

从洗菜开始，攻下“看似不可能”的课题

■本报记者 李晨阳 见习记者 孟凌霄

5 年前的夏天，中科院生物物理研究所园区回荡着悠长的蝉鸣。当时 22 岁、正在读大四的刘昊走进研究员柳振峰的办公室，想要到柳振峰实验室实习。

柳振峰在电脑上打开一张 PPT，上面是植物光合作用的分子机制图。在植物细胞中，叶绿体像一个迷你“生产车间”，其中内部培养的“工人”——蛋白质很少，90%以上的蛋白质要从外部引进。这些蛋白质要进入叶绿体发挥作用，需要经历一段复杂的运输过程。

“你知道叶绿体膜上这个帮助蛋白质‘进门’的结构是什么吗？”柳振峰试探地问，这个知识点有些冷僻，他没指望刘昊能答上来。

没想到，眼前这个年轻人回答得头头是道——这正是他感兴趣的研究方向。就这样，师生初见的短短几个小时里，刘昊就赢得了柳振峰课题组的人场券，并确定了未来 5 年的博士研究方向。

近日，27 岁的刘昊以第一作者身份在《自然》发表论文，解析了叶绿体蛋白质传递器的组装原理。这时柳振峰才笑着承认，当初他有意“忽悠”了一下这个小伙子：“我没告诉你这个课题到底有多难。”

被“忽悠”来的科研苗子

光合作用就是植物通过叶绿体，把光能转化为化学能的过程，是地球上最重要的化学反应。

“在光合作用中，植物如何做到高效吸能、传能、转能，是科学研究的核心问题之一。”柳振峰对《中国科学报》解释，叶绿体中有着复杂空间结构的叶绿素蛋白复合物是重要的能量“传递器”和“转换器”。

叶绿体中蛋白质的来源大致可分为两种，其中不到 10%的蛋白质是由叶绿体内部基因编码的，90%以上的叶绿体蛋白质是由细胞核中基因编码的。后者要进入叶绿体，需要连续穿越叶绿体特殊的内、外双层膜结构。为它们开辟道路的是名为 TOC-TIC 的蛋白质转运复合体。位于叶绿体外膜上的转运体被称为 TOC，位于内膜上的转运体则被称为 TIC。

过去 30 年间，组成 TOC 和 TIC 的不同蛋白亚基已被陆续发现，而二者构成的 TOC-TIC 超复合体如何组装，如何跨越叶绿体内、外膜，又如何组成跨越双层膜的蛋白质转运，这些关键科学问题还未能研究清楚。

“在真核生物体中，叶绿体和线粒体是具有双层膜结构的细胞器，像叶绿体 TOC-TIC 这样能够跨越双层膜的蛋白质转运复合体比较罕见，并且它还具有非常重要



由于常洗菠菜，刘昊的白大褂都绿了。
课题组供图

的生物学功能。它本身的组成和结构非常复杂，而且在细胞内的含量很低，因此研究难度很大。”柳振峰说。

然而看着眼前这个“初生牛犊”般的科研苗子，柳振峰怕把他“吓跑了”，有意在表述上“打了个折”。

“这个课题很有趣，不过可能做四五年也不一定有结果，你愿意来吗？”刘昊接受了挑战：“当时找到柳老师，就是出于对植物膜蛋白的兴趣，所以不管 5 年还是更久，只要能做出来就行。”

科研攻关从“洗菜”开始

对冷冻电镜研究来说，样品的质量极为关键。“巧妇难为无米之炊”，很多时候，同样拥有冷冻电镜的研究单位，之所以有的能快速取得高质量结果，有的迟迟难以突破，主要瓶颈往往就在样品的收集和制备环节上。

在植物和藻类中，叶绿体 TOC 和 TIC 蛋白的天然丰度比较低。如何从叶绿体中获得又多又好的 TOC-TIC 超复合体做实验，成了研究初期最大的难题。

植物叶绿体的优质来源是菠菜。于是去菜市场拎 5 斤菠菜，再回实验室把一大盆菠菜清洗、分离、提纯，这一系列操作，成为刘昊做研究的常态。

久而久之，这个小伙子成了洗菠菜的“熟练工”。要想洗得干净，就得用蒸馏水反复冲刷，每一片绿叶都清洗 6 遍，还不能使用超声

波等技术清洗，只能轻柔手洗，以使 TOC-TIC 超复合体形态完整。

刘昊自嘲地说，洗菜已经成了“职业病”，即使回家洗菜、择菜，也保持着实验室的手法和速度。

但藻类叶绿体样品的收集，就没这么容易了。

柳振峰团队曾经向国际藻资源中心订购实验所需的莱茵衣藻。然而，这株漂洋过海的藻种，经历了被喷酒精和消毒等波折到达研究所时，几乎“没剩几个活细胞”，险些被扔进垃圾箱。

抱着“死马当活马医”的心态，刘昊还是把藻种放进安装了光源的恒温摇床中摇着。“我没事就去看它，一直都长得很缓慢，但突然有一天，它变绿了。”

另一株来之不易的藻种，则多亏了一位好心的瑞士老先生。他是瑞士日内瓦大学教授 Jean-David Rochaix。2018 年召开的第二次世界生命科学大会上，Rochaix 得知柳振峰课题组正在开展这方面的工作后，便主动提出共享自己实验室的带有特殊亲和标签的藻株，用这个藻株做实验，意味着将大大简化提取步骤，加快实验进程。

但由于种种原因，在长达两年的时间里，他们一直没能拿到这个藻株。在 Jean-David 的不懈坚持和争取下，藻株终于辗转寄到了柳振峰课题组。

获得足够的实验样品后，他们很快使用冷冻电镜技术，对 TOC-TIC 复合物中的孔道特征进行了细致观察和分析，并揭示了叶绿体蛋白质传递器的组装原理。经过半年多的反复审稿修改，这项研究终于在《自然》发表。

“与一流科学家开放地交流和合作，能促成很多出色的成果，这株跨越大洋的藻种证明了这一点。”在柳振峰看来，这次研究结果的发表离不开国际交流和合作，“我们毫不犹豫地吧论文初稿发给 Rochaix 教授，并在征得他的同意后，把他的名字写在了论文的共同作者中”。

算上 Rochaix，这篇论文只有 4 位署名作者。博士生刘昊、李安节分别为论文的第一和第二作者，柳振峰则为通讯作者。

柳振峰表示，自己课题组产出的论文作者人数偏少，与科研的不同组织模式有关。他们这种“小团队作战”，参与者都必须承担大量工作，但往往有“高密度”的收获。

对此，刘昊和李安节深有体会。“在我们课题组，柳老师对我们的要求是，每个人都要完整掌握实验的全套流程。”李安节说，“这样会很辛苦，但对我们的成长非常有益。”

实验后期，李安节主要负责分子动力学模拟，但这一体系不同于传统结构解析，还需要有扎实的计算机科学、生物化学和生物物理学等学科基础。李安节花了两周时间，一头扎进新领域的文献海洋。“程序跑通的那一刻，真感觉挺厉害的！”在这个课题组，发论文的效率也许不是最高的，但人才培养的效率并不低。

不要只摘“低垂的果实”

在柳振峰看来，从结构生物学的传统优势出发，阐明光合作用微观机理，是一项“值得投入几代人”的研究。

过去 200 余年间，国际上与光合作用相关的研究成果已经 10 余次问鼎诺贝尔奖。其中，光合膜蛋白的三维结构研究一直是国际公认的高难课题，被认为是一个国家结构生物学研究水平的重要标志。主持完成我国第一个膜蛋白晶体结构测定的科学家，正是柳振峰的导师——中国科学院院士常文瑞。

1998 年，柳振峰来到生物物理所常文瑞课题组，选择了一个“看似不可能”的课题——菠菜捕光复合物的结晶和结构解析。在延期毕业近一年后，柳振峰终于在《自然》上发表了得到国际同行高度认可的论文。

2018 年，柳振峰在实验室第一次见到刘昊时，也抛出了一个“看似不可能”的课题。如今，时隔近 20 年的两篇《自然》论文，串起了 3 代结构生物学者的科研人生。

过去解析一个分子结构需要几年时间，如今随着冷冻电镜和深度学习技术的快速发展，仅需几个星期甚至几天就能完成。那么，结构生物学研究背后的真正问题是什么？

刘昊记得，柳老师总挂在嘴边的一句话是，不要只摘“低垂的果实”。因此，柳振峰招收学生时，从不关注对方发过几篇论文，只关注对方“愿不愿动脑筋、会不会提问题”。在他的课题组，没有发表论文的数量要求，只关注一项研究是否把科学知识的边界往前推动了一大步。

对刘昊来说，结构生物学研究最令他激动的一刻，不是得知文章被《自然》接收，而是解出 TOC-TIC 超复合体电镜密度的一刻。“我也能解出这么难的问题？”与探索未知的收获相比，在顶刊发表论文就显得“平淡多了”。

正如柳振峰所说，“解析结构并不是我们的目的，更重要的是发现结构背后的规律性原理。结构生物学真正的核心在于提供开创性框架，给后来者带来新的启发、创造新的起点”。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1038/s41586-023-05744-y>

发现·进展

东南大学

研发全属性凝胶电子皮肤

本报讯（记者陈彬）东南大学电子科学与工程学院教授吴俊课题组研发了一种水驱动机械性能可调的全属性凝胶电子皮肤，可以实现多信息的集成耦合。相关研究成果近日在线发表于《美国化学会志-纳米》。

吴俊介绍，电子皮肤要具备皮肤的形态柔软、可拉伸等特征，同时具备感知温度、压力等功能。目前，电子皮肤研发面临两大挑战，一是如何提升单个器件性能的稳定性，二是如何将多种信息进行集成耦合。

基于多材料异质改性蚕丝蛋白体系，研究团队首次提出全皮肤理化（可修复、可降解、弱酸抑菌性、防火性）-电（压力、温度、湿度、应变、接触感知）复合功能属性的电子皮肤，具备类皮肤的移植重构能力。

基于团队多年仿生多模软触觉传感器研究，此次研发的新型皮肤可应用于机器人皮肤，以展示其在捕获多种刺激信息、重构配置所需功能方面的高度类皮肤属性。同时，其类皮肤属性具备优异的皮肤兼容性，可用于可穿戴皮肤，辅以深度学习后还可以实现实时动态手势识别。

“多种信息在分别感知后还需要融合在一起，从而建立对皮肤接触物体 / 环境的更精准认知。”吴俊表示，对于人类来说，处于一个陌生环境时，可以借助视觉、听觉、触觉等多感官进行认知，而现有机器人往往更多依赖视觉，仅利用摄像头建立对周围环境的认知，这离重建机器人全感知仿生域仍有很大差距。因此，在非结构环境，即陌生环境之下，需要借助这种新型电子皮肤赋予机器人多维感知能力。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1021/acsnano.2c09851>

中科院合肥物质科学研究院等

北半球气溶胶光学厚度近 20 年呈下降趋势

本报讯（记者王敏）近日，中科院合肥物质科学研究院研究刘东团队和安徽理工大学教授唐超礼合作，利用近 20 年卫星数据，开展气溶胶光学厚度时空分布研究，发现北半球气溶胶光学厚度近 20 年的长期变化呈小幅下降趋势。这种下降趋势在中国东南部尤其明显，且全球气溶胶光学厚度以北纬 17° 为对称轴分布。该研究成果近日发表于《大气环境》。

大气气溶胶光学厚度（AOD, 550 纳米波段的气溶胶光学厚度为 AOD₅₅₀），是表征大气浑浊程度的关键物理量。它是天气、气候和地球能量收支平衡研究关注的重要参数，也是确定气溶胶气候效应的重要因素。通常高的 AOD 值预示着气溶胶纵向积累的增长，导致大气能见度降低。

此次研究分析了国际地球观测系统 TERRA 和 Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪探测的近 20 年 AOD₅₅₀ 数据，系统获取了全球气溶胶光学厚度的全球分布和时空变化特性。研究发现，北半球气溶胶光学厚度近 20 年的长期变化呈小幅下降趋势，在中国东南部尤其明显。亚洲北部、印度半岛、阿拉伯半岛南部和东部的气溶胶光学厚度呈明显上升趋势。在中、低纬度地区，气溶胶光学厚度的全球分布并不是关于赤道对称的，而是向北偏移约 17°。全球气溶胶光学厚度在北纬 17° 达到最大值，然后向南北两极随纬度先显著减小，后逐渐平稳。

在同一纬度地区，气溶胶光学厚度随经度的变化不同，在中纬度地区，气溶胶光学厚度在北半球随经度变化明显，而在南半球随经度变化平缓。在高纬度地区，南半球气溶胶光学厚度随纬度的升高而增大，北半球气溶胶光学厚度随纬度的升高而减小，并且南半球的气溶胶光学厚度随纬度变化比北半球快。

气溶胶光学厚度在南北半球均呈现季节性变化，北半球气溶胶光学厚度显著高于南半球，且最大值都出现在各自半球的春季，最小值都出现在各自半球的秋季。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2023.119722>

中科院海洋研究所

开发可独立供能的摩擦纳米发电机

本报讯（记者廖洋 通讯员王敏）近日，国际学术期刊《纳米能源》在线报道了中科院海洋研究所绿色能源电化学腐蚀防护研究的最新成果。该所海洋环境腐蚀与生物污损重点实验室从推动实现电化学腐蚀防护过程绿色化出发，面向海洋波浪能利用，开发了可独立供能的摩擦纳米发电机阴极保护系统。

金属腐蚀严重影响海洋钢结构服役寿命，电化学防护是延长金属服役年限的重要手段。然而传统的阴极保护存在能源和资源浪费、环境污染等问题。摩擦纳米发电机可收集和捕获周围环境中的机械能，并能将其转化成电能。海洋环境存在着丰富的可利用机械能，如风能、波浪能、潮汐能等，这为利用摩擦纳米发电机实现电化学腐蚀防护绿色化提供了便利的能量来源。

聚焦复合电介质的电荷转移机制，综合考虑电荷产生、传输、俘获和耗散等因素，研究团队设计了一种复合电介质材料，并在此基础上设计了可将周围环境中的机械能转化为电能的摩擦纳米发电机，开发了新型阴极保护系统，展示了其在电化学领域的应用潜力。同时，研究团队设计了一种原位微电解池观察系统，对阴极保护效果进行了评价。

研究结果表明，摩擦纳米发电机可作为独立电源提供电化学阴极保护。该研究为高性能摩擦纳米发电机复合介质的开发提供了有益指导。

相关论文信息：
<https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2023.108345>

一箭四星 车轮式卫星编队发射成功

本报讯（记者沈春蕾）3 月 30 日，银河航天承担研制的 4 颗干涉合成孔径雷达（InSAR）卫星（宏图一号 01 组卫星）在太原发射成功。

《中国科学报》从银河航天获悉，本次任务的 4 颗卫星是由一颗主星和 3 颗辅星组成，是国际上首个四星编队飞行的 X 波段干涉合成孔径雷达对地成像系统。该组卫星在轨构成国际上首个车轮式卫星编队，其中主星重量约为 320 千克，辅星单星重量约为 270 千克。

为什么称其为车轮式卫星编队？银河航天相关负责人介绍，此次发射的 4 颗卫星犹如在太空中飞行的车轮，主星位于车轮中部，3 颗辅星均匀分布在车轮轮毂上，采用星间通信

链路和相位同步链路，在辅星与主星相距仅几百米的情况下，通过精密的轨道控制，保证卫星编队在轨构型的稳定性和空间安全性。相对于传统的干涉卫星系统，车轮式编队具有编队构型相对稳定、干涉基线多、测绘效率高的优势。

该组卫星具备对全球非极区进行 1：5 万比例尺测绘能力，可以快速高效进行全球陆地高精度测绘；具备毫米级形变监测能力，能够为地面沉降、塌陷、滑坡等灾害的勘查和防治提供数据支撑，是早期识别复杂地区重大地质灾害隐患的利器；具备亚米级高分宽幅成像能力，可全天候和全天时对地高质量成像观测，整体技术达到国际领先水平。

突破半世纪极限 飞行器减阻的答案在沙漠

本报讯 日前，西北工业大学空天微纳系统创新团队在飞行器减阻方面取得突破性进展。该团队通过模仿我国库姆塔格沙漠特有的舌形分形沙垄结构，设计出仿沙垄舌形多层分形减阻微纳结构。该结构减阻率较之前国际报道的最好水平提高了 52%，减阻风向摆动角度从 35° 增加到了 60°，减阻性能突破半世纪以来小肋气动减阻技术性能极限。

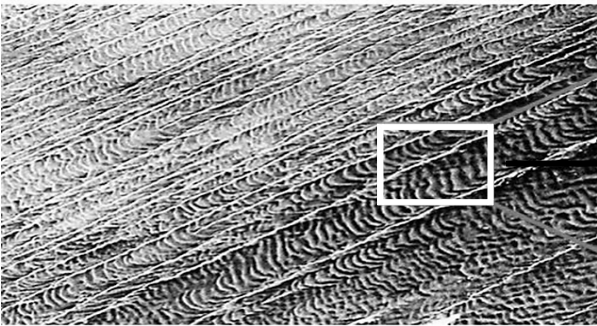
近年来，区别于通过改变飞机气动布局实现减阻的传统手段，国内外专家针对改变飞机表面微观结构实现减阻开展了深入研究。如汉莎航空技术公司通过仿生“鲨鱼皮”研制出一款飞机“贴膜”，经试验应用于波音 747-400 飞机上，可有效降低飞行摩擦阻力。

但仿生“鲨鱼皮”结构在实际应用中存在着气动减阻率较低、风向鲁棒性较差等问题，即在风向发生变化时很难继续保持原有的气动减阻性能。

为此，空天微纳系统教育部重点实验室主任苑伟政与何洋教授团队经过长期比对分析，基于相似准则提取条件特征，最终在茫茫沙漠找到了解决方案。

“沙粒在风的搬运堆积下自然形成沙垄，并在沙垄表面形成了具有一定起伏规律的地

库姆塔格沙漠沙垄形状特征。
西北工业大学供图



貌结构。而自然界遵循最小阻力原则，即所有物质都会沿着最小阻力路径运动。这说明风在通过这些地貌结构形成的路径时能量损失最小，也就意味着这种沙垄结构表面对风的阻力最小。”何洋解释。

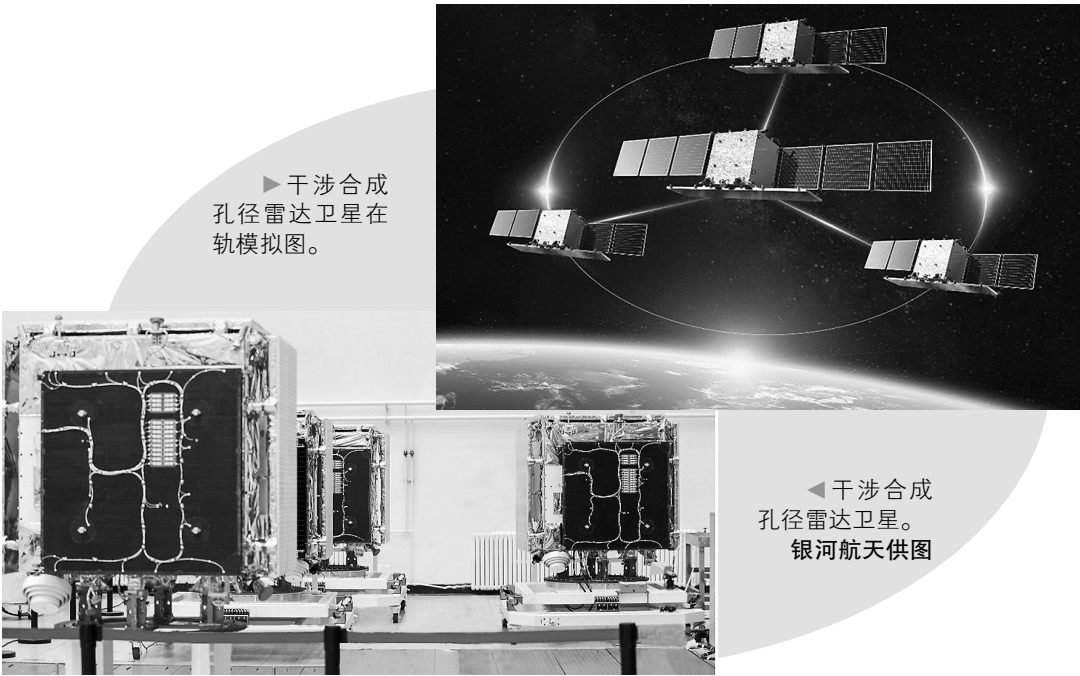
此后 5 年，团队多次前往新疆、甘肃、内蒙古的沙漠开展实地考察，分析沙丘形态、沙垄结构、沙粒特征等，掌握了大量第一手数据，最终选定库姆塔格沙漠作为研究对象。

库姆塔格沙漠横卧于阿尔金山与罗布泊之间，受独特地形影响，8 级以上大风天数占全年近 1/3，且来风方向并不固定，因此其沙

垄表面形成了世界独有的“舌形分形结构”。这种特殊的风向条件和不同寻常的结构赋予了团队研究灵感。

研究团队基于无量纲黏性长度的缩放，经建模及模拟验证设计出了仿沙垄分形微纳结构。针对现有的微纳结构加工方式灵活度低、难以实现复杂构型加工的问题，团队在前期掌握了 MEMS（微机电系统）芯片制造技术优势的基础上，创造性地提出基于多重掩模的三重光刻方法，有效提升加工精度与效率，实现了多层高深异构复合微纳结构的精确制造。

结构制造成功，但如何精确测量出结构



干涉合成孔径雷达卫星。
银河航天供图



表面极小量级摩擦力以验证减阻性能，成为团队面临的新问题。

团队自主研发、设计搭建了国际首座高分辨力微纳减阻测量风洞，为微纳结构流动测量提供有效手段，该系统总剪切力分辨力精确至 2.5 × 10⁻⁴ N，与人的呼吸气流作用在一张名片表面的气动摩擦力大小相当，为公开报道的国际风洞剪切力测量最好结果。

最终翼型叶栅空气动力学国家级重点实验室出具的检测报告表明，仿沙垄减阻微纳结构蒙皮具有显著的减阻效果，超过已知公开报道的最高水平。

（严涛 张行勇）