, 44(3): 546-553.

海鲜 + 水果 = 砒霜？ 背后的化学真相

作者：张怡如，郭奕含，代玉，李雪精，和晓琴，李有梅；Email: 2564321935@qq.com



Image by freepik on Freepik

引言 | 砒霜传说，从何而来？

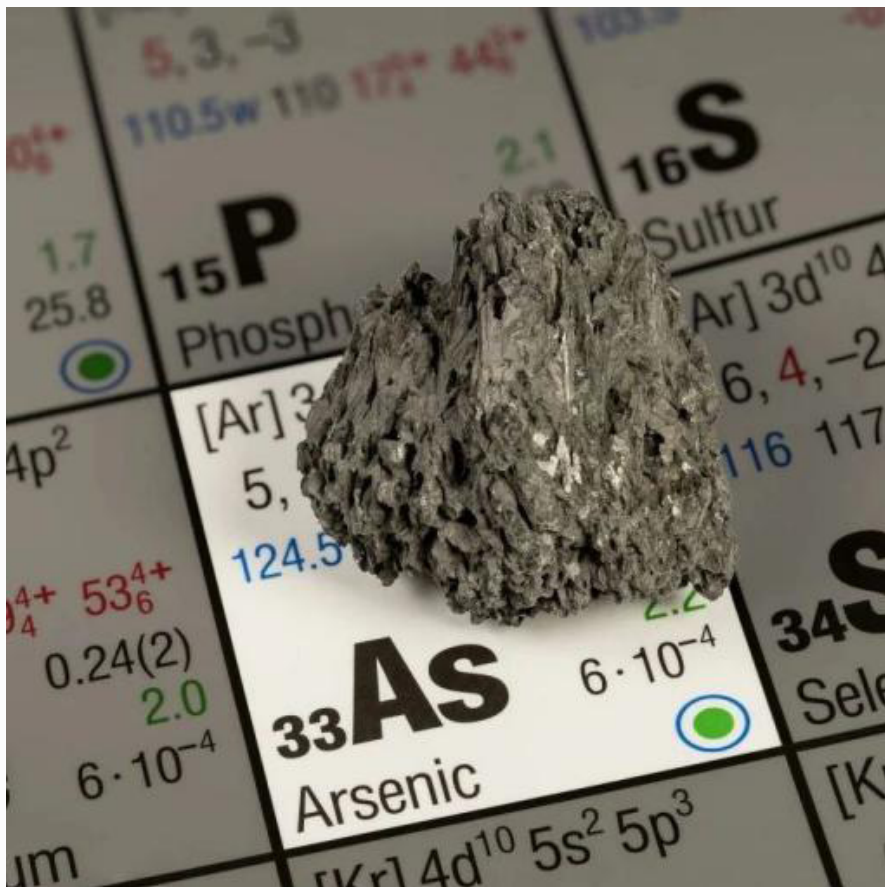
“震惊！海鲜+水果等于砒霜？（图1）”“这两样东西（海鲜、水果）万万不可一起吃，快转发给你的家人吧”。你是否在家庭群、朋友圈看过所谓科普专家这样的“科普”，你是否也震惊于海鲜和水果混合的可怕，对此深信不疑。“海鲜和水果不能一起吃”，如同无形的“餐桌警告”，让公众在面对海鲜水果的组合时心生疑虑，本该是味蕾的双重享受，却被传言蒙上阴影。

然而在传言的背后，却有着普通人无法反驳的原理。传言称：海鲜中有砷，特别是无机砷，不是善茬，水果中则含有维生素C，化身为还原刺客。在胃里，维生素C可以把五价无机砷还原为三价无机砷也就是砒霜，导致中毒。听起来特别有逻辑，让人无法反驳。

但！先别着急扔掉手里的西瓜和小龙虾。海鲜加水果的组合是否真的有中毒的风险？让我们从严谨的化学角度出发，探究广为流传说背后的真相。本文将深入剖析、逐一审视海鲜中砷的形态究竟如何变化？维生素C在人体内是否能完成致命还原？最关键的是，最终“毒”的剂量是否对人体构成威胁？希望能为公众揭开传言背后的科学真相，拨开迷雾，消



①【图1】海鲜+维生素C=砒霜动漫图解（图片来源于百度视频号血管外科郑凯主任）



②【图2】自然砷及其化学式图片（图片来源于搜狐账号程诚检测）

除公众恐慌。以科学证据澄清传言，消除信息差产生的恐慌，科普健康饮食的底线。

1. 原理追踪 | 化学反应有没有可能发生？

1.1 海鲜中的砷主要是哪一种？

砷（As）是一种常见的类金属元素（图2）。在自然界中多以硫化物矿物形式存在，其化学性质与磷相似，却因毒性而更受关注。

表 1 砷的主要类型

形态	典型物质	毒性强度	常见来源
三价无机砷	亚砷酸钠、砒霜	剧毒	工业废水、农药残留
五价无机砷	砷酸钠	毒性较低	污染水体、部分化工产品
有机砷	砷甜菜碱	毒性极低	海产品（虾、蟹、海藻等）

表 1 从形态、典型物质、毒性强度和常见来源四个维度进行区分，虽然我们日常食用的海鲜中确实可能含有砷，但并非传言中剧毒的三价砷（砒霜成分），而是以低毒或无毒的有机砷为主，安全性较高。

海鲜中砷的主要存在形式包括两种。

1) 有机砷化合物（占绝大多数）

海鲜（尤其是鱼类、贝类和虾蟹等）中的砷多与碳、氢、氧等结合，形成有机砷^[1]。例如：砷甜菜碱：最常见的形式，广泛存在于甲壳类、头足类海鲜中，性质稳定，几乎无毒，会随人体代谢排出，不积累。砷胆碱、砷糖：多见于海藻、裙带菜和贝

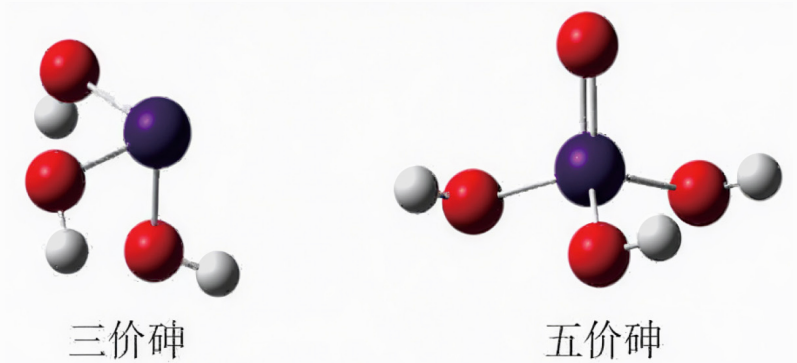
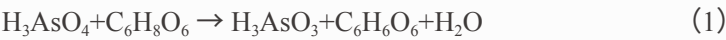
类中，毒性极低，对人体危害可忽略^[2]。

2) 无机砷（含量极低）

包括三价砷（As³⁺）和五价砷（As⁵⁺），其中三价砷毒性较强，但在正常海鲜中含量极微（通常每公斤仅几微克），远低于食品安全标准（我国规定水产中无机砷限量为 0.1 mg/kg）。

砷的化学反应

氧化还原性：三价砷与五价砷可相互转化（式（1））。例如，五价砷在还原剂（如维生素 C）作用下可能还原为三价砷。



【图 3】含氧阴离子砷的分子结构示意图^[3]

海鲜（尤其是甲壳类如虾和蟹）中可能含有五价砷化合物，基于这个化学反应，这时有人就认为同时吃海鲜和维生素 C，体内会产生三价砷，有剧毒，对我们人体有害，理论上五价砷是有可能在维生素 C 的作用下被还原为三价砷（即砒霜的主要成分），关键在于：剂量决定毒性。

现实中，正常海鲜中五价砷的含量极微（通常为 0.1~0.5 mg/kg），远低于安全标准。将海鲜中的五价砷，全部还原为三价砷并达到中毒剂量（砒霜致死量约为 0.1 g），需同时摄入：数十公斤海鲜（使服用的五价砷约 100 mg）和数公斤维生素 C（日常推荐摄入量仅 100 mg/day）。这在现实中完全无法实现，因而抛开剂量来谈论维生素 C 和海鲜共同食用是不科学的。

总的来说日常饮食中，海鲜与富含维生素 C 的食物（如水果和蔬菜）搭配是安全的，无需刻意避免^[4]。但应该注意来源。长期以来，工业化快速发展，诸如工业排放、矿物燃料燃烧、矿山作业和农业化学品的使用等一系列人类活动，均给海水水质带来了一定程度的影响，导致海水中砷含量增加^[5]。为了避免食用受污染的海鲜（可能含

高浓度砷），我们应选择正规渠道购买产品。日常生活中，任何食物过量都可能带来风险，保持饮食多样性健康性更重要。

1.2 水果中的维生素 C 有多强的还原性？

夏天，各种瓜果纷纷上市，鱼、虾及蟹等海鲜也很受欢迎。但“海鲜和水果通吃形如砒霜”这一说法层出不穷，柿子和螃蟹，杨梅和虾蟹这一些忌口人们都谨记在心，时时防备，那么海鲜和水果这一组合，为何让人们如此戒备？或许水果中维

生素 C 可能是人们忌惮的罪魁祸首。

维生素 C，也叫抗坏血酸，是一种具有较强还原作用的水溶性维生素，部分水果中的维生素 C 含量较高，比如鲜枣含量约为 243 mg，猕猴桃含量约为 160 mg，柑橘类的含量也约为 30~50 mg，如图 4 中的水果都是人们生活中常见维生素 C 较高的水果。那维生素 C 的还原性是否能够将海鲜中的五价砷化合物还原为三价砷呢？



④ 【图 4】 常见水果维生素 C 含量排行榜

维生素 C 之所以具有强还原性，根本在于它分子结构中独特的烯醇式羟基结构，特别是烯二醇结构，这种结构极易失去电子，从而使得有极强的还原性^[6]。如此强的还原性在理论上，在甲壳类和贝类的海鲜中含有微量的无机砷，无机砷中毒性较低的五价砷具有氧化性，维生素 C 具有还原性，维生素 C 的强还原性就将五价砷还原成毒性极强的三价砷，也就等同于生成了砒霜，从而使人中毒。

但这只是在理论之中，是否能够发生此化学反应还需要进一步分析。五价砷还原为三价砷需要在强酸性、高温、催化剂的实验室条件下才能进行^[7]。但在人的胃肠道环境复杂，该反应会受到 pH 值、其他食物成分、肠道菌群和消化酶等因素的影响，因

此，维生素 C 是否能够有效、大量地将海鲜中微量的五价砷还原成三价砷是无法确定而且效率较低的过程^[8]。并且食物在胃中停留的时间大约 1~4 h，该时间内也不足以能够进行反应效率非常的低。

维生素 C 的摄入量也是关键所在，在理论上要对微量砷的存在形态产生显著影响也需要摄入远远超于日常摄入量的维生素 C，日常水果提供的维生素 C 的含量远不足以引发这种危险转化，更何况一些水果所含的维生素 C 含量也不是很高。

所以，在正常、均衡的饮食习惯下，同时食用海鲜和水果（包括富含维生素 C 的水果）都是安全的，不会造成砷中毒的危险，人们可以放宽心的吃。

“海鲜 + 维生素 C = 砒霜”是对化学原理的极端夸大，忽略了对实际摄入量与毒性的关系。二者正常搭配不会导致中毒，无需轻信谣言影响饮食选择。真正需要关注的是食物的新鲜度和来源安全。

2. 计量分析 | “中毒”需要满足哪些条件？

2.1 风险剂量理论框架

砷的毒性与其化学形态和剂量密切相关。无机砷（如三氧化二砷 (As_2O_3)，即砒霜）的半数致死量约为 15 mg/kg，而有机砷（如海产品中的砷甜菜碱）毒性极低^[8-9]。世界卫生组织规定，成年人每日无机砷容许的摄入量为 0.15 mg/kg。以体重 60 kg 的成年人为例，每日摄入量超过 9 mg 才可能引发急性中毒^[10]。

水果中的维生素 C 与海鲜中五价砷的反应需满足以下条件：

五价砷的剂量：海鲜中砷含量通常低于 1 mg/kg（以鲜重计），且 90% 以上为无毒的有机砷^[11]。假设食用 200 g 砷污染较高的贝类（含无机砷 0.5 mg/kg），摄入量仅为 0.1 mg，远低于中毒阈值。

反应效率：维生素 C 还原五价砷的实验多在强酸性实验室条件下完成，而人体胃酸环境（pH 1.5~3.5）中反应效率有限，且膳食纤维、蛋白质等成分可能抑制反应。



2.2 现实案例与流行病学证据

东南亚地区饮食调查：越南、泰国等沿海地区常将柑橘类水果（如青柠）与海鲜搭配食用，但未报告因此导致的砷中毒事件。一项针对越南渔民的调查显示，其尿液无机砷水平与内陆居民无显著差异，说明饮食组合的实际风险可控。

秘鲁“酸橘汁腌鱼”：2023年12月被联合国教科文组织列入人类非物质文化遗产代表作名录。秘鲁国家卫生研究所2019年研究发现：按传统配方制作的酸橘汁腌鱼，反应生成的亚砷酸盐总量低于0.005 mg/份，仅为WHO规定每日容许摄入量的0.2%。该饮食组合中维生素C与海鲜砷的理论反应率不足0.5%，且生成的微量亚砷酸盐会在代谢过程中被转化为无害的二甲基砷酸迅速排出体外。

实验室模拟研究：中国疾控

中心曾模拟胃部环境，将100 mg维生素C与1 kg砷污染海鲜（无机砷含量2 mg/kg）混合，结果显示生成的亚砷酸盐量仅为0.02 mg，不足世界卫生组织日容许摄入量的1%。

2.3 风险放大因素辨析

尽管理论风险极低，以下情况可能需谨慎：

极端饮食行为：一次性摄入超过5 kg高砷海鲜（如某些深海鱼内脏）并同时服用大剂量维生素C补充剂（>1000 mg），可能接近风险阈值。

个体差异：慢性砷暴露人群（如矿区居民）或肝功能异常者可能对砷代谢能力下降。

2.4 关键推论与分析

基于剂量-反应关系与真实案例，水果与海鲜同食导致砷中毒的风险可忽略不计。食品安全监管应更关注环境污染或非法添

加剂导致的砷暴露，而非天然饮食组合。建议消费者避免过度依赖单一实验结论，而应从整体膳食结构与摄入量评估风险。

3. 科普误区 | 谣言为何流行？

“海鲜+水果=砒霜”是夸大其词的谣言！在正常食用量下，海鲜中的微量无机砷与水果中的维生素C不足以反应产生有毒物质，除非你一次性吃下几百斤超标海鲜和几十斤水果。有人说柿子和螃蟹一起吃会腹泻不止，实际上原因在于对一些脾胃虚寒的人来说单吃柿子或者螃蟹就会拉肚子：如果柿子和螃蟹一起吃就是寒性的叠加，腹泻的症状自然就会加重。而海鲜大多是寒性的，肠胃不好的人要尽量少吃，否则容易引起腹泻腹痛。真正需要我们注意的是：有一些高鞣酸水果（如柿子、山楂）和海鲜一起吃可能会引发肠胃不舒服（因为鞣酸会影响消化）。

安心享用小贴士：

- 1) 选择吃一些熟透海鲜，彻底的加热杀菌（需要在沸水中煮4~5 min才能彻底杀菌），在吃醉蟹和生鱼片等不加热海鲜时要保证新鲜和卫生。海产品中含有较多的尿酸，关节炎患者要少吃；
- 2) 避开和高鞣酸水果搭配（尤其是肠胃敏感的人）；
- 3) 控制吃的总量，避免因过量的生冷而导致腹痛腹泻。记住：新鲜、适量、熟透才是避免引起不适的关键，所以不需要害怕水果和海鲜的搭配！

常见水果属性表如图 5 所示，
大家要合理搭配合理饮食哦！

4. 结语

正常饮食的情况下，海鲜和水果一起吃，不会产生砒霜，中毒的本质在于剂量，而不是水果和海鲜的组合本身。希望在下一次，当鲜嫩多汁的生蚝和甘甜可口的西瓜在你的舌尖相遇时，你不再是立刻警觉它们是否在“禁忌菜单”中，而是享受美食带来的身心愉悦。科学本身就是为了让生活更加自由和精彩。

常见水果属性表

寒性水果	柚子		桑葚		椰子		柿子	
	香蕉		番茄		奇异果		甜瓜	
凉性水果	枇杷		草莓		橘子		火龙果	
	哈密瓜		梨子		香瓜		西瓜	
热性水果	木瓜		桃子		榴莲		山楂	
	石榴		樱桃		荔枝		龙眼	
温性水果	芒果		苹果		油桃		杏子	
	红毛丹		释迦果		李子		金桔	
平性水果	橄榄		百香果		无花果		覆盆子	
	菠萝		柠檬		蓝莓		葡萄	

➡ 【图 5】 常见水果属性表

参考文献

[1] 李祎, 陈苗苗, 谭婷婷, 等. 常见海鲜干制品类即食食品中砷形态的测定[J]. 食品科技, 2014, 39(6): 303-307.

[2] Wahlen R. HPLC-ICP-MS快速、准确测定鱼肉组织中的砷甜菜碱(AsB)[J]. 中国环境监测, 2004(6): 67-72.

[3] 于亚琴, 周振, 杜彪, 等. 水环境中砷和锑检测方法的研究进展[J]. 计量科学与技术, 2022, 66(6): 19-25.

[4] 是之. 维生素C和虾不能同吃[J]. 新世纪智能, 2021(90): 9.

[5] 虞雯煊, 陆荣茂, 张鹏, 等. 裙带菜不同生长阶段体内砷元素形态及含量的动态变化[J]. 海洋湖沼通报(中英文), 2025, <https://link.cnki.net/urlid/37.1141.p.20250704.1523.002>.

[6] 刘亦江. 胆固醇—嵌—聚维生素C共聚物的合成与研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.

[7] 冉茂霞, 莫晓, 张晓莹, 等. 蒸制后贝类中砷的形态转化及生物可及性研究[J]. 生态毒理学报, 2025, 20(3): 476-485.

[8] 王政, 张大伟, 齐长海, 等. 不同酶制剂在模拟胃肠道环境因素下对玉米皮粉降解的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(16): 40-44.

[9] 朱元州. 砷中毒及治疗[J]. 巴楚医学, 2025, 8(2): 9-22.

[10] World Health Organization (WHO). Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first and second addenda[R]. Geneva, 2022.

[11] Mandal B K, Suzuki K T. Arsenic round the world: A review[J]. Talanta, 2002, 58(1): 201-235.

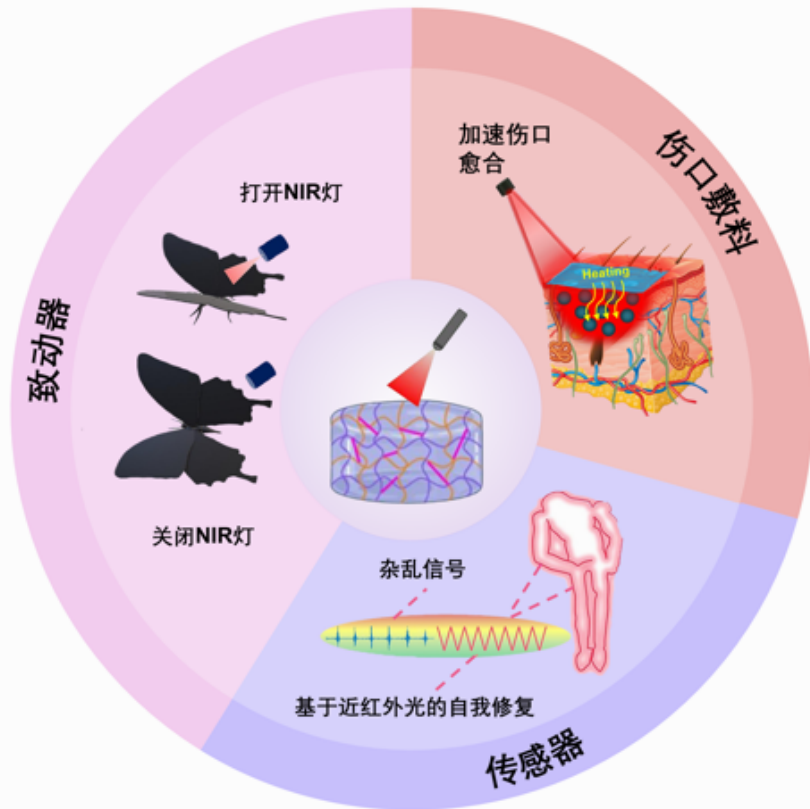
伤口会“报警”、机器人能“追光”？ 这种“智能凝胶”正在改写科技生活

作者：王孟朝，周迅，刘余敏，李雪龙；Email: 233393166@st.usst.edu.cn

当糖尿病患者的伤口反复感染、久不愈合时，医生只需用一支近红外光笔轻轻照射伤口敷料——神奇的事情发生了：敷料像被“唤醒”的卫士，一边释放温和热能杀死顽固细菌，一边通

过微弱的电流将伤口湿度、温度数据实时传到手机^[1]；而在实验室里，一块薄薄的凝胶在光照下能像含羞草般快速收缩，甚至能驱动微型机器人抓取物体^[2]。这些看似“科幻”的场景，背后都

离不开同一种材料——具有近红外光热效应的导电水凝胶（图1）。它既是“会发热的保湿海绵”，又是“能传信号的柔性电线”，正用独特的“超能力”改变医疗、机器人等多个领域。



①【图1】近红外（NIR）响应型导电水凝胶的应用领域——伤口敷料、驱动器、传感器。（素材来自参考文献[3-5]，图片作者原创）

它不是普通凝胶：一种“神奇成分”赋予它双重超能力

要理解这种材料的厉害，得先拆开它的“能力密码”。它的核心是“水凝胶”——一种像人体组织般柔软、能锁住自身质量百倍水分的三维聚合物网络，这让它能完美贴合皮肤且不刺激伤口。但光有柔软还不够，科学家给它加入了一类“特殊成员”，让它同时拥有“导电”和“光热”的超能力。

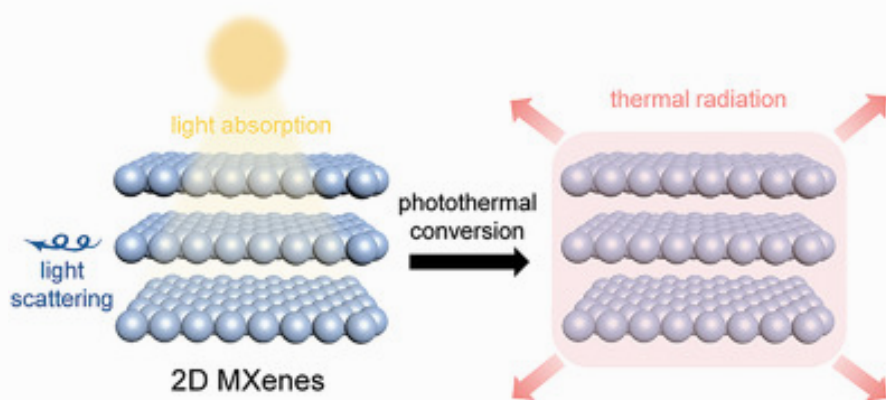
比如文献中研究的 MXenes 纳米片，在近红外频率下表现出强烈的局部表面等离子体共振，以实现宽带吸收。得益于强大的光吸收和局域表面等离子共振 (LSPR) 效应，MXene 材料具有优异的光热转换性能，即高效收集太阳能以及存储和利用转化热能 (图 2) [6]。

这些“特殊成员”像“微型能量转换站”，既能让电流在凝胶里顺畅传递，又能高效捕捉近红外光并转化为热能，缺一不可。

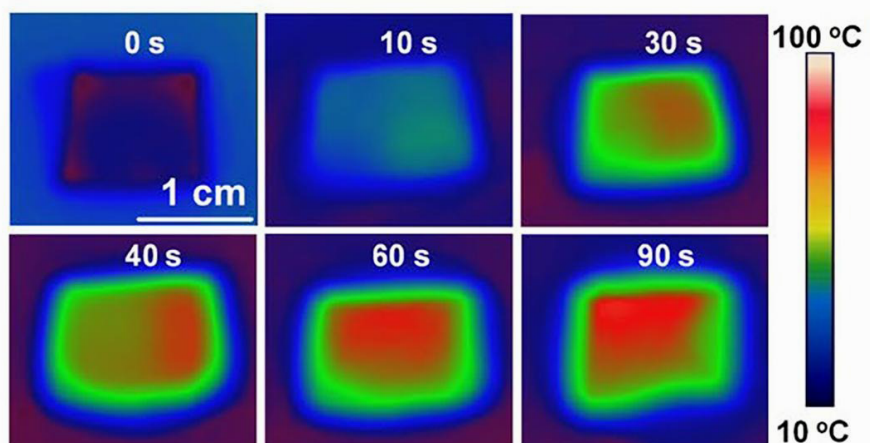
近红外光：激活凝胶超能力的“隐形钥匙”

为什么偏偏是“近红外光”能激活凝胶？因为它是一把“温柔的能量钥匙”。

我们平时看到的可见光（比如太阳光里的红光、蓝光）会被



① 【图 2】二维 MXenes 中光热转换的示意图 [6]



① 【图 3】水凝胶在 808 nm 近红外光不同时间照射下的红外热图像 [7]

皮肤表层吸收，而近红外光的波长更长（808~1064 nm），能像“穿透薄雾”一样穿过皮肤表层，直达深层组织，却不会伤害细胞。当它遇到凝胶里的“特殊成员”时，这些成分会像“接住快递”一样吸收光能，再通过“非辐射跃迁”把光能变成热能——整个过程就像“凝胶在悄悄晒太阳发热”，温度能精准控制在 38~50 °C，既不会太冷没效果，也不会太热伤

组织。

更妙的是，只要调节近红外光的强度和照射时间，就能“指挥”凝胶干活：照得弱一点，凝胶温和发热促进伤口愈合；照得强一点，温度升高到 50 °C，杀死耐药细菌；如果暂停光照，凝胶又会慢慢冷却，恢复柔软状态——就像给凝胶装了个“光控开关”（图 3）[7]。

从医疗到机器人：它的“超能力”正在解决实际难题

这种凝胶的厉害之处，在于它能把“发热”和“导电”结合起来，解决很多传统材料做不到的事。

1. 伤口护理的“智能卫士”

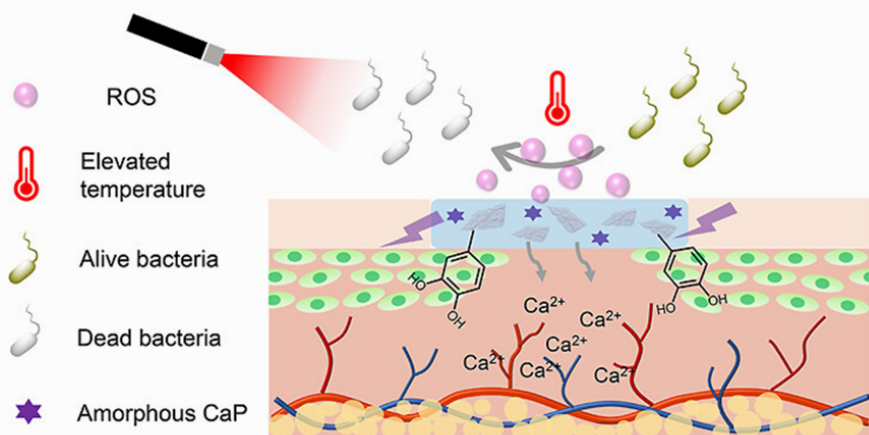
传统伤口敷料要么只能保湿，要么只能杀菌，而这种凝胶是“全能护士”。

光热杀菌：针对糖尿病足、烧伤等易感染伤口，光照后释放的热能能杀死 98% 以上的大肠杆菌、金黄色葡萄球菌，甚至能对付“超级细菌”MRSA（耐甲氧西林金黄色葡萄球菌）^[8]。

促进伤口愈合：导电性通过增强电荷传输发挥作用，一方面能加速炎症细胞清除坏死组织，还能促进修复细胞迁移增殖，光热效应除实现高效杀菌外，还能通过适度高温优化伤口局部微环境，且具备良好循环稳定性，为细胞修复和组织再生提供持续适宜的条件^[9-10]。

智能给药：有的凝胶里藏着抗生素，光照发热时会“打开”凝胶网络，让药物精准释放到伤口，避免全身用药的副作用^[11]。

伤口报警：凝胶的导电性还能监测伤口——如果伤口感染，



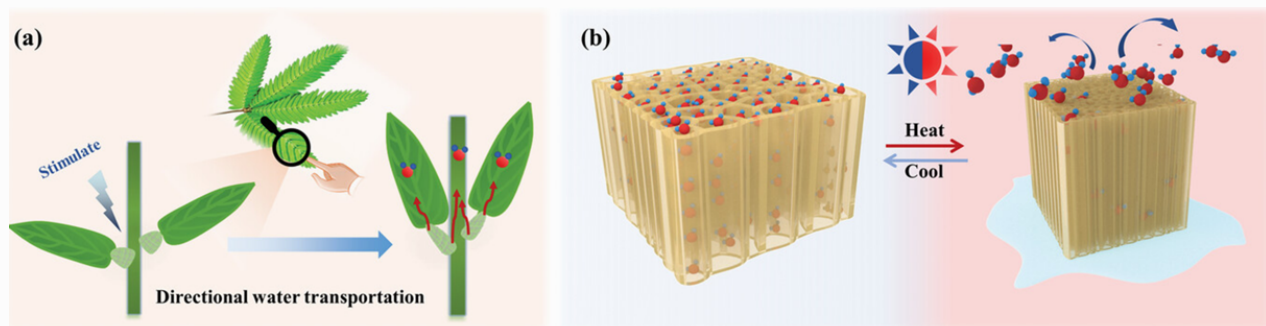
①【图 4】近红外光照射下的感染伤口愈合^[13]

温度、湿度会变化，凝胶的电阻也会跟着变，凝胶内置的柔性微电极实时采集电阻、温度信号，通过微型柔性电路模块转化为数字信号，再经低功耗蓝牙传输至患者手机 APP，一旦数据异常（如湿度 > 70% RH 提示渗液过多，电阻骤升提示感染），APP 立即弹窗报警，并同步数据至医生端平台。医生可远程查看伤口动态，通过 APP 指导患者调整光照强度或用药方案，无需患者反复复诊，显著提升慢性伤口的管理效率^[12]。

比如有研究团队做的“PDA/GO 凝胶”，给感染伤口贴上后，用近红外光照射，伤口温度升到适宜温度，7 天伤口就能结痂，比传统敷料快了一半时间（图 4）^[13]。

2. 软机器人的“柔性肌肉”

传统机器人的“肌肉”是金属电机，又硬又重，而这种凝胶做的“肌肉”又软又轻，还能“追光行动”，为机器人技术开辟了新路径：其兼具高弹性与快速响应特性，3D 打印工艺可定制仿生结构。其驱动与抓取原理依托“光热致动——结构联动”：科学家将光热响应凝胶（PNIPAM 复合凝胶）与 CNTs-弹性体复合，制成“仿生肌肉”致动器，并与微型抓取爪集成。当近红外光（808 nm）照射致动器时，凝胶吸收光能转化为热能，使 PNIPAM 组分因温度升高发生疏水收缩，带动抓取爪向内侧弯曲，实现对微型器件的抓取；关闭光照后，凝胶温度降至室温，PNIPAM 重新吸水溶胀，致动器舒展，抓取爪张开释放物体。这种“光控抓取”精度极高^[14]。



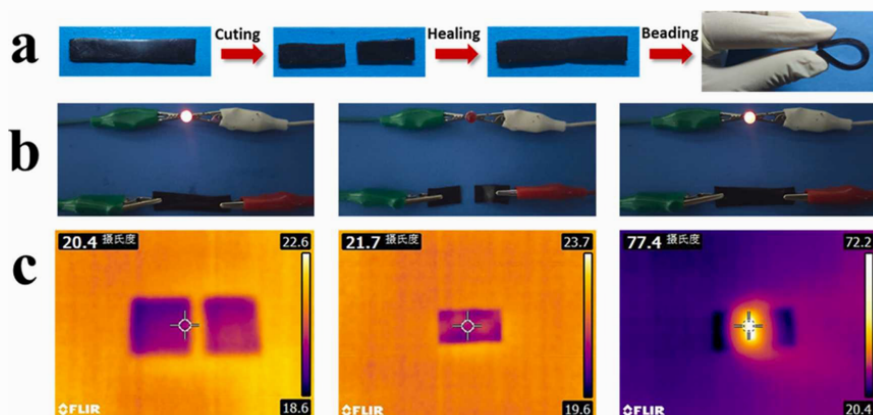
❶ 【图 5】(a) 含羞草叶的刺激和收缩引起的叶子闭合的示意图；(b) 快速变形水凝胶致动器的变形过程^[2]

另有团队模仿含羞草(图5)，做了“光控凝胶机器人”：只要用近红外光照射它的一侧，这侧凝胶收缩，机器人就会朝着光照方向“爬”，像跟着光走的小虫子，未来能用来在狭窄空间里运输药物^[2]。

3. 可穿戴设备的“隐形传感器”

现在的智能手环大多是硬塑料，戴久了会硌手，而这种凝胶做的传感器能像“第二层皮肤”一样贴在手腕上，这依赖其精准匹配的物理性能：拉伸率应大于人体皮肤的应变(25%)以适应手腕活动，一定的皮肤黏附强度确保运动时不脱落，且杨氏模量需小于人体皮肤的杨氏模量(0.5~1.95 MPa)以减少异物感。

它通过导电性监测心率和血氧——当血液流动变化时，凝胶的电阻会轻微改变，转化成电



❶ 【图 6】(a) 水凝胶自愈过程的数码照片；(b) 水凝胶作为离子导体的自修复过程；(c) 红外热像仪观察自愈过程^[15]

信号就是心率数据；天冷时，还能通过近红外光照射让凝胶发热，既保暖又不影响监测。有的凝胶甚至能“自我修复”——如果不小心扯破了，用近红外光照几十秒，破口就能自动黏合，继续使用(图6)^[15]。

未来可期：它还在突破“小难题”

虽然这种凝胶已经很神奇，

但科学家还在帮它“升级”：比如怎么让它更便宜(目前部分成分如MXene成本较高)、怎么让它在反复光照下不容易“疲劳”(比如多次使用后光热效率下降)、怎么让它在体内更长时间工作(比如做植入式传感器)。

不过不用等太久——也许再过三、五年，我们就能在药店买到这种“光热智能创可贴”，运

动时戴的手环会变成“凝胶腕带”，甚至微型机器人能帮医生	在体内精准给药。这种“会发热、能导电、懂响应”的神奇凝胶，	正用科技的温柔力量，把更多“不可能”变成“日常”。
-----------------------------	-------------------------------	---------------------------

参考文献

- [1] Wang Q, Qiu W, Liu H, et al. Conductive hydrogel dressings based on cascade reactions with photothermal effect for monitoring and treatment of diabetic wounds[J]. *Compos Part B: Eng*, 2022, 242: 110098.
- [2] Yan Q, Ding R, Zheng H, et al. bio-inspired stimuli-responsive $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{PNIPAM}$ anisotropic hydrogels for high-performance actuators[J]. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2301982.
- [3] Yang K, Zhou X, Li Z, et al. Ultrastretchable, self-healable, and tissue-adhesive hydrogel dressings involving nanoscale tannic acid/ferric ion complexes for combating bacterial infection and promoting wound healing[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2022, 14: 43010-43025.
- [4] Cui X C, Liu Z Z, Zhang B, et al. Sponge-like, semi-interpenetrating self-sensory hydrogel for smart photothermal-responsive soft actuator with biomimetic self-diagnostic intelligence[J]. *Chem Eng J*, 2023, 467: 143515.
- [5] Ding J, Qiao Z, Zhang Y S, et al. NIR-responsive multi-healing HMPAM/dextran/AgNWs hydrogel sensor with recoverable mechanics and conductivity for human-machine interaction[J]. *Carbohydrate Polym*, 2020, 247: 116686.
- [6] Xu D X, Li Z D, Li L S, et al. Insights into the photothermal conversion of 2D MXene nanomaterials: synthesis, mechanism, and applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30: 2000712.
- [7] Qian C H, Li Y Q, Chen C, et al. A stretchable and conductive design based on multi-responsive hydrogel for self-sensing actuators[J]. *Chem Eng J*, 2023, 454: 140263.
- [8] Wang Q, Qiu W, Liu H, et al. Conductive hydrogel dressings based on cascade reactions with photothermal effect for monitoring and treatment of diabetic wounds[J]. *Compos Part B: Eng*, 2022, 242: 110098.
- [9] Qiao L P, Liang Y P, Chen J Y, et al. Antibacterial conductive self-healing hydrogel wound dressing with dual dynamic bonds promotes infected wound healing[J]. *Bioact Mater*, 2023, 30: 129-141.
- [10] Wang R Y, Li C Y, Zhang Y X, et al. Injectable, conductive MXene@ Mg^{2+} hydrogel with photothermal antibacterial and angiogenic properties for bacteria-infected wound healing[J]. *Chem Eng J*, 2025, 514: 163472.
- [11] Maleki A, He J H, Bochani S, et al. Multifunctional photoactive hydrogels for wound healing acceleration[J]. *ACS Nano*, 2021, 15: 18895-18930.
- [12] Shan M, Chen X, Zhang X, et al. Injectable conductive hydrogel with self-healing, motion monitoring, and bacteria theranostics for bioelectronic wound dressing[J]. *Adv Health Mater*, 2024, 13: 2303876.
- [13] Xie C M, Luo J Q, Luo Y J, et al. Electroactive hydrogels with photothermal/photodynamic effects for effective wound healing assisted by polydopamine-modified graphene oxide[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15: 42329-42340.
- [14] Li H, Liang Y, Gao G, et al. Asymmetric bilayer CNTs-elastomer/hydrogel composite as soft actuators with sensing performance[J]. *Chem Eng J*, 2021, 415: 128988.
- [15] Xu L J, Chen Y, Yu M L, et al. NIR light-induced rapid self-healing hydrogel toward multifunctional applications in sensing[J]. *Nano Energy*, 2023, 107: 108119.

美发车间奇遇

作者：胡奕妍，李雨馨，邓红梅，谢丽，陈万平；Email: 2136794865@qq.com



在头皮小镇的发丝工厂里,无数角蛋白分子有序排列,构成一根根发丝。小卷无精打采地趴在生产线上,它望着镜子里自己微微卷曲的轮廓,满心困惑:“为啥有的伙伴天生笔直如溪流,有的生来卷翘似浪花,我到底能不能自主变造型呀?”同班组的小直凑过来,用“发丝胳膊”戳戳它:“我听说隔壁美发车间,藏着能让头发‘改头换面’的‘变形密码’,要不咱偷偷去探探?”就这样,一场关于头发直卷奥秘的化学冒险,悄然拉开帷幕……

小卷和小直蹑手蹑脚地走进美发店,两人略显拘谨的模样很快吸引了造型师 Tony 的注意。Tony 走上前,笑着拍了拍小卷的肩膀,说道:“哈喽,你好呀!是来做发型的吗?我们刚推出一款新的直发套餐,要不要给你介绍下详情?”看着 Tony 干练专业的样子,小卷紧张地轻轻点头。

Tony 见状继续说道:“你知道吗?作为头发,我们的结构从外到内依次为毛小皮、皮质层和髓质层(图1)^[1,6]。

最外层的毛小皮内含有丰富的硫蛋白,能抵御外界物理和化学因素的影响,能对我们起到保护、锁水以及维持光泽等作用。它是我们健康的外在标志,

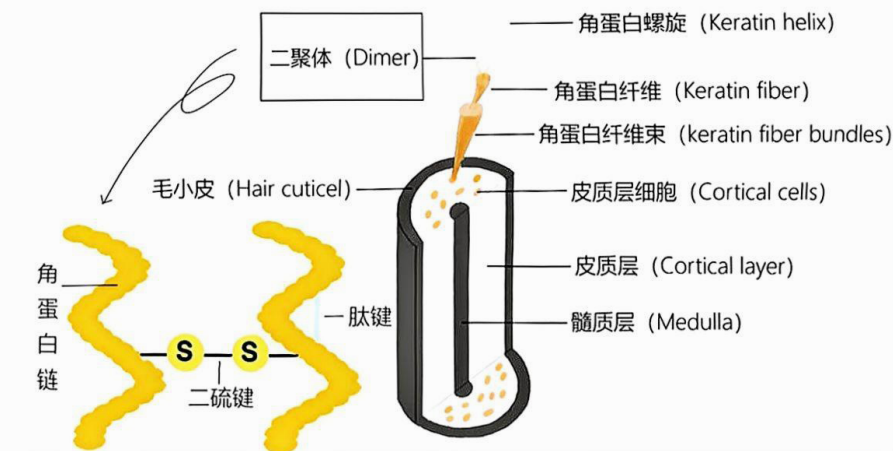


图1 头发结构示意图^[6]

一旦受损,就会导致我们干枯、毛糙、分叉并失去光泽^[2]。

中间的皮质层,是我们头发的主要部分,是决定头发弹性、强度和形态等的核心结构。皮质层中还含有黑色素颗粒,分别是真黑色素和类黑色素,其中真黑色素是黑色或棕色,类黑色素是黄色或红色,这些色素颗粒的种类与含量直接决定着我们头发的颜色^[3]。

最内层的髓质层,其内部有无数气孔,可辅助隔热^[4]。除此之外,髓质层还能保护头部,防止紫外线的直接照射^[5],但它并非所有头发都具备。”

另外一位慵懒蓬松的造型师 Linda 跟着补充道:“在这三层结构中,皮质层是我们烫发变美

的核心对象。皮质层细胞的主要成分是角蛋白。在角蛋白的结构中,它以角蛋白多肽链为基本单位,角蛋白多肽链通过氢键等作用力盘曲折叠形成角蛋白螺旋,两条角蛋白螺旋相互缠绕形成二聚体,多个二聚体首尾相连形成原丝,原丝们之间相互缠绕形成角蛋白纤维,多条角蛋白纤维进一步平行排列或交织,形成更粗的角蛋白纤维束(图1)^[1,6]。

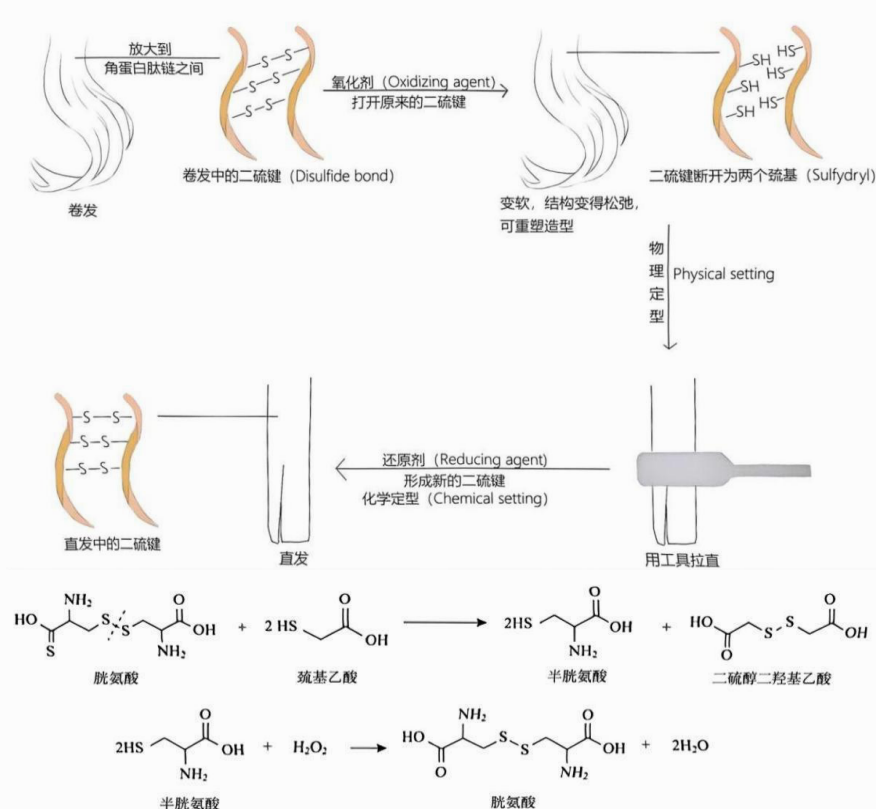
在这些过程中,二硫键($-S-S-$)均发挥了不可或缺的作用。二硫键是一种强化学键,通常由两个半胱氨酸残基中的巯基($-SH$)经过氧化反应连接而成(图1),是维持头发结构稳定的核心化学键^[7]。形成了角蛋白纤维束之后,角蛋白纤维束内部与角蛋白纤维束之间,又会通过大量的二硫键及其他次级

键连接，形成坚固的三维网状结构。在没有外力作用的情况下，这些三维网状结构使我们头发呈现天生自然的形状。如果我们破坏掉它们并为我们头发重新构建新的三维网状结构，我们就可以实现形状的改变^[8]。”

随后 Tony 开始介绍起了新款直发套餐（卷发拉直流程及烫发原理如图 2 所示）。

“首先，我们会用小刷子轻轻涂抹一些软化剂在你们身上，它会迅速渗入发丝，像是在和每一根头发签订‘变直协议’。常用的软化剂为巯基乙酸（ HSCH_2COOH ）软化剂中的巯基（ $-\text{SH}$ ）与二硫键（ $-\text{S}-\text{S}-$ ）发生反应，将其还原为 2 个巯基（ $-\text{SH}$ ），从而破坏角蛋白链的交联结构^[9]，使原本倔强卷曲的发丝，渐渐服软，仿佛被施了定身咒，不再肆意舞动，安静地等待着命运的改变。

半个小时过后，我们将用温水清洗头发，温水如瀑布般倾泻而下，温柔地抚摸着每一根发丝。洗发水像会施魔法的泡泡仙子，一接触头发，就迅速变身成绵密的泡沫，欢快地钻进发间，把灰尘和油脂这些“小脏鬼”通通赶跑。随后用温水冲洗带走泡沫，吹干头发。



【图 2】卷发拉直流程及烫发原理^[9]

用直板夹进行拉直，直板夹像是拥有神奇力量的魔法师，散发着微微的热气。它轻轻夹住发丝，缓慢移动，所到之处，发丝乖乖地变得笔直顺滑。高温（ $185\sim 220\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）拉直时，水分子与角蛋白之间的弱键——氢键会被破坏，让头发更易变形^[10]。

再涂抹我们的独家秘方定型药剂，将巯基（ $-\text{SH}$ ）重新氧化成二硫键（ $-\text{S}-\text{S}-$ ），此时角蛋白链在拉直状态下重新交联，固定头发为直发形状。最后再将头发清洗干净，吹干就能得

到一头完美的优雅直发啦！”

在 Tony 的话术之下，小卷迫不及待地就坐到了镜子面前，“太棒啦，我要变直变美，Tony 快帮我改变吧！”

时间一分一秒过去，随着 Tony 一声“完美”，焕然一新的小卷转过头来——锃亮柔顺的卷发惊艳了在场所有人。它对着镜子欣赏着新造型，激动地对身旁的小直说：“小直小直，这太奇妙了！你也赶紧试试，肯定会很时髦！”

表 1 定型剂和软化剂的类型 [18-20]

产品类型	常见化学物质	主要作用
定型剂	聚乙烯吡咯烷酮 (PVP)、丙烯酸类共聚物 (如丙烯酸酯 /VA 共聚物)	干燥后在头发表面形成薄膜, 固定发型, 定型持久 (PVP 常见于发胶、摩丝), 兼具定型力与柔韧性, 避免头发僵硬 (常见于发蜡、定型喷雾)
	乙醇 (酒精)、异丙醇	溶解成膜剂, 帮助成分均匀附着在头发上
	泛醇 (维生素 B5)、阳离子表面活性剂 (如聚季铵盐)	减少定型剂导致的头发干涩, 提升顺滑度
	防腐剂 (如苯氧乙醇)、香精	防止产品变质 改善产品气味
软化剂	巯基乙酸盐 (如巯基乙酸铵)、半胱氨酸 (或其衍生物)	破坏头发二硫键, 使头发变软可塑形, 温和且效率高 (主流家用 / 沙龙产品首选), 作用相对温和, 对头发损伤略低 (多见于“植物软化”概念产品)
	氨、单乙醇胺 (MEA)、氢氧化钠	调节 pH 值 (多为碱性), 打开头发毛鳞片, 助力还原剂渗透 (氢氧化钠为强碱性, 多用于快速拉直产品, 需谨慎使用)
	乙二胺四乙酸 (EDTA) 二钠盐	防止水中金属离子影响软化效果
	甘油、丙二醇	减少软化过程中头发水分流失, 避免头发干枯

造型师 Linda 顺势用自己卷曲的发丝碰了碰小直的手臂, 热情邀约: “嘿朋友, 相信我, 我能让你成为全场最靓的仔!” 小直看着小卷优雅的新模样, 又望了望气质时髦的 Linda, 心里像揣了群蚂蚁: “自己这直溜溜的头发, 看久了确实腻, 要不也试试?” 它点点头, 立刻被 Linda 带到了造型区。

Linda 先是为小直做了湿热处理, 温柔解释道: “感受到水分子在进入你的发丝了吗? 它们会‘拆’开维持直发的氢键, 让头发变软, 就像在做按摩呢。这些被水分子破坏的氢键, 本质是角

蛋白多肽链间的特异性连接——每条角蛋白多肽链的肽键都有氨基氢和羰基氧, 相邻多肽链的氨基氢与羰基氧会相互吸引形成氢键, 正是这些氢键和二硫键共同支撑着头发的直发形态^[11]。”小直感觉发丝渐渐失去了原先的硬挺, 懵懂中透着期待。

接着, Linda 拿出还原剂涂抹在小直的发丝上: “这还原剂就像‘化学剪刀’, 能切断发丝里的部分二硫键——这些‘小锁’原本牢牢锁住头发形状, 现在被撬开, 头发就松散了, 能随意弯曲啦!” 小直听得新奇, 看着直发丝慢慢变得“听话”、能被随

意摆弄, 觉得有趣极了。

随后, Linda 将软化后的发丝缠绕在卷发棒上, 笑着说: “现在松散的角蛋白纤维要顺着外力重新排列, 这是给新造型打基础哦!”

“最后一步, 涂氧化剂!” Linda 边操作边介绍, “氧化剂中的过氧化氢在碱性拉直环境中 (如配合氨类成分), 会分解生成羟基自由基 ($\cdot\text{OH}$)、过氧阴离子 ($\text{O}_2^{\cdot-}$) 等活性氧物种, 这些物种具有强氧化性, 是破坏二硫键的核心“工具”。活性氧会优先攻击二硫键中的硫原子, 使硫原子被氧化,

先形成不稳定的中间产物“次磺酸”(—S—OH)；接着次磺酸进一步被氧化，或与相邻巯基(—SH)反应，最终导致二硫键完全断裂，生成2个独立的、氧化态更高的含硫基团(如磺酸基—SO₃H)，彻底解除头发原有的卷曲张力，于是角蛋白结构松弛，头发便具备了改变形状的可塑性^[9]。再加上卷发棒的加持，卷发棒会将温度稳定在160~200℃，这个温度能精准破坏角蛋白分子间的氢键；等发丝冷却至室温后，这些氢键会重新形成，并且会顺着卷发棒的弧度，在新的位置搭建起氢键连接，和重新形成的二硫键一起，把卷发形状牢牢固定住^[12]。好了，期待奇迹吧——时尚大卷完成！”

小直盯着镜中崭新的自己，心里像烟花般绽放，完全沉浸在变美的喜悦中。小卷也凑上前来感叹：“天啊，太好看了！原来头发的直与卷这么奇妙！”

告别造型师后，小直和小卷激动地回到工厂，引来大家的一阵夸赞和好奇。于是，它俩把头发变直变卷的奥秘分享给了众人。欢声笑语中，小直和小卷都没注意到：经过这一系列化学处理，发丝的“健康防线”已悄悄出现裂缝。一场隐藏在神奇“变形术”背后的“发丝危机”，正

慢慢逼近，即将让它们的“身体”付出代价……

时间一天天过去，小卷发现自己的“毛小皮鳞片”变得粗糙翘起，原本顺滑的发丝摸起来像砂纸；小直的卷发也没了刚做好时的弹性，发尾开始分叉，甚至轻轻一拽就容易断裂。它们这才惊觉，那场“化学冒险”让角蛋白结构里的“钢筋”二硫键断了不少，毛表皮也像被刮花的玻璃，再也无法紧密贴合保护内部。

“原来变美真的要付出代价啊……”小卷摸着自己干枯的发丝叹气。小直看着镜中失去光泽的卷发，想起Linda操作时那滋滋作响的卷发棒，突然明高温和化学药剂就像悄然蔓延的藤蔓，正一点点缠绕、勒紧它们的健康，让生命力在无声中被消磨。

这时，见多识广的老发丝慢悠悠晃过来，用自己依旧柔韧的“身体”轻轻蹭了蹭它们：“傻孩子，这是由于在做头发的过程中，使用的氧化剂的强氧化性会溶解毛小皮表面的脂质层，毛小皮最外层的脂质主要是神经酰胺和脂肪酸，它们是锁水屏障的关键。氧化剂的强氧化性会氧化脂质分子中的不饱和脂肪酸链，导致脂质链断裂、交联，使脂质层结构瓦解，失去锁水能力，头发开始

变得干燥，导致鳞片失去黏合保护，变得粗糙、翘起；同时，氧化剂会进一步侵蚀毛小皮的蛋白质结构，使鳞片边缘断裂并脱落，最终导致头发毛躁、易断和失去光泽^[10]。此外，紫外线也会对头发造成化学损伤。紫外线具有较高的能量，会引发头发中二硫键的光氧化断裂反应，在这个过程中，会生成如SO₂等物质，进而影响头发的结构与性能，使头发更容易出现干枯、断裂等问题^[13]。快让我这‘老工匠’教教你们怎么修补‘钢筋’和‘鳞片’吧！”

“首先得给头发放个假！”老发丝抖了抖顺滑的外层，“化学药水就像强力胶水，用多了会把二硫键‘钢筋’折腾得千疮百孔。每做完一次造型，起码要等3~6月^[14]，让身体自己慢慢把断开的‘钢筋’重新焊起来！”

小直摸着发尾的分叉，小声问：“那现在已经受伤了，该怎么办呀？”老发丝神秘一笑：“这时候就得请出我们的‘修补队’啦！含硅油的护发素就像给毛小皮的缝隙敷上一层细腻的软蜡，每次洗完头抹一抹，毛小皮立刻变得顺滑服帖，不再毛躁；而角蛋白发膜呢，每周用个一两次，就像给受损的角蛋白链换上一批新的‘支架’，头发又能支棱起来^[15]！”

“原来是这样！”小卷恍然大悟，“那用卷发棒是不是也得小心？我记得拉直的时候烫得可疼了！”老发丝重重一点头：“高温就是隐形杀手！下次用之前，一定要先喷隔热喷雾，就像给头发裹上一层隔热毯，牢牢挡住高温的侵袭；吹风机也别用太热，60℃以下才安全^[16]，不然氢键‘小弹簧’反复被烫断，头

发可不就脆得像薯片？”

“还有清洁和防晒也别忘了！”老发丝指了指自己发亮的表层，“要用弱酸性洗发水，pH值5~6的最好，不然强碱会把盐键这个‘小零件’腐蚀掉；还要记得出门戴帽子、喷防晒喷雾，紫外线可是会把角蛋白晒脆、把发色晒褪色的^[17]！”

小卷和小直认真记下每一个要点，照着老发丝的建议认真护理，几个月后，它们的“毛小皮鳞片”重新变得服帖，断裂的二硫键也慢慢修复。现在它们才明白：真正的美丽不是拼命折腾，而是懂得在变美和护养之间找平衡——就像给发丝筑起一道“防护墙”，才能让每一次造型都成为加分项，而不是伤害呀。

参考文献

- [1] 罗迪, 周昊. 美发与化学[J]. 凯里学院学报. 2013, 31(3): 41-44.
- [2] 何学民. 头发的损伤与头发结构和组分的相互关系[J]. 日用化学工业. 2000(4): 34-36.
- [3] 赵建华. 洗发水配方优化[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 6.
- [4] Deedrick D W, Koch S L. Microscopy of hair part 1: a practical guide and manual for human hairs[J]. Forensic Sci Commun, 2004, 6(1): 6.
- [5] 东红升. 头穴透刺法治疗老年性白发的临床及其实验研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江中医药大学, 2004: 6-9.
- [6] 穆伟伟, 李志洲. 天然植物染发剂[J]. 广州化工, 2015, 43(19): 8-12.
- [7] 安原原. 头发损伤对其性能影响及水分在损伤过程中的作用研究[D]. 杭州: 浙江理工大学, 2015: 3-4.
- [8] Choi K, McCullough R R, Burge C D J, et al. The susceptibility of disulfide bonds to modification in keratin fibers undergoing tensile stress[J]. Biophys J, 2022, 121(8): 15711580.
- [9] 刘玉荣, 郝淑超. 从化学视角剖析烫发、染发原理及顺序[J]. 化学教育, 2022, 43(21): 1-6
- [10] Gandhi A A, Kipling S, Wright L, et al. Curl reversion and damage: The effect of different temperature treatments on hair[J]. J Cosmetol Trichol, 2018, 4(1): 1-5.
- [11] 杨建中. 头发保湿的科学[J]. 中国化妆品. 2010(16): 74-80.
- [12] 李星彩. 染发剂、烫发剂中的化学成分及其对人体的危害[J]. 微量元素与健康研究, 2006(1): 47-48.
- [13] 范加谊, 马铃, 陈殿松等. 头发与头皮护理的科学基础(V)——头发光老化及其防护[J]. 日用化学工业, 2023, 53(5): 503-510.
- [14] 曹蕾, 范卫新, 王磊. 脱发患者生活质量调查[J]. 临床皮肤科杂志, 2008(6): 351-353.
- [15] 黄玉媛, 董银卯, 王超等. 护发素对头发表面性质及力学性能的影响[J]. 日用化学工业, 2014, 44(10): 556-560.
- [16] 刘瑞璞, 李从举. 头发热损伤及防护研究进展[J]. 毛纺科技, 2019, 47(12): 85-89.
- [17] 王雪, 董银卯, 孟宏. 头发的损伤与护理研究进展[J]. 日用化学工业, 2016, 46(3): 171-175.
- [18] 陆海亮, 孙晓曼等. 发用定型剂及其在定型/造型产品中的应用[J]. 中国化妆品, 2025, (3): 92-99.
- [19] 皮丕辉, 文秀芳, 程江, 等. 发用定型剂配方原理与组成[J]. 日用化学工业, 2005, 35(2-4): 184-187, 252-255.
- [20] 郭丽. 探究烫发剂中巯基乙酸盐的使用和危害[J]. 中国化妆品杂志, 2020(6): 104-107.

【CCS Chem.】

吉林大学窦传冬： 硼杂 Z 型及双层并苯

来源：CCS Chemistry 公众号；原文链接：https://mp.weixin.qq.com/s/vxJrUBX4SgVKzkRsp0_iJA

近日，吉林大学超分子结构与材料全国重点实验室窦传冬课题组采用硼烷可控环合策略，构筑了两种新型硼杂二维并苯，阐明了硼原子掺杂的重要性。研究人员以共轭硼烷为前体，通过 FeCl_3 和 $\text{Bi}(\text{OTf})_3$ 介导的分子内环化反应，合成了硼杂 Z 型及双层并苯 C_{32}B_2 ，获得了窄光谱荧光（半峰宽窄至 19 nm）和放大自发辐射性质，证明其作为增益介质的应用潜力。此外，通过研究其二价阴离子和全碳等电子体的电子结构，揭示了硼原子能够扰动共轭骨架芳香性，从而重构自旋密度分布。该研究拓展了含硼分子碳的拓扑结构多样性，亦为发光功能和自旋特性研究提供了新体系。



背景介绍

多环芳烃（PAHs），一种类似石墨烯片段结构的分子碳，在合成化学、材料科学及相关交叉领域中具有重要的研究价值。锯齿边缘能够诱导 PAHs 出现自旋极化态，使其表现出独特的开壳电子态和磁学性质，因而这类锯齿边缘 PAHs（如二维并苯、Z 型并苯和多层并苯）受到广泛关注。然而，开壳自由基

结构通常导致较高的氧化活性和较低的稳定性，使得这类化合物的合成和纯化面临巨大挑战，限制其功能探索 and 材料研究。为解决这些问题，研究人员将杂原子（如硼原子）掺杂进共轭分子骨架，提高分子的稳定性，实现元素组成和拓扑形态的多样性，并赋予其可调控的电子结构和光电性质（图 1）。

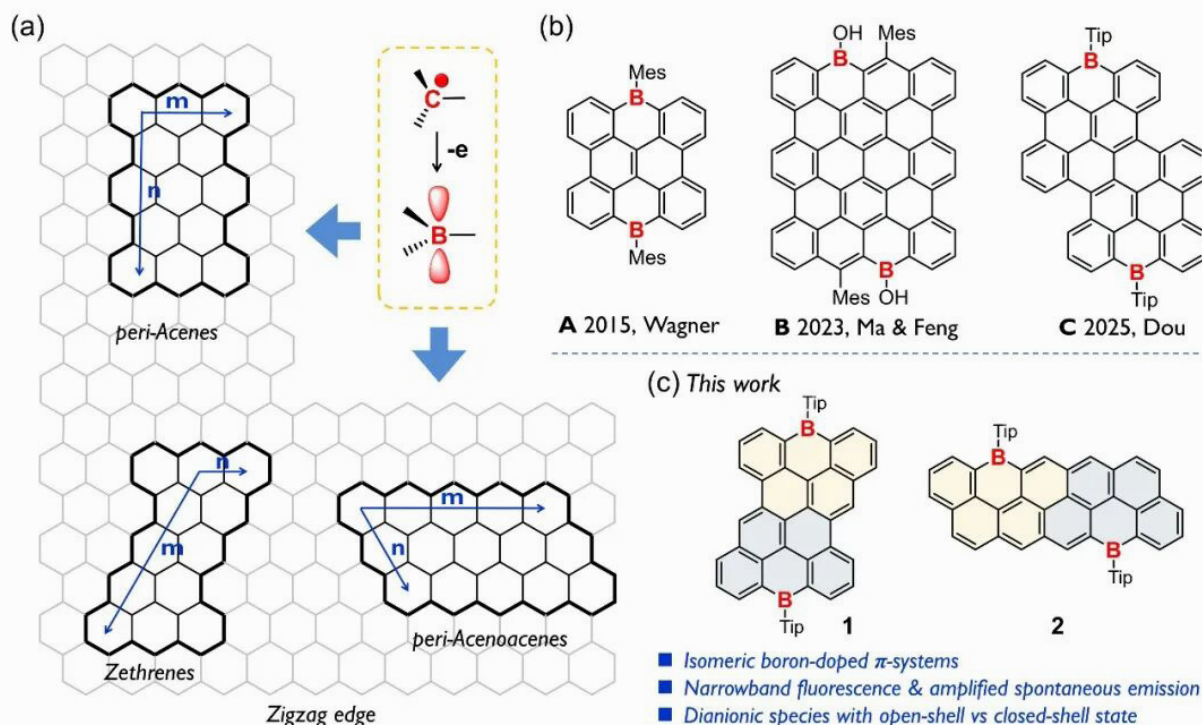


图1 硼杂并苯体系的 (a) 设计策略和 (b, c) 化学结构

本文亮点

在国家自然科学基金委和吉林大学的支持下，窦传冬课题组专攻于硼元素化学和分子碳材料的融合研究。本工作中，作者设计合成了双硼掺杂单元4，其可看作对硼杂单元3进行横向双重稠并，为构建硼杂并苯体系奠定了关键结构基础（图2）。基于硼烷可控环合策略，通过实施 FeCl_3 和 $\text{Bi}(\text{OTf})_3$ 介导的分子内成环反应，制备出两例硼杂二维并苯（1和2）。单晶结构表明，二者具有 C_{32}B_2 同分异构的硼碳共轭骨架，两个硼原子位于彼此平行的锯齿边缘上，可分别看做将两个硼原子掺杂进superzethrene (SZ)和peri-pentacenopentacene

(PP)中，形成了硼杂Z型及双层并苯。

作者系统研究了1和2的光物理性质和激发态动力学。二者的甲苯溶液分别发出黄绿色和深橙色荧光。1的发光峰位于528 nm，而2的发射峰红移至578 nm（图3），光学带隙从2.33 eV减小到2.12 eV，表明横向稠并方式有利于增强硼碳结构的共轭程度。特别是，1和2均表现出窄谱带荧光性质，半峰宽约为20 nm。采用飞秒瞬态吸收光谱研究了激发态动力学行为，1和2分别在567 nm和622 nm处显现负信号峰，该信号未出现在稳态

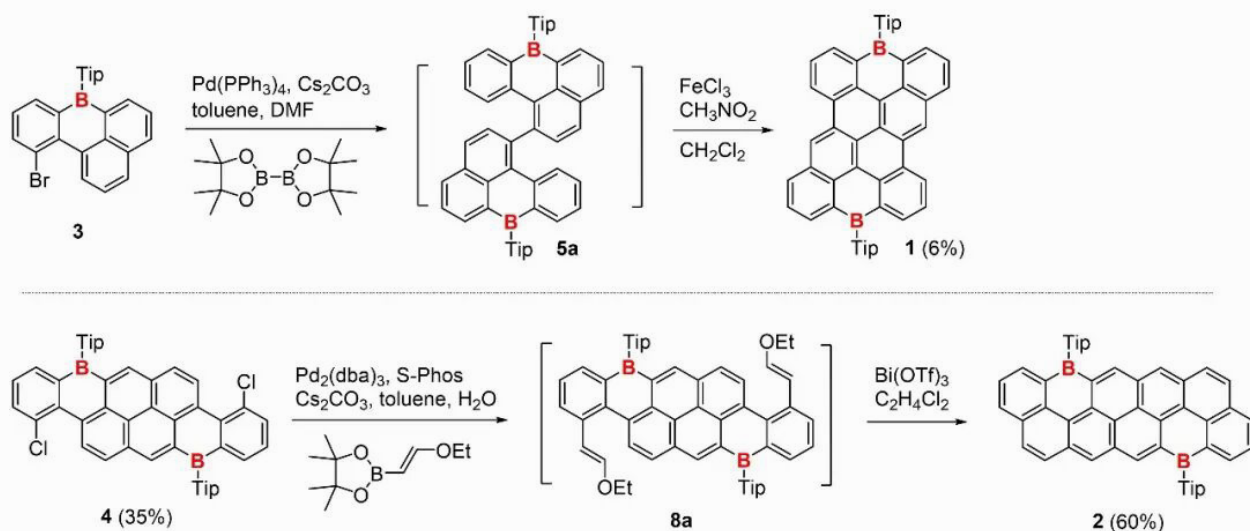


图2 分子1和2的化学结构与合成路线

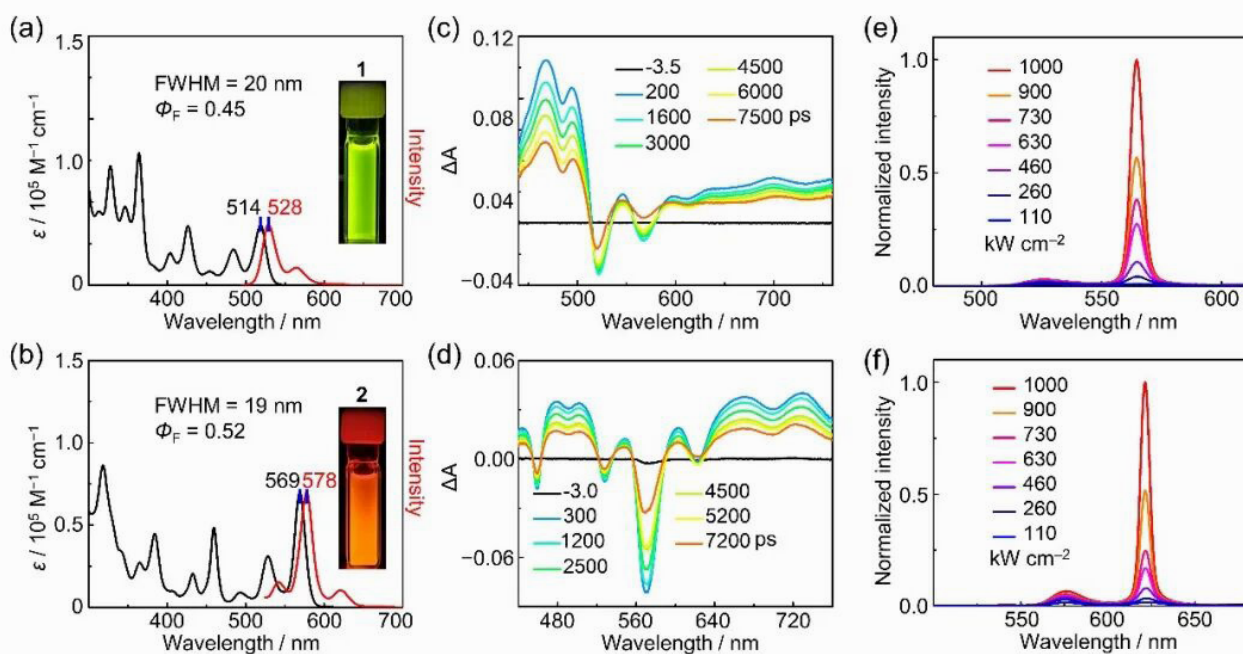


图3 分子1和2的(a, b)吸收和荧光光谱, (c, d)瞬态吸收光谱和(e, f)掺杂薄膜的放大自发发射光谱

吸收光谱中, 而是作为肩峰存在于荧光光谱中, 表明 1 和 2 具有独特的激发态受激辐射行为 (stimulated emission, SE)。基于此, 作者对 1 和 2 的聚苯乙烯 (PS) 掺杂薄膜进行了激光泵浦测试。对于 1/PS 薄膜, 当泵浦光强超过 110 kW cm^{-2} 的阈值后, 位于 565 nm 的发光带迅速增强和窄化, 半峰宽窄至 6.0 nm 。该发射峰和受激辐射峰位相一致, 且其发光强度与半峰宽随泵浦光强呈现明显的非线性变化关系。类似地, 2/PS 薄膜在泵浦光强超过 390 kW cm^{-2} 后, 在 622 nm 处的发射峰增强窄化。上述结果表明, 1 和 2 均具有放大自发辐射 (amplified spontaneous emission, ASE) 特性。这是首次在单一有机分子中同时观察到窄带荧光和 ASE 性质, 表明这类硼杂并苯作为有机窄谱发光和激光材料的应用潜力。

1 和 2 均表现出两个可逆的还原过程, 说明可产生稳定的还原态物种。因此, 作者对它们实施了电化学还原测试, 并使用紫外 - 可见 - 近红外吸收光谱原位监测了二价阴离子物种的形成。如图 4 所示, 1 和 2 表现出两个清晰的得电子还原过程, 溶液颜色发生了明显改变。 1^{2-} 在 $800\sim 1000 \text{ nm}$ 处显示出一个弱的低能吸收带, 该特征通常与自由基结构相关, 证明其可能具有开壳结构。为深入研究硼原子引入对电子结构的调控作用, 以及二价阴离子的芳香性和开壳 / 闭壳性质, 作者对二价阴离子和对应的纯碳等电子体进行了 DFT 理论计算, 结果表明在二价阴离子中, 1) 硼原子的引入增强了含硼环的芳香性, 并扰动了邻近环的芳香性; 2) 二价阴离子与其全碳等电子体保持了类似的开壳 / 闭壳特征, 但是对于开壳结

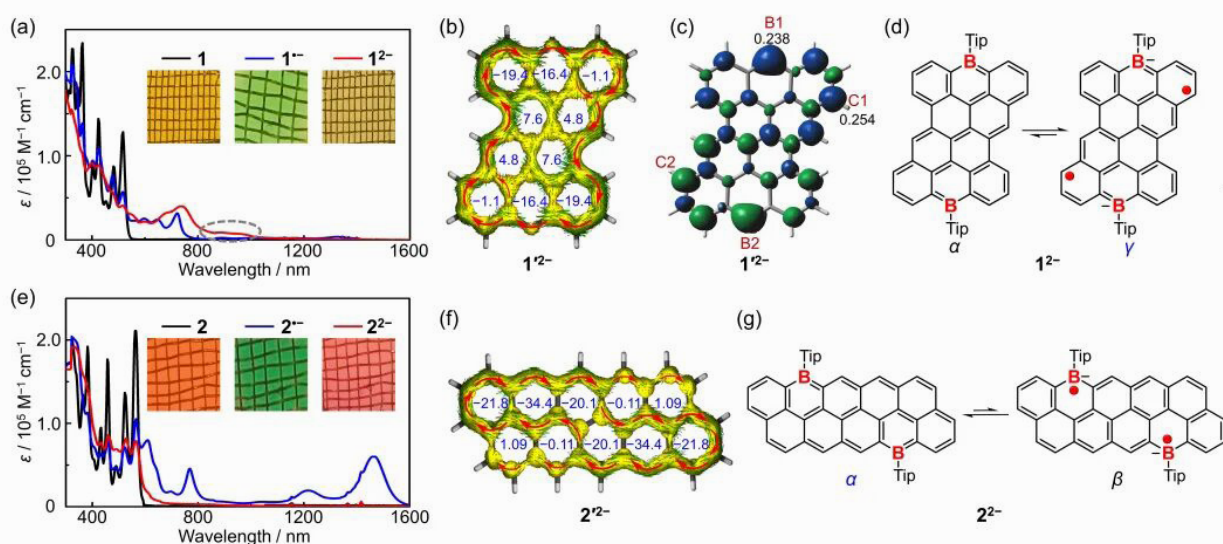


图 4 (a, e) 1 和 2 的电化学还原光谱; (b, f) ACID 图和 NICS (1) ZZ 值; (c) 自旋密度分布图; (d, g) 开壳和闭壳共振结构

构的 1^{2-} ，硼原子的引入使其自旋密度重新分布，自由基主要分布在 C1 和 C2 位置， γ 共振结构对其基态贡献更大。此外， $2'^{2-}$ 保持了闭壳结构， α 共振结

构在基态中占据主导地位。这些结果表明硼原子对并苯骨架的电子结构、芳香性及自旋特性的重要调控作用。

总结与展望

综上所述，该工作采用硼烷可控环合策略，构筑了硼杂 Z 型并苯和双层并苯，揭示了硼原子及稠并方式对电子结构及光电性质的调控作用。所得分子同时展现出窄谱带发光和放大自发辐射两种发光行为，证明其作为有机发光材料和光学增益介质的应用潜力。此外，对比研究其二价阴离子和全碳等电子体，阐明了硼原子能够扰动分子芳香性和自旋密度分布。该工作拓展了硼杂并苯体系的结构类型，为研究发光功能和自旋特性提供了新体系和重要基础。相关成果以 Research Article 的形式发表在 *CCS Chemistry*。李泽一和田鑫宇为论文共同第一作者，窦传冬教授为通讯作者。

文章详情：

Doping Boron into Zethrenes and peri-Acenoacenes: Polycyclic π -Systems Possessing Narrowband Fluorescence and Amplified Spontaneous Emission

Zeyi Li[†], Xinyu Tian[‡], Huimin Zhao, Yujia Liu, Tianyu Zhang and Chuandong Dou^{*}

Cite this by DOI: 10.31635/ccschem.025.202506812

文章链接: <https://doi.org/10.31635/ccschem.025.202506812>



扫码或长按二维码在线阅读 ▶



PS&T: 具有优异生物相容性的 pH 超敏聚酯 纳米探针用于高对比度肿瘤成像

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/lXewcp5dcDmh4Jz_uhA5yw

一、研究背景

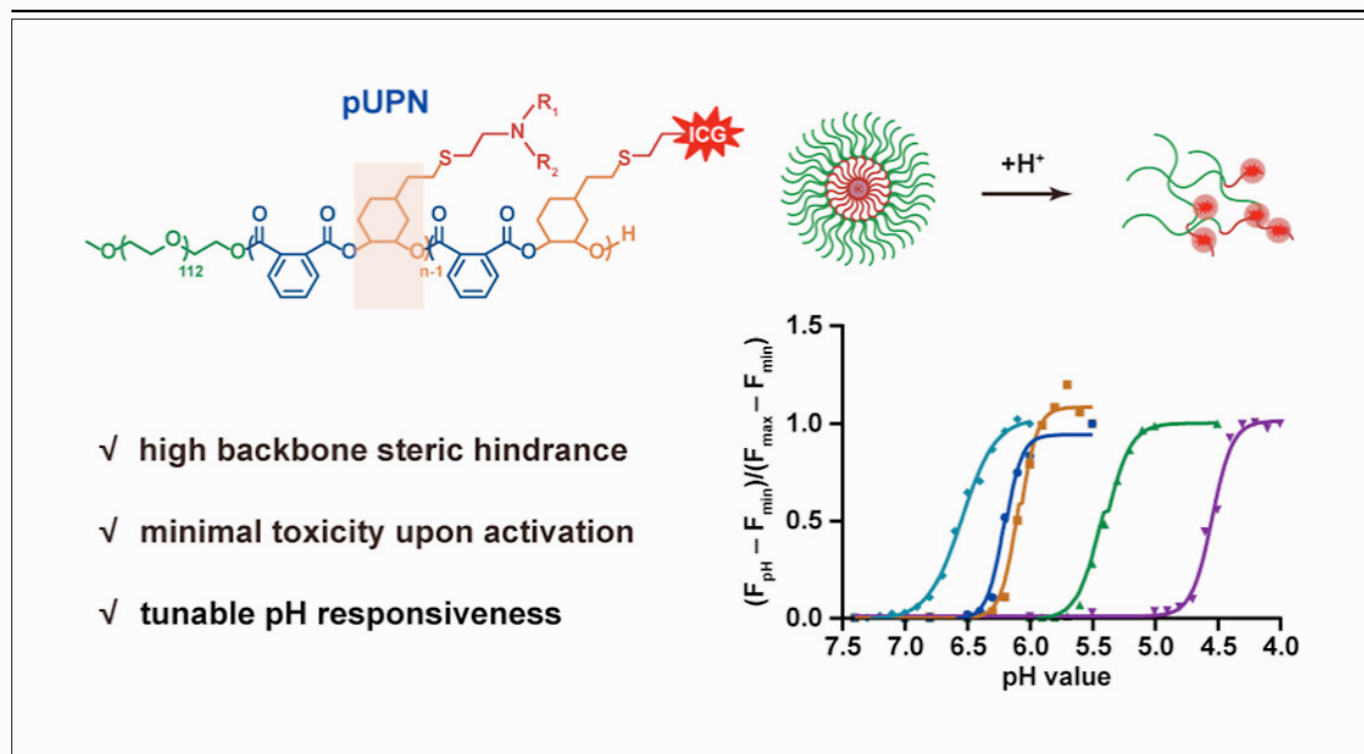
pH 超敏纳米探针相较传统 pH 响应型探针能够高度灵敏地检测 pH 失调，显示出肿瘤成像的巨大潜力。该纳米探针通常由含有可电离片段和疏水片段的两亲性聚合物构成，通过调节聚合物结构，可以在狭窄的 pH 窗口内精确控制其组装 - 解组装转变。在组装状态下，荧光团被封装于疏水性核心内，通过同源共振能量转移（homo-FRET）实现荧光淬灭。一旦纳米探针在特定 pH 阈值处解组装，释放荧光团，即可实现荧光恢复与信号激活。

pH 超敏纳米探针的 pH 敏感性源于聚合物侧链上可电离三级胺的质子化，然而，可电离三级胺的质子化能够破坏聚合物的亲疏水平衡，促进阳离子聚合物链与细胞膜之间的强相互作用，增强疏水结构域的插入并触发膜破坏，进而导致细胞毒性与生物安全风险加剧。因此，实现 pH 超敏响应和良好的生物安全性对于纳米探针的成像应用至关重要。

二、文章简介

华南理工大学熊梦华团队开发了一种 pH 超敏聚酯纳米探针（pUPNs），pUPNs 在激活后毒性极小，且具有可调节的 pH 响应性。pUPNs 由具有 pH 响应的聚酯自组装而成，其主链具有较高的空间位阻，以最小化与细胞膜的相互作用；其侧链则共价连接可电离的三级胺和自猝灭荧光染料吖啶菁绿（ICG），从而实现对微小 pH 变化的精确调控与高灵敏响应。这些 pUPNs 在静脉注射后表现出优异的生物相容性，未检测到肝或肾毒性。本研究通过增强聚合物骨架空间位阻与调节可电离三级胺，提出一个用于构建具有极佳灵敏度和生物相容性的 pH 超敏纳米探针的设计平台。

该工作通过邻苯二甲酸酐（PA）和 1,2- 环氧 -4- 乙烯基环己烷（VCHO）的开环交替聚合合成聚酯骨架，将含有环己烷结构的 VCHO 引入聚合物骨架中，能够有效增强空间位阻，降低与细胞膜相互作用的效率，并最大限度地减少膜破坏；随后将可电



离三级胺和 ICG 共价连接到聚酯侧链上，得到相应的纳米探针，三级胺的疏水性与 pH_t 呈负相关，通过在聚酯侧链上引入不同疏水性的三级胺，实现了 pUPNs 的 pH_t 在 6.5 至 4.5 区间内的连续可调。

该成果以 “pH-Ultrasensitive Polyester Nanoprobe

for High-Contrast Tumor Imaging with Superior Biocompatibility”（《具有优异生物相容性的 pH 超敏聚酯纳米探针用于高对比度肿瘤成像》）为题，于 2025 年 12 月 21 日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

pH-Ultrasensitive Polyester Nanoprobe for High-Contrast Tumor Imaging with Superior Biocompatibility

Yuxuan Zeng, Jihong Wang, Hongbin Zhu, Dun Luo, Huosheng Zhou, Chanjuan Su, Yan Bao, Xianzhu Yang, Jun Wang, Dong Luo*, Menghua Xiong*

通讯作者：华南理工大学生物医学科学与工程学院

原文链接：<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/polymscitech.5c00124>



扫码阅读原文

四、作者团队



熊梦华，本文通讯作者

华南理工大学生物医学科学与工程学院教授、博士生导师，国家级青年人才项目入选者。

主要从事膜裂解活性生物材料的设计开发，及其在肿瘤免疫治疗、mRNA 疫苗、抗菌等方面的研究，发展了 0.1 pH 尺度下可以精确调控膜裂解活性的超敏膜裂解材料以及能够选择性识别细菌磷脂的膜裂解聚肽。近年来，以通讯 / 第一作者在 *Nat. Nanotechnol.*、*PNAS*、*JACS*、*ACS.Nano* 等国际著名杂志发表 30 余篇，申请专利 20 余项，其中 PCT 专利 5 项；主持海外高层次引进人才青年项目、国家重点研发项目课题、基金委面上项目等。



罗东，本文通讯作者

华南理工大学生物医学科学与工程学院副教授、博士生导师。

主要从事影像探针的开发用于疾病诊断和治疗的研究。近年来研究成果以第一 / 通讯作者在 *JACS*、*ACS Nano*、*Biomaterials*、*Nano Letters*、*Chemical Science* 等国际知名学术期刊发表；授权美国专利 2 项，其中 1 项实现技术转让。多次在世界分子影像协会 (WMIS)、控制释放协会 (CRS)、世界材料研究协会 (MRS) 等年会作口头报告。主持国家自然科学基金青年项目、广东省面上项目，参与国家重点研发计划等。

《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：李艳梅
清华大学



编委：徐海
中南大学



编委：宋卫国
中国科学院化学研究所



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：胡文兵
南京大学



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：卞江
北京大学



编委：欧阳瑞镭
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