



化学通讯

CHEMICAL NEWSLETTER

No.7

2026年04月15日



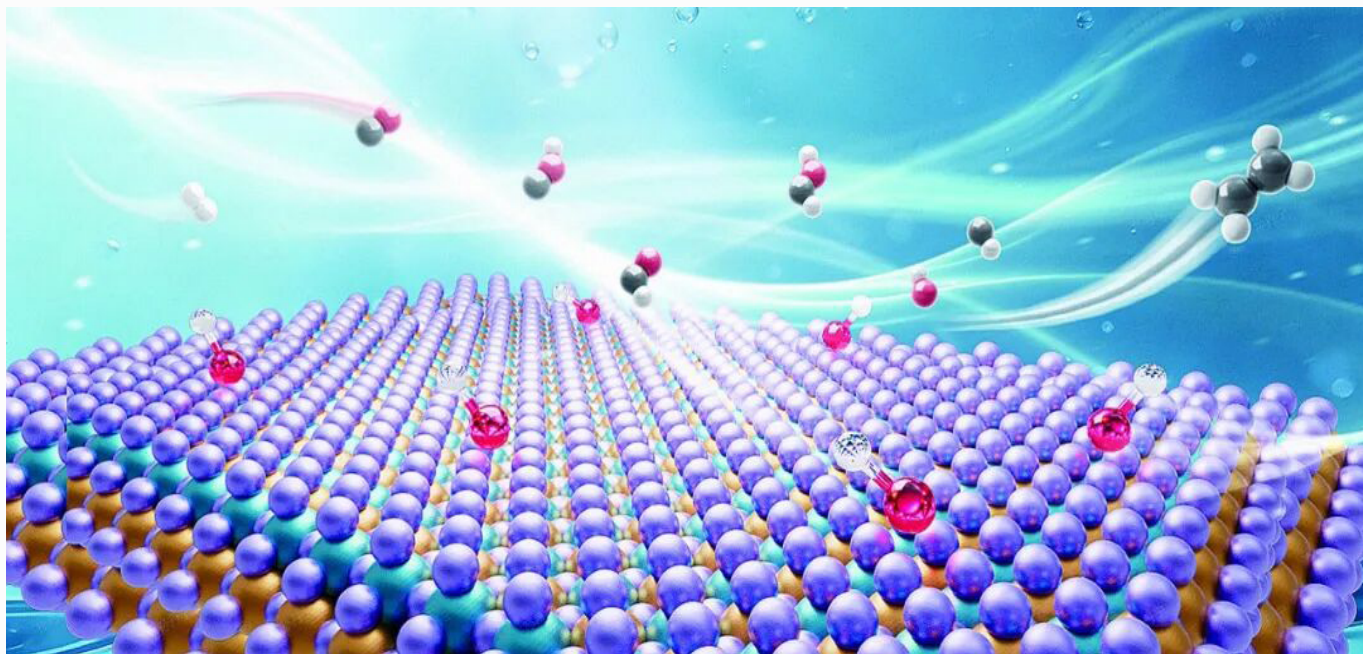
图片来源: www.freepik.com



CHINESE
CHEMICAL
SOCIETY



中国化学会 主办
中国科学院长春应用化学研究所



19



资讯汇集

- | | |
|------------------------------------|----|
| 42位会员新晋级为高级会员 | 01 |
| 来源：中国化学会官网 | |
| 汕头大学化学化工学院（碳中和未来技术学院）成为中国化学会团体会员单位 | 03 |
| 来源：中国化学会官网 | |

新闻速递

- | | |
|-----------------------------|----|
| 中国化学会发布 2026 电催化与电合成学术研讨会通知 | 04 |
| 来源：中国化学会官网 | |
| 研究发现人造有机化学物质已遍布全球海洋 | 04 |
| 来源：新华网 | |
| 科学家成功合成新核素锿-235 与镅-231 | 04 |
| 来源：央视新闻客户端 | |
| 我国科研团队首次系统揭示月壤含氮有机质演化规律 | 04 |
| 来源：今日头条·央视新闻 | |

中国科学院大连化学物理研究所实现煤炭温和条件下高效转化为塑料原料 04
来源: 微博视频号·央视网

封面文章

※ 防晒喷雾你真的用对了吗 05
作者: 苏奕铭, 王振光, 刘凯, 裴福彬

科技新闻

中国 AI 治理: 发展与安全, 如何兼得 12
来源: 科技导报公众号

“唤醒”一氧化碳, 他们变气成“材” 19
来源: 中国科学报公众号

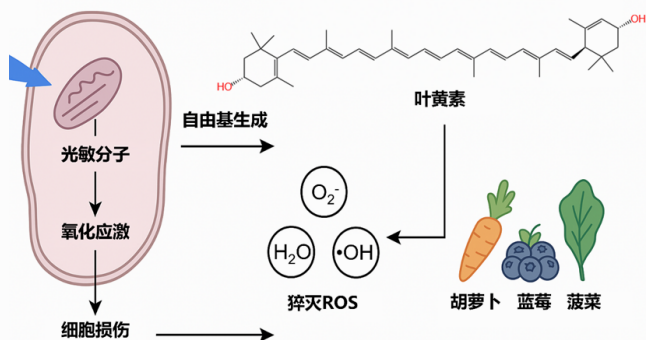
折扣儿童服装中可检出高含量铅 23
来源: chemistryworld

纺织回收行业谋求重振旗鼓 25
来源: c&en

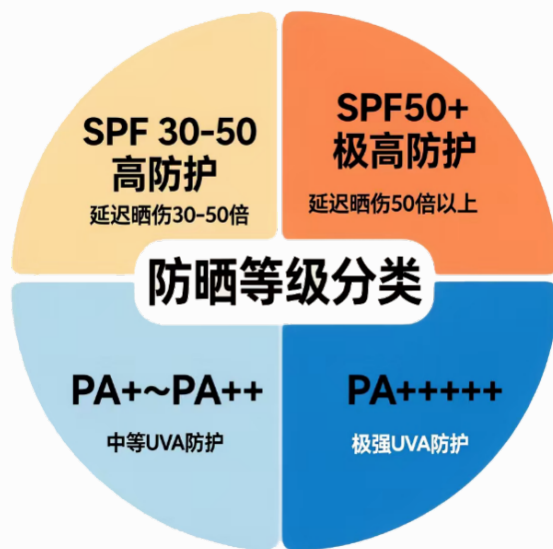
科普大赛

※ 蓝光危害的科学解析与应对指南 30
作者: 万侯佳, 王英胜, 韩迪

※ 稀土“小哪吒”: “非凡魔力”背后的“结构玄机” 35
作者: 田俊, 高晨曦, 高文超



32



07

科研进展

PS&T: 基于两性离子的聚合物载体用于药物高效跨生物屏障递送 45
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

42 位会员新晋级为高级会员

- 2026 年 4 月，中国化学会新晋级高级会员 42 位，祝贺新一批成功晋级的各位高级会员！
- 中国化学会高级会员均享有专属会员主页，并可即时自主更新主页，变更信息或添加代表性论文等。



登录网址

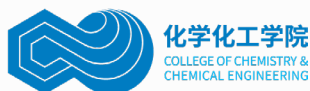
<http://www.chemsoc.org.cn/member/senior/> (点击阅读原文)，可查询、浏览每位高级会员个人主页。

新晋级高级会员名单

序号	姓名	工作单位
1	蔡 雪	牡丹江师范学院
2	陈海峰	上海交通大学
3	谌 宁	苏州大学
4	程传伟	同济大学
5	程姗姗	天津大学
6	程杏安	仲恺农业工程学院
7	崔基炜	山东大学
8	代 岩	大连理工大学盘锦产业技术研究院
9	邓国伟	成都师范学院
10	丁梦宁	南京大学
11	衡利苹	北京航空航天大学
12	黄海涛	香港理工大学
13	黄泽寰	北京大学
14	纪志梁	厦门大学
15	蒋峰芝	云南大学

▶【续表】

序号	姓名	工作单位
16	孔令兵	山东大学
17	李乐乐	国家纳米科学中心
18	李学哲	山西省产品质量监督检验研究院
19	李永光	杭州师范大学
20	刘 岚	中山大学
21	刘汝章	扬州大学
22	刘 松	东北林业大学
23	刘永宏	中国科学院南海海洋研究所
24	罗 根	安徽大学
25	吕 刚	南京工业大学
26	吕建波	烟台大学
27	裴剑锋	北京大学
28	史慧芳	南京工业大学
29	王建军	山东大学
30	吴浩斌	浙江大学
31	武鹏彦	江苏师范大学
32	肖 刚	北京化工大学
33	杨靖霞	上海工程技术大学
34	杨利明	华中科技大学
35	袁玉鹏	安徽大学
36	张 琦	华东理工大学
37	张宇飞	西安建筑科技大学
38	赵晓娟	仲恺农业工程学院
39	赵新锋	西北大学
40	钟鸿英	广西大学
41	周 亮	中国科学院长春应用化学研究所
42	朱 楠	大连理工大学



汕头大学化学化工学院 (碳中和未来技术学院) 成为中国化学会团体会员单位

2026年4月起，汕头大学化学化工学院（碳中和未来技术学院）正式加入中国化学会，成为中国化学会团体会员单位。今后，汕头大学化学化工学院（碳中和未来技术学院）与中国化学会将在学术交流、产学研、决策咨询等领域开展合作，共同为中国的化学发展做出贡献。

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。

汕头大学化学化工学院未来将依托中国化学会的平台优势，聚焦于学术交流、产学研协同创新和高层次人才培养，更好服务于国家“双碳”和“科技自立自强”战略。

(★ 本学会展示的单位会员简介资料系由各单位会员自行提供，资料的真实性由单位会员负责)

来源：中国化学会官网

中国化学会发布 2026 电催化与电合成学术研讨会通知

4月2日，中国化学会官方发布《2026 电催化与电合成学术研讨会（第一轮通知）》，宣布会议将于2026年5月29日~31日在湖南长沙举办。本次会议以“低碳能源体系构建与社会可持续发展”为主题，围绕电催化基础理论、二氧化碳电还原、氢能电催化、有机电合成及电化学储能等核心方向展开学术交流，旨在推动电催化与电合成技术在化工、能源和环境等领域的交叉融合与产业化落地。

原文链接

<https://www.chemsoc.org.cn/meeting/home/m668>

来源：新华网

研究发现人造有机化学物质已遍布全球海洋

3月24日，南非罗德斯大学联合美国加利福尼亚大学里弗赛德分校等机构的研究团队，在《自然 - 地球科学》发表研究成果，证实人造有机化学物质已遍布全球海洋。团队通过高分辨率质谱仪与可扩展计算工具，分析太平洋、大西洋、印度洋的2315份海水样本，绘制出相关物质分布图谱。结果显示，农药、药物类化合物集中于近岸区域，塑料添加剂、工业润滑剂等化合物遍布全海洋生态系统；近岸人为来源有机物占比最高达20%，离岸20公里海域仍达1%。研究人员警示，该类物质或影响海洋微生物活动与碳循环，其长期生态影响尚不明确，呼吁开展长期标准化监测。

原文链接

<https://www.news.cn/20260324/3d3c3f068265446cac7ce31377285e89/c.html>

来源：央视新闻客户端

科学家成功合成新核素镅 -235 与镅 -231

3月31日，中国科学院近代物理研究所团队利用兰州重离子加速器，首次成功合成新核素镅 -235 及子核镅 -231，精确测量其衰变能量与半衰期，成果发表于《物理快报 B》。该发现填补了轻质量镅系核素空白，为原子核结构研究与理论模型改进提供关键实验数据，拓展了人类核素认知版图。

原文链接

https://news.cnr.cn/kuaixun/20260331/t20260331_527568232.shtml

来源：今日头条·央视新闻

我国科研团队首次系统揭示月壤含氮有机质演化规律

4月9日，中国科学院地质与地球物理研究所联合国内外科研团队，在嫦娥五号、嫦娥六号返回月壤颗粒表面首次系统识别出多种含氮有机质，明确其三类赋存形态与碳氮氧为主的化学组成特征，完整揭示了月壤有机质从外源输入、撞击重构到空间风化的连续演化过程。该成果填补了月壤有机质研究的核心空白，为太阳系早期有机质输送历史研究提供了全新依据，也为深空探测样品的化学表征提供了新技术方案。

原文链接

<http://m.toutiao.com/group/7626569552733979171/>

来源：微博视频号·央视网

中国科学院大连化学物理研究所实现煤炭温和条件下高效转化为塑料原料

4月1日，中国科学院大连化学物理研究所科研团队在国际学术期刊《自然》发表成果，创新性开发出基于防粘涂层的温和转化体系，打破传统煤化工高温高压的技术瓶颈，实现煤炭在温和条件下高效转化为塑料核心原料。该成果大幅降低煤化工能耗与碳排放，为我国煤炭清洁高值化利用、减少石油进口依赖开辟了全新路径。

原文链接

<https://m.weibo.cn/detail/5283181341182473>

防晒喷雾 你真的用对了吗

作者：苏奕铭，王振光，刘凯，裴福彬；Email: peifubin@163.com

SPF
50

引言

受太阳紫外线的炙烤，防晒成了出行必不可少的措施。防晒喷雾作为一款流行的防晒产品可通过吸收、反射或散射紫外线辐射来减弱太阳能向皮肤的传输，已被广泛用于对抗 UVA 和 UVB 辐射（290~400 nm）对人体皮肤的老化和晒伤^[1]，因此深受人们青睐。一般可分为含有二氧化钛（TiO₂）或氧化锌作为活性保护成分的物理防晒喷雾和包括多种活性成分，包括：阿伏苯宗、氧苯酮、辛诺酯、奥克立林和辛水杨酸盐等^[2]。虽然使用防晒喷雾可以带来的良好防晒效果，但不当使用可能引发多重健康风险也不容忽视，如：临床案例显示吸入喷雾可致急性过敏性肺炎、推进剂丙烷 / 丁烷存在易燃易爆隐患等。

在这里我们探讨了防晒喷雾的正确使用方式、成分构成、潜在风险及科学选购策略。文中详细分析了化学紫外线吸收剂、物理阻隔剂及功能性添加剂的成分特性。此外，还提出了基于成分排序、粒径检测、无香料和安全推进剂等多项指标的选购建议，并强调使用时应保持通风、避免吸入及远离火源等注意事项。最后，通过“三步 30 秒快速筛选法”帮助消费者高效识别低风险产品，倡导理性选择与安全使用防晒喷雾。

防晒喷雾的主要成分

1. 化学紫外线吸收剂

主要包含：阿伏苯宗、氧苯酮、辛诺酯、奥克立林和辛水杨酸盐等。有研究显示，胡莫柳酯、甲氧基肉桂酸乙基己酯与水杨酸乙基己酯，能够覆盖 290~320 nm 的紫外线^[3]。2020 年美国食品药品监督管理局临床研究显示，氧苯酮的透皮吸收率显著高于其他成分，单次使用后血液浓度达阿伏苯宗的 53~94.1 倍^[4]。

2. 物理阻隔剂

主要成份为纳米 TiO₂、氧化锌(图 1)。欧盟要求含 TiO₂ 产品需标注“请勿吸入”警示。

3. 功能性添加剂

生育酚(维生素 E)与β-葡聚糖用于中和自由基;马齿苋-凤仙花-马鞭草提取物提升光稳定性;抗坏血酸,即维生素 C,增强抗氧化作用^[5-6]。

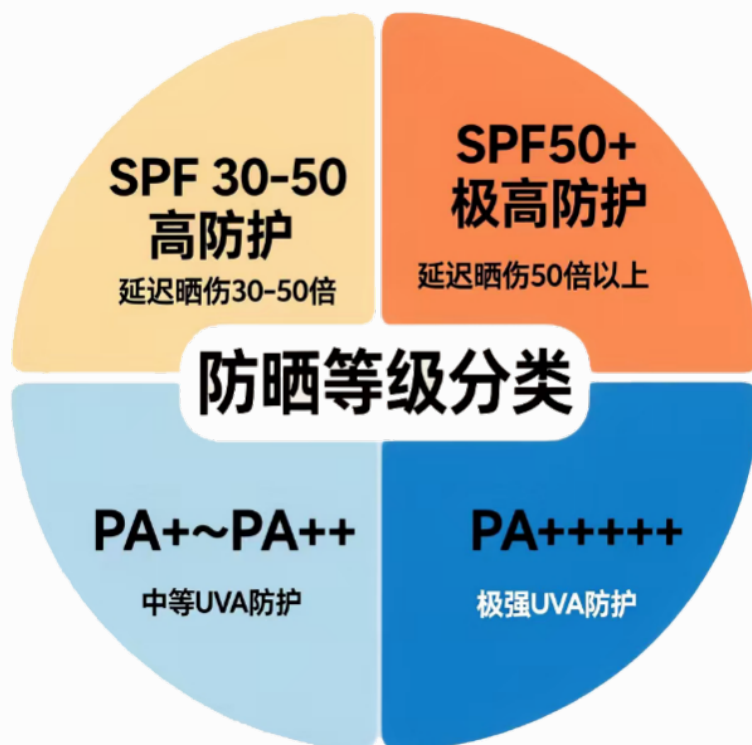
防晒等级简介

1. 看一看你的防晒产品是哪个等级

防晒系数(SPF)反映产品对UVB的防护能力,其定义为“涂抹防晒产品后引发最小红斑所需紫外线剂量”与“未防护皮肤引发等量红斑所需紫外线剂量”的比值(图2)。例如SPF 30表示理论上可将皮肤晒伤时间延迟30倍。标记的SPF等于30或50的“高防护”,标记的SPF等于50+的“极高防护”,然而SPF仅针对红斑效应(晒伤),未涵盖UVA防护效能^[7]。UVA防护等级(PA)则分级标示UVA防护效果,以PA+至PA++++表示防护强度,其依据为持续性色素沉着(PPD)测试结果^[8]。我们常说的UPF 40+与UPF 50+,则是国标GB/T 18830-2009中防晒纺织品采用紫外线防护系数(UPF)评价体系,与防晒喷雾的



①【图1】防晒喷雾的主要组成成分(图片来源于豆包 AI生成)



①【图2】防晒等级分类(图片来源于豆包 AI生成)

防护评价无关切勿混淆。

2. 防晒等级评价方法是怎么来的

早期防晒效能评估依赖体外透射光谱法，如乙醇-乙醚混合溶剂溶解法。该方法通过测量290~400 nm紫外线透射率，结合公式推算SPF值。操作简便，但无法模拟真实使用环境下防晒剂在皮肤表面的成膜性与光降解过程。2021年美国市场实验室测试显示，51款防晒霜中，体外SPF均值仅为标签值的73%，且UVA防护效率普遍低于SPF标注值^[9]。

国际新标准(ISO 23698:2024)引入了混合漫反射光谱法(HDRS)，创新性地融合了体外光谱测量与人体皮肤原位测试：首先在聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)板上形成防晒薄膜并测定其初始透射光谱，同时通过模拟日光照射评估光降解效应；随后采用紫外级石英光纤探头，在人体皮肤表面实地测量320~400 nm波段的漫反射信号以获取防晒剂对紫外线的实际衰减情况^[10]；最后通过数据融合与光稳定性校正，利用体内UVA数据对体外光谱进行加权校正，将校正后的体外UVB数据与体内UVA数据融合，生成HDRS吸收光谱，从而精确计算出SPF与UVA-PF值。

防晒喷雾的危害性

1. 吸入性风险

有研究显示，防晒喷雾的平均涂抹密度为1.75 mg/cm²，高于之前报告的消费者对化妆水密度的应用。喷雾会导致大量成份流失到环境中，流失防晒霜量约为56%^[11]。因此，防晒喷雾在密闭空间（如车内）密集使用，易被吸入含有防晒剂、挥发性有机化合物、香料等的微小液滴，尤其对过敏体质儿童风险更高，可诱发咳嗽、喘息甚至哮喘。过敏体质者长时间接触可能还会导致接触性皮炎、红疹等皮肤过敏症状；长时间吸入也可发生过敏性

肺炎、引发哮喘发作等气道病。因此，在使用防晒喷雾时需适量使用避免超量，建议先将喷雾喷到手上，然后在脸上涂抹均匀，避免直接对着脸部喷洒。

2. 易燃易爆风险

由于气雾剂型产品中使用的推进剂可能是丁烷、丙烷等易燃物质，且处于液化的高压状态，遇火源易发生爆燃事故。因此，防晒喷雾化妆品在使用和存放时需要关注防火防爆的问题。实际上，这是绝大多数防晒喷雾都含有的成分，也是打火机燃料里的主要成分。这就意味着，如果操作不当或在使用时突



①【图3】防晒喷雾的危害性（图片来源于豆包 AI 生成）

遇明火，极有可能引火上身。因此，防晒喷雾应存放在阴凉干燥通风环境中，避免阳光直晒，并远离火源、热源等。

3. 其他风险

许多与皮肤相关的问题，如各种光过敏反应引起的皮炎、维生素 D 水平的波动和雌激素，被

认为可能与防晒霜配方中使用的不同成分有关^[12]。巴基斯坦拉合尔的 Ali 等人^[13]的研究发现，当地销售的防晒霜中重金属 (Pb、Cd、Ni 和 Ti) 的浓度超过欧盟的标准。许多研究评估了 TiO₂ 和 ZnO 对海洋生物的环境影响，如鲍鱼的氧化应激、珊瑚的白化和

鱼类的遗传毒性^[14]。此外，国家药监局《2023 年国家化妆品抽检年报》显示，2023 年共抽检防晒类化妆品 20936 批次，合格率 97.38%，官方未披露镍迁移量及纳米 TiO₂ 标识数据，提示儿童与敏感肌人群仍宜优先选择“无纳米+无重金属”双证备案产品。

如何挑选防晒喷雾和规避风险

1. 挑选防晒喷雾的方法

“第三方粒径报告”如何拿到？

1. 电商旗舰店：在京东/天猫商品详情页→“检验报告”栏目，关键词检索“粒径分布”或“D50”；若未公示，可直接联系客服索要报告编号，再到“化妆品监管”APP（国家药监局）输入备案号→“附件”下载。

2. 线下商超：认准罐底“化妆品备案编号”+“纳米原料警示语”；现场用微信扫码进入“化妆品监管”小程序→“信息公开”→“检验报告”→筛选“粒径”字段，若显示“D50 > 200 nm 且无 < 100 nm 峰”即为合格。

3. 第三方快检：对仍存疑的产品，可送检“SGS 通标”、“华测”、“中检科”等机构，费用约 600~800 元/样，3~5 个工作日可获激光粒度仪 (ISO 13320) 报告；日常选购若无预算，可优先选择已公开报告的品牌，降低踩坑概率。

综合现有关于防晒喷雾成分分析、毒理学评估及安全性研究的文献^[15, 16]，我们总结了选购的四个参考指标：

- 全成分排序（水、防晒剂、润肤剂在前，乙醇 ≤ 20%）；
- 厂商提供第三方粒径报告（D50 > 200 nm，无 < 100 nm 峰）；
- 无合成香料条目；
- 推进剂为压缩空气或氮气；

外罐印有“Non-Flammable”、“Fragrance-Free”及“SPF ≥ 30, PA+++”字样。满足上述全部条件方可判定为低风险防晒喷雾。

2. 降低风险的使用建议

成分表上，若乙醇排序在前五位，则避免高温贮存；应将产品存放于 $\leq 25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 阴凉避光环境，夏季严禁置于车，并在启用后6个月内用完，以降低持续氧化裂解风险。

选用非纳米配方后，仍需在使用前以15 cm距离、 $\leq 2\text{ s}$ 短喷方式分区处理；成人一次喷射量控制在0.5 g以内，儿童减半，

并在通风良好（风速 $\geq 0.5\text{ m/s}$ ）的户外完成，随后闭口屏息5 s以上，显著减少吸入剂量。

选购无香型；若已有含香产品，应在开放阳台使用，保持1 m以上无儿童及孕妇区域，使用完毕后立即关闭门窗30 min，通过机械排风降低残留浓度。

选用氮气或压缩空气推进剂产品；使用现场应远离明火、热源

与电器开关，环境温度 $< 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；罐体避免阳光直射及撞击，使用后空罐以回收箱收集，禁止穿刺或焚烧。

使用前充分摇匀10 s；喷头与皮肤垂直距离15 cm；位于上风口，面部转向逆风；闭眼、屏息、闭口；每区域喷射 $\leq 1\text{ s}$ ；用手掌快速均匀涂布，以抑制雾化液滴漂移吸入。

【三步 30 秒快速筛选】

- ① 打开“化妆品监管”APP → 输入备案号 → 有“粒径报告”且 $D_{50} > 200\text{ nm}$ ；
- ② 成分表前五位无乙醇或排序 ≥ 6 ；推进剂为“氮气 / 压缩空气”；
- ③ 标签同时印有“无香”、“非纳米”、“非易燃”三项。

同时满足即可放入购物车，否则建议放弃。

结语

爱美有风险，选购需谨慎。对于防晒喷雾带来的良好防晒效果对大家都很认可，但是对于使用其存在的风险也请大家重视。希望本文能够对大家今后的防晒喷雾选择、使用方法有所帮助，同时也期望企业能够开发出更好、更健康的防晒产品。

参考文献

- [1] Martins R M, Martins S D S, Barbosa G L F, et al. Natural component and solid lipid microparticles of solar filter in sunscreen: Photoprotective and photostability effect enhancement[J]. J Drug Delivery Sci Technol, 2023, 88: 104860.

- [2] Gholap A D, Pardeshi S R, Hatvate N T, et al. Environmental implications and nanotechnological advances in octocrylene-enriched sunscreen formulations: A comprehensive review[J]. Chemosphere, 2024, 358: 142235.
- [3] 彭再辉, 彭晓丹, 刘小林. 一种防晒喷雾及其制备方法[P]. 中国专利, CN107049805B. 2020.
- [4] Matta M, Florian J, Zusterzeel R, et al. Effect of sunscreen application on plasma concentration of sunscreen active ingredients[J]. JAMA, 2020, 323(3): 256-267.
- [5] Jesus A, Mota S, Torres A, et al. Antioxidants in sunscreens: Which and what for?[J]. Antioxidants, 2023, 12: 138.
- [6] 吴银. 一种稳定性高的防晒喷雾及其制备方法[P]. 中国专利, CN110025532A. 2019.
- [7] Gomez-Berrada M P, Ficheux A S, Rakotomalala S, et al. Probabilistic exposure assessment of sun care products[J]. Food Chem Toxicol, 2017, 108: 314-325.
- [8] Fujishiro M, Yahagi S, Kuroda A, et al. Investigation on the validity of *in vitro* sun protection factor and ultraviolet-A protection factor evaluation method for sunscreen samples[J]. J Oleo Sci, 2024, 73: 603-610.
- [9] Andrews D Q, Rauhe K, Burns C, et al. Laboratory testing of sunscreens on the US market finds lower *in vitro* SPF values than on labels and even less UVA protection[J]. Photodermatol Photoimmunol Photomed, 2022, 38: 224-232.
- [10] Fujishiro M, Yahagi S, Kuroda A, et al. Oleo materials and nano-technologies investigation on the validity of *in vitro* sun protection factor and ultraviolet-a protection factor evaluation method for sunscreen samples[J]. J Oleo Sci, 2024, 73(4): 603-610.
- [11] Broussard L, Hirner S, Dellavalle R, et al. 274 Spray sunscreen - Characterizing real world use and implications for sun protection[J]. J Invest Dermatol, 2019, 139: S47.
- [12] Chavda V P, Acharya D, Hala V, daware s, et al. Sunscreens: A comprehensive review with the application of nanotechnology[J]. J Drug Deliv Sci Technol, 2023, 86: 104720.
- [13] Ali M, Shahzad L, Hayyat M U, et al. Determination of heavy metals and their associated health risk assessment in the commonly available sunblocks[J]. Int J Environ Anal Chem, 2023, 104(19): 7408-7426.
- [14] Tovar-Sánchez A, Sánchez-Quiles D, Rodríguez-Romero A. Massive coastal tourism influx to the Mediterranean Sea: The environmental risk of sunscreens[J]. Sci Total Environ, 2019, 656: 316-321.
- [15] Zhang Z, Wang X, Zhang X, et al. Integrated LC-MS and network pharmacology methods to screen quantitative indicators in the Hippocampus histrix Kaup and method transfer[J]. J Pharm Biomed Anal, 2023, 228: 115294.
- [16] Li D, Chen Z, Zhang F, et al. Nano-tentacled interconnected channels organic gel for rapid uranium extraction from seawater[J]. J Hazard Mater, 2024, 480: 135784.



中国 AI 治理： 发展与安全，如何兼得

来源：科技导报公众号；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/dKoR9MH2R5b19C5eeQQHTw>

原文发表于《科技导报》2026 年第 5 期《中国人工智能治理政策的结构特征与优化路径》

新一轮科技革命和产业变革的背景下，人工智能已经成为核心驱动力，正在对世界经济、社会治理和人民生活产生极其深刻的影响。同时，也引发了对人工智能发展的诸多担忧。《科技导报》邀请中国科学院大学杨国梁研究员团队撰写文章，选取了中国 2017-2024 年有关部门发布的规划意见、法律法规、标准规范、原则倡议 4 类政策文本，聚焦数据、算法、算力等人工智能治理关键要素进行政策文本量化分析。针对中国人工智能治理面临的挑战提出具体对策。

人工智能 (AI) 概念的提出，最早出现于 1950 年计算机科学与人工智能之父——图灵发表的《计算机与智能》一文中。1956 年，在美国达特茅斯会议上，麦卡锡 (John McCarthy) 首

次提出了人工智能这一概念。当下，人工智能已经成为新一轮科技革命和产业变革的核心驱动力，正在对世界经济、社会治理和人民生活产生越来越深刻的影响。然而，人工智能也带来了技术失控风险、社会伦理挑战等问题，由此引起了人们对人工智能治理的思考。

为此，我们的研究在数据、算法、算力等人工智能伦理关键治理要素的框架下，遵循“治理主体、治理议题、治理工具”的三维治理框架，运用政策文本量化分析方法揭示出当前中国人工智能伦理治理现状及挑战，并尝试提出符合中国特色的未来人工智能治理路径。

1. 中国人工智能治理的现状

1.1 数据保护

随着人工智能技术的广泛应用，数据作为关键要素，其重要性愈发凸显。同时，数据安全及隐私保护问题也逐渐成为全球各国关注的焦点。欧盟采取“自上而下的规则监管”模式，通过设定法律法规来对数据进行监管。美国秉持“州级自立与分领域监管并存”模式。一方面，以州和地方政府制定符合自身情况的相关政策并成立治理机构；另一方面，针对金融、医疗、儿童隐私等领域主体出台相应法案。

中国强调“国家安全为导向”的制度构建策略，持续强化对数据安全及隐私保护的监管力度，从顶层设计到具体实施细则，出台了一系列政策文件，特别是在跨境数据治理中，采取的是“属地原则”的“数据本地化”政策，强调国家数据主权和数据

控制权来满足自身安全需要。《个人信息保护法》与《网络安全法》《数据安全法》共同形成了中国数据安全领域法律体系的“三驾马车”，以推动中国数据要素市场的法治化建设。

1.2 算法安全

当前，信息茧房、大数据杀熟、算法歧视等应用乱象层出不穷。美国将算法作为直接监管对象，采取外部问责和政府风险监管并重的治理方式，反对算法歧视、追求决策公平。欧盟重点规制互联网巨头，解决算法安全问题，防止其滥用市场支配地位。

近年来，中国逐步将数据安全治理的重心向算法安全治理倾斜，2021年9月，9个部门联合发布《关于加强互联网信息服务算法综合治理的指导意见》，创新性地形成了算法备案、算法监督检查、算法风险监测、算法安全评估等多维一体的监管举措。2022年3月1日，由国家网信办等4个部门联合发布的中国首部专门以“算法”为名的规定——《互联网信息服务算法推荐管理规定》正式实施。自此，中国也有了针对算法黑箱、算法歧视、信息茧房、舆论操控、不正当竞争等算法侵害的规范。

1.3 算力规范

算力已成为人工智能时代的核心生产力，同时国际上关于算力规范的政策与研究正围绕人工智能的技术演进与社会影响展开，各国形成了差异化的治理框架。欧盟倾向风险导向的算力监管，将算力使用与风险等级挂钩。美国则支持算力竞争与安全并重，一方面通过《芯片和科学法案》来提升其算力基础设施水平和创新能力，另一方面通过《人工智能风险管理框架》等政策要求算力使用符合公平性、安全性原则。

为应对挑战，中国出台了2项相关政策。2023年10月，工业和信息化部发布的《算力基础设施高质量发展行动计划》，从提升算力综合供给、强化运力高效承载、增强算力应用赋能等多方面发力，为算力安全发展提供了总体方向。2023年12月，国家发展和改革委员会发布的《深入实施“东数西算”工程加快构建全国一体化算力网的实施意见》明确提出要统筹算力发展与安全保障一体化推进，要完善算力网安全保障体系，构建促发展保安全机制。

1.4 综合治理

在综合治理方面，美欧均相继出台较为权威的人工智能治理政策。欧盟坚持“以人为本，伦

理优先”的治理原则，已生效的《人工智能法案》主张构建协作治理结构。美国秉持“美国优先，创新优先”策略，拜登政府2023年发布《安全、可靠和可信赖的人工智能开发和使用权行政命令》，要求AI开发者在发布前提交安全测试结果，并对高风险模型实施监管。2025年1月特朗普政府签署行政令废除该行政命令，采取“轻监管”模式，强调减少对企业创新的干预。

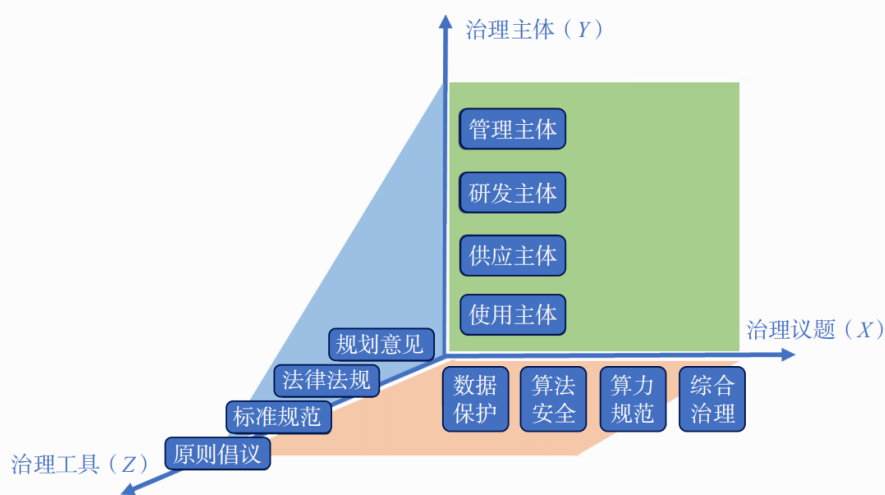
中国已在数据保护、算法安全、算力规范层面作出了不少探索，同时也在人工智能综合治理层面也提出了系列倡议、原则、指南及管理办法。2019年初，科技部成立新一代人工智能治理专业委员会，同年6月发布《新一代人工智能治理原则——发展负责任的人工智能》，提出8条人工智能治理原则。2020年7月，国家标准化管理委员会等部门联合印发《国家新一代人工智能标准体系建设指南》，在安全及伦理标准部分，提出6个部分重点开展标准体系建设。2021年9月，新一代人工智能治理专业委员会发布《新一代人工智能伦理规范》，提出了6项基本伦理要求。2023年7月10日，国家网信办等7个部门联合发布出台了《生成式人工智能服务管理暂行办法》，重点监管利用生成式人

工智能技术向中华人民共和国境内公众提供生成文本、图片、音频、视频等内容和服务的主体。

2. 中国人工智能治理的政策文本量化分析

2.1 政策分析框架构建

治理主体指的是治理的“相关者网络”，是参与治理过程各类行为主体。治理议题指的是治理的“问题导向”，是治理活动所针对的具体问题或领域。治理工具指的是治理的“手段工具箱”，是为实现治理目标而采用的政策工具、机制或方式。通过“治理主体—治理议题—治理工具”的三维分析框架，运用政策文本量化分析法，深入剖析其在



【图 1】中国人工智能治理的量化分析框架

单维度、双维度的政策特征，进而提出中国人工智能治理的针对性建议，如图 1 所示。

2.1.1 治理议题（X 维度）

在治理议题的 X 维度，分别

从综合治理和精细治理维度提出了系列政策措施，既包含通识性、系统化人工智能综合治理政策，也包含数据保护、算法安全、算力规范的分环节治理政策，如表 1 所示。

表 1 人工智能治理过程维度（X 维度）指标及其描述

治理议题	治理议题描述	编码
数据保护	包含数据跨境流动、网络安全、个人信息等相关的法律、条例、审查办法、管理规定、指导意见、安全倡议等	X1
算法安全	包含信息服务相关的算法推荐、弹窗推送、跟帖评论、深度合成、账号管理等	X2
算力规范	包含提升算力相关的算网安全、算力低碳等行动计划、实施意见等	X3
综合治理	包含人工智能相关的发展规划、治理原则、建设指南、伦理规范、管理办法、安全要求、治理倡议等	X4

2.1.2 治理主体（Y 维度）

在治理主体的 Y 维度，中国

制定的人工智能治理政策实现了全周期覆盖，包括管理主体、研

发主体、供应主体和使用主体 4 类主体，如表 2 所示。

表 2 人工智能治理过程维度（Y 维度）指标及其描述

治理主体	治理主体描述	编码
管理主体	承担人工智能发展相关的规划、组织、协调等职能的主体，涉及国务院、核心监管部门、行业自律组织等	Y1
研发主体	负责人工智能技术研发与试验相关的主体，涉及科技巨头企业、高校与科研机构、开源社区等	Y2
供应主体	在人工智能产品供应链中承担原材料、零部件等供给职能的主体，包括硬件供应、软件与算法供应、数据服务等	Y3
使用主体	人工智能产品和服务的最终承载者，如政务、金融、医疗、教育、交通、工业、能源、农业等智能化转型	Y4

2.1.3 治理工具 (Z 维度)

在治理工具的 Z 维度,从“硬

性法律”到“软性原则”进行了全范围的覆盖,主要涉及规划意

见、法律法规、标准规范、原则倡议等 4 类,如表 3 所示。

表 3 人工智能治理过程维度 (Z 维度) 指标及其描述

治理工具	治理工具描述	编码
规划意见	为人工智能发展与治理绘制了宏观蓝图	Z1
法律法规	是人工智能治理的刚性约束	Z2
标准规范	为人工智能技术和产品的研发、应用提供了统一尺度	Z3
原则倡议	从伦理道德、发展理念等层面为人工智能发展提供软性指引	Z4

2.2 研究样本及编码

2.2.1 研究样本检索与选取

关于政策选取时间,2017 年 7 月,国务院正式印发《新一代人工智能发展规划》,确立了新一代人工智能发展“三步走”战略目标,人工智能的发展至此上升到国家战略层面,推动中国人工智能步入新阶段。因此,我们选取政策时间自 2017 年 1 月~2024 年 4 月。

关于政策检索原则,我们的研究基于“治理主体—治理议题—治理工具”的三维分析框架遴选政策文本,研究重点从中国共产党中央委员会、国务院、工业和信息化部、科学技术部、教育部、国家网信办、国家标准化委员会等官方网站,遴选出 42 份关联度强的政策文本。通过该图可以看出,自 2021 至今中国人工智能治理政策密集出

台,对其重视程度达到高点,如图 2 所示。

2.2.2 研究样本使用与编码

关于政策编码方法,参考 NVivo 软件中文本标注方法对已经选定的 42 份政策进行节点标注。具体地,对分别符合“治理主体—治理议题—治理工具”三维框架下的任何一个维度,包括治理议题(数据、算法、算力、

综合治理)、治理主体(管理、研发、供应、使用)、治理工具(规划意见、法律法规、标准规范、原则倡议)的相关章节有且仅标注 1 次,均标注为 1 个节点。

3. 基于“治理主体—治理议题—治理工具”三维框架的中国人工智能治理的政策文本量化分析

3.1 基于三维分析框架的中国人工智能治理政策单维度分析

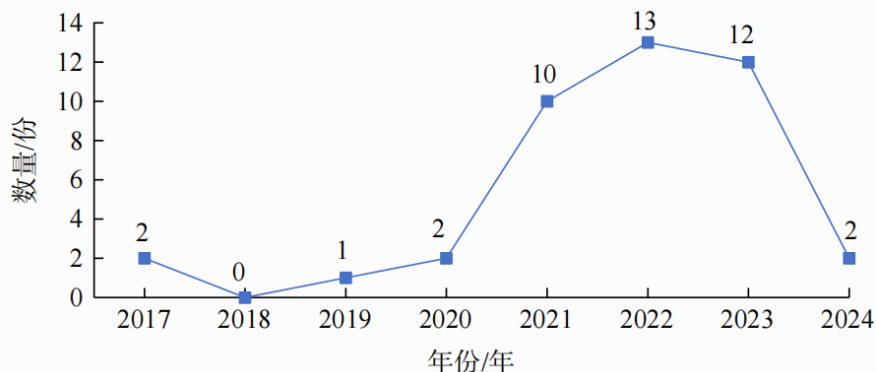


图 2 2017~2024 年中国人工智能治理政策数量的时间变化态势

3.1.1 治理议题维度 (X 维度)

通过统计发现，数据保护维度 (X1) 占据主导地位，其次是算法安全维度 (X2)，再次是综合治理维度 (X4)，最后是算力规范维度 (X3)。这一结构反映出当前中国治理框架的阶段性与潜在优化空间。

这种“前端重、中后端轻”的治理格局，与人工智能技术发展的现实逻辑高度相关。《数据安全法》《个人信息保护法》等顶层设计的落地，形成以数据合规为核心的“防护墙”。算法安全维度的 23.44% 占比，则体现了对算法透明性、可解释性及公平性的制度探索。综合治理维度的 18.75% 占比，说明治理层已开始关注技术应用的社会影响。然而，算力规范维度的显著薄弱暴露出治理体系的结构短板。这种“重数据轻算力”的治理偏向，与人工智能“数据—算法—算力”三位一体的技术逻辑存在内在张力，亟待从全生命周期治理视角进行优化 (图 3)。

3.1.2 治理主体维度 (Y 维度)

通过统计发现，管理主体维度 (Y1) 占比 32.17%；研发主体维度 (Y2) 占比 29.57%；供应主体维度 (Y3) 占比 29.57%；使用主体维度 (Y4) 占比 8.69%。这一量化统计反映出中国治理体系呈

现出显著的“主体结构偏向性”特征。

管理主体的高占比本质上是治理体系“顶层设计优先”原则的体现。研发主体 (Y2) 与供应主体 (Y3) 的高占比，反映出研发与供应主体的协同治理，即政策对技术创新链与产业链的双重关注。使用主体维度 (Y4) 的低占比，暴露出治理体系对“人工

智能技术应用场景”的关注不足，造成终端风险防控的“最后一公里”缺失。一是权益保障的缺口。二是公众参与缺位。例如，欧盟《人工智能法案》明确要求高风险系统需进行“社会影响评估”，而中国相关政策中用户反馈机制仍待完善 (图 4)。

3.1.3 治理工具维度 (Z 维度)

从政策工具维度观察中国人

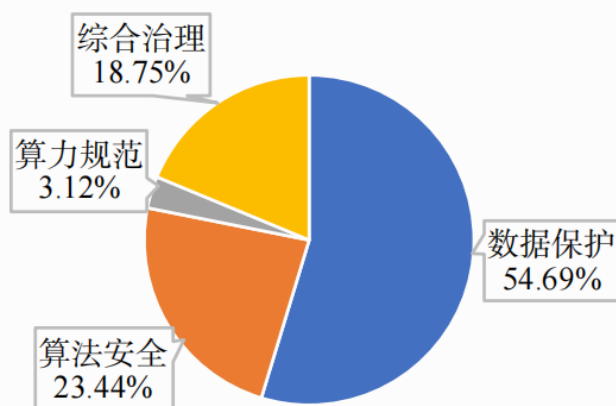


图 3 基于治理议题维度的政策量化分析结果

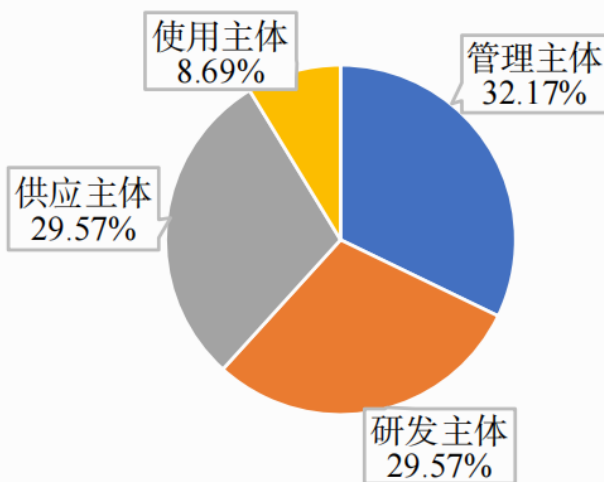


图 4 基于治理主体维度的政策量化分析结果

工智能治理体系，呈现出“硬法规制主导、软约束不足”的显著特征。在总计 42 个治理节点中，法律法规维度（Z2）52.38% 的绝对优势位居首位，战略规划维度（Z1）占比 21.43%，标准指南维度（Z3）占 14.29%，而原则倡议维度（Z4）仅占 11.90%。这一结构既体现了治理体系的制度建构逻辑，也揭示出从“刚性管控”向“刚柔并济”转型的必要性。

52.38% 的法律法规占比，本质上是对人工智能技术“强渗透性风险”的制度回应。但是，标准指南维度（Z3）和原则倡议维度（Z4）分别仅占 14.29% 和 11.90%，反映出治理体系对技术落地的“规则衔接”不足，也反映出治理体系对“技术伦理柔性治理”的重视不足。总体上，当前政策工具呈现“法律—规划—标准—倡议”的单向传导链条，但缺乏“硬法授权软法、软法补充硬法”的互动机制（图 5）。

3.2 三维分析框架下的中国人工智能治理政策双维度分析

3.2.1 治理议题（X）——治理主体（Y）维度分析

通过治理议题（X）—治理主体（Y）二维量化分析发现，在数据保护、算法安全、综合治理 3 大核心议题中，管理主体（政府）、研发主体（企业/科研机构）、

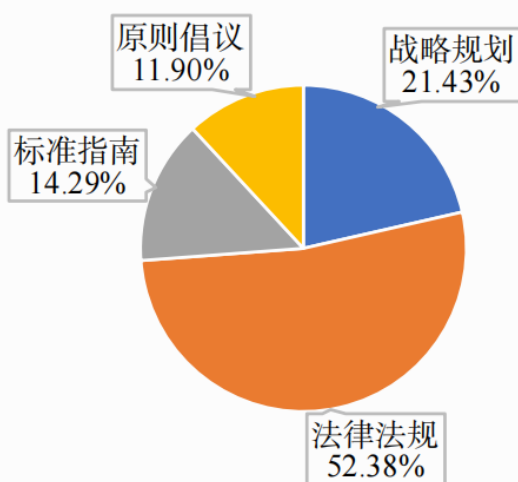


图 5 基于治理工具维度的政策量化分析结果

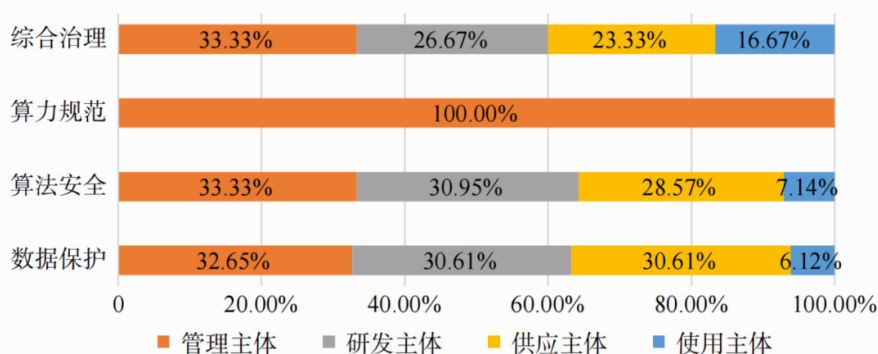


图 6 基于治理议题（X）—治理主体（Y）维度的量化分析结果

供应主体（产业链上下游）的政策参与度均维持在 20%~30% 的高位区间，形成“治理铁三角”结构。然而，使用主体（终端用户）在 3 大议题中的参与度均低于 10%，形成治理结构的“断裂带”。此外，算力规范维度相关政策发布数量较少，且均集中在管理规范上。

人工智能技术的“规划—开发—生产—使用”本应形成完整治理链条，但当前人工智能治理

体系呈现出“重上游、轻下游”的结构，可能导致以下问题：

一是造成风险传导效应，研发与供应环节的合规性，可能因使用环节的失控而失效；

二是产业生态的“供需错配”，供给侧治理政策的过度聚焦，导致人工智能技术停滞，而需求侧培育机制（如用户数字素养教育、公众参与式伦理审查）严重缺位（图 6）。

3.2.2 治理议题 (X) —— 治理工具 (Z) 维度分析

通过量化分析发现,治理议题中数据保护、算法安全聚焦法律法规类文本,形成“硬法优先”的治理模式。但过度刚性的规制可能引发“寒蝉效应”,降低企业创新活力。综合治理则聚焦于规划意见类文本,呈现“软法主导”特征。软法的灵活性虽能快速响应技术变化,但缺乏法律强制力,难以形成稳定的预期制度环境(图7)。

4. 中国人工智能治理建议

中国在人工智能治理上有别于美国、欧盟的“创新优先”和“伦理优先”治理模式,而是将“坚持发展和安全并重、促进创新和依法治理相结合”作为人工智能治理的基本原则,推进人工智能健康发展。

一是治理议题上的平衡。建

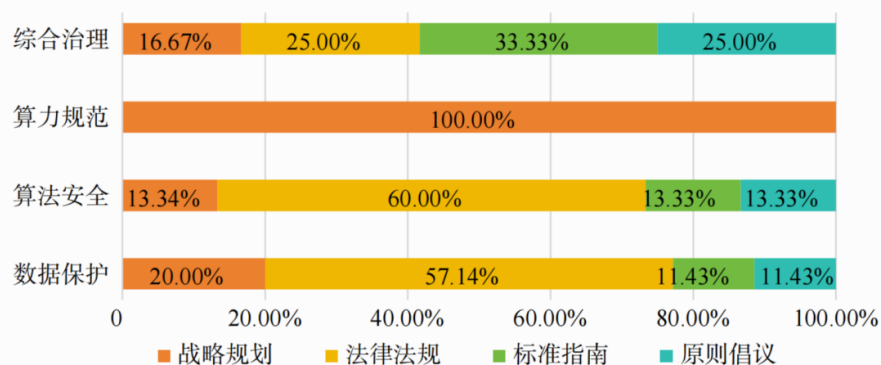


图7 治理议题 (X) — 治理工具 (Z) 维度的量化分析结果

议建立算力资源分类分级管理制度,将绿色算力、安全算力纳入政策支持范畴。

二是治理主体间的协同。建议强化使用主体的“场景化治理”,针对高风险场景(如金融科技、公共安全),建立强制性用户操作标准;探索建立“算法用户委员会”,赋予用户对自动化决策的异议权;推动企业承担使用端治理责任,通过“生产者责任延伸制度”,要求研发与供应主体向用户提供安全培训、风

险预警等服务。

三是治理工具上的协调。建议优化政策工具组合,推进硬法托底与软法协同。在高风险领域强化硬法刚性,针对生物识别、公共监控等涉及基本权利的场景,加快出台《人工智能法》等专门立法,明确数据滥用、算法歧视的刑事责任;在创新活跃领域扩大软法空间,例如生成式人工智能、量子计算等前沿领域,推行“监管沙盒+行业自律”模式。

本文作者: 刘肖肖、杨国梁

作者简介: 刘肖肖,中国标准化研究院、中国科学院科技战略咨询研究院,助理研究员,研究方向为科技规划与管理、标准化原理与方法;杨国梁(通信作者),中国科学院科技战略咨询研究院、中国科学院大学,研究员,研究方向为科技规划与管理、决策理论与方法。

文章来源: 刘肖肖,杨国梁.中国人工智能治理政策的结构特征与优化路径[J].科技导报,2026,44(5):112-119.

“唤醒”一氧化碳， 他们变气成“材”

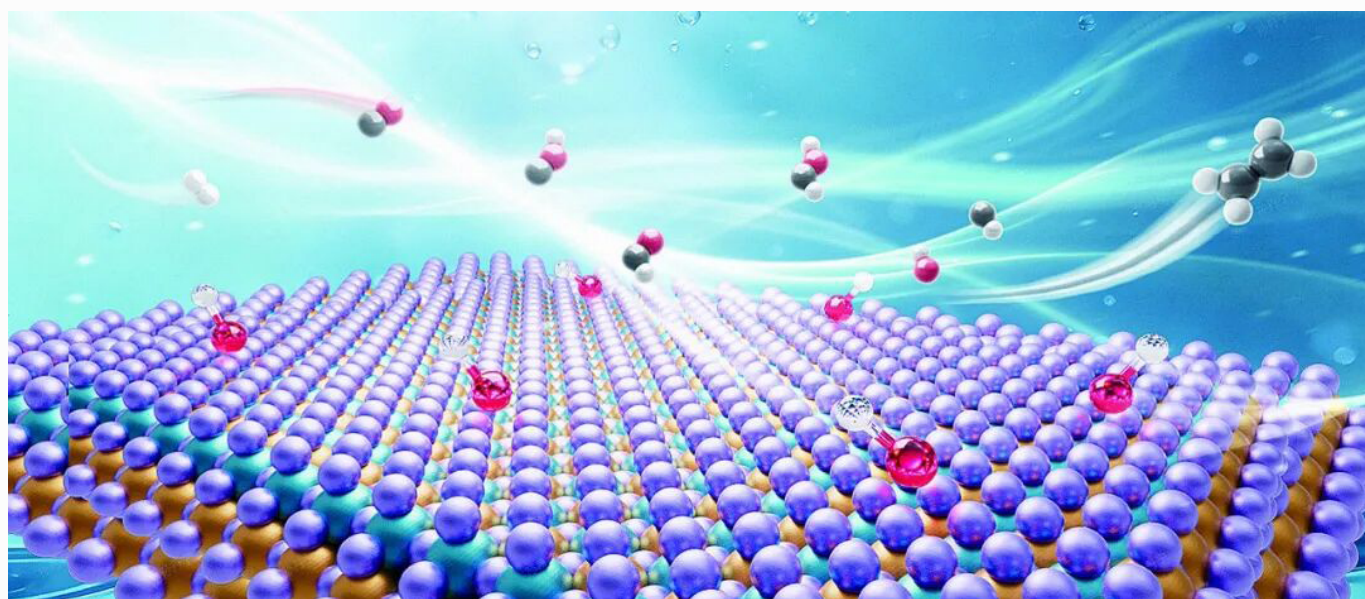
来源：中国科学报公众号；原文链接：<https://mp.weixin.qq.com/s/sVR6BDZFJxURyivzrRcFqg>

低碳烯烃是现代化工和新材料产业的基础原料，广泛应用于塑料、合成橡胶及精细化学品生产。中国科学院大连化学物理研究所（以下简称大连化物所）研究员孙剑、葛庆杰团队研究的就

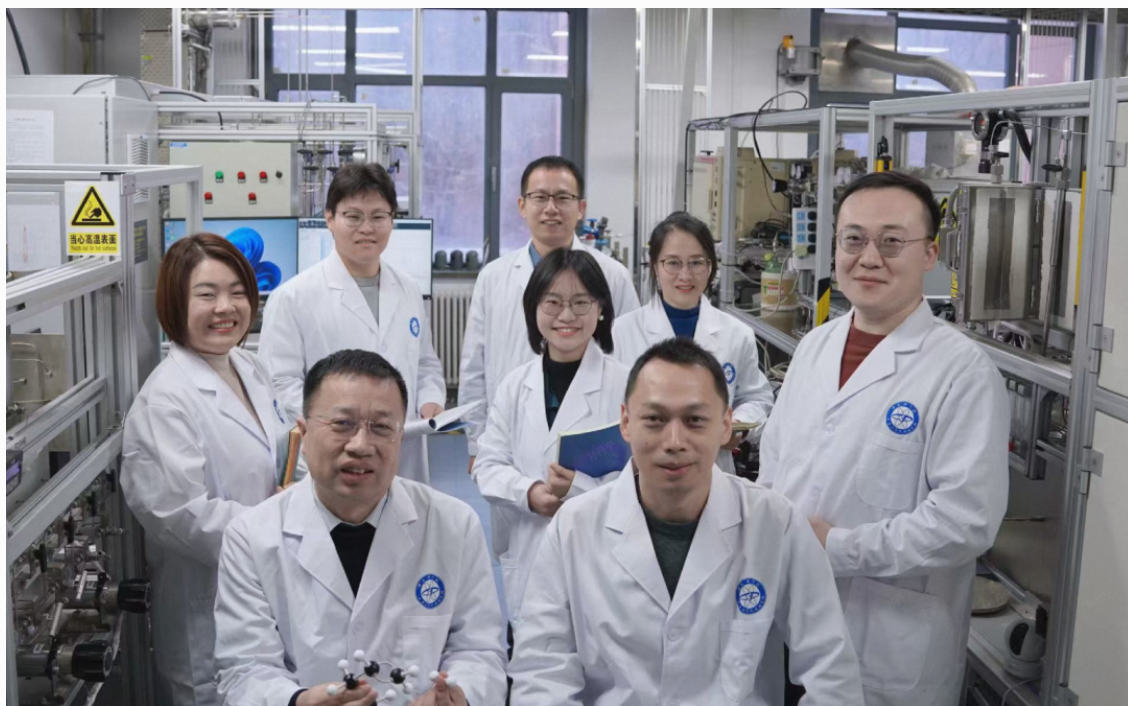
是如何在温和条件下让一氧化碳高效“苏醒”并转化为烯烃。

团队提出了一种基于费托合成体系的催化新策略，实现了合成气在温和条件下（250~260 摄

氏度，0.1 兆帕）向低碳烯烃的高效转化。与传统高温高压费托制烯烃过程相比，该策略为降低能耗并拓展催化剂结构 - 性能关系的认识提供了新的研究思路。相关成果近日发表于《自然》。



① 温和条件下费托合成制低碳烯烃示意图。



① 团队合影。

被忽略的“源头”环节

时间回到2017年，在中国矿业大学读本科的韩誉被一则来自大连化物所的成果报道吸引。报道说，孙剑团队首次实现了二氧化碳直接加氢制取高辛烷值汽油。这种变废为宝的“魔法”，在一位年轻学子心中埋下了向往的种子。“我希望未来也能从事这样既有价值又有挑战的研究。”韩誉回忆道。

这颗种子很快落地生根。怀揣对碳资源转化利用的浓厚兴趣，2018年韩誉考入大连化物所，加入孙剑团队，从事一氧化碳/二氧化碳催化转化相关研究。

随着研究深入，一个基础而关键的问题逐渐凸显：无论是二氧化碳还是合成气转化，反应中极具挑战性的第一步往往在于碳氧键的有效断裂。在大量实验和机理讨论中，韩誉注意到，在温和反应条件下，限制反应效率的并非碳链增长能力，而是原料分子难以被充分、定向活化，从而无法为后续反应提供足够的活性中间体。

这一认识与团队既往实践中的观察高度契合。在二氧化碳加氢制汽油的工业化放大试验中，团队就曾捕捉到一些不同于传统认知的现象，提示他们催化

剂在真实反应状态下可能呈现更为复杂的活性结构，尤其在二氧化碳活化这一关键步骤中，或许存在尚未被充分认识的反应路径。

“我国能源结构具有‘富煤、贫油、少气’的特点，发展以合成气为中间体的转化技术，对保障能源安全和推动化工原料多元化具有重要意义。”孙剑表示，“这不仅关系到基础化学品的稳定供给，也为未来与清洁能源体系的协同发展提供了可能。”

在个人探索、团队积累与国家需求的共同推动下，研究团队

逐渐形成共识：温和条件下合成气直接制低碳烯烃，既包含亟待突破的基础科学问题，也具有重要的战略意义，他们需要进一步探索其中的奥秘。

亲水羟基成“助攻”

明确方向后，团队聚焦于如何在温和条件下有效“激活”一氧化碳分子。

此前理论通常认为，合成气转化过程中生成的水会覆盖催化剂表面活性位点，从而抑制一氧化碳加氢反应，因此不同尺度的疏水修饰策略受到学界广泛关注。然而，也有研究认为，水分子或其解离形成的表面羟基，可能影响一氧化碳的活化路径。

于是，团队重新审视了此前完成的一次工业级试验。在二氧化碳制汽油反应中，为提升催化剂稳定性，他们曾引入氢氧化铝、勃姆石等含铝助剂。结果显示，在反应条件下，二氧化碳转化率和产物分布变化有限，但催化剂的抗积碳能力和运行稳定性显著提升。结构表征进一步发现，主要活性相由普遍认为的铁碳化物，转变为以铁氧化物为主、铁碳化物为辅的复合结构。

在此基础上，韩誉观察到，

在较低温度和压力条件下，即使二氧化碳转化率保持平稳，一氧化碳的选择性也明显下降。这说明在温和条件下，反应路径与中间体的演变对整体行为有更精细的调控作用。于是，韩誉想：“我们是否可以借鉴这种‘氧化物主导、羟基参与’的特点，将其引入费托合成制烯烃体系，从而提升一氧化碳的活化效率。”

基于工业实践与基础研究的交叉印证，团队逐渐形成新的认识——羟基未必只是抑制因素，在特定条件下，它甚至可能促进关键反应步骤。由此，他们提出，亲水性的羟基或许能在一氧化碳活化中发挥积极作用。

“表面上，‘疏水’与‘亲水’看似对立，但它们的作用机制并不相同。”葛庆杰解释道，“疏水策略更像在优化现有活性位的工作环境，而羟基策略则在更早阶段介入，通过调控催化剂结构演变过程，从源头构建更有利于关键反应的新型活性位点。”

基于这一思路，团队在钠-钴-锰催化体系中引入特定羟基助剂，构建出富含表面羟基的反应界面，诱导形成具有低对称性三斜相的钴-锰复合氧化物新活性位。在250~260摄氏度、0.1兆帕条件下，该体系在

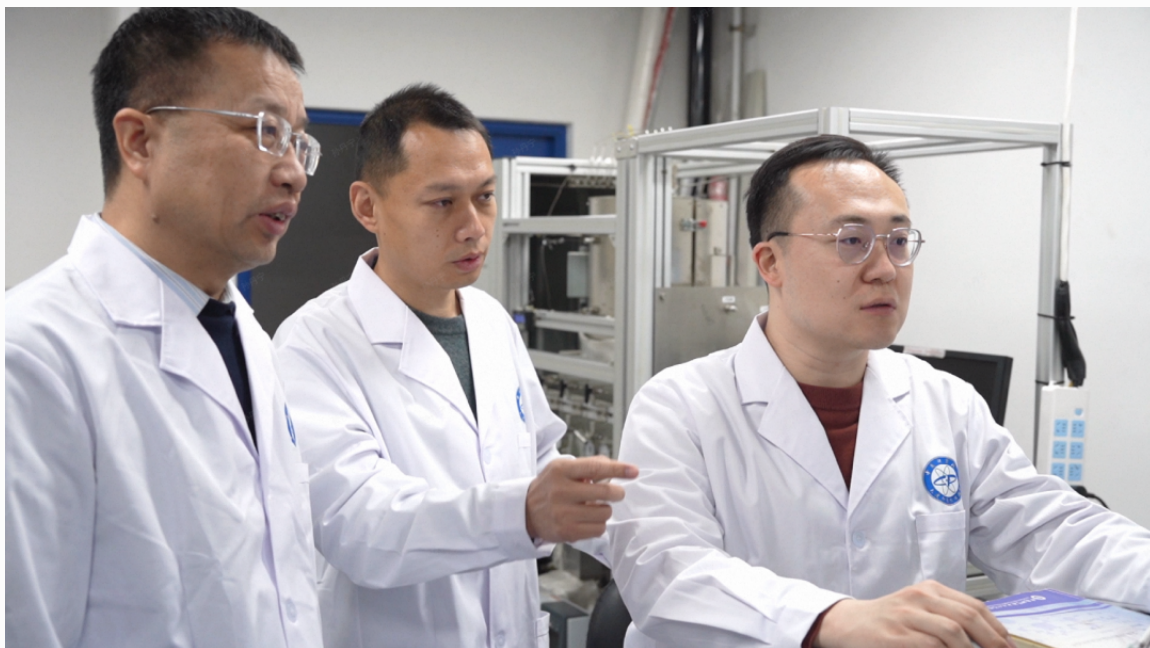
较宽氢碳比范围内一氧化碳转化率达80%，低碳烯烃选择性达60%，总烯烃选择性超过80%。

这类新型氧化物活性位倾向于通过“氢辅助”路径完成关键断键过程。通俗来说，与让一氧化碳在催化剂表面直接断键相比，氢辅助路径相当于先将其关键化学键“软化”，使一氧化碳更容易被激活，进而更高效地生成后续形成烯烃所需的关键中间体。

大胆假设，小心求证

2024年3月，团队将文章投稿至《自然》，经过编辑评估和同行评审后，却于5月20日收到审稿意见与拒稿通知。“我们提出的研究思路与既有认知存在一定差异，所以审稿人提出了更高标准的验证要求，包括羟基助剂的类型及其作用形式、羟基促进一氧化碳活化的普适性、对催化剂构效关系中其他可能影响因素的排除，以及反应机理合理性的系统论证。”孙剑回忆道。

在随后的修改过程中，团队将审稿人的质疑视为完善研究逻辑与证据体系的重要契机。“审稿意见极具建设性。”韩誉表示，“这促使我们不断深挖羟基究竟如何起作用、活性结构如何动态演变、结论的适用边



① 科研人员在费托合成反应装置前讨论实验数据。大连化物所供图

界究竟在哪里。”

团队系统补充和深化了多方面实验与分析,设计了更多对照实验以排除干扰因素,引入了更先进的原位表征技术来捕捉活性位演变过程中的关键瞬间,并对反应机理进行了更加严谨的论证。

“正是通过与审稿人展开的深入学术讨论,这项研究才完成了从‘有趣发现’到‘扎实的机理认识’的转变。”葛庆杰告诉《中国科学报》,“我们在这一过程中践行了‘大胆假设,小心求证’的科研精神。”

孙剑表示:“未来,团队将围绕羟基助剂调控一氧化碳/二氧化碳催化转化体系的构筑方式、活性位结构演化及反应过程优化等关键问题,持续推进相关基础研究与应用探索,为我国煤炭清洁高效利用和低碳化工过程发展提供技术支撑。”

相关论文信息: <https://doi.org/10.1038/s41586-026-10204-4>

《中国科学报》(2026-04-07 第1版要闻)

折扣儿童服装中可检出高含量铅

来源: chemistryworld; 作者: Rebecca Trager; 翻译: 余婉宁

原文链接: <https://www.chemistryworld.com/news/preliminary-results-suggest-high-lead-levels-can-be-found-in-discount-childrens-clothing/4023201.article>

美国印第安纳州玛丽安大学 (Marian University, Indiana) 的化学家开展的初步研究显示, 部分“快时尚”折扣服装的面料中, 铅含量超出了美国政府规定的安全限值。该研究由环境化学家卡米拉·迪弗斯 (Kamila Deavers) 领衔, 研究团队于 3 月 23 日在佐治亚州亚特兰大市举办的美国化学学会 (American Chemical Society, ACS) 会议上, 公布了这项尚未发表的研究结果。

15 年前, 一次常规血检发现, 迪弗斯当时年仅 2 岁的女儿血液中, 这种有毒重金属的含量偏高, 也正是这件事, 让她对铅污染研究产生了兴趣。迪弗斯最终将女儿的血铅异常, 追溯到了玩具表面的含铅涂层。“我当时回到家, 把家里彻底清理了一遍, 扔掉了所有塑料玩具和色彩鲜艳的玩具, 比如橡胶小黄鸭。”她



📍 为何部分“快时尚”服装的铅含量会超出安全限值? 这与用于将染料固着在面料上的媒染剂 (mordants) 有关。图片来源: © Groen/Shutterstock

回忆道。迪弗斯说, 大约 2 周后, 女儿的血铅水平复查结果已恢复至正常范围。

她的研究团队成员包括本科生研究员克里斯蒂娜·阿韦洛 (Cristina Avello) 与普丽西拉·埃

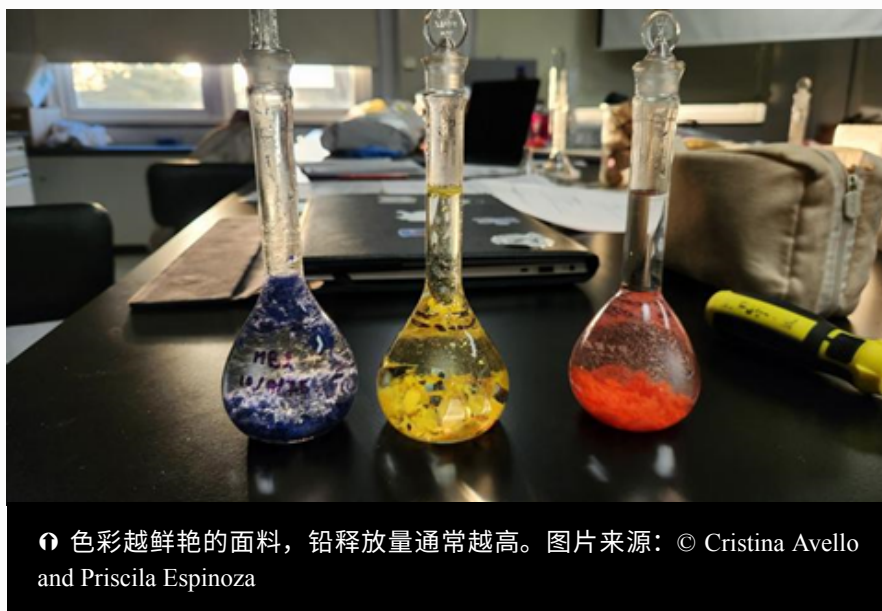
斯皮诺萨 (Priscila Espinoza)。团队从 4 家不同的快时尚与折扣服装零售商处, 订购了 6 岁及以下儿童的服装。

研究人员选取了 12 件不同颜色的 T 恤开展铅含量检测, 将

每件样品剪为三个不同部位——衣袖、标识印花区域、剩余衣身部分。“这样做是为了保证检测的一致性与准确性。”阿韦洛解释道，“我们无法确定标识印花区域的铅含量高低，要避免这类因素对研究结果造成干扰。”

这些产自多个国家的服装样品，研究人员先采用 X 射线荧光光谱法 (X-ray Fluorescence Spectroscopy, XRF) 进行初筛，随后通过电感耦合等离子体质谱法 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS) 开展定量分析。结果显示，所有样品的铅含量均超出了美国消费品安全委员会 (U.S. Consumer Product Safety Commission, CPSC) 规定的 100 ppm 铅限值。研究人员发现，在所有受检服装品牌中，色彩最鲜艳的面料 (包括部分红色、黄色面料) 普遍铅含量更高。

研究团队还开展了模拟消化实验，测定胃酸环境中可被人体吸收的铅的最大含量。团队参考美国环境保护署 (U.S. Environmental Protection Agency, EPA) 的标准模拟铅的迁移过程，计算了幼儿吮吸、啃咬面料等典型行为下，这类服装可能造成的铅暴露与吸收量。



① 色彩越鲜艳的面料，铅释放量通常越高。图片来源：© Cristina Avello and Priscila Espinoza

研究结果显示，该暴露量超出了美国食品药品监督管理局 (FDA) 设定的儿童每日铅摄入安全限值——2.2 微克/天。其中 2 件服装的铅暴露量大幅超出该限值，有 1 件 T 恤的铅含量更是超过 FDA 标准的 2 倍以上。迪弗斯表示，这些估算值大概率还是偏保守的。“这一结果非常令人担忧。”她说道。

关于服装中铅的来源，研究人员指出，核心原因是生产过程中使用了将染料、颜料固着在纺织品上的媒染剂；同时，生产环节中添加剂、稳定剂等辅料的使用，也可能造成交叉污染。

乙酸铅 (II) 长期以来被用作媒染剂，但迪弗斯强调，目前已

有可实现染料固色、同时保持色彩鲜艳度的更安全替代方案，包括从栎树皮、石榴皮等高单宁含量植物中提取的天然媒染剂。

但迪弗斯也指出，要在服装行业实现这种工艺变革，将面临高昂的成本，需要来自消费者或政府层面的推动。她开展这项研究的核心目标，是揭示低价儿童服装铅暴露的潜在风险，向家长及广大消费者开展科普宣教。

“很多家长对此并不知情，仍在大量购买快时尚服装。”迪弗斯在接受《化学世界》(Chemistry World) 采访时表示。她希望能帮助家长们在给孩子挑选衣物时，做出充分知情的选择。

图片来源：Mike Reddy



纺织回收行业谋求重振旗鼓

来源：c&en；作者：Vanessa Zainzinger；翻译：余婉宁

原文链接：<https://cen.acs.org/business/start-ups/Textile-recycling-tries-gain-second/104/web/2026/04>

化学回收技术发展不及预期政策调整助力企业重获发展势头

全球每年产生 9200 万吨纺织废弃物，据估算，到 2030 年，这一数字将攀升至 1.34 亿吨。行业亟需一场深刻变革，但针对这一海量废弃物难题，至今仍未找到真正可行的解决方案。

数年前，化学法回收技术曾被寄予厚望，被视作降低纺织行业环境影响的破局路径。2022 年，一大批初创企业扎堆入局，纷纷宣称在棉等纤维素类纤维、涤纶等合成纤维的回收技术上取得了突破。

但时隔 4 年，这些企业无一能实现具备商业可行性的再生纤维规模化量产，行业整体进展已然陷入停滞。

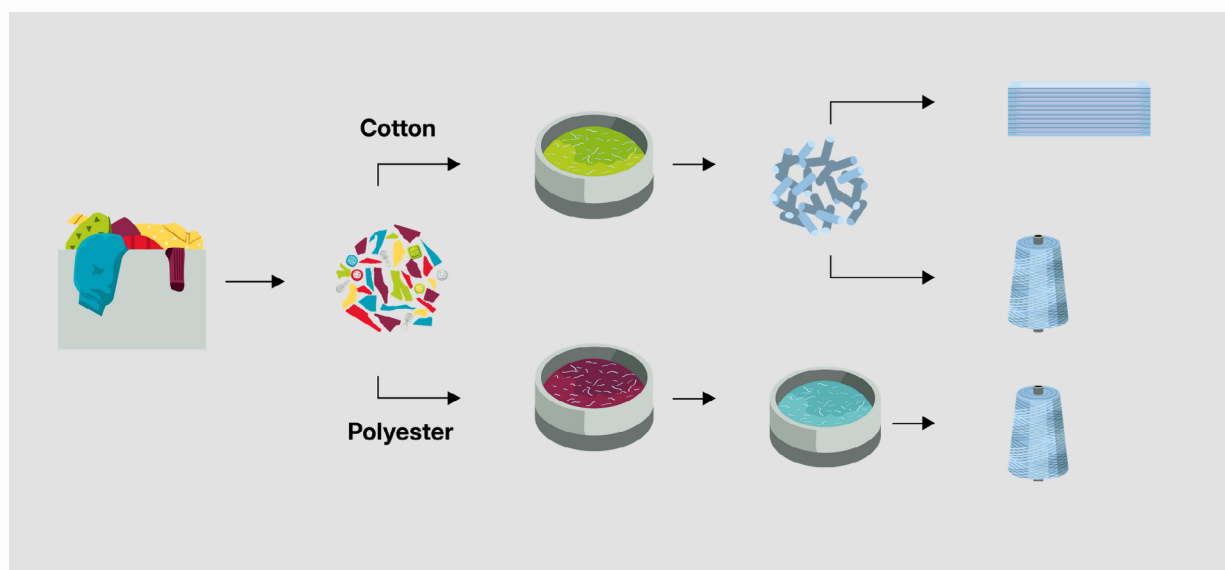
“当下的回收行业正处在艰难时刻。”非营利可持续发展网络欧洲零废弃组织（Zero Waste Europe），负责化学回收与塑料制燃料相关政策的专员洛丽亚娜·韦亚尔（Lauriane Veillard）直言。行业组织欧洲塑料回收商协会（Plastic Recyclers Europe）测算，仅欧洲一地，就

已经流失了近 100 万吨的塑料回收产能。

如今，纺织回收工厂的建设计划再度兴起。尽管多数企业在推进商业化落地时，比 2022 年更加审慎，但部分回收企业已显现出新的乐观态势。这份乐观，一方面源于各界期待已久的可持续发展政策迎来调整，另一方面则来自企业解决行业顽疾的决心——这个问题若不采取根本性的干预措施，根本无法彻底解决。



❶ Infinited Fiber 公司目前仅在运营一座中试工厂，而非其最初规划的全规模量产工厂。图片来源：© Infinited Fiber



① 杨 H. 库 /C&EN/Shutterstock, 凯·尤恩卷轴动画, 来源: Ambercycle、Circulose、C&EN 研究。

韦亚尔表示，纺织回收行业此前一直面临多重发展阻碍：原生纤维价格长期处于低位，再生纤维难以形成价格竞争力；原本预期将推动可持续发展进程的欧盟政策，落地推进十分缓慢；地缘政治格局的变化，也让资本的投资重心从可持续发展，转向了供应链韧性建设。

芬兰国家技术研究中心 (VTT Technical Research Centre of Finland) 研究教授阿里·哈林 (Ali Harlin) 指出，融资环境的变动，使化学法纺织回收行业“至少损失了 2~3 年的发展进程”。他表示，若企业在未获得纺织行业足量产品采购保障的前提下投建商业化工厂，该行业或将遭遇与塑料回收行业相同的发展障碍。“纺织回收的发展路径已然清晰，但

首要前提是理顺整个价值链。”

北欧生物产品集团 (Nordic Bioproducts Group, NBG) 联合创始人、首席执行官奥利·卡赫宁 (Olli Kähkönen) 表示，已观察到纺织全价值链对化学回收的关注度普遍不足。“这是一个全球性问题。”他称。数年前，因合作方制浆造纸企业 CMPC 退出，NBG 终止了一项以木质基原料生产纤维的工艺研发工作。

“这些企业在供给端短时间内就从零冲到了满负荷量产，却根本没为产品做好市场铺垫。”

乔纳坦·扬马克
Circulose 公司首席执行官

此后，NBG 将研发重心转向混纺织物中棉与涤纶的分离工艺。2024 年，该公司加入欧盟资助的 PESCO-Up 项目，该项目由多家企业联合技术资源，实现混合纺织废弃物的分离处理，并将棉与涤纶组分加工为再生纱线。

NBG 由欧洲北部的阿尔托大学孵化成立。卡赫宁表示，四年前，该地区有十余家企业均在开展纤维素回收技术研发，尽管获得了数百万欧元的投资，尚无一家企业实现技术的规模化应用。

当前，多数企业仍停滞于中试规模技术到商业化量产的过渡阶段。总部位于赫尔辛基的 Infinited Fiber 公司，开发了与木浆制备粘胶纤维工艺相近的技术，可将富棉纺织废弃物转化为

外观、手感与棉纤维一致的再生产品。该公司已落实规划年产能3万吨的工厂选址，并与多家跨国企业签订了多年期供应协议，合作方包括拥有Zara、Massimo Dutti等品牌的西班牙快时尚集团Inditex。

但Infinite Fiber并未如2022年的规划直接投建大型生产设施，而是采取渐进式推进策略：先建设年产能200吨的生产单元，在该单元内优化生产工艺，验证产品品质的稳定性。公司首席执行官萨希尔·考希克（Sahil Kaushik）表示，此举反映了当前融资环境趋于审慎的行业现状。

“当前，投资者与出资方在承诺大额资本投入前，会对技术可规模化性、项目执行能力与合理回报预期进行更为严格的核查。”考希克表示，“这一转变，深刻影响了同类企业的规模化推进策略。”

考希克指出，行业目前仍处于“鸡生蛋、蛋生鸡”的两难局面：纺织回收的需求十分迫切，但配套基础设施建设需要充足周期。保障稳定的原料供给、搭建纺织废弃物回收分拣体系、实现再生纤维与现有供应链的深度融合，均是行业面临的重大挑战。

当前，化学法纺织回收行业

已显现复苏迹象。北欧纺织回收领域的标杆企业Renewcell于2024年申请破产，两个月前，该企业以Circulose为主体完成重组，宣布计划于当年年底前重启其位于瑞典松兹瓦尔市工厂的商业化规模生产，目前该公司由私募股权机构Altor持有。

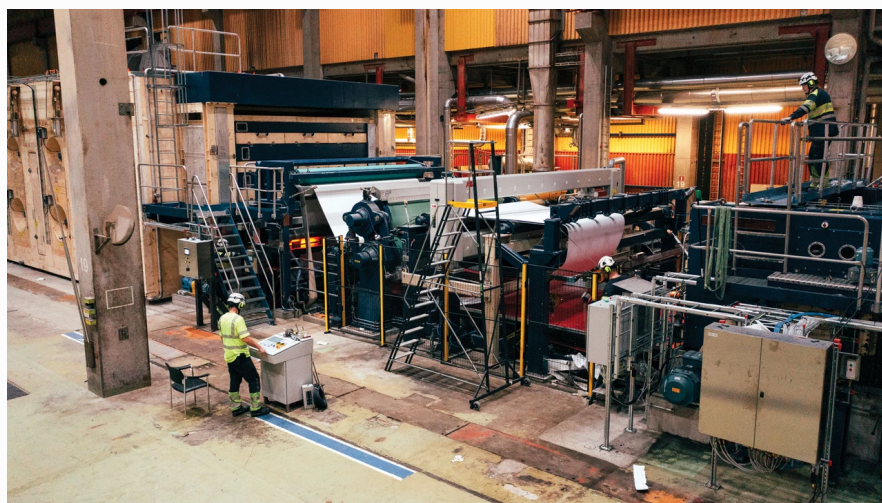
Circulose首席执行官乔纳坦·扬马克（Jonatan Janmark）表示，公司核心产品（通过废旧棉花化学回收制备的纤维素纤维）未发生重大调整，重组后的企业仅对废旧纤维的机械粉碎工艺进行了优化，以提升纤维转化后浆粕的品质。

扬马克指出，导致Renewcell经营失败的核心原因并非技术缺陷，而是规模化扩产策略的失

误。“这类企业在供给端短期内实现了从零到规模化满产的快速扩张，却并未真正为产品培育好对应的下游市场。”目前，该公司以品牌合作为核心业务方向，通过锁定采购承诺规避产能过剩风险。

扬马克认为，Circulose重启的时机已成熟。他表示，Renewcell发展初期，纺织化学回收领域仅依靠概念热度获得关注，缺乏配套的商业化落地策略，而当前市场已趋于成熟；此外，原本预期将推动纺织回收行业发展的相关政策，目前才达到4年前行业的预期落地水平。

欧盟于2025年初正式实施废旧纺织品强制单独回收制度，该规定提升了纺织废弃物的回收



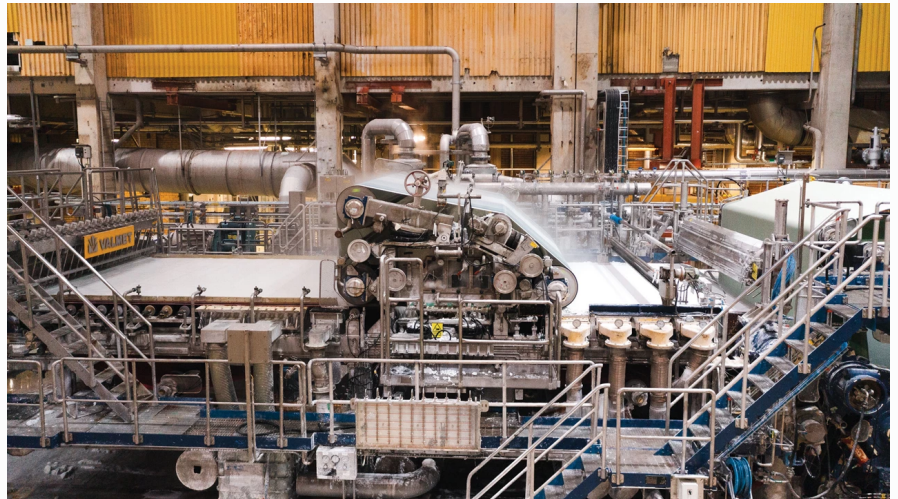
经历破产期后，Circulose公司正在复产其位于瑞典松兹瓦尔市的纺织回收工厂。图片来源：© Henrik Bodin/Circulose

规模，同时为纺织回收设施提供了潜在原料保障。同年9月，欧洲议会表决通过相关法规，要求欧盟成员国建立相应机制，确保纺织品生产商承担其产品的回收、分拣与再生全流程成本。此外，新出台的《生态设计法规》将在未来数年针对纺织品制定进一步的强制要求。

上述政策调整带来的行业机遇，是法国工程巨头德希尼布能源（Technip Energies）于2023年成立涤纶回收企业 Reju 的核心动因。成立不足1年，该公司即在德国法兰克福投运首座工厂，目前再生涤纶年产能达1000吨。Reju 首席执行官帕特里克·弗里斯克（Patrik Frisk）表示，公司已在法国、荷兰及美国纽约州罗切斯特市落实新工厂选址，计划至2035年实现10万吨的总回收产能。

Reju 采用专有催化剂，将聚酯解聚为对苯二甲酸二（2-羟乙基）酯与乙二醇，得到的粉末再经重新聚合制成颗粒，可熔融挤出为涤纶纱线。

这是目前重新受到关注的几



❶ Circulose 公司通过化学回收废旧棉，生产出一种纤维素纤维。图片来源：© Henrik Bodin/Circulose

种涤纶回收技术之一。另一种来自美国弗吉尼亚州的 Circ 公司，其采用水热工艺分离纤维素并解聚涤纶。去年秋季，H&M 推出了采用 Circ 回收涤纶制成的女士抓绒卫衣；今年春季，该品牌还将推出含 30% Circ 回收浆粕制成的纤维素纤维的牛仔裤。Circ 已与奥地利粘胶纤维老牌企业兰精集团（Lenzing）合作，将回收浆粕加工为 Refibra 纤维——这是一种完全由棉废料制成、应用广泛的纤维产品。

根据可持续发展战略，H&M 计划到 2030 年，让产品中 50% 的原料来自再生资源。这一目

标也反映出欧洲服装企业普遍提高再生利用指标的趋势。行业组织 欧洲纺织服装联合会（Euratex）预估，到 2030 年，欧盟服装与家纺领域对再生纤维的需求量将达到 390 万吨。

弗里斯克对纺织回收的复苏前景持乐观态度，他认为只要政策与行业目标保持同步，这一趋势就能持续。“行业已经形成共识：我们正迈向纺织品真正实现循环回收的未来。”他表示，“当规模化变得可行时，也会进一步推动监管部门出台更有力的政策。”

Vanessa Zainzinger 英国自由撰稿人

作者：万侯佳，王英胜，韩迪；Email: wyjj@ciac.ac.cn

蓝光危害的科学解析与 应对指南





①【图1】生活中蓝光的不同存在形式（图片来源于豆包 AI 制作）

一、引言

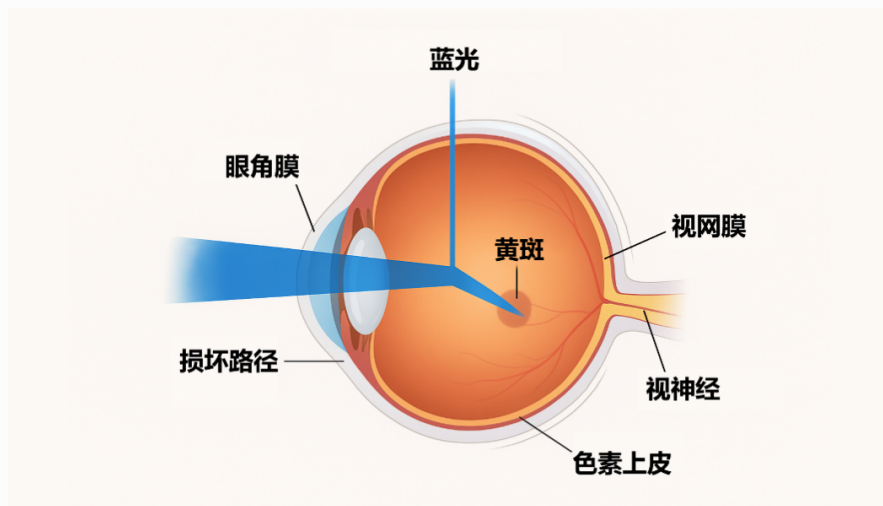
随着信息技术与照明技术的快速发展,人类的生活环境被各种光源所覆盖:夜间街道的路灯、清晨睁眼看到的手机屏幕、室内的灯具、工作中的电脑以及休闲娱乐使用的平板等(图1)。无论是照明还是显示,这些设备的核心均依赖于白光光源。白光的实现方式主要有两种:一是蓝光与黄色荧光的组合,二是蓝光与红、绿三基色的叠加。白光的普及极大提升了生活便利性,但同时也带来了健康隐忧。在白光中,蓝光是不可或缺的重要组成部分,通常由高效、低成本的蓝光芯片提供。蓝光属于波长400~500 nm的高能短波段,其中415~455 nm的短波蓝光因穿透力强,被认为对眼部及机体健康具有潜在风险;而455~500 nm的蓝光则有助于维持昼夜节律、促进认知及情绪稳定。自然界中,阳光是蓝光的主要来源,占比约为25%~30%;然而现代社会中,LED

照明与电子显示屏的大量应用显著提高了人群的蓝光暴露水平。由于蓝光波长短、能量高,能够穿透角膜和晶状体直达视网膜,长期作用可能导致组织损伤、视功能下降甚至眼部疾病^[1]。因此,系统认识蓝光可能造成的健康危害,并探讨合理的防护与应对措施,具有重要的现实意义。本文将从蓝光对健康的潜在影响及科学防护策略两个方面展开论述。

二、蓝光对健康的潜在威胁与作用机制

1. 人眼结构与蓝光作用靶点

理解蓝光对眼睛的损伤,需先明确人眼关键结构及蓝光的作用位置。人眼由角膜、晶状体、玻璃体和视网膜等组成,其中黄斑区位于视网膜中心,是负责精细视力与色觉的核心区域,对蓝光尤为敏感(图2)。蓝光可穿透角膜、晶状体(婴幼儿晶状体



①【图2】眼睛结构（图片来源于豆包 AI 制作）

透光率约为成人的4倍)，最终聚焦于黄斑区，成为眼部损伤的主要靶点^[2]。

2. 眼睛的结构性损伤及化学机制

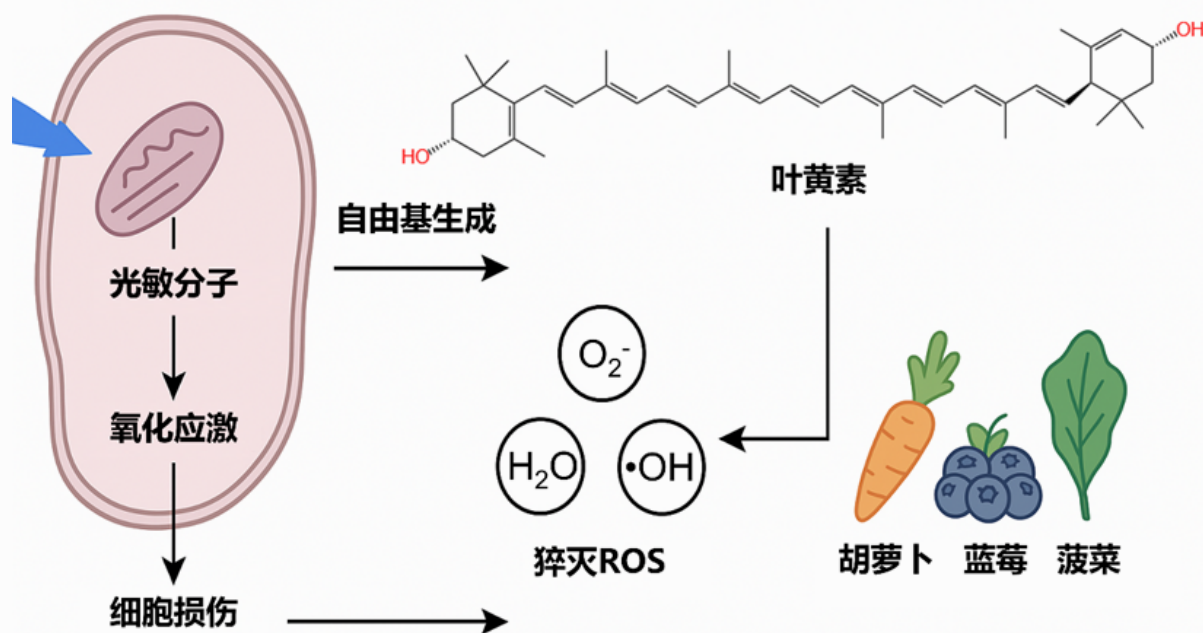
视觉系统是最直接暴露于蓝光之下的器官，其损伤本质与氧化应激反应密切相关。短波蓝光能够激发视网膜中的光敏分子（如视紫红质和视黄醇），产生电子转移过程，从而形成活性氧(ROS)（图3）。这些活性氧分子包括超氧阴离子(O_2^-)、过氧化氢(H_2O_2)和羟基自由基($\cdot OH$)，它们可以引发一系列的氧化应激反应。具体的化学机制是：首先蓝光激发视网膜细胞内的光敏色素，生

成过量的电子和空穴；然后，这些电子和空穴与水分子反应生成活性氧(ROS)；最后，活性氧分子会破坏细胞膜、氧化脂质，进而破坏细胞结构并导致细胞死亡^[3-4]。长期蓝光暴露会导致黄斑区感光细胞持续凋亡，提升黄斑病变发生率，严重时可能造成不可逆的中心视力下降（如视物变形、黑影遮挡）。

3. 视觉疲劳与昼夜节律紊乱

视觉疲劳是蓝光暴露的常见表现。长时间注视电子屏幕时，蓝光刺激使睫状肌持续处于紧张状态，导致眼睛无法充分放松，同时加速泪液蒸发，造成泪

膜不稳定，从而引发干涩、酸胀及模糊等症状。据调查，连续使用电子设备2h以上时，眼部疲劳发生率可高达70%。此外，蓝光散射性强，迫使眼球调节肌肉长期紧张，从而加快近视发展。青少年由于眼球仍处于发育阶段，角膜和晶状体透光率较高，更易受到蓝光影响。教育部数据显示，我国小学生近视率超过50%，初中生超过70%，高中生甚至超过80%，蓝光暴露被认为是重要诱因之一。蓝光还会影响人体睡眠与生物钟。褪黑素是由松果体分泌的调节睡眠的重要激素，其分泌量在光照增强时受到抑制。研究发现，蓝光对褪黑素的抑制



①【图3】蓝光引发ROS生成机制（图片来源于豆包AI制作）

作用显著强于其他波段光线。由于其波长特性与视网膜感光色素——视黑素的吸收峰相匹配，夜间暴露蓝光会向大脑发出“白昼”信号，从而干扰褪黑素合成，导致入睡延迟、睡眠不足，增加失眠风险^[5]。长期睡眠紊乱不仅损害认知与学习效率，还可能增加代谢紊乱及恶性疾病的风险。

4. 其他健康风险

除视觉系统外，蓝光还可能对皮肤及全身健康产生影响。研究显示，蓝光能够穿透表皮，诱发自由基生成，加速胶原蛋白降解，导致皮肤干燥、松弛和早衰。相比紫外线，蓝光的穿透力虽弱，但可作用于真皮层，对深层组织造成潜在损伤，尤其对长期面对电子屏幕的人群而言更为明显。此外，昼夜节律的紊乱与心血管系统异常及心理健康问题密切相关。长期夜间蓝光暴露可导致血压升高、心率不齐，增加心血管疾病风险；同时，睡眠不足与节律紊乱也会加重焦虑、抑郁等症状。部分研究还提示，蓝光可能通过抑制免疫细胞活性，削弱机体抵抗力，使感染风险上升。

三、科学防护与习惯调整

1. 硬件层面的防护

合理选择照明与显示设备是基础防护措施。居家和办公场所

宜采用蓝光比例较低的照明产品，例如色温不高于 4000 K 的暖白光 LED 灯，避免冷白光直射及过亮光源。夜间卧室应保持昏暗，睡前 1~2 h 尽量减少电子设备使用，以利于褪黑素分泌。电子终端大多配有“夜间模式”或“护眼模式”，可降低蓝光输出；同时，调整屏幕亮度与环境光匹配，避免亮度差过大。此外，贴合防蓝光膜或佩戴防蓝光眼镜也能在一定程度上阻隔有害蓝光（阻隔率 20%~30% 较为适宜）。在强光或高强度使用电子设备的场景下，可选择阻隔率更高的产品^[5]。防蓝光眼镜：需区分“日常防护型”与“专业防护型”——日常使用（如看电脑）可选树脂镀膜镜片（阻隔率 20%~30%），而长期暴露于高强度蓝光环境（如 LED 生产车间）可选用特殊光学镜片（阻隔率 40%~50%）。需注意：市面上宣称“100% 阻隔蓝光”的产品不科学，会阻断 455~500 nm 的有益蓝光，反而影响昼夜节律^[6]。

2. 日常用眼习惯优化

控制电子产品的使用时长是关键。遵循“20-20-20 原则”，即每用眼 20 min，远眺 20 英尺（约 6 m）以外物体，持续 20s 以上，可有效缓解睫状肌紧张。阅读时保持 50 cm 以上的视距，避

免长时间近距离注视。不同年龄段人群的眼部结构与蓝光暴露场景差异显著，需针对性防护：婴幼儿（0~3 岁）：避免接触电子屏幕（手机、平板等），室内照明选用色温 2700~3000 K 的暖黄光；外出时使用防蓝光襁褓（材质需符合 GB 31701-2015《婴幼儿及儿童纺织产品安全技术规范》）或婴儿车遮阳篷，减少阳光中短波蓝光的直接照射^[7]。青少年（4~18 岁）：严格控制电子设备使用时长：4~6 岁每日 ≤ 1 h，7~12 岁每日 ≤ 1.5 h，13~18 岁每日 ≤ 2 h；并定期（每半年）进行视力检查。

3. 环境与生活方式调整

增加户外活动有助于缓解视觉疲劳并维持昼夜节律。适度接受自然光照射还能促进维生素 D 合成，对骨骼与免疫健康具有积极作用。睡前应避免使用电子设备，保持卧室光线昏暗，以保证高质量睡眠。饮食方面，多摄入含有抗氧化和猝灭 ROS 物质的食物，如叶黄素。由于叶黄素的分子结构中含有多个共轭双键，这些双键可以与 ROS 反应并抑制 ROS 的活性，从而防止它们进一步损伤眼部细胞。另一方面，叶黄素还可以通过增强细胞内抗氧化酶的活性，间接增强细胞的抗氧化能力，从而减轻氧化损伤

饮食补充叶黄素：每日建议摄入量 10 mg^[8-9]。其他如维生素 A、Omega-3 脂肪酸等也有类似的抗氧化作用，这些营养素广泛存在于蓝莓、胡萝卜、菠菜、坚果及深海鱼类中，保护细胞免受过量 ROS 的损伤。保持规律作息、合理饮食与良好生活习惯，是长期防护蓝光危害的有效途径。用眼

习惯：阅读、看屏幕时保持 50 cm 以上视距，避免躺着或在晃动环境（如公交车）中使用电子设备；睡眠与环境调整：睡前 1~2 h 停用电子设备，卧室保持昏暗（可使用遮光窗帘），促进褪黑素分泌；除补充叶黄素（成人每日 10~20 mg，可通过多样化食物组合获取：100 g 菠菜约含 10~12 mg、200 g 羽衣

甘蓝约含 16~20 mg、300 g 西兰花约含 3~6 mg、2 个鸡蛋黄约含 0.6~1 mg^[10]、维生素 A（如 50 g 胡萝卜，约含 800~1000 μg 视黄醇当量）外，每周增加 3 次户外活动（每次 30 min）——自然光可调节昼夜节律，同时促进维生素 D 合成，间接保护眼部健康。

参考文献

- [1] 肖治宇, 林楷荣, 刘晓柯, 等. 蓝光光生物安全危害研究的现状分析[J]. 激光生物学报, 2022, 31(5): 385-390.
- [2] 中华医学会眼科学分会视光学组. 中国城市人群电子设备使用与眼部疲劳现状调查[J]. 中华眼科杂志, 2023, 59(2): 101-106.
- [3] Godley B F, Shamsi F A, Liang F Q, et al. Blue light induces mitochondrial DNA damage and free radical production in epithelial cells[J]. J Biol Chem, 2005, 280(22): 21061-6.
- [4] Abdouh M, Chen Y, Goyeneche A, et al. Blue light-induced mitochondrial oxidative damage underlay retinal pigment epithelial cell apoptosis[J]. Int J Mol Sci, 2024, 25, 12619.
- [5] 王晓瑜, 陈东川, 朱书贤, 等. 防蓝光显示技术进展[J]. 液晶与显示, 2020, 35(1): 1-11.
- [6] 瞿佳, 吕帆, 周佳. 防蓝光眼镜的临床应用专家共识[J]. 中华眼科杂志, 2020, 56(11): 817-820.
- [7] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB 31701-2015 婴幼儿及儿童纺织产品安全技术规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015: 8-12.
- [8] Sies H, Stahl W. Nutritional protection against skin damage from sunlight[J]. Annu Rev Nutr, 2004, 24:173-200.
- [9] 苏娟, 杨永安, 沈智蓉, 等. 叶黄素的护眼机制及其在近视防治中的应用进展[J]. 妇儿健康导刊, 2024, 3(9): 17-20.
- [10] 中国疾病预防控制中心营养与健康所. 中国食物成分表标准版(第6版/第一册)[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2018: 124-135.

作者：田俊，高晨曦，高文超；Email: gaowenchao@tyut.edu.cn

稀土“小哪吒”

“非凡魔力”背后的“结构玄机”

1. 引言

哪吒三头六臂、脚踏风火轮，凭一身“百变神通”改天换地；而在原子级世界里，也藏着一群堪称“小哪吒”的存在——稀土元素。它们“以小牵大”“量微而功巨”，牵动着传统工业到高端制造的万千领域，有着“工业维生素”和“新材料之母”的美誉，甚至成为大国博弈中不可或缺的关键筹码。今年6月，中美在伦敦启动了新一轮的经贸会谈，美国方面的核心诉求是希望我国能够放宽对美稀土出口的限制。那么，何为稀土？它又为何能成为中美谈判桌上的王牌筹码？本文将以化学视角，和大家一同答疑解惑，揭秘稀土“非凡魔力”背后的“结构玄机”。

2. 稀土非“土”，稀土不“稀”

提到“稀土”这个名字，其实是个流传许久的误会。稀土英文称 Rare Earth (简称 RE 或 R)，意思是“稀少的土”，这是由于在稀土发现之初，受限于当时的冶炼提纯技术，人们往往仅能得到性状似“土”的稀土氧化物，而且每次得到的量也不多，因此得名稀土。实际上，稀土非但不是“土”，反而很“多金”，它其实是一类典型的金属，是元素周期表 III B 族中的钪、钇、镧系的总称，即镧 (La)、铈 (Ce)、镨 (Pr)、钕 (Nd)、钷 (Pm)、钐 (Sm)、铕 (Eu)、钆 (Gd)、铽 (Tb)、镝 (Dy)、钬 (Ho)、铒 (Er)、铥 (Tm)、镱 (Yb)、镱 (Lu)、钪 (Sc)、钇 (Y) 这 17 种元素^[1]。

根据矿物共生的特性，稀土元素通常又可分为两类：镧系元素前 7 种，即原子序数为 57~63 的元素被称为轻稀土（也叫铈组），剩余的 10 种元素则被称为重稀土（也叫铽组）（图 1）^[2]。然而，目前全球科学界对于轻、重稀土元素的分类尚无绝对统一的标准。

其次，稀土元素在地壳中的含量并不“稀少”，总的克拉克值^[3]已达到了 234.51%，比常见的元素铜 (10%)、锌 (5%)、锡 (4%)、铅 (1.6%)、镍 (8%) 和钴 (3%) 等都要多^[4]。可见，稀土的“稀”并不在于储量，而在其“藏得深”和“难分离”的特性：稀土矿石多以独居石、氟碳铈矿、磷灰石和萤石等形式存在^[5]，而这些矿

道包裹在原子内层，形成类似“核外电子的内层核心区”，如同在“整座院落”外封了一层“屏蔽罩”，屏蔽效应可以保障 4f 轨道电子的各类行为，如 f-f 电子跃迁或未成对 f 电子的“强自旋-轨道耦合”的稳定性，几乎不受外界化学环境（如配体、晶体结构等）的影响，从而使稀土元素拥有独特的光学性质和极高的固有磁矩^[9]。

另外，在常温常压下，稀土家族的成员们还会展现出 4 类主要的“身形”特质——晶体结构^[10]（图 3）：第一类，密排六方结构（图 3a），钇和大部分重稀土元素最爱这种结构。在这种结构中，原子像被精心堆叠的积木，排列得特别紧密，几乎没有多余空隙。这种“紧凑身材”让它们天生拥有高强度和高硬度，主打一个“硬汉”形象，但也因此，延展性和导电性就稍逊一筹；第二类，面心立方结构（图 3b），铈和镱是这种结构的代表。它们的原子间结合力相对较弱，原子层之间好似涂了润滑油，容易发生相对滑动。这种“灵活的骨架”让它们延展性很好，松散的排列也给电子的移动留出了空间，导电性也更出色。不过，“灵活”的代价是强度和硬度会稍弱；第三类，双密排六方结构（图 3c），镧、铈、钕等稀

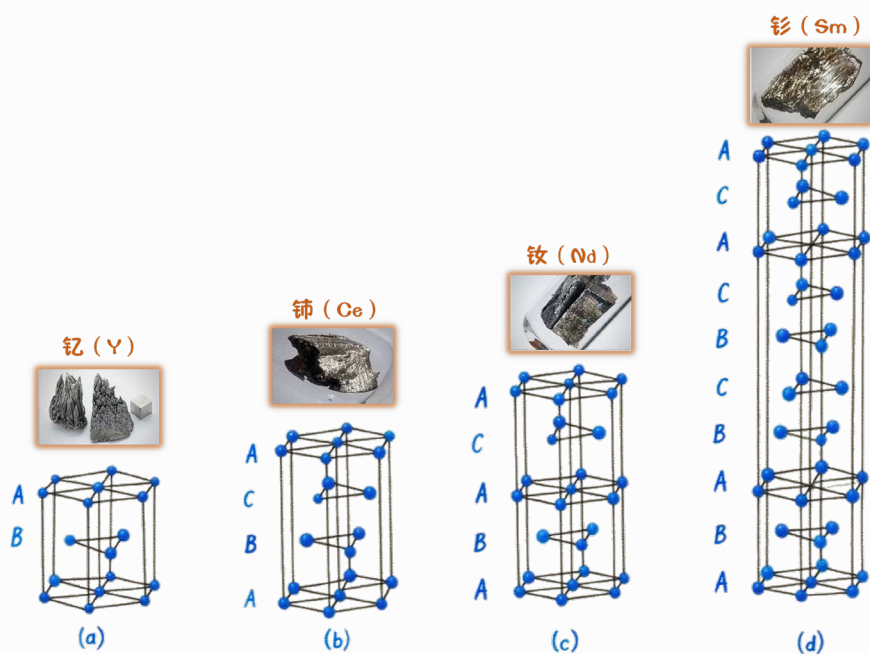


图 3 常温常压下稀土元素的晶体结构类型^[10]

土成员常采用这种结构。它们的原子排列方式颇具“特殊性”，仿佛特意为原子的“小磁针”们铺就轨道，方便磁矩更有序地排列。这使得这类稀土金属具有较高的磁性能；第四类，斜方结构（图 3d），以钐为代表的少数稀土元素会选择这种结构。它们的“骨架”在不同方向上“身形各异”——有的方向原子间距宽，有的方向原子结合力强。这种“不对称身材”让它们的物理性质，比如磁性、硬度、热膨胀等变得很有“个性”，在不同方向上表现出明显差异，从而能在一些需要精准调控性能的场景中派上大用场。更有趣的是，稀土金属的

“身形”并不是一成不变的。若改变温度或压力，大多数稀土还能够切换晶体结构，随之而来的是物理性质的突然变化，比如原本坚硬的可能变柔软，或者磁性突然增强。这一特性让科学家们能够通过调整温度、压力，精准“定制”稀土的性能，为稀土在各种高科技领域的广泛应用提供更多可能性。

那么，基于“结构决定性质，性质决定用途”这一化学内核，稀土元素与生俱来的结构优势，让它们个个“身怀绝技”，在冶金、机械、石油、化工、玻璃、陶瓷、纺织、生物医药、以及光学、磁学、电子、信息、航天、

军事和原子能工业等 40 多个行业领域里“大显身手”(图 4)^[11-16]。当然,稀土元素的应用场景虽包罗万象,但其核心机制均源于原子结构与晶体结构的特性,原理相通。基于此,本文不再逐一细述各类应用场景,仅选取几类典型介绍如下。

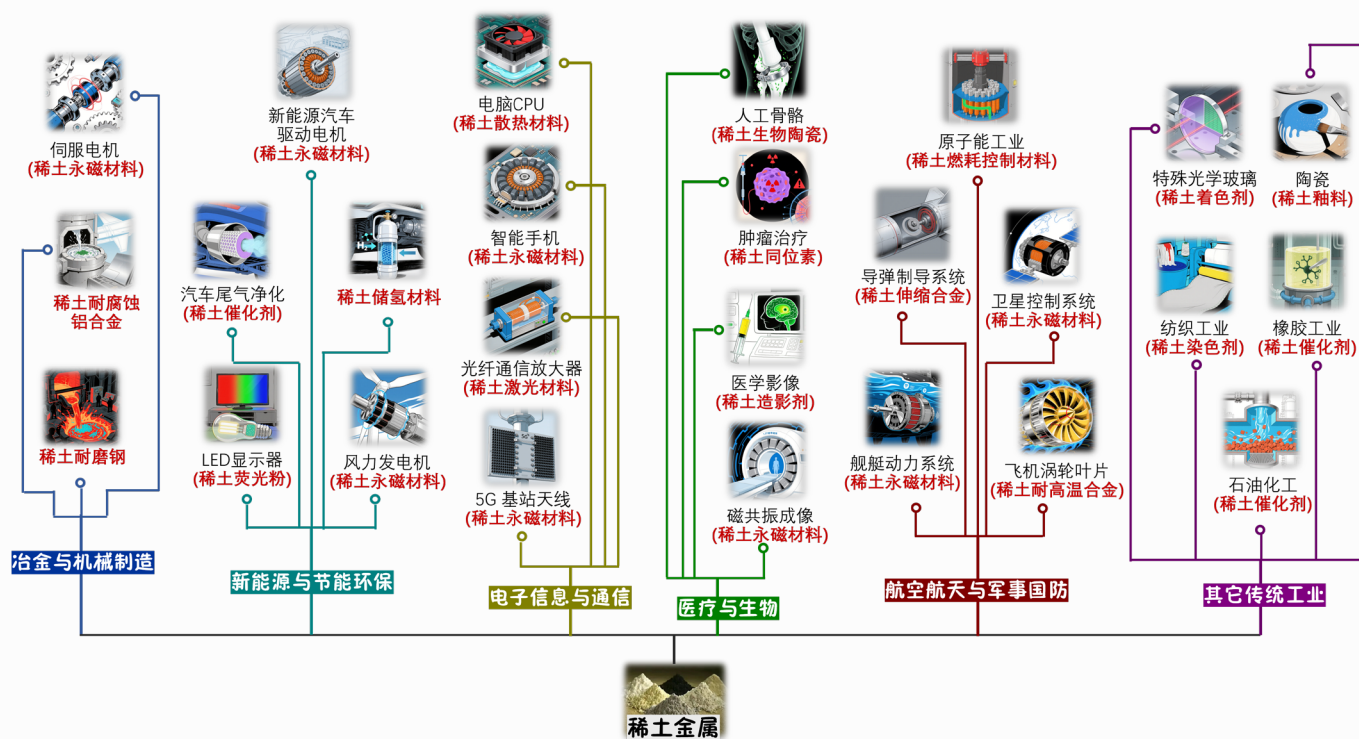
4. 冶金“医师”

在行业内有一个比喻:如果石油是“工业的血液”,那稀土就是“工业的维生素”,这是由于稀土元素之于材料,就如同维生素之于生命体,量微而功巨,通常仅需添加材料总质量的万分

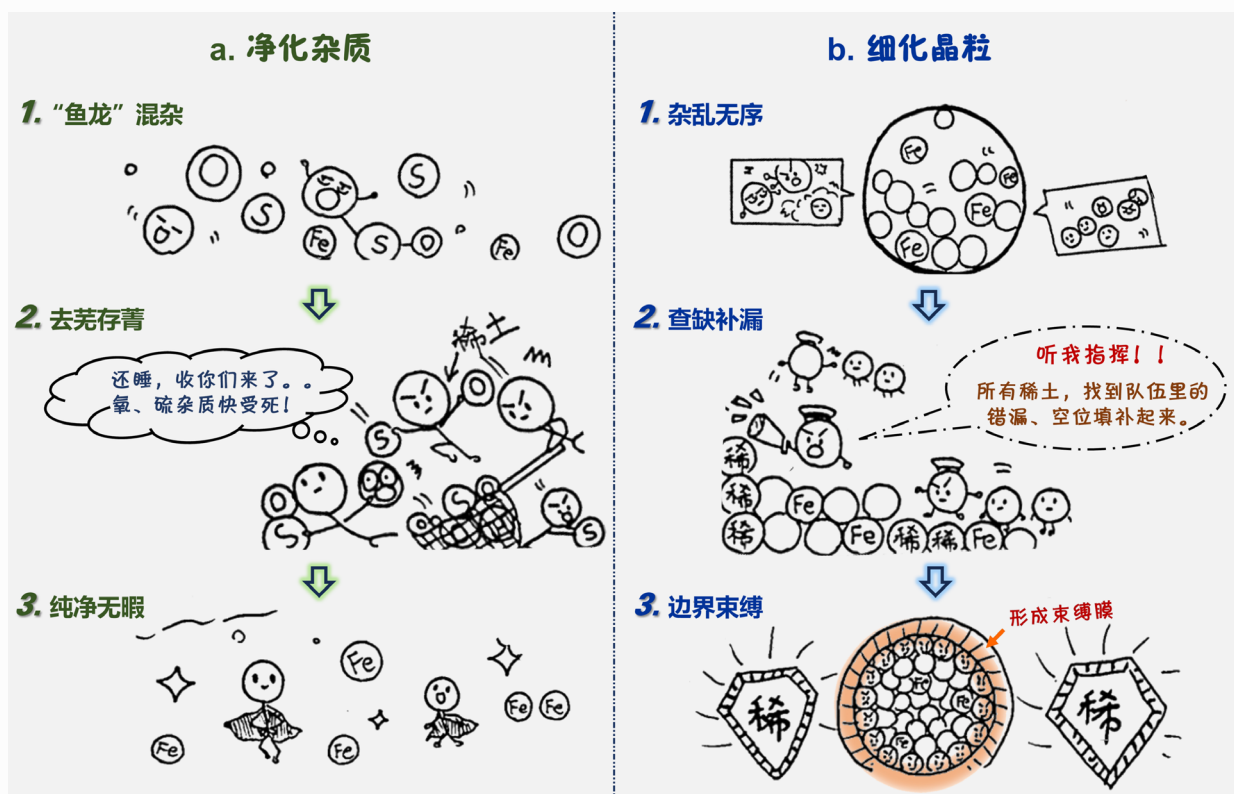
之几到百分之几,就能靶向攻克各类金属材料的“亚健康”问题。

就拿炼钢来说,往钢水里添加钢材质量 0.02%~0.03% 的稀土元素,也就是每吨钢加约 1 勺盐量的稀土,就可以提高钢材的强度、韧性、耐高温性、耐腐蚀性等核心性能^[17]。具体来讲,在传统炼钢工艺中,矿石中或外在环境带来的氧或硫,易与钢材中的铁元素等形成化合物,破坏钢材的连续性和均匀性,导致钢材在锻压时发生脆裂。而稀土元素与氧、硫的亲合力远高于铁元素,可优先与钢液中的硫和氧

等杂质发生反应,形成熔点高、密度小的化合物,这些稀土化合物易上浮成渣,很容易从钢水中筛除,达到净化杂质、提高钢材质量的效果(图 5a)^[18]。另一方面,铁的原子半径约为 1.26 Å (1Å=10⁻¹⁰ m),而稀土元素的原子半径多在 1.8~2.0 Å 之间,显著大于铁原子。这种尺寸差异使稀土元素难以稳定融入铁的晶格,反而更容易堆集在晶格错位、空位处,阻碍了晶粒的迁移,同时通过微合金化在晶粒边界形成束缚膜,抑制晶粒长大(图 5b)^[19],从而保持细小的晶粒尺寸,均匀



①【图 4】稀土元素在各行业领域应用概览



①【图5】稀土元素在炼钢工艺中净化杂质和细化晶粒示意图

细小的晶粒可以使钢材在轧制、锻造等加工过程中变形更均匀，减少开裂风险。

类似的，这些原理在有色金属冶炼中也同样适用，通过添加微量的稀土元素，可以使金属材料突破原有“性能瓶颈”，在高温、高压、强腐蚀等极端环境下稳定工作，为高端装备提供支撑。如航空发动机涡轮叶片需在 1000℃ 以上高温、巨大离心力下工作，传统的镍基合金等，易因“晶粒长大”而脆化，当添加不足 0.5% 的钇后，合金的耐高温强度提升 40%，使用寿命可从 1000 h 延长至 3000 h^[20]；同样，

用于制备火箭燃料贮箱的传统铝合金材料零下 100℃ 已脆化，当在合金中添加 0.2% 的钪，可使其在液氢温度下 (-270℃) 仍保持塑性，避免低温脆裂^[21]。

5. 永磁“骄子”

我们知道，永磁体，也就是俗称的“磁铁”，磁场的获得和保有，跟固体原子中电子的行为有关。电子本身带电，电子的自旋运动产生磁场，当电子自旋朝向相反时，磁力会内部相互抵消，整体不显示磁性，而若朝向一致时，磁力会叠加增强，整体则会显示磁性^[22]。比如铁原子，就会“偏好”让自己的 4 个未成对

电子自旋朝向总是倾向于相同，所以每一个铁原子都好比一根小磁针，因而赢得了成为磁铁的先天禀赋。

在永磁材料领域，传统的铁氧体材料的磁能积大概只有 4 MGOe^[23]。这是啥概念呢？就是这点儿磁力，只能算得上“永磁圈儿”里的“经济适用款”，磁力需求小的时候够用，比如冰箱贴、门吸等，若想让它产生强磁场，就得做得庞大、笨重，根本无法满足现代设备“小型化、高磁效”的需求。而稀土永磁材料，如钕铁硼永磁体（Neo 永磁体）的磁能积可达 50~60 MGOe，是



①【图6】Neo 永磁体磁性强化机制

传统磁体的 10 倍以上^[24]。这是由于在钕铁硼永磁体中^[25]，钕原子的 4f 电子层有 7 个未成对电子，比铁原子的未成对电子还要多，且这些电子的自旋方向高度一致，就像一群整齐划动的“小磁针”，为磁铁提供了强大的磁性基础。其次，钕原子凭借独特的电子云结构（图 6b），会对周围铁原子产生强烈的“磁耦合作用”，如同无形的手将铁原子的磁矩统一“掰”向同一方向，让无数微小的磁性区域整齐排列，形成叠加的强磁场^[26]。最后，在钕铁硼的四方相晶体（ $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ）中，钕（Nd）原子位于特定的晶格节点上，与铁、硼原子形成牢固的化学键（图 6c）。这种结构能牢牢锁住磁性区域的方向，即使在外力或温度干扰下，也不易“跑偏”，从而保证了磁铁的永磁特性^[27]。

在室温环境下，Neo 磁体是迄今最强的永磁体，已然成为现代高新技术领域的关键材料：新能源汽车驱动电机用它提升能效，增加续航；风电设备靠其实现高效发电；医用核磁共振成像（MRI）设备依赖它产生强磁场成像；手机和耳机等电子设备用它实现振动、发声等功能。

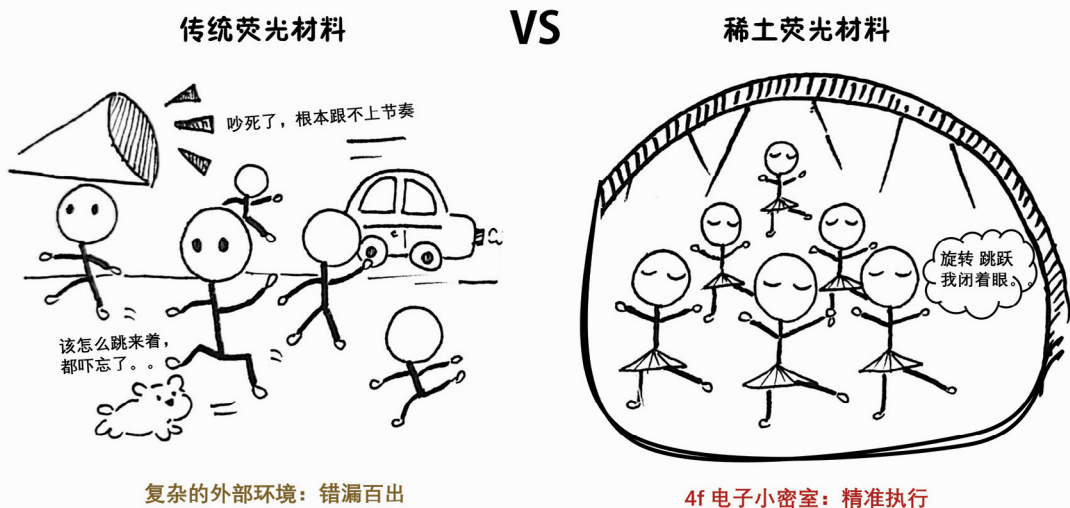
6. “稀”有特“色”

在荧光显色材料领域，其发光原理，简单来说，就是材料里的分子或原子，会先“抓住”周围的能量，比如紫外线、电子束及可见光等，这些能量会让内部的电子从“低能量状态”跳到“高能量状态”，相当于电子“跳”上更高的“台阶”。然而，电子在高“台阶”上待得并不舒服，在短暂调整状态后，电子会重新跳回最初的低能量状态，这时多余的能量就会以“光”的形式释

放出来，也就是我们看到的荧光。

传统化学荧光材料，主要依赖分子层面的电子运动，这种电子运动完全靠分子本身的结构“撑着”，如果外界温度变化，或者有其他化学物质干扰，分子结构容易被“打乱”，电子运动就会失常，荧光可能变弱、变色甚至消失（图 7a）。而稀土荧光材料则不同，它的发光靠的是原子内层 4f 轨道的 f-f 电子跃迁^[28]，我们前面曾提到，稀土元素 4f 电子被外层电子所屏蔽，如同藏在特殊的电子密室里，其电子跃迁几乎不受外界环境的影响，凭着“色纯度高、响应稳定”的优势，在显像技术革命中大放光彩，一步步推着我们从模糊走向极致清晰（图 7b）。

要知道，早期彩电没有稀土荧光粉时，红光主要靠硫化镉



①【图7】传统荧光材料与稀土荧光材料“电子小密室”特点对照

(CdS) 等材料, 发光偏橙红, 不够纯粹; 绿光则多依赖硫化锌镉 ($Zn_{1-x}Cd_xS$), 容易混进黄色调, 导致红、绿两色都“发灰”“发闷”, 颜色混在一起, 整个画面就像蒙了层雾。直到稀土里的铕(Eu)和铽(Tb)登场, 它们的“电子小密室”能够精准控色, Eu^{3+} 受电子束激发时, 4f 电子跃迁释放的红光波长极为精准, Tb^{3+} 则能发出纯净的绿光, 搭配蓝光荧光粉即可组成完整色域, 让彩电画面从模糊的单色跃迁至细腻的彩色^[29]。来到 LED 显示屏时代, 屏幕像素越来越密, 手机、电视要显示千万种颜色。传统荧光材料在密密麻麻的像素里, 要么颜色串色, 要么用久了就变暗。但稀土的“电子小密室”像装了“稳

定器”, 铕、铽发出的光波长一丝不差, 几百万个像素颜色都一样, 而且耐得住高温, 用很久画面还是鲜亮, 让屏幕从“大而模糊”变成“小而高清”^[30]。直至现在的 Micro LED 技术, 像素小到微米级, 差不多是头发丝的几十分之一。这时候, 普通材料根本难以胜任这么精细的活儿, 但稀土的“电子小密室”自带“定位功能”, 铕、铽的光就能精准匹配微型芯片, 在纳米级空间里稳稳发光, 上百万个像素挤在一起, 画面清晰到能看清布料的纹理、皮肤的毛孔, 造就了目前显示技术的“天花板”。

7. 中国优势 全球称冠

2025 年 4 月 30 日, 《美乌矿产协议》一经传出, 便迅速吸

引全球目光聚焦, 而其中涉及稀土的部分, 更是折射出美国在全球稀土供应链中被中国“卡脖子”的窘迫与焦虑。也正是在稀土资源方面的多重优势, 才能让我国在文首所提及的经贸会谈中紧握王牌筹码。

中国目前是全球稀土资源最丰富的国家, 据美国地质调查局 (USGS) 2025 年 1 月公布数据显示, 2024 年全球已探明稀土资源总储量约为 9000 万吨, 其中, 中国稀土资源储量 4400 万吨, 是世界最大稀土资源国, 占全球总量的 48.9%; 巴西稀土储量位列第二, 为 2100 万吨; 其次是印度和澳大利亚, 稀土资源为 690 万吨和 570 万吨; 而美国的稀土资源仅有 180 万吨 (图 8)^[31]。

此外,中国还是唯一一个能够提供全部 17 种稀土金属的国家,特别是军事用途极其突出的重稀土,中国储量占全球总储量的 90% 以上,让人艳羡。

同时,经过多年的发展,中国还是全球唯一具备稀土全产业链生产能力的国家,全面覆盖采矿、冶炼精炼和加工应用等上中下游三个环节,并且技术优势遥遥领先。依托内蒙古白云鄂博轻稀土主产区、江西赣州重稀土主产区等大型矿床,我国长期承担全球 68% 以上的稀土开采量^[31]和 92% 的冶炼分离产能。特别是在冶炼分离环节,由被誉为“中国稀土之父”“稀土界的袁隆平”的徐光宪院士^[32]独创的“串级萃取”技术将稀土元素分离纯度提升至 99.999%,分离成本较国际水平低 30%,突破了稀土精炼的技术壁垒^[33]。在稀土应用领域,我国已具备规模化生产能力,据中国稀土行业协会报告,2020~2023 年,美国进口的 70% 稀土来自中国;欧洲的稀土磁铁大部分依赖从中国进口,全球 90% 的永磁材料都是 Made in China! 且我国在稀土应用核心技术领域实现多项从“跟跑”到“领跑”的突破,如稀土荧光粉支撑的 Mini LED、Micro LED 等新一代显示技术,国产

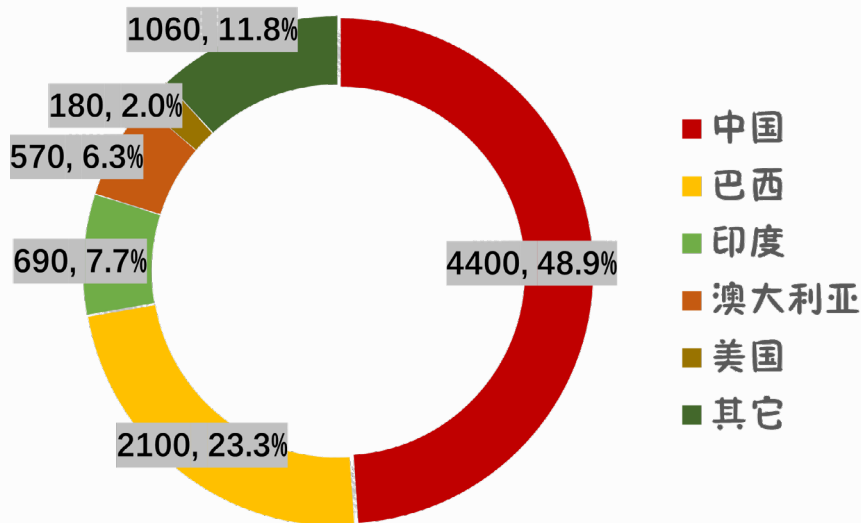


图 8】2024 全球稀土资源储量及占比图示

化率超 90%。

另外,中国率先建立全球最完善的稀土循环利用体系,通过湿法冶金、生物冶金等技术创新,稀土废料回收率从早期的 30% 提升至 95% 以上,实现了将“废弃资源”转化为“二次矿山”,为稀土资源的长期应用提供可持续支撑。

8. 一鸣从此始,相望青云端

稀土,如“万能之土”般,早已渗透进我们生活的方方面面。因其元素结构的特殊性,它的“非凡魔力”不断被解锁,几乎每 3~5 年就有新用途被发现,每六项发明中便有一项与其相关。稀土素有“新材料之母”之称,在材料领域,自是当仁不让的“主

角”,占据了世界稀土消费总量的 70%,工业和信息化部明确指出,稀土永磁和发光等功能材料已成为先进装备制造业、新能源和新兴产业的“刚需”,可以说,没有稀土,新一代材料创新便没了“母体”,诸多高端制造和前沿科技如人形机器人、新能源及低空经济等新兴领域也将沦为空谈。有数据显示,截至 2024 年底,我国智能机器人产业企业超 45 万家,新能源汽车产销量分别达 1288.8 万辆和 1286.6 万辆。这些产业所涉及的关键部件,比如机器人的关节马达等伺服电机系统,要求设备更轻、能量更足、运行更稳,使得这类新兴产业对以高性能稀土永磁材料为代表的新材料,产生了前所未有的需求,

且需求的广度和深度持续拓展。

不仅如此，稀土还被发现具

备类似微量元素的特性，能促进农作物种子萌发、根系生长及光合作用^[34]。或许在未来，在“端

牢中国饭碗”的战略指引下，稀土也能为粮食安全赋能，为全人类创造更丰富的食物资源。

参考文献

- [1] Damhus T, Hartshorn R, Hutton A. Nomenclature of inorganic chemistry: IUPAC recommendations[M]. UK: Royal Society of Chemistry, Cambridge, 2005.
- [2] Krishnamurthy N, Gupta C. Extractive metallurgy of rare earths[M]. Boca Raton: CRC Press: 2016.
- [3] Clarke F W. The data of geochemistry. 5th edition[M]. USA: Geol Survey Bull, 1924: 770.
- [4] Kabata-Pendias A, Boca Raton FL. Trace elements in soils and plants. 4th edition[M]. USA: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2010: 548.
- [5] Gupta C, Krishnamurthy N. Extractive metallurgy of rare earths[M]. Florifa: CRC Press, 2005.
- [6] Li D. A review on yttrium solvent extraction chemistry and separation process[J]. J Rare Earths, 2017, 35(2): 107-119.
- [7] Ramos S J, Dinali G S, Oliveira C. et al. rare earth elements in the soil environment[J]. Curr Pollution Rep, 2016, 2: 28-50.
- [8] Migaszewski Z M, Gałuszka A. The characteristics, occurrence, and geochemical behavior of rare earth elements in the environment: A review[J]. Crit Rev Environ Sci Technol, 2014, 45: 429-471.
- [9] Mori T. Rare earth higher borides, Handbook on the Physics and Chemistry of Rare-earths[M]. Elsevier, 2020, 58: 39-154.
- [10] 王晓敏. 工程材料学. 第4版[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2017.
- [11] Titova S A, Kruglova M P, Stupin V A, et al. Potential Applications of Rare Earth Metal Nanoparticles in Biomedicine[J]. Pharmaceuticals, 2025, 18(2): 154.
- [12] Zheng B Z, Fan J Y, Chen B, et al. Rare-earth doping in nanostructured inorganic materials[J]. Chem Rev, 2022, 122(6): 5519-5603.
- [13] Shen W, Da P F, Guo L C, et al. Rare earth interface structure materials: Synthesis, applications, and mechanisms[J]. Acc Mater Res, 2024, 5(6): 712-725.
- [14] Zhang H, Zhang H. Special issue: Rare earth luminescent materials[J]. Light Sci Appl, 2022, 11: 260.
- [15] Saraci F, Quezada-Novoa V, Donnarumma P R, et al. Rare-earth metal-organic frameworks: from structure to applications[J]. Chem Soc Rev, 2020, 49(22): 7949-7977.

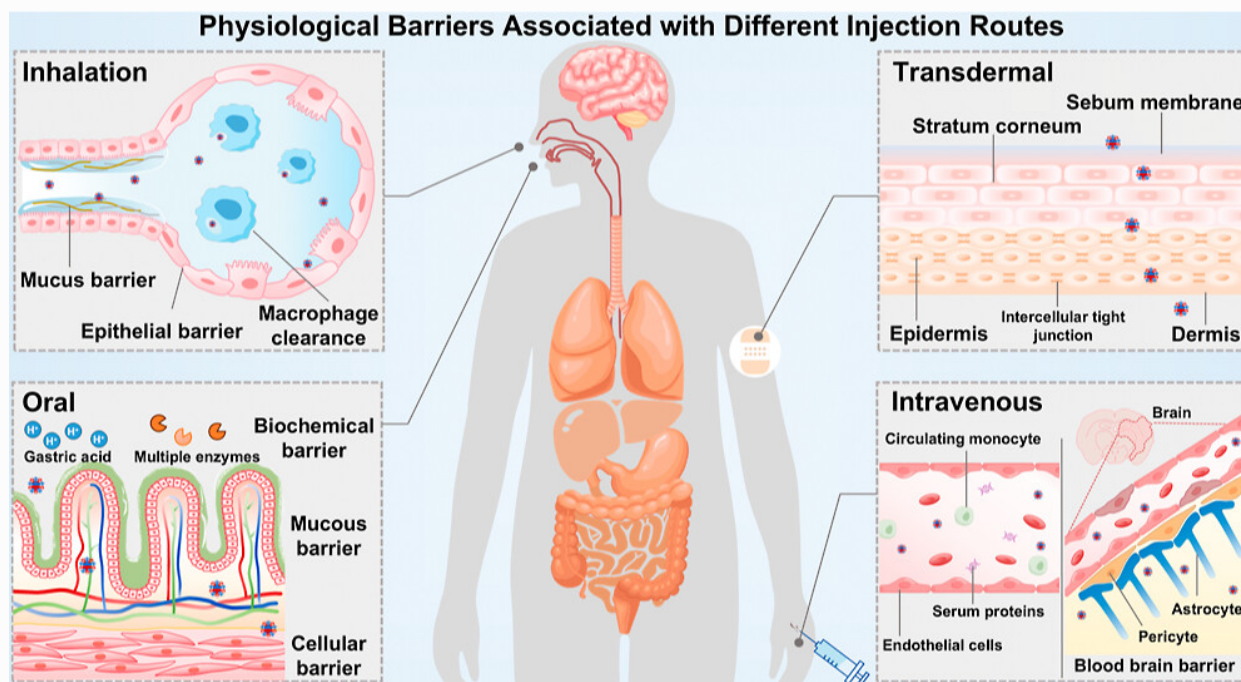


- [16] Nakamura H. The current and future status of rare earth permanent magnets[J]. *Scr Mater*, 2018, 154: 273-276.
- [17] Li H, Ren Q, Zhang L F. Effect of cerium addition on non-metallic inclusions in a high-carbon chromium bearing steel[J]. *J Iron Steel Res Int*, 2023, 30(11): 2254-2266.
- [18] Lu P C, Li H B, Feng H, et al. Improving cleanliness and controlling inclusion characteristics in high-nitrogen stainless bearing steels by optimizing addition order and contents of Mg and Ce[J]. *Metall Mater Trans B*, 2022, 53(3): 1920-1935.
- [19] Qu W, Hou Y, Ren H P, et al. Grain refinement of the CrMnFeCoNi high entropy alloy cast ingots by adding lanthanum[J]. *Metall Mater Trans B*, 2021, 52(3): 1194-1199.
- [20] Sidorov V V. Mechanism of the influence of microadditions on the oxidation resistance of high-temperature nickel alloys[J]. *Met Sci Heat Treat*, 1995, 37: 33-36.
- [21] Patel D K, Sharma V K, Sharma H O. Advancements in aluminum matrix composites: A comprehensive review on the mechanical and microstructural attributes of rare earth elements (REEs) and rare earth oxides (REOs) doped materials[J]. *Trans Indian Inst Met*, 2024, 77(9): 2265-2276.
- [22] Coey J M D. *Magnetism and Magnetic Materials*[M]. Cambridge: Cambridge U. Press, 2009.
- [23] 冯端. *固体物理学大辞典*[M]. 高等教育出版社, 1995.
- [24] Herbst J F, Croat J J. Neodymium-iron-boron permanent magnets[J]. *J Magn Magn Mater*, 1991, 100(1-3): 57-78.
- [25] Buschow K H J. Intermetallic compounds of rare-earth and 3d transition metals[J]. *Rep Prog Phys*, 1977, 40(10): 1179-1256.
- [26] Li H S, Coey J M D. Chapter 1 Magnetic properties of ternary rare-earth transition-metal compounds, *Handbook of Magnetic Materials*[M]. Elsevier, 1991, 6: 1-83.
- [27] Miyake T, Akai H. Quantum theory of rare-earth magnets[J]. *J Phys Soc Jpn*, 2018, 87, 041009.
- [28] Binnemans K. Lanthanide-based luminescent hybrid materials[J]. *Chem Rev*, 2009, 109(9): 4283-4374.
- [29] Shionoya S, Yen W M. *Phosphor Handbook*[M]. CRC Press Inc, 1999.
- [30] Wang L, Fang P, Zhao Z, et al. Rare Earth complexes with 5d-4f transition: New emitters in organic light-emitting diodes[J]. *J Phys Chem Lett*, 2022, 13(12): 2686-2694.
- [31] Mineral Commodity Summaries 2025[Z]. USGS: <https://www.usgs.gov/centers/nmic/products/data>
- [32] 李艳. 稀土人生鞠躬尽“萃”——追记中国“稀土之父”、中科院院士徐光宪[N]. *科技日报*, 2015年04月30日01版.
- [33] Yan C H, Jia J T, Liao C S, et al. Rare earth separation in China[J]. *Tsinghua Sci Technol*, 2006, 11(2): 241-247.
- [34] Ozturk M, Metin M, Altay V, et al. Role of rare earth elements in plants[J]. *Plant Mol Biol Rep*, 2023, 41: 345-368.

PS&T: 基于两性离子的聚合物载体用于 药物高效跨生物屏障递送

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/FJanFpgUmiBhMn0h5Bg2og>



TOC 图 不同给药途径及其生物屏障

一、摘要

尽管聚合物载体凭借其高度可调的理化性质，在药物递送领域展现出巨大潜力，但无论是载体的

功能化设计还是创新给药途径，其递送效率始终受限于无法有效突破体内复杂多重屏障这一关键挑战。在此背景下，含有两性离子的聚合物载体因其

优异的水合能力及抗蛋白吸附特性，展现出了独特的生物屏障穿透性能。因此阐明两性离子化学结构调控载体穿越生物屏障的内在规律，是设计高靶向性递药系统的关键。本综述基于两性离子聚合物载体的设计策略，重点阐述其“结构-性能-效率”构效关系，并分析其经由不同给药途径克服特定生物屏障的作用机制。最后，本综述展望了人工智能如何赋能此类载体的智能化理性设计，以加速其临床转化进程。

二、文章简介

尽管已开发了多种策略用于提高体内药物递送系统的靶向能力，但黏液屏障、紧密的上皮细胞层以及活跃的单核-吞噬细胞系统等多重生物屏障，仍是众多药物递送系统面临的关键挑战。近年来，基于两性离子的高分子载体在克服这些生物屏障方面展现出巨大潜力，已被广泛认为是提升药物递送效率与治疗效果的关键材料体系。

两性离子聚合物作为递送载体的核心优势在于其优异的生物相容性与高效的生物屏障穿透能力：

(1) 其表面的强水合作用与电荷平衡特性，可极大抑制非特异性蛋白质吸附和免疫识别，展现出比聚乙二醇（PEG）或阳离子递送载体更优的“隐形”特性与更低的免疫原性风险。

(2) 两性离子的电中性表面可避免与带负电的生物膜（如细胞膜、黏液）产生静电排斥，从而克服阴离子系统的渗透性限制，显著提升递送效率。

(3) 部分两性离子结构还可通过与磷脂相互作用获得独特细胞膜穿透能力。

本综述系统阐述了如何利用两性离子聚合物（如聚磺酸甜菜碱、聚羧酸甜菜碱、聚磷酸胆碱等）递送系统突破药物递送中的各类生物屏障，内容涵盖不同给药途径的屏障特性、两性离子材料的克服机制，以及提升递送效率的先进策略。

内皮屏障与黏液屏障是药物递送过程中需克服的两大关键障碍。全身给药时，血管内皮阻碍载体的外渗与靶向递送；而在脑部，血脑屏障（BBB）在提供必要保护的同时，也因其极低的通透性严重阻碍了治疗药物的入脑，构成了中枢神经系统疾病治疗的主要困境。黏液屏障则是

黏膜给药（如口服、肺部给药）面临的首要挑战。它不仅是物理屏障，还具有酶解、快速清除及免疫抑制等复杂生物特性。理想的口服递药系统需依次克服胃酸、肠道黏液与上皮屏障，并避免肝首过效应。肺部吸入给药虽能绕过首过效应，但仍需应对黏液清除、肺泡巨噬细胞吞噬及

上皮相互作用等多重障碍，确保药物能有效抵达并作用于靶点。这些复杂且多样的生物屏障共同构成了高效药物递送的主要瓶颈。

而两性离子聚合物又是如何发挥自身优势跨越多种生物屏障的呢？具体而言，其机制可概括为层层递进的级联过程。首先，其卓越的抗蛋白吸附与“隐身”特性，能有效逃避网状内皮系统清除，显著延长体循环时间，确保载体以完整形态抵达靶器官。其次，长循环效应结合肿瘤等病理组织的增强渗透与滞留作用，使载体在屏障界面高效富集。最后，两性离子聚合物通过多重途径实现屏障穿透：针对血脑屏障，可经受体介导的胞吞转运或瞬时调控紧密连接蛋白；针对肠道黏膜，通过调控疏水-亲水平衡，其可凭借与黏蛋白的排斥作用快速穿透黏液层，并经上皮细胞内吞完成跨膜转运；此外，部分两性离子结构可在酸性微环境或酶刺激下发生电荷反转，触发深层组织渗透。该领域未来研究应聚焦将数据科学与临床转化需求相结合——通过构建高通量筛选数据库、机器学习辅助的构效关系预测模型，以及贴近临床场景的屏障穿透评价体系，系统性加速具有高效生理屏障穿越能力的下一代药物递送系统的研发与转化。

本综述旨在深入解析两性离子聚合物载体高效穿透各类生物屏障的机制。核心在于阐明其化学结构与跨屏障性能之间的构效关系，并系统阐述其在不同给药路径中克服特定生理障碍的作用原理。

四、论文信息

Zwitterion-Based Polymeric Carriers for Efficient Drug Delivery across Biological Barriers.

Meng He, Qiongya Huang, Yuan Zhang, Xing Guo*, Shaobing Zhou

通讯作者，郭星，西南交通大学医学院

原文链接：<https://doi.org/10.1021/polymscitech.5c00146>

三、综述目录

1. 前言

2. 静脉给药生物屏障

- 2.1. 静脉注射两性离子纳米药物靶向肿瘤
- 2.2. 静脉注射两性离子纳米药物靶向中枢神经系统
- 2.3. 静脉注射两性离子纳米药物靶向脾脏

3. 口服给药生物屏障

- 3.1. 口服两性离子纳米药物治疗癌症
- 3.2. 口服两性离子纳米药物治疗糖尿病
- 3.3. 口服两性离子纳米药物治疗结肠炎

4. 肺部吸入给药生物屏障

- 4.1. 用于穿透肺黏液的两性离子聚合物

5. 用于穿透其他生物屏障的两性离子聚合物

- 5.1. 两性离子聚合物用于透皮递药
- 5.2. 两性离子聚合物用于腹腔递药
- 5.3. 两性离子聚合物用于瘤内递药
- 5.4. 两性离子聚合物用于长效植入

6. 结论和展望

该成果以“Zwitterion-Based Polymeric Carriers for Efficient Drug Delivery across Biological Barriers”为题，于2026年3月18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

四、作者团队



郭星，本文通讯作者

西南交通大学医学院博导、教授，从事生物医用高分子材料的研究。

主持国家自然科学基金 3 项及国家重点研发计划子课题 1 项。获得国家青年特聘专家、中国科协青年托举人才及四川省特聘专家称号。研究成果以第一作者或通讯作者在 *Advanced Materials*, *Progress in Materials Science*, *Nano Today*, *Nano Letters* 等著名杂志发表文章多篇。担任 *Chinese Chemical Letters* 青年编委、*Smart Materials in Medicine* 客座编辑，中国生物材料学会生物医用高分子材料分会、智能仿生生物材料分会委员及四川省纳米药物专委会委员。



何朦，本文第一作者

西南交通大学助理教授、硕士生导师。

2024 年 4 月博士毕业于上海交通大学。研究方向集中于功能性生物医用高分子的设计合成及其在癌症等重大疾病中的诊断与治疗，在 *Advanced Functional Materials*, *Advanced Science*, *Advanced Healthcare Materials* 等期刊上发表研究论文 10 余篇，主持国家自然科学基金青年科学基金项目（C 类）1 项。

《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：欧阳瑞镛
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