



# 化学通讯

CHEMICAL NEWSLETTER

No.8

2026年04月30日



图王来源: 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



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：hxtx@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

## 资讯汇集

【热烈祝贺】2025 年度中国化学会会士 (FCCS) 当选名单公布 01

来源：中国化学会官网

单位会员资讯 | 汕头大学化学化工学院 03  
诚聘海内外高层次人才

来源：中国化学会官网

## 新闻速递

中国化学会第 35 届学术年会在重庆圆满落幕 07

来源：中国化学会官网

应急管理部推进化工和危化品安全生产标准升级，破解“低”“缺”“软”问题 07

来源：中国化学品安全协会公众号

郑州大学化学学院在铜系元素化学研究领域取得重要进展 08

来源：郑州大学官网

清华大学化学系成立一百周年发展大会举行 08

来源：清华大学官网





10

中国科学院化学研究所实现光学超材料  
规模化打印技术重大突破

来源：中国科学院官网

## 科技新闻

2029 年完成全面改造，石化化工老旧装  
置迎“绿色换新”大考

来源：能源与原材料工业公众号

“或引发癌症、不孕不育”，Lululemon  
被调查

来源：南方日报公众号

化学家的实验室：如何“智造”高端香水

来源：scientificamerican

化学家认为他们已揭开“玛丽·塞莱斯  
特”号船上的真相

来源：chemistryworld

## 科普大赛

※ 输液江湖：晶液体、胶液体与血液制  
品的争霸

作者：颜玲，王杰，杨锦华，刘永，段镇娟

※ 羽衣甘蓝：风靡全球的“营养之王”

作者：Amier

## 科研进展

PS&T：水凝胶中的高度缠结：从高分子  
物理到强韧力学

来源：高分子科学与技术 PS&T 公众号

中国科学院上海有机化学研究所丁奎岭  
/ 韩召斌团队：利用锰 / 碱接力催化实  
现消旋开链  $\alpha,\beta$ - 二取代  $\gamma$ - 酮酯的动态  
动力学拆分合成多取代  $\gamma$ - 丁内酯

来源：CCS Chemistry 公众号



豆聊AI生成

35

## 【热烈祝贺】

## 2025 年度中国化学学会会士 (FCCS) 当选名单公布



根据《中国化学学会会士条例》，经中国化学学会会士提名、会士工作委员会审议、常务理事会议投票等程序，中国化学学会评选产生“2025 年度中国化学学会会士”50 位，分别来自国内高校和科研院所等 37 个单位。谨向新当选的中国化学学会会士们致以热烈的祝贺！

## 2025 年度中国化学学会会士当选名单

(50 位)

序号	姓名	性别	工作单位
1	曹宏斌	男	中国科学院过程工程研究所
2	陈永胜	男	南开大学
3	胡文平	男	厦门大学、天津大学

序号	姓名	性别	工作单位
4	骆广生	男	清华大学
5	聂红	女	中石化石油化工科学研究院有限公司
6	申有青	男	浙江大学

## ▶【续表】

序号	姓名	性别	工作单位
7	杨超	男	中国科学院过程工程研究所
8	巢晖	男	暨南大学
9	陈国颂	女	复旦大学
10	陈玲	女	武汉纺织大学
11	陈永明	男	河南大学
12	程方益	男	南开大学
13	程群峰	男	中国科学技术大学
14	邓德会	男	中国科学院大连化学物理研究所
15	狄重安	男	中国科学院化学研究所
16	杜世萱	女	中国科学院物理研究所
17	樊江莉	女	大连理工大学
18	高飞雪	女	国家自然科学基金委员会化学部
19	韩永生	男	重庆大学
20	黄维扬	男	香港理工大学
21	兰亚乾	男	华南师范大学
22	雷晓光	男	北京大学
23	黎占亭	男	中国科学院上海有机化学研究所
24	李昂	男	中国科学院上海有机化学研究所
25	李振	男	武汉大学
26	刘心元	男	南方科技大学
27	陆安慧	男	辽宁大学、大连理工大学
28	罗三中	男	清华大学

序号	姓名	性别	工作单位
29	马骧	男	华东理工大学
30	马新宾	男	新疆大学、天津大学
31	毛兰群	男	北京师范大学
32	聂广军	男	国家纳米科学中心
33	任斌	男	厦门大学
34	石峰	男	中国科学院兰州化学物理研究所
35	史炳锋	男	浙江大学
36	宋秋玲	女	福州大学
37	宋卫国	男	中国科学院化学研究所
38	孙俊良	男	北京大学
39	万颖	女	上海师范大学
40	汪海林	男	中国科学院生态环境研究中心
41	王笃金	男	中国科学院化学研究所
42	熊宇杰	男	中国科学技术大学
43	许华平	男	清华大学
44	燕红	女	南京大学
45	杨国昱	男	北京理工大学
46	杨黄浩	男	福州大学
47	张俊良	男	复旦大学
48	张前	女	东北师范大学
49	张强	男	清华大学
50	张艳	女	南京大学

## 单位会员资讯 |

# 汕头大学化学化工学院 诚聘海内外高层次人才

汕头大学是 1981 年经国务院批准成立的广东省省属综合性大学，是教育部、广东省、李嘉诚基金会三方共建的高等院校，广东省高水平大学重点学科建设高校，广东省首家高等教育体制机制改革实验示范校，也是全球唯一一所由私人基金会——李嘉诚基金会持续资助的公立大学。学校现有国家重点学科 1 个、博士后流动站 6 个、一级博士学位授权点 6 个、二级博士学位授权点 52 个、一级硕士学位授权点 20 个、二级硕士学位授权点 137 个、硕士专业学位授权点 20 个；广东省高水平大学重点建设学科 5 个（临床医学、化学、海洋科学、数学、滨海智慧城市交叉学科）。学校持续扩大国际影响力，多次入围世界权威大学排行榜，连续进入泰晤士高等教育相关排名，2026 年世界大学排名中居中国内地高校并列第 71 位；13 个学科进入 ESI 全球前 1% 行列。

汕头大学化学化工学院成立于 2022 年 7 月，拥有应用化学、材料科学与工程、环境工程、化学工程与工艺等 4 个本科专业，化学、工业催化、应用化学 3 个学术型硕士点和材料与化工 1 个专业型硕士点。应用化学专业入选国家一流本科专业，材料科学与工程专业和环境工程专业入选广东省一流本科

专业。依托广东省有序结构材料的制备与应用重点实验室、粤港联合实验室和广东省先进高分子合成工程技术研究中心等科研平台，化学学科进入 ESI 全球前 4.04%、材料科学学科和环境科学学科均进入 ESI 全球前 1%。化学学科先后被评为广东省优势重点学科、高水平大学重点建设学科和“冲补强”重点建设学科，在泰晤士高等教育中国学科评级中获得“A-”等级。

学院现有专任教师 51 人，形成了以国家杰青、优青和广东省珠江特聘教授为核心的中青年研究团队。聚焦二氧化碳捕集与资源化利用、光电功能材料与器件、新能源材料与器件、绿色智能化合成等重点研究领域，近五年承担各类科研项目超 200 余项，立项总经费超过 6000 万元，在 *Science*、*J. Am. Chem. Soc.*、*Angew. Chem. Int. Ed.*、*Adv. Mater.* 等国际著名期刊发表 SCI 论文 800 余篇。

学院专任教师队伍计划在未来三年内扩充至约 80 人。目前较多科研教学岗位虚位以待，诚挚邀请海内外优秀学者加盟。学校将为人才提供具有竞争力的薪酬待遇、安家补贴、科研启动经费以及充足的实验室空间等全方位保障。

## 一、招聘学科方向及岗位

**学科方向：**无机化学，有机化学，物理化学和材料科学与工程等。

**岗位类型：**教学型教授、科研教学型教授、科研教学型副教授、科研教学型讲师。

## 二、招聘岗位及薪资待遇要求

**人才计划：**符合相关条件的人才可申请我校相应系列及层级的人才计划。不同人才层次要求及待遇如下：

(一) “汕头大学卓越人才计划 A 系列” 招聘条件及待遇 (单位：万元)

人才层次	基础年薪	房屋补贴费	科研启动经费	搬迁费
顶尖人才	达到中国科学院院士、中国工程院院士、人文社科一级教授及相当层次人才选拔标准的高层次人才。			
	300+	面议	面议	5
杰出人才	达到国家级人才 A 类选拔标准，具有国际影响力、具有前瞻战略构想和创新能力、组织管理能力，善于建立创新团队和培养青年人才，能够带领学科或前沿领域赶超国际国内先进水平的顶级专家。			
	150-180	300	实验：600-2000 理论：300	5
领军人才	达到国家级人才 B 类选拔标准，具有杰出研究和创新能力，取得国内外同行专家公认的高水平科研或教学业绩能够在本学科领域取得突破性、标志性成果的知名专家。			
	85-100	150	实验：300-1000 理论：150	5
拔尖人才	达到省部级人才 A 类选拔标准，具有较高学术造诣，已取得突出业绩成果或从事开创性前沿研究项目，具有较大发展潜力的高层次人才。			
	70	75	实验：150 理论：75	5
优秀人才	达到省部级人才 B 类选拔标准，具有较高学术水平或取得突出科研、教学成果的高层次人才。			
	55	50	实验：100 理论：50	5

国家和省部级教学名师，国家级教学成果奖获得者可入选汕头大学卓越人才计划 A 系列高层次人才。

依托我单位申报国家自然科学基金优秀青年科学基金项目（海外）的人才且入选，可直接聘为我

校卓越 A 系列领军人才，且根据有关规定，省、市、单位将按入选人才实际情况提供优渥的配套资助。申报基本条件要求如下：

1. 出生日期在 1986 年 1 月 1 日（含）以后；
2. 具有博士学位；

3. 在取得博士学位后至申报当年截止之日前，一般应在海外高校、科研机构、企业研发机构获得正式教学或者科研职位，且具有连续 36 个月以上工作经历；在海外取得博士学位且业绩特别突出的，可适当放宽工作年限要求；

4. 申请人尚未全职回国（来华）工作，或 2025 年 1 月

1 日以后回国（来华）工作。获资助后须辞去海外工作或海外无工作，全职回国（来华）工作不少于 3 年。

详见汕头大学诚聘英才网站 [http://job.stu.edu.cn/product/recruit/website/RecruitNoticeViewNew.jsp?FM\\_SYS\\_ID=stdx&entityId=45DC305AA4F64101AA3D608D3A996216](http://job.stu.edu.cn/product/recruit/website/RecruitNoticeViewNew.jsp?FM_SYS_ID=stdx&entityId=45DC305AA4F64101AA3D608D3A996216)。

(二) 未入选卓越人才 A 计划的招聘条件及待遇（万元）

人才层次	年收入	房屋补贴费	科研启动费	搬迁费
教授	达到《汕头大学职称评审办法》中科研教学型教授条件，且具有学科领域标志性成果，有海外留汕头大学职称评审办学工作背景优先。			
	最高 51	40+	理工类（实验）：80 理工类（理论）：50 人文社科类：35	5
副教授	达到《汕头大学职称评审办法》中科研教学型副教授条件，且具有学科领域标志性成果，有海外留学工作背景优先。			
	最高 38	35	理工类（实验）：50 理工类（理论）：25 人文社科类：15	5
讲师	<p><b>理工类：</b>近五年，获得国家自然科学基金青年科学基金及以上项目立项，或发表中国科技期刊卓越行动计划重点期刊 / 中科院大类分区二区期刊论文 3 篇及以上。</p> <p><b>人文社科类：</b>近五年，获得省部级及以上科研项目立项，或发表中科院大类分区二区期刊 / 北大中文核心期刊要目总览学科分类排名前 25% 的和 CSSCI 来源期刊交集的学术性文章（3000 字以上）3 篇及以上。</p> <p><b>数学学科：</b>近五年，获得国家自然科学基金青年科学基金及以上项目立项，或在汕头大学自定义一流数学期刊发表 2 篇论文以上，或在汕头大学自定义高水平数学期刊发表 4 篇论文以上，或在中科院大类分区二区期刊发表论文 3 篇及以上。</p> <p><b>计算机学科：</b>近五年，获得国家自然科学基金青年科学基金及以上项目立项，或发表中国科技期刊卓越行动计划重点期刊 / 中科院大类分区二区期刊论文 / CCF 推荐 B 类学术期刊或会议论文 3 篇及以上。</p> <p>以上类型，一般要求有博士后经历；如为应届博士毕业生，还需具有学科领域标志性成果；具有海外留学工作背景优先。</p>			
	最高 35	30	理工类（实验）：25 理工类（理论）：15 人文社科类：10	5

说明：新引进教师薪酬待遇参照学校最新规定执行，详见诚聘英才网站。

### 三、应聘方式与材料要求

**(一) 报名时间：**本公告长期有效。

**(二) 报名方式：**提供以下报名材料，所有材料打包并以“姓名+应聘岗位”命名，发送到汕头大学化学化工学院邮箱（o\_chem@stu.edu.cn）。

1. 个人简历，包括完整的教育工作经历，代表性论文和项目；
2. 身份证；
3. 学历学位证书。

**(三) 联系人及电话：**陈老师 | 0754-86503793

**(四) 地址：**广东省汕头市金平区大学路 243 号汕头大学化学化工学院



信息来源：中国化学会团体会员单位——汕头大学化学化工学院 供稿

**编者按：**为提升会员服务水平，充分发挥桥梁纽带作用，中国化学会将通过官方宣传渠道（包括但不限于官方微信号等）不定期地推广单位会员招聘 / 招生信息，以期帮助单位会员解决人才短缺、招聘 / 招生渠道窄等难题，并为个人会员提供获取相关信息的新通道。欢迎大家关注！

来源：中国化学会官网

## 中国化学会第 35 届学术年会在重庆圆满落幕

4月14日，为期4天的中国化学会第35届学术年会在重庆科学会堂落下帷幕，本届年会以“赋能化学 新质未来”为主题，共设立72个学术分会、18个特色论坛，交流论文9216篇，安排各层级学术报告超5000场、墙报展示2826个，包括两位诺贝尔化学奖得主、百余位两院院士在内的1.6万余名化学科技工作者和学生参会交流。本届年会亮点突出，首次设立中国化学会青培博士生论坛，为青年博士搭建多元学术交流平台；打造“无处不化学”主题科普展，将抽象化学知识转化为沉浸式科普体验；同步设置学会期刊集群专属展区、会员打卡区，丰富参会者体验。年会共评选出154项优秀墙报奖，同期还举办了新技术、新产品与新仪器大型成果展览，150家单位携190余个展位参展，覆盖化学试剂、仪器装备和科研平台等多个领域。

原文链接

<https://www.chemsoc.org.cn/news/internal/a7154.html>

来源：中国化学品安全协会公众号

## 应急管理部推进化工和危化品安全生产标准升级，破解“低”“缺”“软”问题

4月22日，应急管理部举行季度例行新闻发布会，危险化学品安全监督管理一司副司长刘丽介绍化工和危化品安全生产标准制修订工作。应急管理部坚持“问题导向、急用先行、创新引领、应强尽强”原则，2024年以来发布相关标准19项，“十四五”期间制修订22项，强制性标准占比从57%提升至83%。部门聚焦重大危险源、高危细分领域、特殊作业等关键环节完善标准体系，将重大隐患判定标准升级为强制性行业标准，推动数字化技术赋能安全防控，2025年特殊作业环节事故同比下降超1/3。下一步将持续提升标准强制性与实施质效，以高标准护航化工行业安全发展。



原文链接

<https://mp.weixin.qq.com/s/5OnlBUOfE1WijHDgMIYdxw>

Image by macrovector on Freepik

来源：郑州大学官网

## 郑州大学化学学院在铜系元素化学研究领域取得重要进展

4月24日，郑州大学发布消息，该校化学学院团队在铜系元素化学研究领域取得突破，成功精准构筑双铀和双钍稳定的全铋三元环反三明治构型分子配合物，首次明确阐释了  $\text{cyclo-}[\text{Bi}_3]^{3-}$  单元以  $\sigma$ -芳香性为主的电子结构，深化了对重金属芳香性本质的理解。相关成果发表于国际权威期刊《Nature Chemistry》，郑州大学为第一署名单位，2023级博士研究生丁俊汝为论文唯一第一作者。

原文链接

<https://www.zzu.edu.cn/info/1217/88073.htm>

来源：中国科学院官网

## 中国科学院化学研究所实现光学超材料规模化打印技术重大突破

4月22日，中国科学院化学研究所宋延林团队联合新加坡国立大学团队，在国际顶级期刊《自然》发表光学超材料突破性研究成果。团队提出打印多尺度光学超材料的全新范式，自主研发卷对卷增材纳米打印设备，破解了光学超材料低成本、规模化及个性化量产难以兼顾的长期行业困境，实现超材料“像印报纸一样”高效量产，为微纳光子学研究及多领域产业化应用开辟了新路径。

原文链接

[https://www.cas.cn/cm/202604/t20260423\\_5107702.shtml](https://www.cas.cn/cm/202604/t20260423_5107702.shtml)

来源：清华大学官网

## 清华大学化学系成立一百周年发展大会举行

4月18日，清华大学化学系百年发展大会在清华学堂举行，校党委书记邱勇出席并讲话，中国化学会理事长万立骏院士、美国化学会代表等致辞祝贺。清华化学系始建于1926年，是学校最早设立的17个学系之一，百年来培养出61位两院院士，多项成果跻身世界领先水平。大会授予赵玉芬、程津培院士百年发展“杰出贡献奖”，千余名各界代表参会，同期举办了化学学科发展论坛、中学化学教育论坛等配套活动。

原文链接

<https://www.tsinghua.edu.cn/info/1177/125440.htm>


Image by pikisuperstar on Freepik

# 2029 年完成全面改造，石化化工 老旧装置迎“绿色换新”大考

来源：能源与原材料工业公众号；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/zMOuSph91F05EI8BBY4esA>

作为国民经济的支柱产业，我国石化化工行业正迎来一场系统性、强制性“设备革命”。近日，工业和信息化部、国家发展改革委、生态环境部等七部门联合印发《加力推进石化化工行业老旧装置更新改造行动方案（2026—2029年）》（以下简称《行动方案》），对石化化工行业老旧装置更新改造作出系统性安排，明确到2029年全面完成2025年已确定的改造任务，建立常态化、长效化工作机制。

目前，我国石化化工行业规模以上生产企业超过2.7万家，部分早期建成的装置设计建设标准不高、工艺技术落后、自动化控制水平偏低，存在安全隐患突出、布局不合理、运行效率偏低等问题。工业和信息化部原材料工业司司长常国武在近日举办的新闻发布会上表示，加快石化化工行业老旧装置更新改造，是从根源上消除安全环境风险的重要举措，也是提升行业技术装备水平、培育发展新质生产力的

有效路径。

## 从引导性整治走向系统性强制升级

与以往老旧装置改造相关政策相比，此次《行动方案》在覆盖范围、执行力度和战略定位上均实现显著突破。

“此次《行动方案》最大的突破在于‘系统性+强制性’双轮驱动。”中国自动化学会石油化工应用专业委员会秘书长张建立在接受中国工业报记者采访时

表示，过去相关政策多以鼓励性、引导性为主，而此次由七部门联合印发，明确了时间表、任务书和责任链，执行约束力明显增强，标志着行业治理从“阶段性整治”转向“常态化管理”。定位从安全生产应对转变为产业升级、绿色低碳转型的重要抓手。

对比应急管理部等四部门2024年联合印发的《化工老旧装置淘汰退出和更新改造工作方



案》（应急〔2024〕49号），原金陵石化公司设备技术专家劳瑞卿在接受中国工业报记者采访时指出四大关键差异：**一是牵头部门扩容。**《行动方案》在2024年4部委基础上增加国家发展改革委、生态环境部、中国人民银行3个部委，更加突出老旧设备改造的重要性和多部门联动的关联性；**二是监管范围收紧。**老旧装置认定下限从30年降至20年，20年以上装置均需建档评估。对实际投产运行未超过20年的，经评估确有必要实施更新改造的，也应纳入老旧设备更新改造工作台帐；**三是责任主体调整。**本次由工业和信息化部牵头组织实施，央企与地方企

业统一纳入省级工信部门排查，政策延续性与统一性提升；**四是智能转型强化。**《行动方案》鼓励更新改造企业对标行业先进水平实施安全化、绿色化、智能化改造。推进重点监管的危险工艺加快全流程自动化改造或低风险替代。

天津保泰安全技术服务有限公司总经理孙舒对中国工业报记者进一步表示，在推进力度上，《行动方案》明确2029年全国统一“硬时限”，要求2025年已确定的改造任务必须全面完成，单套装置改造周期原则上不超过5年。同时，政策优化了项目审批流程，加大了政府投资基

金、技术改造信贷等多渠道金融支持力度，推进节奏更快、保障措施更实。

### 环保协同增效从源头削减VOCs排放

石化化工行业是工业领域挥发性有机物（VOCs）排放第一大行业，其中老旧生产装置更是污染物无组织排放的核心源头，也是大气污染防治攻坚的重中之重。

生态环境部大气环境司副司长张昊龙介绍，近年来，我国环境空气质量明显改善。但在全球气候变暖加剧、国际形势复杂多变等多重压力下，空气质量持续

改善压力不断加大，今年以来部分地区 PM 2.5 浓度出现反弹。石化化工行业是大气污染物排放重点行业，特别是挥发性有机物（VOCs）排放量在工业行业中位居首位，也是减排潜力相对较大的领域。

在行业全链条减排过程中，储罐设备的密闭性短板成为亟待破解的突出痛点。普瑞泰格®中国董事长张岩在接受中国工业报记者采访时表示，储罐是石化化工生产储运的核心设施，其配套使用的呼吸阀、紧急泄放阀普遍存在泄漏量大、排放易超标等问题，不仅是厂区 VOCs 逸散污染的主要来源，更埋下闪爆、火灾等安全生产隐患，环保与安全风险交织叠加。

瞄准这一行业共性难题，专业环保安全设备企业加快技术创新迭代，为源头治污提供解决方案。张岩介绍，公司依托核心技术研发出高效环保呼吸阀、紧急泄放阀等系列产品：通过低超压 10% 翼型阀盘技术、镜面级金属面密封技术，大幅降低阀门泄漏量，提升储罐密封性。

先进技术与装备的落地应用，已在多家石化企业取得显著减排成效。中国石化齐鲁分公司 66 台重质油储罐应用普瑞泰格



普瑞泰格 @ 环保型防凝固一体式阻火呼吸阀现场使用情况

呼吸阀后，VOCs 泄漏检测值从 1000~8000 ppm 降至 100 ppm 以下，彻底解决异味与超标排放问题，各项指标均满足现行国家环保标准规范及重污染天气重点行业绩效评级 A 级企业要求，为行业同类装置改造提供了标杆范本；中国石化沧州炼化储罐区更换普瑞泰格高效环保超低泄漏呼吸阀和紧急泄压阀后，阀门泄漏量远低于国标要求，成功实现 VOCs 深度治理。

行业政策推动与治理需求升级的双重驱动下，安全环保装备产业也迎来发展新格局。谈及未来市场趋势，张岩预判，行业技术标准将全面升级，超低泄漏、

本质安全、全生命周期管控将成为核心要求。与此同时，产品将加速向集成化、智能化发展，融合阻火 + 呼吸、泄压 + 密封等多功能集成的智能设备将成为市场主流选择。

顶层设计层面也为行业绿色转型划定清晰路径。张昊龙表示，此次出台的《行动方案》将生态环境保护要求融入产业政策，具体围绕以下三方面展开：一是做到心中有数，对全行业老旧装置开展全面体检，形成老旧装置清单。二是通过逐一评估，分类施策，推动不符合环保、安全等相关要求的装置淘汰退出一批、改造提升一批、整体新建一批，鼓

励采用更先进、环保的装置和污染治理技术，从源头上削减污染物排放。三是建立年度滚动摸底评估和持续改造提升的长效机制，不断提高行业污染防治水平。通过系统推动老旧装置“绿色焕新”，不仅能夯实行业安全发展根基，也将为持续改善空气质量、促进经济社会全面绿色转型注入新的活力。

### 老旧装置安全环保与运行压力突出

当前，我国石化化工行业运行超 20 年、部分超 30 年的老旧装置仍占有一定比例，普遍存在设备腐蚀、控制滞后、能效偏低等问题。

张建立介绍，从区域分布看，老旧装置主要集中在东北、华北、华东等老工业基地；从行业领域看，以炼油、乙烯、化肥、氯碱等传统化工装置为主；压力容器、储罐、管道系统、反应器等关键核心设备是更新改造重点。这些老旧装置不仅带来安全隐患，也制约行业能效提升和数字化转型。

孙舒补充说道：“国内炼油装置多在 2005 年前后集中建成投产，部分上世纪 90 年代末建设的装置仍在运行。老旧装置主要分布在东北炼化企业、山东地方炼厂、山西和内蒙古煤化工项目、江浙地区化工装置以及广州、

福建等地炼化一体化装置，其中东北、华北炼化装置运行周期普遍偏长。2025 年大连石化千万吨级装置停产退出，也体现出中央企业加快老旧装置更新改革的实际行动。”

专家普遍认为，方案实施过程中，行业企业仍面临资金、生产、保供等多重现实挑战。

张建立直言，改造面临四大难点，一是资金压力较大，尤其是中小企业改造成本高、融资渠道有限；二是部分老旧装置缺乏成熟替代技术，企业存在“想改不会改”的问题；三是石化装置连续生产特点突出，改造停产



与生产保供矛盾突出；此外，部分地区监管能力不足、标准体系不统一，也可能影响政策落地效果。

结合行业运行实际，孙舒坦言，当前石化化工行业整体盈利水平偏低，部分领域处于亏损或微利状态，企业现金流紧张，大额改造资金落实存在难度。同时，单套装置改造成本高、停产损失大，上游基础化工装置改造还可能造成下游精细化工、新材料企业原料供应波动或价格上涨，对产业链稳定运行带来一定影响。

## 多方聚力施策护航改造落地见效

面对挑战，多位专家为企业改造落地提供精准建议。

张建立认为，企业要早评估、早规划，尽快开展装置现状摸排，制定分阶段改造计划，积极争取政策支持；借力工业互联网、数字孪生等智能化技术，提升装置运行监测与风险预警能力；积极对接绿色信贷、设备更新专项再贷款等金融工具，拓宽融资渠道；加强与上下游企业、化工园区协同，分步实施改造，最大限度降低停产影响；加强设备管

理与安全运维人才培养，确保改造后装置稳定高效运行。

孙舒强调，装置评估是改造前提，应采用专业检测技术，对装置结构、工艺、设备、仪表、电气等开展全面诊断，科学确定改造或延期服役方案。他结合参与海上平台 20 年延期服役评估项目经验表示，经系统检测评估后，符合条件的装置可实现安全稳定运行。对于确需改造的企业，建议优先从局部改造入手，将改造计划与企业 3~5 年发展规划、检修计划、产能调整统筹结合，分期分批实施，避免大规模集中改造与市场需求脱节，造成投资浪费。

劳瑞卿提出，企业要将改造与“十五五”规划深度结合，“一企一策”明确发展方向，同步推进产品结构调整、原料保障、高端新材料布局；同时，紧盯行业先进 KPI 指标，达标企业抢抓政策机遇升级，落后装置坚决淘汰关停，以改造为契机实现高质量绿色发展。

中央石化企业是行业主力军，老旧装置存量、改造任务重。国务院国资委规划发展局副

局长桂刚表示，下一步，国务院国资委将会同有关部门，推动中央企业以两年左右时间打好老旧石化化工装置更新改造攻坚战，重点抓好五项工作：强化企业主体责任，成立专项工作领导小组，企业主要负责人亲自部署推进；实施挂图作战，建立动态工作台账；严守安全稳定底线，规范改造全过程管理；做好供应保障预案，确保基础石化产品稳定供应；强化政策协同与沟通协调，保障工作平稳有序推进。

常国武强调，老旧装置更新改造工作涉及面广、系统性强，需要加强部门协同、上下联动，加快形成“国家引导、省级主导、市县落实、企业主体”的工作格局。下一步，工业和信息化部将会同有关部门加大政策支持力度，加强对地方工作指导，及时协调解决推进中的困难问题。各省级工业和信息化主管部门将督促企业落实主体责任，鼓励地方因地制宜出台配套支持政策，推动《行动方案》落实落细。企业作为实施主体，将严格按照要求保质保量完成改造任务，推动石化化工行业加快向本质安全、绿色低碳、智能高效方向转型升级。

# “或引发癌症、不孕不育”， Lululemon 被调查

来源：南方日报公众号；原文链接：[https://mp.weixin.qq.com/s/ySoyiV7aDbVF65N\\_3jzs8A](https://mp.weixin.qq.com/s/ySoyiV7aDbVF65N_3jzs8A)

消费者花近千元买一条瑜伽裤看中的是它的舒适、透气还有品牌传递的健康生活方式然而就在最近知名运动品牌露露乐蒙（Lululemon）因为一种叫 PFAS 的化学物质被推上了风口浪尖



## PFAS 是什么？它出现在衣服里意味着什么？

### 美国得州就“永久性化学物质”问题对 Lululemon 展开调查

据新华社消息，美国得克萨斯州总检察长肯·帕克斯顿日前宣布，已向加拿大运动服饰品牌 Lululemon 的美国公司发布调查令，将调查其产品是否含有“永久性化学物质”。

“永久性化学物质”主要是指全氟和多氟烷基物质 (PFAS)。帕克斯顿 13 日在一份声明中说，近期研究及消费者关切引发质疑，认为 Lululemon 产品可能含有某些合成材料和化学物质，可能与内分泌紊乱、不孕不育、癌症及其他健康问题有关联。此次调查旨在查明 Lululemon 是否在产品安全性、质量及对健康的影响方面误导消费者。

根据安排，得克萨斯州总检察长办公室还将审查 Lululemon 美国公司的限用物质清单、产品检测流程以及供应链管理情况，以评估其产品是否符合宣称的安全标准。

帕克斯顿表示，不会允许任何企业打着“健康”和“可持续发展”的幌子，高价向消费者销



售含“有害”或“有毒”物质的产品。如果调查发现 Lululemon 违反得州法律，将依法追究其责任。

Lululemon 方面回应称，该公司产品不使用 PFAS。此前曾在少量防水产品中使用相关物质，已于 2023 财年逐步淘汰。该公司要求供应商通过第三方机构定期开展包括 PFAS 在内的限用物质检测，以确保持续合规。Lululemon 还表示，正在配合提供调查所需材料。Lululemon 中国也同步声明，国内所有产品符合标准，不含 PFAS。

### PFAS 是什么？为何出现在人们的衣服里？

PFAS 是一类超过 1.4 万种合成化学物质的总称，它有个直白的绰号——“永久化学品”。

之所以叫“永久”，是因为这类物质里有一种叫“碳-氟键”的化学结构，极难被破坏。水冲不走、太阳晒不烂、微生物也分解不了。一旦进入环境，几十年甚至上百年都不会消失。

PFAS 被广泛应用于工业生产及消费产品，包括纺织品、消防泡沫、医疗器械、涂料、个人护理产品、建筑材料等。

Lululemon 的这次风波，揭开了服装行业一个隐秘的角落。

因为同时具有憎水又憎油的特性，很多运动服饰为了让汗水快速挥发、保持干爽，会在面料中加入含有 PFAS 的防水防污涂层。特别是带有“防水”“防泼水”功能的夹克、风衣，更离不开这类化学品的加持。

问题在于，衣服会洗、会旧、会磨损。每洗一次，面料上的一部分 PFAS 就会随着洗衣水进入下水道，最终汇入河流、渗入地下水。穿在身上的“舒适科技”，不知不觉变成了排进环境的“永久污染”。

不仅是 Lululemon，全球户外品牌、快时尚品牌都面临着同样的拷问。随着环保监管收紧，一场寻找 PFAS 替代品的“去毒革命”正在服装行业悄然展开。

## 穿含 PFAS 的衣服，对人体有害吗？

学界和业界长期关注 PFAS，可以明确的一点是：通过皮肤接触 PFAS 的风险极低，它不会像过敏一样让人立刻起疹子。真正的隐患在于长期、慢性的累积。

据美国疾病控制和预防中心介绍，接触某些 PFAS 可能与多



种健康问题相关，包括癌症风险增加、胆固醇水平升高及免疫系统受影响等。

《英国医学杂志》(BMJ) 于 2025 年发布的分析指出，不同种类的 PFAS 与一系列健康问题相关，包括影响生殖系统、干扰胎儿发育、改变肝脏酶活性、扰乱甲状腺功能、升高胆固醇水平，以及降低疫苗的抗体反应。

耶鲁大学公共卫生学院的研究进一步证实，PFAS 暴露与肾癌、睾丸癌、肝癌等多种癌症存在关联，同时还可能导致新生儿出生体重降低、生育能力下降，甚至削弱免疫系统对新冠病毒等感染的防御能力。

PFAS 进入环境后，会通过饮水、食物链进入人体。一旦进

入血液，它就开始在肝脏、肾脏等器官里“安家落户”。多项研究指出，长期暴露于高水平的 PFAS，可能与甲状腺疾病、胆固醇升高、免疫系统受损，甚至肾癌、睾丸癌等健康问题有关。

对儿童的影响尤其值得警惕。有研究发现，体内 PFAS 水平较高的孩子，接种常规疫苗（如破伤风、白喉）后产生的抗体水平可能偏低——换句话说，这些“永久化学品”可能在悄悄削弱下一代的免疫力。

不过，公众不必过度恐慌，需要警惕的是长期、累积的风险，毕竟不是穿一件衣服就会中毒。公众对此的科学态度应该是：正视它的存在，并主动减少不必要的暴露。



📍 图片来源 Kyle Bean, 2026 年 5 月刊, 刊载平台: 《Chemistry》

# 化学家的实验室： 如何“智造”高端香水

在奇华顿与 IFF，化学家创制并守护着与情感、记忆深度绑定的全新香气分子

来源：scientificamerican；作者：Eric Sullivan；翻译：余婉宁

原文链接：<https://www.scientificamerican.com/article/how-chemists-engineer-the-signature-smells-of-luxury-perfumes/>

在曼哈顿第 57 街一栋外观普通的写字楼 11 层，身穿白大褂的技术人员手持移液管，俯身对着玻璃样品瓶与电子天平，精心调配着香水。这里是

全球最大香精香料生产商之一——奇华顿 (Givaudan) 的实验实验室。他们的工作精细程度，堪比工程师在芯片上逐层沉积硅材料。

这些技术人员每天要完成多达 250 款调香师配方的试生产，再经过评估、调整和复配，直到最终版本定型。实验室的墙面上摆满了数千个密封瓶罐，每一瓶都盛放着独有的芳香物质；隔壁房间里，还整齐码放着 5 万余个试验瓶，层层货架仿佛一直延伸向远方。

“走进这里，它看起来令人敬畏。”奇华顿副总裁兼调香师斯蒂芬·尼尔森（Stephen Nilsen）表示，“但每一个瓶子都是一个秘密、一个谜题，每一瓶里都藏着一段故事。”

数千年来，香水原料仅通过从花卉中蒸馏或从植物中提取获得。1868 年，首批有机香气分子被人工合成，由此开启了全新的嗅觉探索图景。奢侈品香水市场或许推崇调香师的艺术造诣，但该领域的创新归根结底由化学家推动——正是他们的实验创造出全新的香气分子。

“我们处于创意构思、概念验证与前沿探索阶段。”另一家头部香精香料企业——国际香精香料公司（International Flavors and Fragrances, IFF）总监兼首席科学家保罗·琼斯（Paul Jones）说。在

IFF 位于新泽西州联合滩的实验室中，琼斯及其有机化学团队先构建假想香气分子的模型、提出科学假设，再将原料进行化学反应，以观察会产生何种新气味。其目标是：制备可规模化生产的定制化化合物，使 IFF 获得市场竞争优势。

香精香料制造是一个全球性市场，数据公司史塔哲（Statista）预计，其今年市场规模将超过 650 亿美元。这一领域充斥着商业机密。香水配方极少申请专利，而是作为商业机密严加保护；但人工合成的香气分子本身通常会被申请专利与商标，在上市前的数年内一直作为发明者专属的“独有原料”。

琼斯表示，在启动化学反应之前，香精生产商必须先考虑分子的知识产权问题。“当前分析科学十分先进，如果原料不受知识产权保护，你的成果就会任由所有人仿制。”在奢侈品市场，这种风险尤其高。他说：“高端香水与衣物洗涤剂等日用香精的区别在于，高端香水具备吸引力与精致感。”这种“惊艳感”可来自一种关键分子，例如 IFF 研发的萨菲亚诺（Saffiano）分子，其气味近似绒面革，“当你使用它时，会立刻感受到与众不同”。

高端香水的创新由化学家推动，  
正是他们的实验创造出了全新的香气分子。

这种分子改造技术还可用于替代濒危或受管制的天然原料。香精企业正越来越多地采用绿色化学（soft chemistry）实现这一目标，利用发酵、酶促转化等生物合成方法完成制备。

“可以想象一下，酵母如何通过发酵将糖转化为酒精。”尼尔森表示，“我们使用特定的酶与微生物菌株，以类似方式分解糖类或改造分子，从而构建复杂的分子结构，这些结构正是打造优质香气的

核心基础。”

这些分子还具有更可持续的额外优势。尼尔森举例提到 Ambrofix，这是一种带有木质与琥珀香调的分子，可替代龙涎香——一种由抹香鲸消化系统产生的物质。Ambrofix 最初源自香紫苏中的香紫苏醇，如今通过蔗糖发酵生产。“过去我们需要数千英亩土地种植足够的植物来制造它，”尼尔森说，“现在只需使用生物反应器，所需土地仅为原来的百分之一，即可生产出相同的分子。”

香水创新并非只发生在合成化学实验室。植物学家正在通过杂交培育花卉，以获得香气品质更优的品种；同时，超临界二氧化碳、微波技术等环保萃取工艺正逐步淘汰己烷——一种长期用于从植物中萃取芳香分子的有毒石油溶剂。升级回收技术的进步也为调香师的原料库带来了全新成分。IFF 天然原料研发副总裁伯纳德·布莱罗特 (Bernard Blerot) 表示，以此方式推出的最新香调之一是橡木 (Oakwood)，它采用专利二氧化碳萃取工艺，利用法国最大制桶企业的剩余木材制备而成。“这种香气很特别，兼具干燥感与温暖感，”布莱罗特说，“它不同于檀香、岩兰草或广藿香”，为调香师提供了一种全新可用的香调。

奢侈品市场对新型香气分子的需求源于神经生物学：嗅觉与情感、记忆紧密相连。2007 年出版的《欲望之香》(The Scent of Desire) 一书作者、神经科学家雷切尔·赫兹 (Rachel Herz) 表示，人类对气味的感知方式是天生的，这一特性使我们本能地追寻香水所能带来的短暂愉悦体验。“我们对气味的感知与情感的激活发生在大脑的完全相同区域，因此我们对气味的体验本质上是情绪化

的，这与其他所有感官体验都不同。”她说，“即使我们无法识别气味，也不了解其背后的缘由，它依然能引发我们的情绪。当这种感受是愉悦的时候，它就有一种深刻且与生俱来的快感，不带有分析或认知层面的叠加，非常纯粹。我认为这正是人们对香水有强烈渴求的原因。”

在奇华顿实验室参观时，尼尔森将一瓶瓶芳香化学品依次递到笔者鼻前。一瓶闻起来像冷空气，一瓶像铅笔屑，还有一瓶混合着百香果与洋葱的气息。（笔者觉得有些怪异，但他表示“我们一直在使用它”。）笔者还嗅闻了多种天然原料：玫瑰原精、粉红胡椒和茉莉。参观尾声，他向笔者展示了一台名为卡尔托 (Carto) 的机器人，调香师可借助这台设备在进入实验室进行试配前，先对香水配方进行“草图式”构思。设备一侧是容纳 300 种香水原料的玻璃舱体，另一侧则是电脑屏幕。

“最近有人找到我，说想要一款闻起来像‘彩虹芒果’的香水。”尼尔森说，“我当时表示，我不知道那是什么味道。于是我来到这里，思考可能需要哪些成分：丁酸乙酯、若干柠檬醛类成分和一些青香调——青苹果、少许梨香，还有桃子香。”他将这些香调及其他成分输入 Carto 系统，机械装置随即启动，将原料精准称量至样品瓶中。尼尔森如同从自动售货机中取出成品一般，将调配好的样品递给笔者嗅闻。它闻起来有芒果的气息，但更鲜亮、更有活力，也更复杂。这是一种甚至会让人想涂抹在身上的芒果香气。

“这距离一款成品香水还相去甚远。”尼尔森耸耸肩，“但它确实能让人感到愉悦，不是吗？”

# 化学家认为他们已揭开 “玛丽·塞莱斯特”号船上的真相

来源 : chemistryworld; 作者 : Mason Wakley; 翻译 : 余婉宁

原文链接 : <https://www.chemistryworld.com/news/chemists-think-they-know-what-happened-on-board-the-mary-celeste/4023228.article>

针对这艘满载货物却全员离奇失踪的船只，学界已提出诸多成因假说，而本次化学家提出的新解释，能否为这桩百年悬案彻底结案？



英国曼彻斯特大学(University of Manchester, UK)的化学家杰克·罗伯瑟姆(Jack Rowbotham)与弗兰克·梅尔(Frank Mair)提出,船员发现广为人知的“玛丽·塞莱斯特”号(Mary Celeste)被弃置的核心原因,极有可能是一场乙醇蒸汽快速爆燃——这类爆炸的关键特征是不会留下任何可见的损毁痕迹。在英国第五频道(Channel 5)近期播出的纪录片中,两位研究者利用模型船对该假说进行了还原验证。他们认为,本次实验为“当年船上可能发生的事件经过”,提供了一套“极具说服力的论证”。

1872年12月,船员在葡萄牙以西约900英里的亚速尔群岛(Azores)附近海域,发现了“玛丽·塞莱斯特”号。尽管该船货舱内几乎所有原始货物均完好留存,船长及其家人、其余船员却已全部不在船上,且此后始终未发现该批船员的任何踪迹。围绕事件的成因,各类假说迅速流传,涵盖海盗劫掠、自然灾害、疫病爆发,甚至超自然力量袭击等多种可能性。

罗伯瑟姆表示:“‘玛丽·塞莱斯特’号是一艘商船,当时正从纽约驶往意大利的热那亚(Genoa),运输的货物为工业级乙醇。”该船共装载约1700桶



杰克·罗伯瑟姆(左)与弗兰克·梅尔在英国第五频道纪录片的拍摄现场,成功完成乙醇蒸汽爆燃假说的验证实验后合影留念。来源:© Content Kings

乙醇,这类乙醇常被酿酒商用于葡萄酒加烈。

后续的海事调查显示,船上有9桶乙醇已完全排空,原因很可能是这批木桶的木质孔隙率更高,导致乙醇发生渗漏。船员的

航海日志同时显示,该船在航行途中遭遇了恶劣天气,船员因此对船舱进行了封舱处理,无意间将渗漏挥发的乙醇蒸汽密闭在了货舱内。当船只驶入温暖海域后,舱内乙醇蒸汽的温度随之升

高，超过了乙醇 13 °C 的闪点。

罗伯瑟姆解释称，此时一丝火花——可能来自散落的余烬、点燃的烟斗，或是金属部件间的摩擦——就足以触发一场快速爆燃。这一事件要么会让船员在极度恐慌中弃船逃生，要么甚至会直接将人员掀入海中，最终导致整艘船被弃置。罗伯瑟姆表示，最关键的一点是，尽管乙醇燃烧的火焰温度可达 2000 °C，但这场爆燃“在瞬间就已结束”，因此船上不会留下任何燃烧痕迹。

## 理论验证

借助“玛丽·塞莱斯特”号 1:18 比例的缩尺模型，罗伯瑟姆与梅尔现已验证：乙醇蒸汽爆燃有可能未在该船上留下任何痕迹。

为验证这一猜想，两人先将低温乙醇喷入模型船的货舱，并把环境温度设置为 1872 年冬天该船从纽约出发时的相近温度。随后用导线在舱内打出电火花，但并未发生爆炸。

在更高温度下重复实验，结果则完全不同。为还原亚速尔群岛的温暖环境，两人先用水浴加热乙醇，并用加热器升高模型船整体温度。将加热后的乙醇喷入舱内并点燃混合气后，瞬间发生



① 一场令人极度恐慌的乙醇蒸汽爆燃，即便仅对船体造成了微乎其微的损毁，也极有可能是导致“玛丽·塞莱斯特”号船员弃船的原因。来源：© 杰克·罗伯瑟姆

剧烈爆燃：原本虚掩的舱盖被直接炸飞到房间另一头，甲板也发生了弯曲。而整个木质模型上，没有留下任何灼烧或炭化痕迹。

“船上的船员大多没有受过专业科学教育，”伦敦大学学院 (University College London) 的安德里亚·塞拉 (Andrea Sella) 说，“在黑暗中突然出现一道蓝色闪光，一股热浪，所有舱门瞬间炸开——这对他们来说极为恐怖。”

塞拉认为，这件事的趣味“并不在于找到一个答案”，而在于“你会试着设身处地回到那个年代，去理解当时人们看待世界的方式与我们有多么不同”。

2006 年，塞拉曾做过类似实验。罗伯瑟姆解释说：“我们改进了塞拉教授的实验。他当时用的是丁烷和纸，我们则用了真实的木材和乙醇，更贴近‘玛丽·塞莱斯特’号上的实际情况。”

他还表示，两人希望把这项实验重新设计成科普活动，用来培养科学思维、向学生讲解燃料混合气知识，并体现化学的实用价值。

“我们无法确定爆炸之后具体发生了什么，但我们非常确信，这些因素组合在一起，已经构成了非常有说服力的解释。”罗伯瑟姆说。

# 输液江湖

## 晶体液、胶体液与血液制品的争霸

作者：颜玲，王杰，杨锦华，刘永，段镇娟；Email: wuwai135@qq.com



Image by freepik on Freepik

## 一、引言

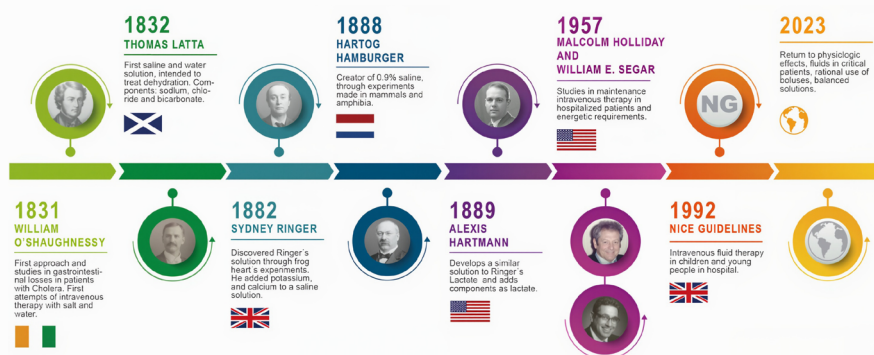
医学技术的飞速进步，极大革新了疾病的治疗手段与方法，输液治疗作为现代医疗体系中的关键环节，在临床实践中应用极为广泛。晶体液、胶体液以及血液制品（图 1），作为输液治疗的 3 种主要制品类型，犹如守护患者健康的坚固防线，各自承担着不可或缺的重要使命。

晶体液如生理盐水等可快速透过血管壁，补充细胞外液，维持水电解质及酸碱平衡，是补充体液的基石，常见于脱水等症。胶体液如羟乙基淀粉“人如其名”能够维持血管内胶体渗透压，相对分子质量大，可用于扩充血容量，见于抗休克治疗。血液制品源于血液，含有多种复杂的生物活性成分，可用于治疗贫血、凝血障碍等。

在临床应用中，这三类输液制品的合理选用与科学使用，对于提升治疗效果、促进患者康复进程、降低并发症发生率起着决定性作用。医生需依据患者的具体病情、身体状况以及各项生理指标，综合考量后做出最为恰当的选择。然而，不同输液制品各有怎样的特点与优缺点？在何种情况下应优先选用哪类制品？怎样才能确保输液治疗既安全又高效？接下来，让我们一同深入探究这 3 种



【图 1】3 种输液制品的代表溶液（图片来源于豆包 AI 生成）



【图 2】晶体液发展历史和研究人员的主要贡献（图片来源于急诊时间微信公众号）

输液制品的奥秘，了解它们在医疗领域中的应用，为守护健康增添更多的专业知识储备。

## 二、3 种输液制品的前世今生

### 2.1 晶体液：从霍乱救治萌芽到多元发展

晶体液发展历史(图 2)，19 世纪 30 年代，欧洲霍乱肆虐，英国

医生托马斯·拉塔(Thomas Latta)用煮沸的生理盐水与  $\text{NaHCO}_3$  救治患者，开启晶体液应用，但其成分与如今 0.9% 生理盐水差异大。1874 年，法格(Fagg)将 0.9% 氯化钠溶液(生理盐水)用于临床，因  $\text{Cl}^-$  浓度高，大量输注易引发高氯性酸中毒。1883 年，悉尼·林格(Sydney Ringer)提出

含钾、钙和碳酸氢根的林格液,更贴合人体需求。1932年,亚历克西斯·哈特曼(Alexis Hartmann)在林格液中加入乳酸钠制成乳酸林格液,可调节酸碱平衡,但有适用局限。1979年国外推出醋酸钠林格液,2005年江苏恒瑞研发含糖醋酸钠林格液,弥补不含钙的缺陷。后来逐渐实现碳酸氢钠林格液工业化生产。

## 2.2 胶体液: 战争催生的扩容良方

胶体液的发展与战争医疗需求密切相关。1915年一战时,霍根首次报道在人体使用明胶溶液,用于治疗休克,其成为第一种人造血浆代用品,后衍生出琥珀酰明胶和聚明胶肽。

20世纪40~50年代,右旋糖酐和羟乙基淀粉制剂相继出现。1945年右旋糖酐用于临床,

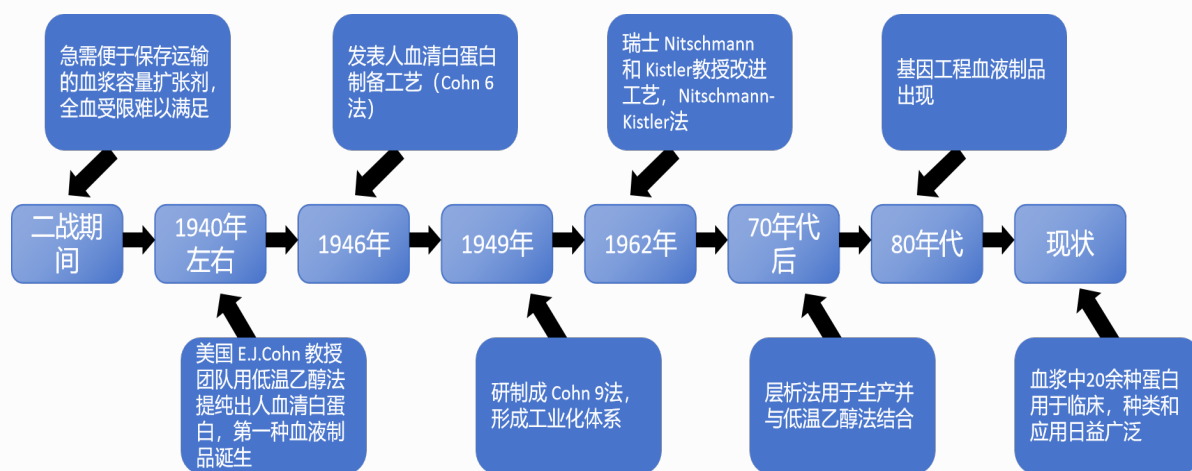


①【图3】医生在给受伤的士兵进行血液输注(图片来源于一本正经说历史微信公众号)

1960年羟乙基淀粉开始临床试验,2004年1月第三代羟乙基淀粉(万汶)在欧洲获准用于儿童。胶体液溶质分子直径1~100 nm,相对分子质量常超1000 Da,能调节血管内外水平衡、扩充血容量及维持血浆胶体渗透压等,作用显著。

## 2.3 血液制品: 从血浆分离到基因工程介入

血液制品源于二战战场需求,军医为失血性休克的士兵患者在进行输全血治疗(图3)。但当时急需便于保存运输的血浆容量扩张剂,全血受限制难以满足。如图4所示,1940年左右,美国Cohn E J教授团队用低温乙醇法



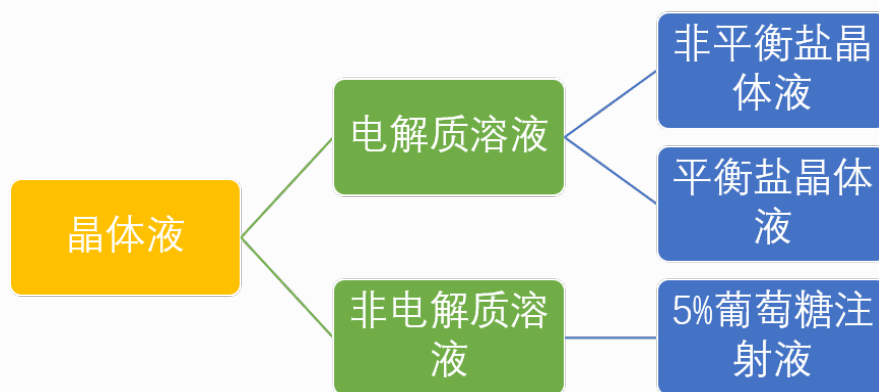
①【图4】血液制品工业化工艺发展历程

提纯出人血清白蛋白，第一种血液制品诞生。1946年其发表人血清白蛋白制备工艺(Cohn 6法)<sup>[1]</sup>，1949年研制成Cohn 9法，形成工业化体系。1962年，瑞士Nitschmann和Kistler教授改进工艺，即Nitschmann-Kistler法。70年代后，层析法用于生产并与低温乙醇法结合。80年代基因工程血液制品出现。现血浆中20余种蛋白用于临床，种类和应用日益广泛<sup>[2]</sup>。

### 三、3种输液制品的主要类型与特点

#### 3.1 晶体液

晶体液是指溶质分子直径 $<1\text{ nm}$ 的溶液，由于没有大相对分子质量物质的存在，输注血管后能够自由通过毛细血管壁，大部分渗透分布于组织间隙，因其电解质组成与细胞外液相似，且能在一定程度上纠正酸中毒，被广泛用于各种休克的液体复苏<sup>[3]</sup>。目前临床上应用的晶体液分为电解质溶液和非电解质溶液2类(图5)。电解质溶液分为以0.9%氯化钠注射液为代表的非平衡盐晶体液和以乳酸钠林格注射液、醋酸钠林格注射液等为代表的平衡盐晶体液。非平衡盐晶体液具有高氯性，大量输注时易引发高氯性代谢性酸中毒，而非平衡盐晶体液电解质成分更接近



①【图5】晶体液分类



①【图6】复方氯化钠溶液(图片来源于百度百科)

血浆，因此目前临床上大多数情况(尤其是危重症复苏)下更倾向使用平衡盐晶体液以减少不良反应与死亡风险。非电解质溶液则有5%葡萄糖注射液等。

生理盐水即0.9%氯化钠注射液，是临床最常用的非平衡盐晶体液，价格低廉，溶液中没有其他离子，不易发生配伍禁忌。

但是大量液体复苏时，需要根据患者具体情况谨慎使用。

复方氯化钠溶液(即林洛氏溶液)，(图6)是在生理盐水的基础上调整了钠离子浓度，与人体更为接近；另外，还添加了钾和钙离子。在液体复苏中减少了出现离子紊乱的可能性，特别是低钾和低钙血症。

乳酸林格液 (LRS) 在林格液的基础上添加了乳酸盐, 降低了氯离子的含量, 使钠离子和氯离子水平与细胞外液生理水平更为接近。另一方面, 增强了对酸中毒的缓冲, 使其更适用于酸中毒或有酸中毒倾向的脱水患者。

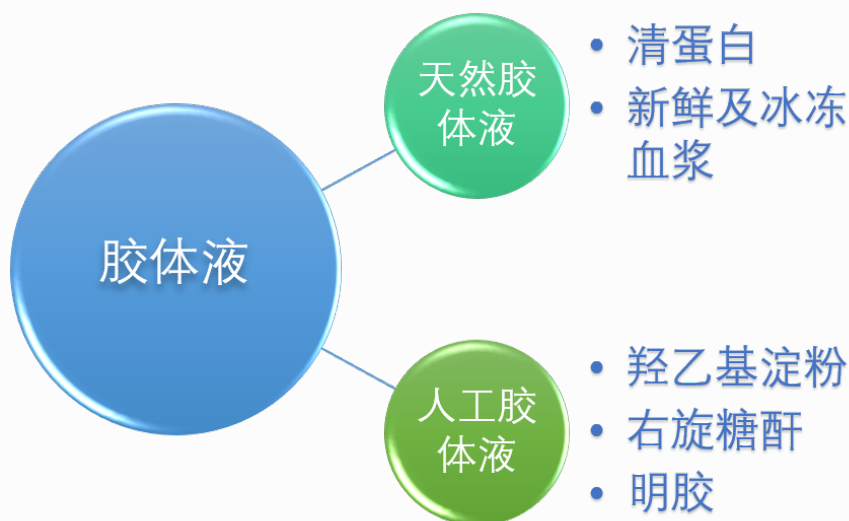
醋酸林格液 (ARS) 采用醋酸盐替代乳酸盐, 在电解质水平上更接近细胞外液, 渗透压及 pH 值均在生理范围以内。适用于肝功能不良、肝移植及肝脏手术的患者, 也可用于糖尿病和酸中毒的治疗。与乳酸林格液相比, 醋酸钠林格液更适于在输血前后使用, 并且因其成分中不含  $\text{Ca}^{2+}$ , 可避免  $\text{Ca}^{2+}$  过量导致的凝集级联反应的活化和凝血的发生。

高张氯化钠溶液的  $\text{Na}^+$  浓度范围为 250~1200 mEq/L。适用于烧伤和水中毒等。

6.5% 葡萄糖溶液是一种等渗溶液, 主要用于补充体液和能量。主要成分为葡萄糖或无水葡萄糖, 分子式  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ , 可快速提供能量, 调节血糖水平。

### 3.2 胶体液

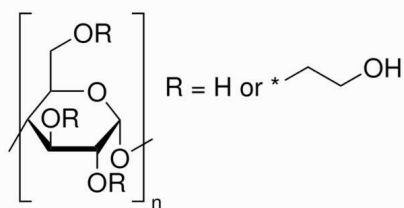
胶体液是指溶质分子直径为 1~100 nm 的溶液, 静脉输入后, 不易透过正常的毛细血管壁, 大部分保留在血管内, 维持有效血



①【图 7】胶体液的分类

容量的作用较晶体液持久<sup>[4]</sup>。目前临床上应用的胶体液如图 7 所示, 有天然胶体液 (白蛋白等) 和人工胶体液 (包括羟乙基淀粉、右旋糖酐和明胶等) 两类。

以羟乙基淀粉 (图 8) 为代表的胶体液由于扩容效果显著、扩容时间持久, 一度成为理想的液体复苏药物<sup>[5]</sup>。然而, 大量试验及研究证明其具有严重的肾损伤和凝血功能障碍风险, 另外对



①【图 8】羟乙基淀粉结构式 (图片来源于分析测试百科网)

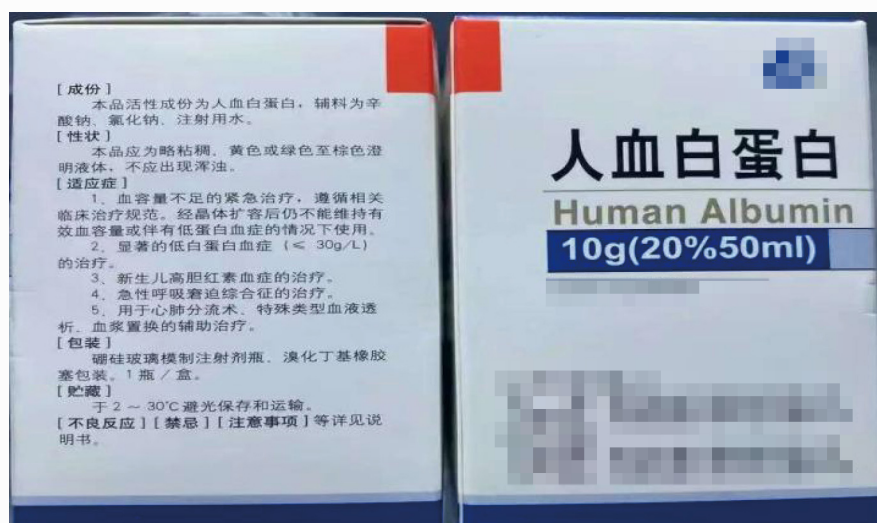
重症特别是严重脓毒症和肾功能受损患者可致肾功能损害, 目前在重症患者、严重脓毒症和肾损伤患者中的应用已受到严格限制, 部分国家已禁用。

### 3.3 血液制品

血液制品是指从人血液或其组分中经各种物理、化学、免疫学和生物技术制成的药物。在免疫缺陷、凝血障碍等重大疾病的治疗中发挥着不可替代的作用<sup>[6]</sup>。血液制品在危重病患者、遗传性疾病、自身免疫性疾病的治疗中占有不可撼动的位置<sup>[7]</sup>。我国上市的血液制品有 3 大类, 即白蛋白类、凝血因子类和免疫球蛋白类, 共计 13 种产品。国外血液制品产业发展较快, 另有蛋白酶抑制剂类和抗凝蛋白类 10 余种

产品已经上市。

血液制品中白蛋白(图9)具有调节血浆渗透压,参与药物、各种离子或脂肪酸的转运,减轻炎症反应,抗血栓形成和组织蛋白互相转化等作用。而免疫球蛋白通过抗原抗体特异性结合在免疫调节和预防感染性疾病的治疗中具有重要作用。



①【图9】人血白蛋白(图片来源于抖音)

#### 四、临床应用

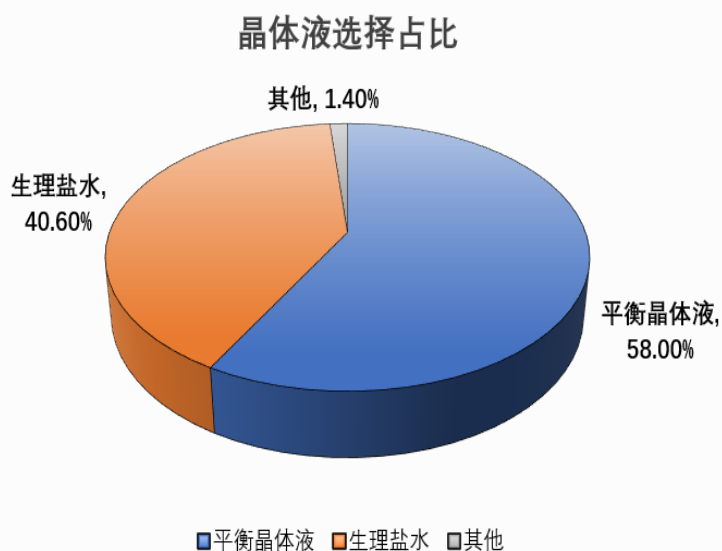
晶体液和胶体液是重症监护病房(Intensive Care Unit, ICU)中常用的两种复苏液体,选择哪种液体随着时间的推移也在改变。如图10所示,2014年一项在全球426个ICU进行的横断面研究显示,81.3%的液体复苏治疗选择晶体液,21.4%选择胶体液<sup>[8]</sup>;而在晶体液中,58.0%使用平衡盐晶体液,40.6%使用生理盐水;胶体液中,79.7%使用白蛋白,11.0%使用明胶。

##### 4.1 晶体液: 人体“电解质小管家”, 基础补液好帮手

晶体液就像一位贴心的“电解质小管家”,科学层面,晶体液是溶质分子直径<1 nm的溶液,因不含大分子物质,输注后可自由透过毛细血管壁,快速补充细胞外液,维持水电解质及酸碱平衡,这是其能承担“电解质调节”功能的核心原理。主要由水、钠

离子、氯离子和钾离子等电解质组成,部分还添加了葡萄糖这类小分子物质。这些成分个头小,能自由穿过毛细血管壁,在人体内灵活穿梭。说到晶体液家族,如表1所示,0.9%氯化钠溶液(也

就是我们常说的生理盐水)可是“老大哥”,它价格亲民、生产简单,很早就活跃在医疗舞台上。不过,这位“老大哥”也有小缺点——虽然渗透压和血浆差不多,但其他方面和人体内环境并不完全匹



①【图10】2014年全球ICU晶体液使用情况

表 1 晶体液的临床应用与注意事项

输液类型	代表液体	临床应用	注意事项
晶体液	生理盐水	Na <sup>+</sup> 的补充液或药物输入的载体	大量输注可引起大量输注会导致高氯性代谢性酸中毒，增加急性肾损伤风险引起电解质紊乱
	林洛氏液	调节体液电解质及酸碱平衡	与生理盐水相似
	乳酸钠林格液	适用于酸中毒或有酸中毒倾向的脱水病人	大量输注可引起高乳酸血症(尤其合并乳酸代谢障碍患者)
	醋酸林格液	相比乳酸钠林格液更舒适肾功能受损或高乳酸血症的患者	过量或快速输注可能导致电解质紊乱、液体超负荷等

配。其含有过高浓度的 Cl<sup>-</sup> 可导致高氯酸性酸中毒，增加患者内环境紊乱及增加肾损伤，降低肾小球滤过率等风险<sup>[9]</sup>。在临床场景中，晶体液的作用可不小。当人们因为脱水、低钠血症等出现水、电解质紊乱时，它能及时补充水分和电解质，帮身体恢复平衡；手术中及术后，它还能维持体液容量和渗透压，为身体搭建“基础补给线”；此外，它还常常充当“药物稀释器”，很多药物需要用它稀释后才能输入体内。除了生理盐水，晶体液家族还有乳酸林格液、葡萄糖注射液等成员，在不同医疗需求中发挥作用。

#### 4.2 胶体液：血管“扩容特种兵”，对抗休克显神通

从医学定义看，胶体液溶质分子直径为 1~100 nm、相对分子质量常超 1000 Da，静脉输入后不易透过正常毛细血管壁，大部分保留在血管内，因此能更持久地扩充血容量、维持血浆胶体渗透压，这是其“扩容”作用的关键机制。和晶体液不同，胶体液是由大分子物质构成的“大块头”，凭借独特的结构，它比晶体液更擅长改善微循环，还能减少内皮细胞肿胀，就像一位训练有素的“血管卫士”。临床上，胶体液分为天然胶体液和人工胶体液两大阵营，天然胶体液中清蛋白是血浆中产生胶体渗透压的

主要物质，而人工合成胶体液能在血管内长时间维持较高的胶体渗透压。在医疗战场上，胶体液堪称“扩容特种兵”。遇到低血容量休克的患者，它能快速扩充血管内血容量，帮患者挺过休克早期的危急时刻；对于烧伤、失血性休克等情况，它既能维持血浆胶体渗透压，又能减少组织水肿，为患者的后续治疗争取时间。常见的右旋糖酐注射液、羟乙基淀粉注射液、明胶类注射液等，都是临床中常用的胶体液，在拯救生命的过程中发挥着重要作用。

#### 4.3 血液制品：人体“生命补给包”，多效修复有妙招

血液制品可不是普通的液体，它是由健康人血浆或经特异免疫的人血浆，经分离、提纯或由重组 DNA 技术制备的血浆蛋白组分，以及血液细胞有形成分的统称<sup>[9]</sup>，就像一个装满“生命能量”的补给包，其“补给”功能源于含有的多种生物活性成分——如红细胞可运输氧气、白蛋白可调节血浆渗透压、凝血因子可促进止血、免疫球蛋白可增强免疫力，能针对性治疗贫血、凝血障碍和免疫缺陷等疾病。在临床应用中，血液制品的用途十分广泛。红细胞制品是“氧气搬运工”，当患者贫血、缺氧时，

它能及时输送氧气，改善患者的缺氧状态；血浆制品则是“凝血小助手”，可以为身体补充凝血因子，同时也能起到扩容的作用；白蛋白能提高血浆胶体渗透压，帮助调节血管内水分平衡；血小板是“止血卫士”，能治疗各种

与血小板相关的出血问题；免疫球蛋白则是“免疫增强剂”，适合免疫缺陷病患者或感染患者，帮他们提升免疫力对抗疾病。

#### 4.4 常见风险与注意事项

在临床输液治疗中，晶体液、

胶体液和血液制品是维持患者循环稳定、调节内环境紊乱和补充特定成分的关键手段。然而，三者均存在其特殊的使用风险和注意事项（如表 2 所示），合理选择与规范应用是保障患者安全的核心。

表 2 晶体液、胶体液、血液制品常见风险及注意事项

输液类型	常见风险	注意事项
晶体液	高氯性酸中毒、组织水肿、电解质紊乱等	首选平衡盐溶液；个体化治疗；监测容量负荷及电解质
胶体液	肾损伤、凝血功能障碍、过敏反应、组织蓄积等	谨慎使用人工胶体液，避免 HES 用于脓毒症 / 肾功能不全者；警惕过敏；严格掌握指征
血液制品	免疫反应、感染、循环超负荷、电解质紊乱等	严格输血指征；执行核对；采用滤白、辐照等措施；控制输注速度

### 1) 晶体液常见风险

**高氯性代谢性酸中毒：**大量输注 0.9% 氯化钠注射液（生理盐水）等非平衡盐溶液，因其氯离子浓度显著高于血浆，会导致肾性高氯性酸中毒、急性肾损伤风险增加以及肾小球滤过率下降<sup>[3,9]</sup>。因此对于需要大量液体复苏的患者，应首选平衡盐晶体液。

**组织水肿与容量负荷过重：**

晶体液在血管内的存留时间短，过量输注会导致全身组织水肿，易引发脑水肿、肺水肿，对心力衰竭患者可诱发急性左心衰。因此需严密监测患者的容量负荷指征。

**特定溶液的代谢风险：**乳酸林格液中的乳酸需经肝脏代谢。对于严重肝损伤、休克致肝灌注不足的患者，乳酸代谢受阻，可能加重酸中毒。含葡萄糖的晶体液则可能导致血糖剧烈

波动。

### 2) 胶体液常见风险

**急性肾损伤：**羟乙基淀粉（Hetastarch, HES）可沉积于肾小管，引起“渗透性肾病”，显著增加重症患者、脓毒症患者及已有肾功能不全者的急性肾损伤风险与肾脏替代治疗需求<sup>[10]</sup>。

**凝血功能障碍：**HES 和右旋糖酐可通过稀释凝血因子、影

响血小板功能和纤维蛋白原聚合而干扰凝血，增加出血风险。

**过敏样反应：**所有人工胶体液均有引发过敏样反应的风险，明胶类制剂的发生率相对最高。用药前应询问过敏史，输液过程中应密切观察，备好肾上腺素等抢救药物。

**组织蓄积与瘙痒：**HES 可在网状内皮系统长期蓄积，导致顽

固性瘙痒，治疗困难。

### 3) 血液制品常见风险

**输血相关免疫反应：**包括发热性非溶血性输血反应、过敏反应、输血相关急性肺损伤、溶血反应以及输血相关移植物抗宿主病等。

**感染风险：**尽管现代筛查与病毒灭活技术已极大降低风险，但经血传播疾病（如艾滋病病毒和乙肝病毒等）的窗口期风

险依然存在。

**输血相关循环超负荷：**快速或过量输注全血、血浆等，可导致血容量急剧升高，引发急性肺水肿，尤其是老年及心功能不全患者。

**电解质与代谢紊乱：**大量输注库存血可致高钾血症和低钙血症。在大量输血时，需监测电解质，必要时补充钙剂。

### 临床建议：

- 建议首选平衡盐晶体液；
- 多数情况应避免选用胶体液；
- 严重肝损伤、严重颅脑损伤和脑水肿患者避免选用乳酸钠林格液；
- 建议肝功能不全、糖尿病和危重症患者选用醋酸钠林格液。

综上所述，基于现有循证证据，重症监护患者液体复苏首选平衡盐晶体液，避免使用羟乙基淀粉和明胶，国内专家共识建议肝功能不全、肝脏手术、糖尿病和危重症患者使用醋酸钠林格液，不推荐严重肝功能损伤、严重颅脑损伤和脑水肿患者使用乳酸钠林格液。关于白蛋白，不推荐脑外伤或神经重症患者维持治疗，只有大量输注晶体液的脓毒症或脓毒性休克、大面积烧伤和明确的低蛋白血症患者可考虑使用白蛋白<sup>[10]</sup>。

## 五、前景展望

未来，随着医疗技术的飞速发展和人们对健康需求的不断提升，三大输液将开启各自的“升级之路”，在守护人类健康的舞台上绽放更多光彩。先看晶体液，

它的市场规模会随着临床需求的增加持续扩大。科研人员会不断优化它的配方，就像给“电解质小管家”升级装备，从“一刀切”的通用配方，转向针对特定患者群体和病理生理状态的“精准配

方”，让它更符合人体生理需求，减少不良反应。比如针对糖尿病患者，可能会研发出低糖或无糖的专用晶体液。同时，未来将涌现更多第三代平衡盐晶体液，如含多种缓冲体系（如丙酮酸）的

溶液,以更好地维持酸碱平衡,减少传统乳酸林格液或生理盐水的代谢副作用<sup>[10]</sup>。

胶体液的发展也不甘落后。为了让这位“血管扩容特种兵”更强大,科研人员会持续优化配方,努力开发过敏风险更低、稳定性更好的胶体液,让胶体液能满足更多复杂疾病的治疗需求。毕竟,过敏反应是胶体液使用中需要警惕的问题,未来的胶体液可能会通过特殊工艺去除致敏成分,让更多患者放心使用。在生产工艺方面,未来将引入连续生产工艺和在线质量监控,确保每一批胶体液的质量均一、可控,从生产源头保障产品安全,实现生产工艺的标准化与智能化。

血液制品行业则会呈现出明显的集中化趋势,就像行业内的“强者愈强”,少数大型跨国企业会凭借强大的技术实力和广泛的市场渠道主导全球市场。而国内那些拥有先进技术研发能力和科学浆站运营模式的企业,一方面加快信息化建设,另一方面也在积极运用新技术进行更深入的探索,不断扩大市场份额。同时药监部门也在努力与企业深化协作,不断强化血液制品生产的智慧监管<sup>[11]</sup>。免疫球蛋白类产品会成为行业增长的“新引擎”,随着它在临床应用中的不断普及,

适应症会进一步拓展。凝血因子类产品也会迎来好消息,医保支付范围的扩大,会让更多有凝血功能障碍的患者能用得起这类药物,减轻他们的经济负担。在技术创新方面,传统工艺与现代技术的结合、改进与完善,使得血浆蛋白新制品不断出现,使以往因为技术和成本限制的微量蛋白制品的研发成为可能,一份血浆制备多达十几种不同产品已在领先的血液制品企业实施<sup>[2]</sup>。未来,这个数字可能还会不断增加,让血浆的利用效率达到新高度。不过,血液制品行业也面临着一个棘手的问题——血液供应紧张。随着临床用血需求的持续攀升,血液供应一直处于“紧平衡”状态,就像一个不断消耗的“蓄水池”,进水速度赶不上出水速度。解决血源紧张和输血风险是血液制品领域最迫切的挑战,人工血液制品的研发是应对这一挑战的核心方向。目前已有诸多技术有望解决这个问题包括干细胞技术、血红蛋白基氧载体技术、重组技术等。在此基础上,个体化液体治疗将成为临床实践的核心准则。一方面,通过基因组、代谢组等多组学数据,预测患者对不同液体及血液制品的反应与风险,实现“因人施治”<sup>[12]</sup>;另一方面,在重症监护等场景中,利用便携超声、功能血流动力学

监测等手段,对患者进行精细的血流动力学分型,从而制定“因病因时施治”的精准复苏策略,告别单一化的输液方案<sup>[13]</sup>。

智能输液系统作为贯穿输注流程的“智慧中枢”,正推动给药方式的变革。系统通过集成高精度传感器、机器视觉与物联网技术,实现液位、滴速的实时监测与堵塞预警。自动配药与换药装置则显著降低了护士工作负荷与操作误差。未来的发展方向是深度融合人工智能,构建个体化闭环输注系统,能够根据患者的实时生理数据动态调整输液参数,并与电子病历系统互联,最终实现从“开放管理”到“智能闭环”的跨越。

## 六、结语

我们相信,晶体液、胶体液与血液制品必将在医疗健康领域书写更多精彩篇章。它们不仅会在临床治疗中朝着更精准、更个性化的方向发展,让医生能根据患者的具体情况“对症下药”,还可能在紧急救援、再生医学等前沿场景中开辟新的应用领域。比如在地震、洪水等突发灾害的救援现场,便携、高效的输液产品能为受伤人员争取宝贵的救治时间;在再生医学领域,经过特殊处理的血液制品可能会为组织修复、器官移植提供新的技

术支持。相信在科技的助力下，  
这3类输液制品会不断突破创新，

为人类健康保障体系的完善带来  
更多突破性进展，守护更多人的

生命健康。

## 参考文献

- [1] Cohn E J, Strong L E, Hughes W L J, et al. Preparation and properties of serum and plasma proteins. IV. A system for the separation into fractions of the protein and lipoprotein components of biological tissues and fluids<sup>1a, b, c, d</sup>[J]. J Am Chem Soc, 1946, 68(3): 459-475.
- [2] Burnouf T. Modern plasma fractionation[J]. Transfus Med Rev, 2007, 21(2): 101-117.
- [3] 董立鹏. 不同种类液体复苏对早期脓毒症和脓毒性休克患者多糖包被影响及临床意义的研究[D]. 石家庄: 河北医科大学, 2024.
- [4] 赵玉沛, 杨尹默, 楼文晖, 等. 外科病人围手术期液体治疗专家共识(2015)[J]. 中国实用外科杂志, 2015, 35(9): 960-966.
- [5] Fidler P, Lineaweaver W. The evolution of colloid administration in burn resuscitation[J]. Ann Plast Surg, 2022, 88(2): S132-S133.
- [6] 徐雅楠, 霍记平, 吴强, 等. 国内外血液制品企业产品研发现状及产业发展态势[J]. 医药导报, 2025, 44(8): 1272-1280.
- [7] 章金刚. 血液制品及其在伤病救治中的应用[J]. 军事医学, 2015, 39(3): 161-164.
- [8] Hammond N E, Taylor C, Finfer S, et al. Patterns of intravenous fluid resuscitation use in adult intensive care patients between 2007 and 2014: An international cross-sectional study[J]. PLoS One, 2017, 12(5): e176292.
- [9] 曹熙, 雷桂华, 何陵湘, 等. 基于层次分析法的晶体液优选模型研究及评价[J]. 今日药学, 2020, 30(1): 27-30.
- [10] 郭姗姗, 刘小会, 李草, 等. 基于循证证据的晶体液和胶体液选择[J]. 临床药物治疗杂志, 2024, 22(6): 1-5.
- [11] 蒋红瑜. 我国血液制品生产智慧升级加快推进[N]. 中国医药报, 2025-08-09(001).
- [12] Maslove D M, Tang B, Shankar-Hari M, et al. Redefining critical illness[J]. Nat Med, 2022, 28(6): 1141-1148.
- [13] Cecconi M, De Backer D, Antonelli M, et al. Consensus on circulatory shock and hemodynamic monitoring. Task force of the European Society of Intensive Care Medicine[J]. Intensive Care Med, 2014, 40(12): 1795-1815.



# 羽衣甘蓝 风靡全球的“营养之王”

作者：Amier；Email: 550074745@qq.com

## 引言

羽衣甘蓝（学名：*Brassica oleracea var. sabellica*），这一源自地中海沿岸的古老十字花科植物，如今已席卷全球健康饮食领域，成为备受推崇的“超级食物”之一（图1）。与其同属的卷心菜、西兰花和花椰菜相比，羽衣甘蓝以其独特的褶皱叶片和强大的环境适应能力脱颖而出，但其真正价值远不止于观赏性或易栽培性——它更是一座浓缩的营养宝库。近年来，随着营养学与食品科学研究的不断深入，羽衣甘蓝凭借其卓越的营养密度和多元的生物活性成分，从传统的餐盘配菜跃升为功能型食品与膳食补充剂领域的重要原料。它不仅在家庭厨房中频繁现身，更引起了食品工业、营养学界及公共卫生领域的广泛关注。羽衣甘蓝富含多种维生素、矿物质、膳食纤维以及具有显著生理活性的植物化学物，如硫代葡萄糖苷、多酚类和类胡萝卜素等。这些成分被现代研究证实具有抗氧化、抗炎、支持心血管健康、调节血糖以及潜在的抗癌特性。而其独特的营养成分在人体内通过诸如激活 Nrf2 抗氧化通路等分子机制发挥保护作用，进一步增强了其作为功能食物的科学基础。与此同时，随着消费者对健康膳食的需求日益增长，羽衣甘蓝的加工与应用形式也日趋多样，包括冷冻、干燥、发酵及萃取等工艺，不仅延长了其保质期，也拓展了其在现代食品体系中的应用范围。



①【图1】羽衣甘蓝照片（图片来源于豆包 AI 生成）

## 1. 羽衣甘蓝的主要成分

羽衣甘蓝及同属的多种甘蓝类蔬菜外观形态丰富多样，且营养成分既全面又高度浓缩，堪称“营养之王”。从宏量营养素来看，它含有蛋白质、总脂肪和碳水化合物等，为机体提供基础的能量供给与物质构建支持（图 2）<sup>[1]</sup>；同时更是多种维生素的极佳来源：维生素 C 含量丰富，作为强效天然抗氧化剂作用显著；还含有核黄素（维生素 B2）、维生素 B6 等 B 族维生素；维生素 K 含量尤为突出，对血液凝固和骨骼健康至关重要；维生素 A 主要以  $\beta$ -胡萝卜素形式存在，有助于维持良好视力和增强免疫系统；同时也富含维生素 E。在矿物质方面，羽衣甘蓝提供丰富的钾、钙、镁等，是优质的植物性钙来源之一；此外还含有锰、铁等矿物质。同时，它还含有丰富的膳食纤维，包括促进肠道蠕动的不可溶性纤维，以及有益于肠道益生菌增殖、提升饱腹感的可溶性纤维。不仅如此，羽衣甘蓝还富含多种生物活性物质，包括硫代葡萄糖苷（可在切割或咀嚼后转化为具有抗癌活性的萝卜硫素等异硫氰酸酯）、多酚类抗氧化剂（如槲皮素和山奈酚）以及类胡萝卜素（如

素形式存在，有助于维持良好视力和增强免疫系统；同时也富含维生素 E。在矿物质方面，羽衣甘蓝提供丰富的钾、钙、镁等，是优质的植物性钙来源之一；此外还含有锰、铁等矿物质。同时，它还含有丰富的膳食纤维，包括促进肠道蠕动的不可溶性纤维，以及有益于肠道益生菌增殖、提升饱腹感的可溶性纤维。不仅如此，羽衣甘蓝还富含多种生物活性物质，包括硫代葡萄糖苷（可在切割或咀嚼后转化为具有抗癌活性的萝卜硫素等异硫氰酸酯）、多酚类抗氧化剂（如槲皮素和山奈酚）以及类胡萝卜素（如

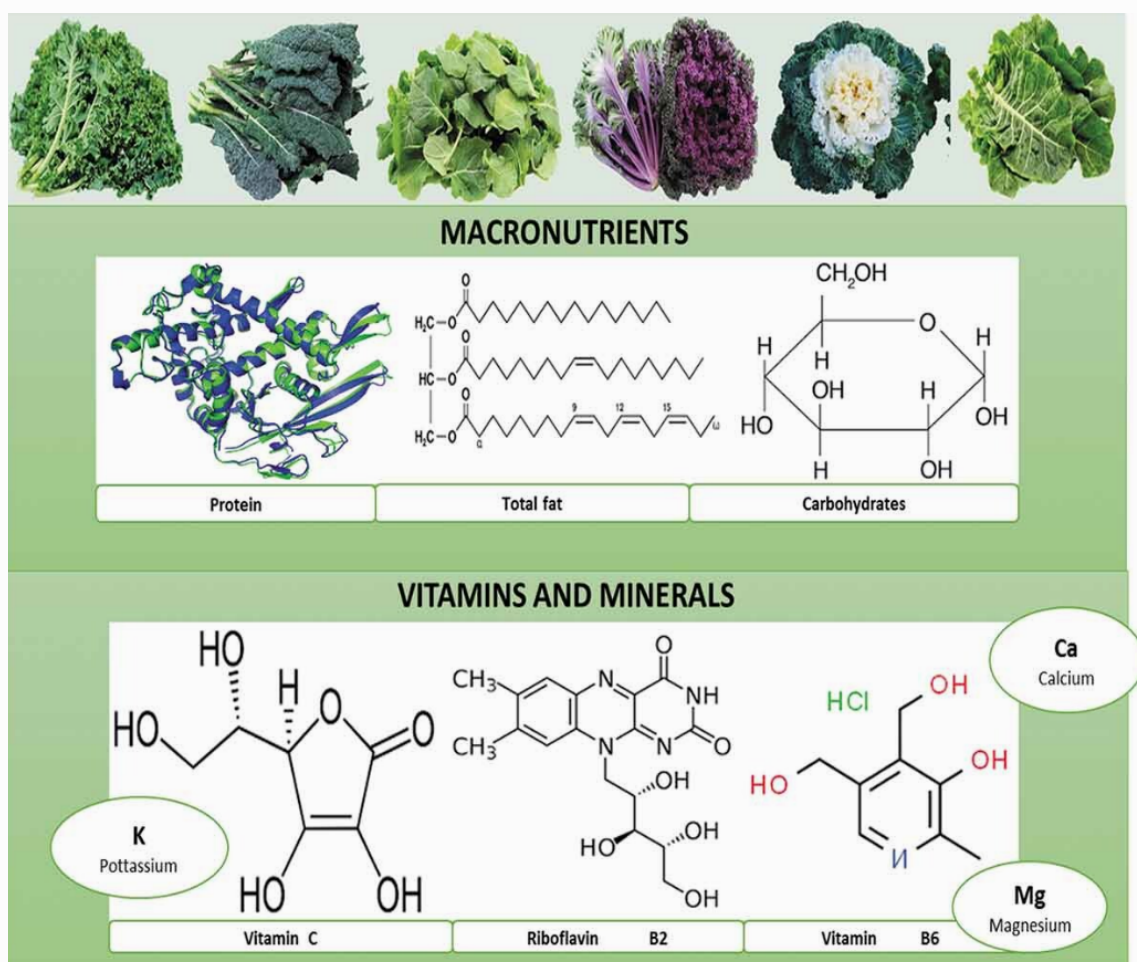


图 2 多种绿叶蔬菜（如不同品类的羽衣甘蓝等）及其含有的主要营养成分<sup>[1]</sup>

大量营养素（Macronutrients）：包括蛋白质、总脂肪、碳水化合物等

维生素和矿物质（Vitamins and Minerals）：包括维生素 C、核黄素（维生素 B2）、维生素 B6 的化学结构，以及钾（K）、钙（Ca）、镁（Mg）等矿物质

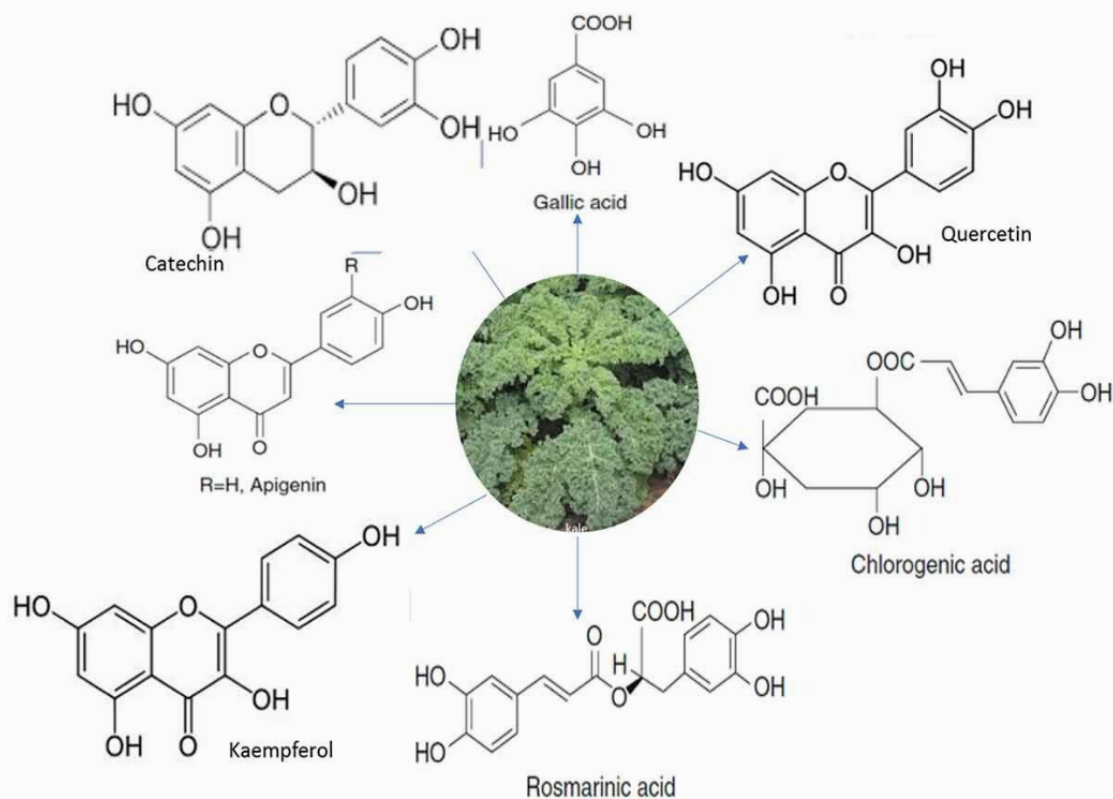
叶黄素和玉米黄质)。这些营养成分与生物活性物质共同构成了羽衣甘蓝强大健康功效的基础<sup>[2-3]</sup>。

尽管羽衣甘蓝以其极为丰富的营养价值和多样的功能性成分而受到广泛关注,但在实际消费与推广过程中仍面临一定局限。其叶片组织较厚,纤维含量高,质地较为粗糙,食用时口感偏硬;同时,由于其含有较高水平的硫代葡萄糖苷及其分解产物异硫氰酸酯,导致羽衣甘蓝在味觉上呈现出轻微的苦味与辛辣气息。这些特征虽与其生理防御机制和营养活性密切相关,却在一定程度上影响了消费者的接受度,使羽衣甘蓝在鲜食蔬菜市场中的受欢迎程度不及其他叶菜类蔬菜。此外,运输过程中叶片易失水变硬、加工利用率不高,也进一步限制了其商业化

推广与规模化种植潜力。近年来,针对这一问题,科研与产业界开始探索多种改良途径,包括通过品种选育降低苦味物质含量、利用低温调控与遮光栽培改善叶片质地,以及采用发酵、脱苦、烘焙和功能性食品开发等加工方式以提升风味与适口性。这些努力不仅有助于提高羽衣甘蓝的市场竞争力,也为其营养价值的充分利用和产业化发展提供了新的方向。

## 2. 主要功效

基于上述丰富的营养成分,羽衣甘蓝被现代科学研究证实具有多重健康功效。其首要功效是强大的抗氧化能力,能够有效中和体内的自由基,减缓氧化应激对细胞的损伤,从而从底层降低多种慢性疾病的发病风险并延缓衰老(图3)<sup>[2]</sup>。与之紧密相关的



①【图3】羽衣甘蓝中的抗营养物质 / 生物活性化合物<sup>[1]</sup>

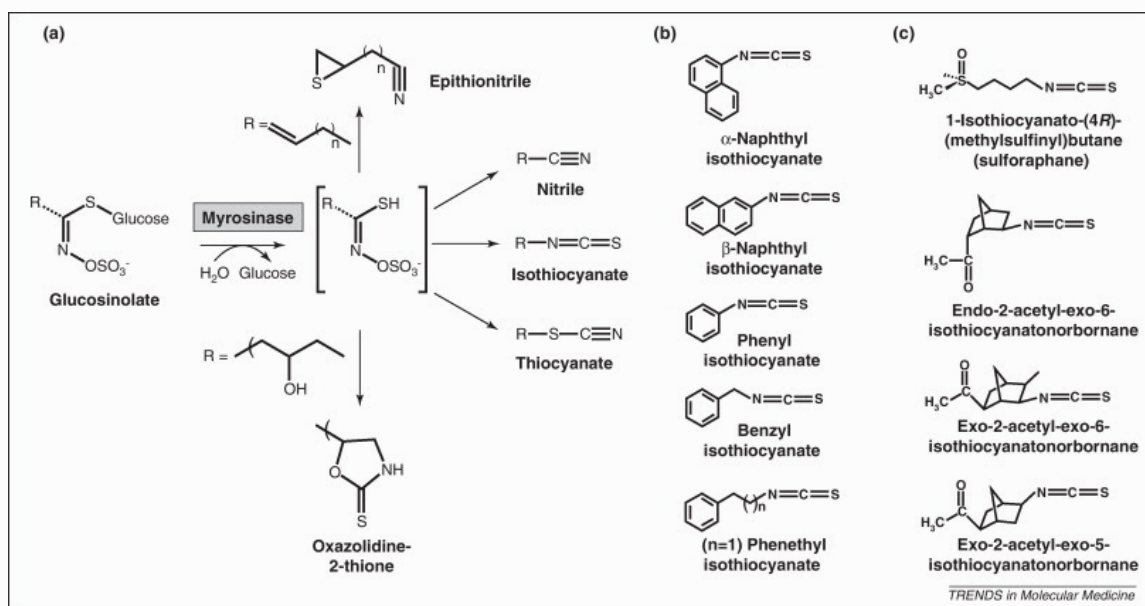
注: Catechin: 儿茶素; Gallic acid: 没食子酸; Quercetin: 槲皮素; Apigenin: 芹菜素; Chlorogenic acid: 绿原酸; Kaempferol: 山奈酚; Rosmarinic acid: 迷迭香酸; Kale: 羽衣甘蓝。

是其显著的抗炎特性，羽衣甘蓝中的活性成分能够调节体内的炎症信号通路，对预防和管理如关节炎等慢性炎症性疾病具有潜在益处。在心血管健康方面，其膳食纤维有助于结合并排出血液中的胆固醇，而充足的钾元素则有助于维持健康的血压水平，抗氧化和抗炎作用的叠加效应共同为心血管系统提供了坚实的保护<sup>[4]</sup>。此外，大量细胞和动物研究表明，羽衣甘蓝中的萝卜硫素等活性物质展现出强大的潜在抗癌特性，它们能够通过多种机制抑制癌细胞的增殖并诱导其凋亡<sup>[3]</sup>。对于用眼频繁的现代，羽衣甘蓝中的叶黄素和玉米黄质能够有效过滤有害蓝

光，显著降低年龄相关性黄斑变性的风险。最后，其高含量的维生素 K 作为骨钙蛋白的活化剂，能确保钙被有效地沉积到骨骼中，从而促进骨骼健康，预防骨质疏松。

### 3. 功效背后的化学机理

羽衣甘蓝的核心健康功效主要源于一个精巧的“植物化学防御系统”及其在人体内引发的连锁反应。其关键始于硫代葡萄糖苷和其专属酶——黑芥子酶（Myrosinase）（图 4）。在完整的羽衣甘蓝细胞中，这两者被物理区隔开来。当叶片被切割、



④【图 4】黑芥子酶反应产物<sup>[5]</sup>。(a) 硫代葡萄糖苷水解的可能反应产物。硫代葡萄糖苷的水解由黑芥子酶催化，产生不稳定的苷元并释放葡萄糖。根据反应条件和硫代葡萄糖苷侧链（R）的结构，可生成一系列产物，包括腈类、硫氰酸盐、环硫腈、恶唑烷-2-硫酮和异硫氰酸盐。(b) 抗癌芳香异硫氰酸盐的化学结构。(c) 天然存在的异硫氰酸盐莱菔硫烷及其合成的降冰片基类似物的化学结构。

注：图 (a) 硫代葡萄糖苷的酶解反应及产物。Glucosinolate, 硫代葡萄糖苷；Myrosinase, 黑芥子酶；H<sub>2</sub>O, 水（反应介质）；Glucose, 葡萄糖；Epithionitrile, 环硫腈；Nitrile, 腈；Isothiocyanate, 异硫氰酸盐；Thiocyanate, 硫氰酸盐；Oxazolidine-2-thione, 恶唑烷-2-硫酮。图 (b) 不同取代基的异硫氰酸盐。 $\alpha$ -Naphthylisothiocyanate,  $\alpha$ -萘基异硫氰酸盐； $\beta$ -Naphthylisothiocyanate,  $\beta$ -萘基异硫氰酸盐；Phenylisothiocyanate, 苯基异硫氰酸盐；Benzylisothiocyanate, 苄基异硫氰酸盐；Phenethylisothiocyanate, 苯乙基异硫氰酸盐。图 (c) 特定结构的异硫氰酸盐（含天然产物与合成类似物）。1-isothiocyanato-4(H)-(methylsulfinyl)butane (sulforaphane), 1-异硫氰酸基-4(氢)-(甲基亚磺酰基)丁烷（萝卜硫素）；Endo-2-acetyl-exo-6-isothiocyanatonorborene, 内-2-乙酰基-外-6-异硫氰酸基降冰片烷；Exo-2-acetyl-exo-6-isothiocyanatonorborene, 外-2-乙酰基-外-6-异硫氰酸基降冰片烷；Exo-2-acetyl-exo-5-isothiocyanatonorborene, 外-2-乙酰基-外-5-异硫氰酸基降冰片烷。

咀嚼或任何形式的破坏时，细胞结构破裂，黑芥子酶与硫代葡萄糖苷接触并发生水解反应，生成一系列活性化合物，其中最重要的一员便是萝卜硫素<sup>[2]</sup>。萝卜硫素进入人体后，真正的魔法开始了。它并非直接攻击疾病，而是作为一个高效的“开关”，激活人体细胞内一种名为 Nrf2 的关键转录因子。Nrf2 是细胞抗氧化应激反应的中枢调节器，正常情况下与 Keap1 蛋白结合处于失活状态。萝卜硫素等异硫氰酸酯能够修饰 Keap1 上的特定半胱氨酸残基，使 Nrf2 解离并被激活。激活的 Nrf2 随后进入细胞核，与抗氧化反应元件 (ARE) 结合，从而启动一系列细胞保护性基因的表达。这些基因编码的蛋白质被称为 II 相解毒酶，如醌氧化还原酶 (NQO1) 和谷胱甘肽-S-转移酶 (GST)，它们就像一支高效的内部清洁部队，能够高效地中和致癌毒素、消除自由基、减轻炎症反应。因此，食用羽衣甘蓝实际上是在巧妙地“借用”植物的防御信号来启动和增强我们人体自身的细胞防御系统，这是其诸多健康益处的根本分子机理<sup>[5-6]</sup>。

#### 4. 食品加工领域

羽衣甘蓝在食品工业中的应用正迅速扩展。全球超级食品市场对有机羽衣甘蓝粉的需求激增，被广泛应用于制药、营养保健品、饮料和食品工业，用以提升冰沙、果汁、面包和糕点等产品的营养价值<sup>[7-8]</sup>。此外，从其种子中提取的油脂以及通过乳酸菌发酵制成的羽衣甘蓝汁，也因其丰富的营养成分和功能性而受到青睐。然而，加工方式显著影响其最终产品的营养价值。常用的工业加工与保存方法包括：热烫与冷冻。热烫 (96~98 °C，约 2.5 min) 是冷冻前的关键步骤，旨在灭酶护色，但会导致水溶性营养素 (如维生素 C 和矿物质) 的流失。后续的快速冷冻 (-40 °C) 则能较好地保存其整体品质。罐藏 (灭菌)：高温高压灭菌过程 (可达 118~120 °C)

虽能长期保存产品，但会对热敏性营养素 (如某些维生素和生物活性物质) 造成较大破坏。干燥：热风干燥成本较低但高温可能导致营养降解和色泽变差。冷冻干燥能最大限度地保留其营养成分、色泽和风味，被认为是生产高品质羽衣甘蓝粉的最佳技术，尽管成本较高。

#### 5. 如何科学食用与加工副产物的增值利用

从家庭烹饪到工业加工，科学的方法是最大化保留营养的关键。轻度蒸煮优于长时间沸水煮；快速热烫后急冷能更好地保留色泽和营养；生食 (如制成沙拉或思慕雪) 并能充分咀嚼，可最大程度利用其酶系统生成萝卜硫素。一个关键技巧是：切碎后静置几分钟再烹饪，为黑芥子酶提供充足时间生成更多萝卜硫素。更重要的是，食品工业在加工羽衣甘蓝 (如切碎、榨汁) 时会产生大量副产物 (如叶渣)。这些废弃物同样富含膳食纤维、色素和生物活性化合物，不再被简单丢弃，而是被视为一种宝贵的资源。通过可持续技术将其转化为天然食用色素、营养强化剂或功能性食品配料，重新投入生产线，不仅减少了浪费，还创造了经济价值，实现了循环经济模式，这是当前食品工业研发的前沿领域。

#### 6. 结论与展望

羽衣甘蓝已从一种传统的绿叶蔬菜演变为全球健康饮食和食品工业创新的明星原料。其价值不仅在于无与伦比的营养密度，更在于其深加工潜力及副产物的高值化利用。未来研究应聚焦于：1) 开发更温和、高效的加工技术以优化营养保留；2) 深入探索从加工副产物中提取生物活性成分并确保其安全性的规模化应用；3) 加强产学研合作，将实验室的成果转化为可持续的工业解决方案，充分挖掘羽衣甘蓝全产业链的价值，为人类健康和食品工业的可持续发展提供更多可能。

## 参考文献

- [1] Khalid W, Iqra, Afzal F, et al. Industrial applications of kale (*Brassica oleracea* var. *sabellica*) as a functional ingredient: A review[J]. Int J Food Prop, 2023, 26(1): 489-501.
- [2] Vanduchova A, Anzenbacher P, Anzenbacherova E. Isothiocyanate from broccoli, sulforaphane, and its properties[J]. J Med Food, 2019, 22(2): 121-126.
- [3] Podsędek A. Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review[J]. LWT-Food Sci Technol, 2007, 40(1): 1-11.
- [4] Blekkenhorst L C, Sim M, Bondonno C P, et al. Cardiovascular health benefits of specific vegetable types: A narrative review[J]. Nutrients, 2017, 9(8): 923.
- [5] Dinkova-Kostova A T, Kostov R V. Glucosinolates and isothiocyanates in health and disease[J]. Trends Mol Med, 2012, 18(6): 337-347.
- [6] Yamamoto M, Kensler T W, Motohashi H. The KEAP1-NRF2 system: A thiol-based sensor-effector apparatus for maintaining redox homeostasis[J]. Physiol Rev, 2018, 98(3): 1169-1203.
- [7] Sharma S, Padhi S, Chourasia R, et al. Phytoconstituents from *Urtica dioica* (stinging nettle) of Sikkim Himalaya and their molecular docking interactions revealed their nutraceutical potential as  $\alpha$ -amylase and  $\alpha$ -glucosidase inhibitors[J]. J Food Sci Technol, 2023, 60(10): 2649-2658.
- [8] Subedi U, Raychaudhuri S, Fan S, et al. Fermenting kale (*Brassica oleracea* L.) enhances its functional food properties by increasing accessibility of key phytochemicals and reducing antinutritional factors[J]. Food Sci Nutr, 2024, 12(8): 5480-5496.



Image by wahyu\_t on Freepik

PS&amp;T

# 水凝胶中的高度缠结： 从高分子物理到强韧力学

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/UaGMwxTRKVGf6x6i4TmWMw>

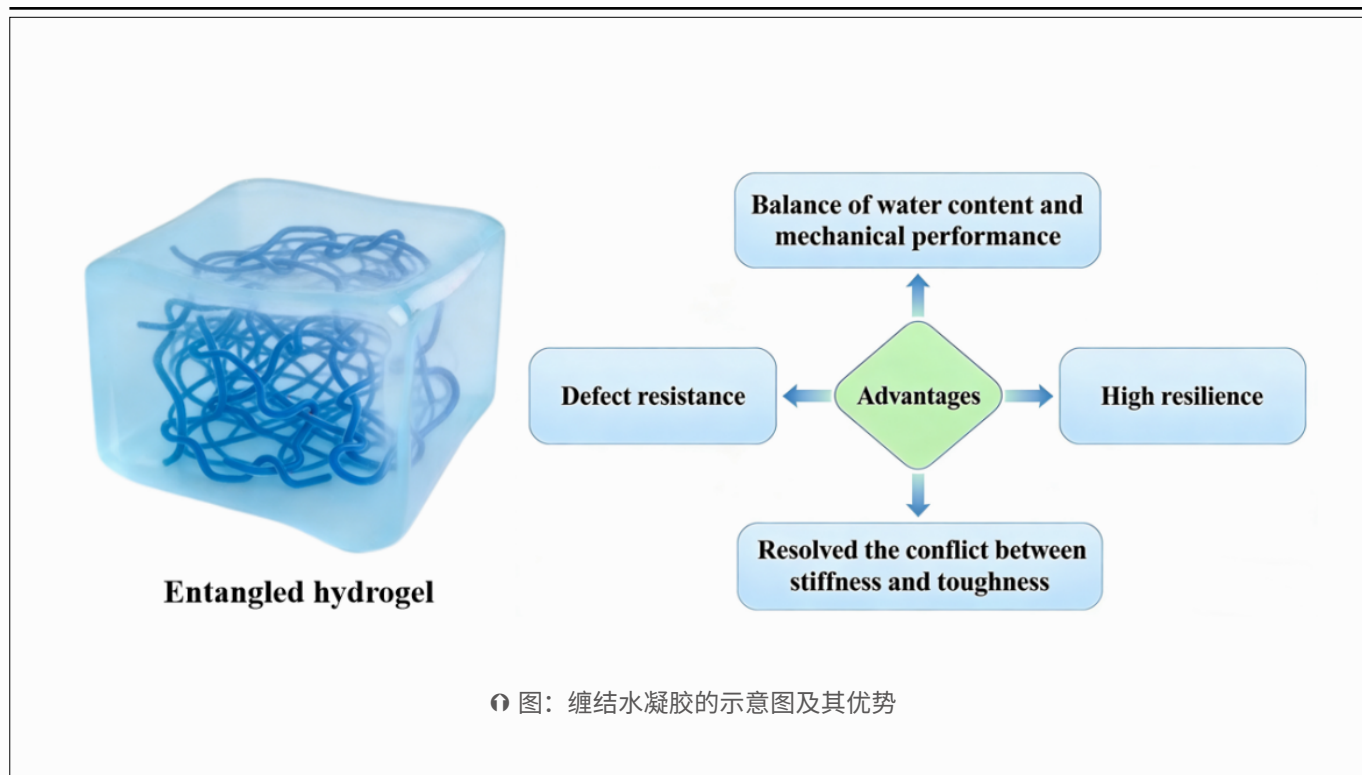
**英文原题：**High Entanglement in Hydrogels: From Polymer Physics to Robust Mechanics

**作者：**Yan Zhang\*, Hui Lou, Chunlei Yan, Qian Zhang, Yafei Wang\*, and Yongjun Zhang\*

## »» 摘要 ««

传统水凝胶因交联网络不均匀，长期面临刚性与韧性难以兼顾、高含水量与力学性能无法共存的矛盾。高缠结水凝胶通过最大化聚合物链间的拓扑约束，使缠结点数量远超化学交联点，从而在低交联度下实现高刚度、高韧性、低滞后与优异抗疲劳性能。本综述从聚合物物理出发，阐释缠结的本质、管子模型与爬行运动理论，并引入缠结分子量作为连接微观结构与宏观性能的关键参数。系统分析了影响缠结程度的因素（浓度、链柔性、溶剂条件等），总结了高浓度聚合、捏合-退火、纳米限域等制备策略。强调缠结的不可见性决定了多技术联

合表征的必要性，包括力学测试、散射、偏振光显微镜、介电谱与核磁共振等。综述展示了高缠结水凝胶在生物医学（伤口敷料、软骨修复）、柔性传感、环境修复（重金属/染料吸附）及能源器件（电解质、被动冷却）中的广泛应用前景。最后指出当前挑战：溶胀态下缠结物理模型尚不完善、长期耐久性评估缺失、缺乏标准化测试与预测工具。未来需发展适用于溶胀网络的缠结理论，建立多尺度模拟与数据驱动方法，实现缠结网络的可编程设计，推动其从实验室走向实际应用。



### 文章简介

水凝胶作为一种高含水量、三维交联的亲水性聚合物网络，因其类似软组织的力学特性、良好的生物相容性以及可调的物理化学性质，在生物医学、柔性电子、环境工程和能源存储等领域展现出巨大的应用潜力。然而，传统水凝胶在力学性能上存在两大长期难以调和的矛盾：一是刚性与韧性之间的冲突，提高化学交联密度虽然能增加刚度，却往往导致材料变脆、韧性下降，难以承受大变形；二是高聚合物量与机械稳定性之间的矛盾，为了获得足够强度而增加聚合物含量，又可能引发脆化、弹性丧失甚至毒性问题。这两个矛盾严重制约了水凝胶在承载、抗冲击、长期动态载荷等实际场景中的应用。

为了突破这些限制，研究者先后提出了双网络水凝胶、纳米复合水凝胶、滑动环水凝胶等多种能量耗散策略。这些设计在一定程度上提升了水凝胶的韧性和强度，但往往以增加结构复杂性、牺牲弹性恢复能力或引入非生物相容性成分为代价。近年来，一种回归聚合物物理本质的设计思路，以缠结作为主要网络约束逐渐成为研究热点。缠结是由长链分子在空间中相互穿插、无法穿透而产生的拓扑约束，既不依赖化学键也不依赖特异性相互作用，兼具动态可逆性和结构稳健性。通过在制备过程中最大化链间重叠与互穿，使缠结点数量远超化学交联点，可以在极低交联度下实现高刚度、高韧性、低滞后和优异的抗疲劳性能。本综述正是围绕这一

新兴方向，系统总结高缠结水凝胶的物理基础、制备策略、表征方法、力学性能及其应用进展。

缠结并非简单的链间缠绕，而是一种由聚合物链不可穿越性决定的拓扑约束。在熔体或浓溶液中，每条链被周围大量其他链包围，无法自由横向穿行，形成类似笼子的约束环境。为描述这一复杂多体问题，de Gennes 和 Edwards 提出了经典的管子模型与爬行运动理论。管子模型将多链体系对目标链的平均约束等效为一条虚拟的“管”，链的运动被限制在管内，其主要运动方式为沿管轴线的爬行运动。该模型成功预测了缠结聚合物的粘度与分子量之间的幂律关系，并为理解缠结网络的力学响应提供了直观图像。

在这一理论框架下，缠结分子量成为关键参数。它标志着聚合物链开始形成有效缠结的临界长度。当分子量超过该阈值后，体系进入缠结主导区，表现出显著增强的模量、粘度和弹性恢复能力。对于化学交联网络，总模量可近似表示为交联贡献与缠结贡献之和。当交联密度极低时，模量几乎完全由缠结分子量决定，说明缠结可以独立承担网络弹性。从热力学角度看，缠结并非由吸引相互作用驱动，而是高密度体系中熵最大化的必然结果 - 链间不可穿越性迫使各链在保持构象熵的同时形成互穿结构。从动力学角度看，缠结的形成与解离是连续、可逆的过程，受温度、浓度、链柔性和加工历史等因素调控。

综述总结了构建高缠结水凝胶的几种典型策略。高浓度单体聚合法是最直接的方式：使用极少量的溶剂、高浓度单体和极低交联剂，聚合过程中链间重叠密度极高，形成以缠结为主的网络。捏合 - 退火法则将干燥聚合物粉末与少量溶剂、引发剂

混合成“面团”，通过反复捏合与高温退火促进链间均匀互穿，再经稀疏交联和溶胀平衡得到高缠结水凝胶。此外，纳米限域聚合、溶剂交换诱导缠结、以及引入碳纳米材料或天然多糖等复合策略，也被证明能有效提升缠结密度。

在表征方面，文章强调缠结的不可见性决定了多技术联合使用的必要性。宏观力学测试（单轴拉伸、循环加载、流变振荡）可评估模量、韧性、滞后与疲劳行为，间接推断缠结贡献。散射技术（SAXS/SANS）可揭示形变诱导的链取向与网络各向异性。偏振光显微镜能观察链段在拉伸过程中的双折射变化。介电谱和核磁共振则从分子动力学角度探测链段运动受限程度，直接反映缠结的动态约束效应。

高缠结水凝胶最显著的力学特征是能够同时实现高刚性与高韧性。这一看似矛盾的性能源于缠结的滑动机制：受拉伸时，缠结点允许链段沿轮廓方向重新分布应力，避免应力集中于最短链段；即使某条链断裂，载荷也能通过缠结迅速传递至周围链，延缓宏观破坏。这种应力离域化机制使得材料在保持高模量的同时仍能承受大变形。在循环加载下，高缠结水凝胶表现出极低的滞后和优异的抗疲劳性能，适用于长期动态载荷环境。

基于这些特性，高缠结水凝胶在多个领域展现出应用潜力。生物医学方面，它们被用于制备高强度伤口敷料、软骨修复支架和细胞载体，在小鼠模型中实现了 94% 以上的伤口愈合率，并促进无瘢痕皮肤再生。柔性传感方面，作为应变传感器可实现对微小形变（如喉部振动）的高分辨率、低滞后监测。环境工程中，富含羧基的高缠结水凝胶对亚甲基蓝和铅离子的吸附容量远超传统交联水凝胶。能源领域，作为电解质载体显著提升了锌离子电池的离

子电导率和循环稳定性，同时应用于日间被动冷却材料。

尽管成果显著，综述也明确指出当前挑战：现有缠结理论主要基于熔体或浓溶液，而水凝胶处于高度溶胀状态，溶剂显著改变链构象与运动能力，亟需发展适用于溶胀网络的缠结物理模型；长期耐

久性与环境稳定性（UV、温度循环、脱水-再水化）缺乏系统评估；缠结密度调控仍依赖经验试错，缺少定量预测模型。未来应着力于建立标准化耐久性测试协议，结合分子动力学模拟与数据驱动方法，构建从制备条件到缠结密度再到宏观性能的预测框架，最终实现缠结网络的拓扑可编程设计，推动高缠结水凝胶从实验室走向实际应用。

### 作者团队



#### 张岩，本文通讯作者、第一作者

博士，天津工业大学副教授。

2015年本科毕业于天津大学材料学院材料科学与工程专业（高分子方向）；2019年获天津大学材料学院硕士学位；2022年获南开大学化学学院高分子所博士学位。

现主持国家自然科学基金、天津市自然科学基金、河北省自然科学基金以及天津工业大学“天工百人”科研启动基金等项目。以第一作者（含共同第一作者）或通讯作者身份在 *Nature Communications*、*Science Advances*、*Advanced Materials* 等期刊发表论文 20 余篇，其中 ESI 高被引论文 2 篇；参与发表论文 40 余篇，总被引次数超过 2000 次。



#### 王亚斐，本文通讯作者

博士，天津工业大学副教授。

2016年本科毕业于青岛科技大学，2018年硕士毕业于中国海洋大学医药学院，2022年博士毕业于南开大学化学学院高分子化学与物理专业。

主要研究方向包括蛋白印迹聚合物、纳米抗体、功能性多肽材料，以及磁性 / 温敏微凝胶胶体晶体自组装与结构色水凝胶等。



## 张拥军，本文通讯作者

教授，博士生导师。

2011 年入选教育部“新世纪优秀人才支持计划”，2016 年获国家杰出青年科学基金。1992 年获武汉大学学士学位，1995 年获中国科学院感光化学研究所硕士学位，2001 年获北京大学博士学位。先后在美国 Oklahoma State University 及 City University of New York 从事博士后研究。2006 年任南开大学教授。2019 年任天津工业大学教授。兼任中国化学会高分子学科委员会委员、仿生材料化学委员会委员，中国生物材料学会生物医用高分子材料分会委员。

长期从事智能与功能高分子材料以及生物医用材料研究，在细胞培养、生物传感、药物释放、蛋白印迹等多个领域取得突破。主持国家级项目 10 项，发表 SCI 论文 120 余篇，学术章节 3 章，申请国家发明专利 16 项，国际专利 2 项。

## 论文信息

<https://doi.org/10.1021/polymscitech.6c00001>

该成果以“High Entanglement in Hydrogels: From Polymer Physics to Robust Mechanics”为题，于 2026 年 3 月 27 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。



扫码阅读原文

# 中国科学院上海有机化学研究所 丁奎岭 / 韩召斌团队：

## 利用锰 / 碱接力催化实现消旋开链 $\alpha, \beta$ -二取代 $\gamma$ -酮酯的动态动力学 拆分合成多取代 $\gamma$ -丁内酯

来源：CCS Chemistry 公众号；原文链接：[https://mp.weixin.qq.com/s/sjf-U3lhG\\_O7h\\_tVJAczBQ](https://mp.weixin.qq.com/s/sjf-U3lhG_O7h_tVJAczBQ)

近日，中国科学院上海有机化学研究所丁奎岭 / 韩召斌团队发展了一个锰 / 碱接力催化的动态动力学拆分 - 不对称氢化 / 内酯化 / 差向异构化级联体系，成功实现了从高度柔性的外消旋开链  $\alpha, \beta$ -二取代  $\gamma$ -酮酯出发一锅法高效、高非对映选择性和对映选择性地合成手性  $\alpha, \beta, \gamma$ -三取代  $\gamma$ -丁内酯。该方法具有优良的底物普适性，并成功应用于天然产物 nicotlactone A 和 5-*epi*-eupomatilone 6 的简洁不对称合成。机理研究表明，底物与催化剂之间的多重非共价相互作用是控制反应立体选择性的关键。

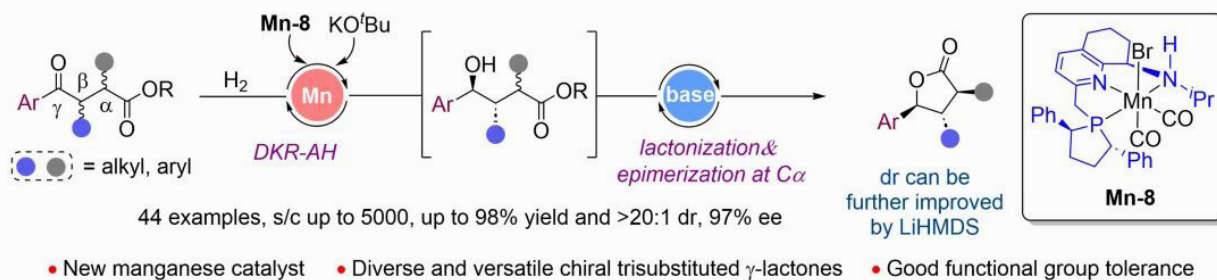


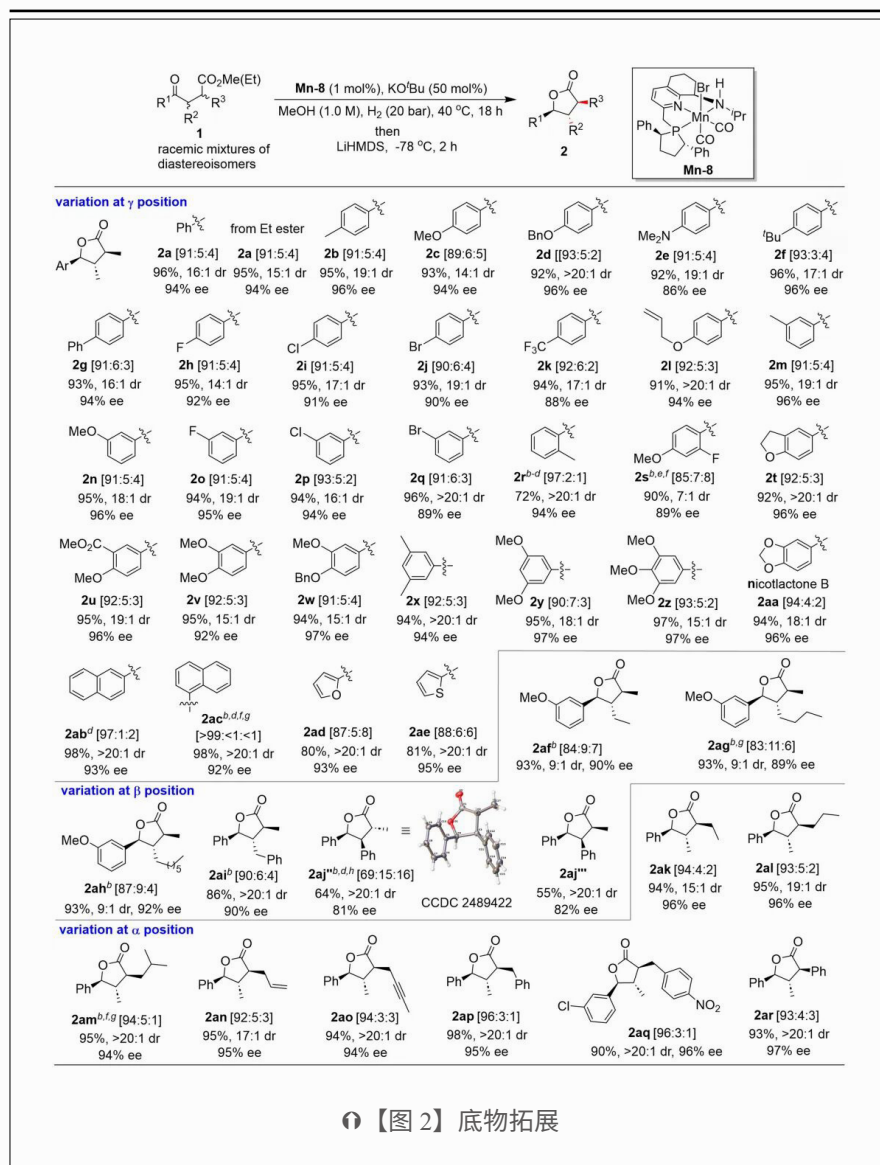
图 1 锰 / 碱接力催化开链  $\alpha, \beta$ -二取代  $\gamma$ -酮酯的动态动力学拆分 - 不对称氢化 / 内酯化 / 差向异构化

## >>> 背景介绍 <<<

$\gamma$ -丁内酯是众多天然产物及生物活性分子中普遍存在的核心骨架，其结构特征常表现为密集取代和明确的立体化学构型。这一结构复杂性使得手性多取代  $\gamma$ -丁内酯的合成通常依赖多步反应序列，整体效率偏低。相比之下，通过外消旋  $\alpha$ ,  $\beta$ -二取代  $\gamma$ -酮酯一锅法对映汇聚式的还原/内酯化串联反应可一步实现三个手性中心的精准构筑，具有显著优势。然而，该转化需满足：1) 底物的四种立体异构体之间在催化条件下可进行快速动态互变；2) 催化剂能精准识别特定构型底物并进行高选择性地还原。目前，该策略仅在构象受限的环状底物上取得了一定的进展，而对于构象高度柔性的开链  $\alpha$ ,  $\beta$ -二取代  $\gamma$ -酮酯的对映汇聚式动态动力学拆分-不对称(转移)氢化/内酯化反应仍有待发展高效催化体系。

## >>> 本文亮点 <<<

作者设计并合成了一系列基于环己基/环戊基稠合吡啶骨架的 PNN 配体及其相应的锰配合物，并成功将其应用于外消旋开链  $\alpha$ ,  $\beta$ -二取代  $\gamma$ -酮酯的动态动力学拆分-不对称氢化/内酯化/差向异构化串联反应。以 Mn-8 和叔丁醇钾为催化剂，标准底物 1a 在温和的氢化反应条件下以高非对映选择性 (10:1 dr) 和对映选择性 (94% ee) 得到 *trans-trans* 构型  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -三取代  $\gamma$ -丁内酯。使用双三甲基硅基氨基锂对氢化粗产物再次进行差向异构化可将产物中主要异构体的比例提高至 16:1。在优化的反应条件下，一系列  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  位带有不同取代基的  $\gamma$ -酮酯均能高效、高立体选择性 (高达 >20:1 dr, 97% ee) 地转化为相应的手性三取代  $\gamma$ -丁内酯，展现出良好的官能团兼容性。

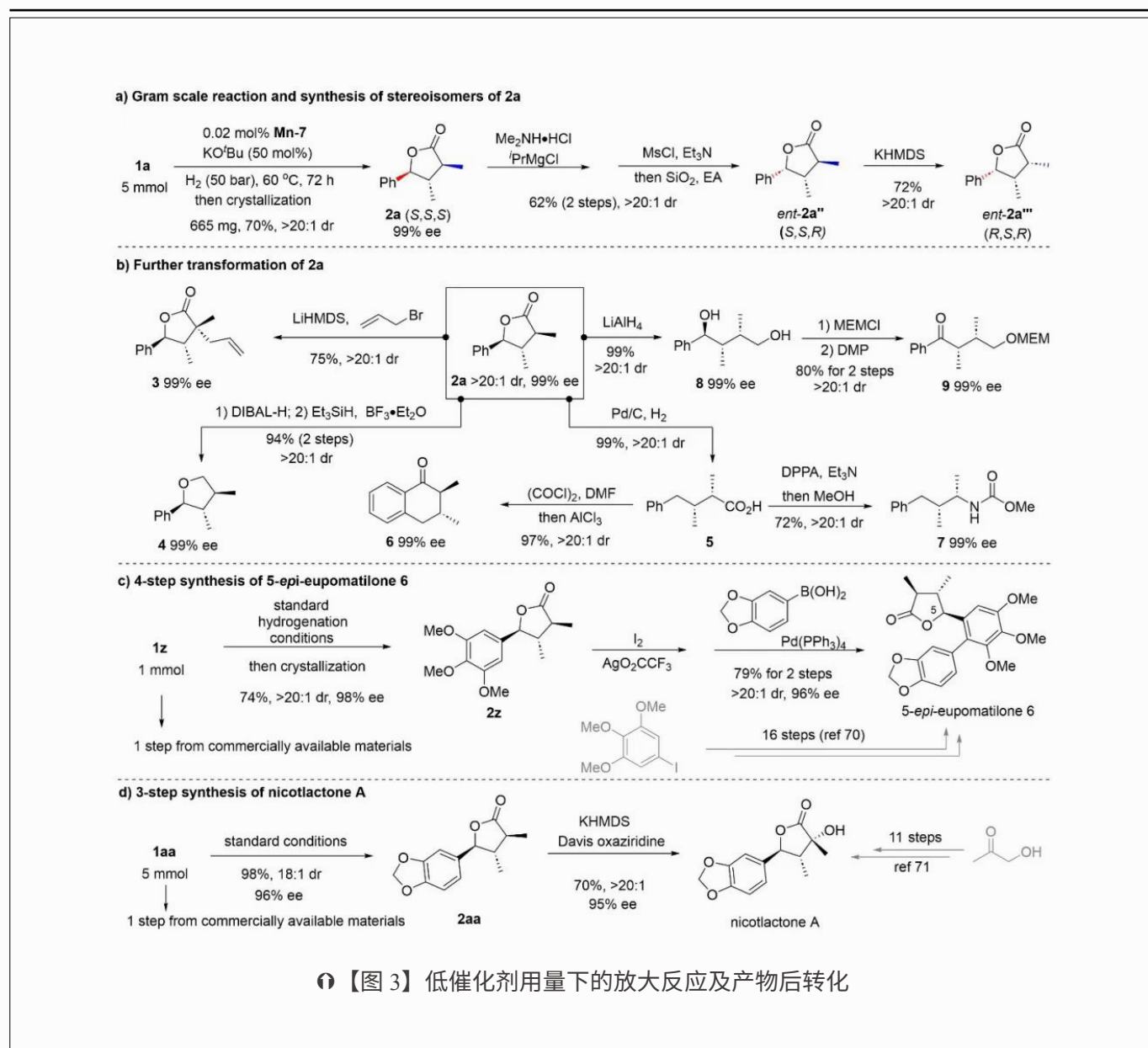


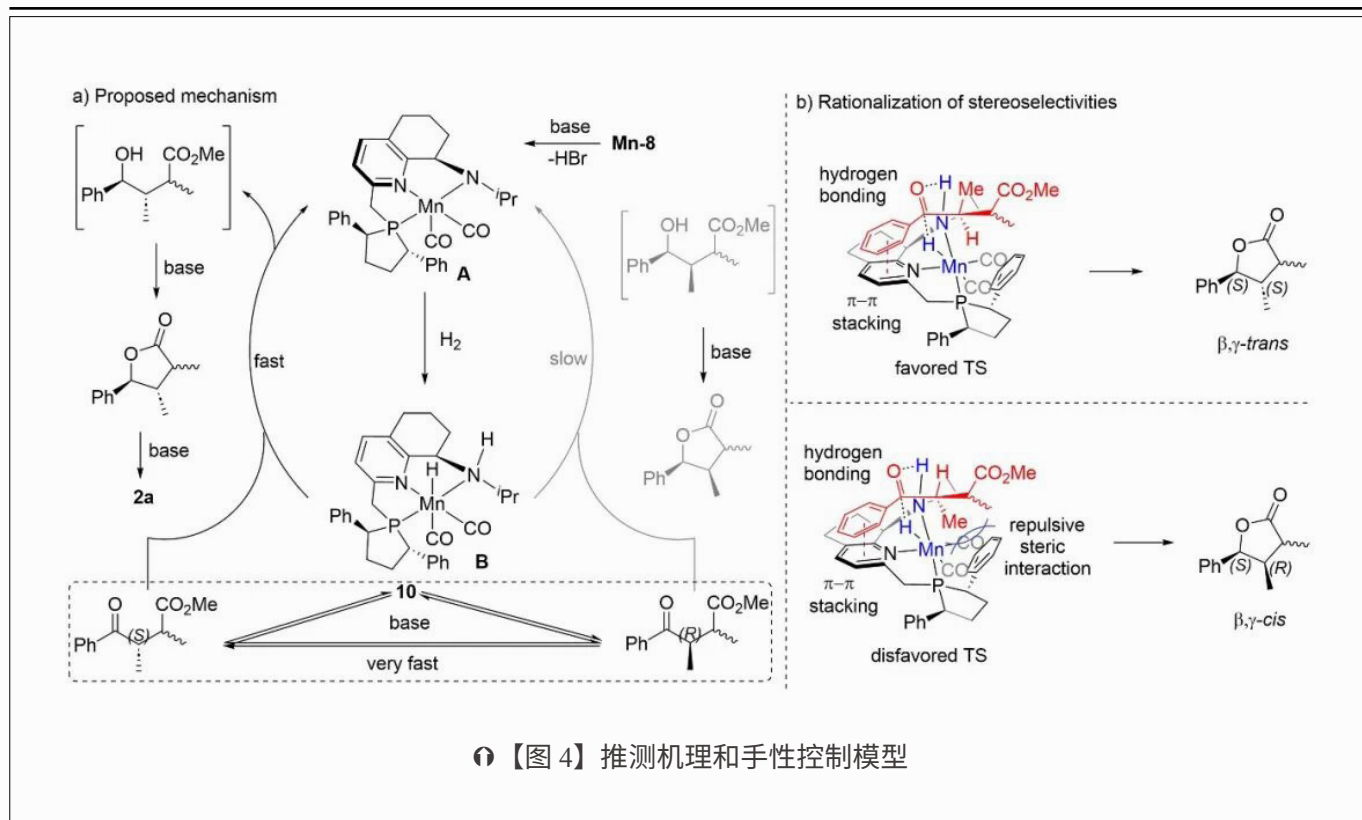
此外, 在低至 0.02 mol% 锰催化剂用量下, 反应依然可以顺利进行, 粗产物经重结晶后可得到光学纯 *trans-trans*- 内酯。所得产物可通过 2~3 步转化可实现  $\gamma$ - 及  $\alpha$ - 碳原子的手性构型翻转, 为  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ - 三取代  $\gamma$ - 丁内酯的立体发散性合成提供了便捷

途径。对产物内酯进行官能团衍生化转化。可得到结构多样的具有两个或三个手性中心的内酯、环醚、羧酸、酮、胺及醇类化合物。值得一提的是, 基于该策略, 作者从商品化原料出发, 分别仅需三步和四步反应即可合成天然产物 nicotlactone A 和 5-*epi*-

eupomatilone 6, 展现了该方法的合成潜力。

机理研究表明, 碱不仅促进了底物不同构型间的快速互变, 确保了动态动力学拆分的顺利进行, 还能够对内酯产物的  $\alpha$  位进行差向异构化, 驱使反应





体系进一步向热力学更稳定的 *trans-trans*-内酯收敛。另外，底物  $\gamma$  位芳环对反应的立体选择性控制起到了关键作用。基于上述结果并结合前期研究，作者提出如下催化循环过程：现场生成的

锰氢配合物与底物之间通过氢键（配体中 NH 基团与底物酮羰基之间）和  $\pi\pi$  堆积（配体吡啶环与底物  $\gamma$  位芳环之间）等多重非共价作用，优先对  $\beta$  位为 *S* 构型的底物进行选择性的氢化，从而构

建了  $\beta$  与  $\gamma$  位的手性中心。得到的羟基酯随后发生内酯化，并在碱催化下对  $\alpha$  位进行差向异构化，最终生成热力学稳定的 *trans-trans* 构型为主的  $\alpha,\beta,\gamma$ -三取代  $\gamma$ -丁内酯。

### 总结与展望

综上所述，该研究以新开发的手性 PNN 型锰配合物为核心，发展了一个锰/碱接力催化的动态动力学拆分-不对称氢化/内酯化/差向异构化级联体系反应，成功实现了易得的外消旋

$\alpha,\beta$ -二取代  $\gamma$ -酮酯向手性  $\alpha,\beta,\gamma$ -三取代  $\gamma$ -丁内酯的转化。该反应条件温和，具有高反应活性和立体选择性，并对多种官能团展现出良好兼容性。所得的内酯可进一步转化为多类具有连续手性

中心的潜在功能分子，并实现了天然产物 nicotlactone A 和 5-*epi*-eupomatilone-6 的简洁不对称合成。该反应成功的关键在于锰催化剂与底物的多重非共价键相互作用可以有效控制  $\beta$  与  $\gamma$  位的手

性，而随后碱催化的差向异构化完成了  $\alpha$  位手性的汇聚。该策略不仅对手性  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ -三取代  $\gamma$ -丁内酯及其衍生物的合成提供了新途径，也为锰催化剂在复杂底物不对称氢化中的应用开辟了新

思路。

相关研究成果以 Research Article 形式发表在 *CCS Chemistry*。论文第一作者为上海科技大学与中国科学院上海有机化学研究所联合培养硕士研究生张家

豪，通讯作者为上海有机所丁奎岭研究员和韩召斌副研究员。该研究获得了国家重点研发计划、国家自然科学基金、中国科学院战略性先导科技专项以及上海市科委等项目的支持。

### 文章详情:

#### Catalytic Enantioselective Synthesis of $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ -Trisubstituted $\gamma$ -Butyrolactones via Dynamic Kinetic Resolution of Racemic Acyclic $\alpha$ , $\beta$ -Disubstituted $\gamma$ -Keto Esters

Jiahao Zhang, Yizhuo Zhao, Menglong Zhao, Qian Chen, Zhaobin Han\* and Kuiling Ding\*

Online publication date: 3 Mar 2026

<https://doi.org/10.31635/ccschem.026.202607308>



扫码或长按二维码在线阅读 ▶



# 《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