



发酵蛋白中的蛋白含量高达40%—80%，含有多种维生素、纤维素、碳水化合物、脂类、矿物质，以及丰富的酶类和生物活性物质等，且不含胆固醇，对心脑血管疾病患者更加友好。

**李德茂**  
中国科学院天津工业生物技术研究所研究员



视觉中国供图

# 未来我们吃的“肉”可能是微生物造的

◎本报记者 陈曦

2月19日，科技日报记者获悉，Deep-Tech深科技发布了《2023合成生物学在食品微生物制造中的应用与前景研究》报告。报告聚焦合成生物技术在新食品中的应用，其中，通过发酵蛋白技术生产替代蛋白受到广泛关注。

一直以来，在健康与环保双重需求的驱动下，发酵蛋白产业规模也在不断扩大，由微生物发酵生产的替代蛋白也逐步应用到肉、功能饮料、纯素奶酪等各种产品中。

## 发酵蛋白“肉”健康又环保

肉类是人类获取蛋白质的主要来源之一，随着人口数量增长、城市化进程加快，全球植物蛋白和动物蛋白人均需求量和年需求量均显著增长。传统肉类的生产消耗大量淡水、土地资源，并增加温室气体的排放。以牛肉为例，生产1千克牛肉需消耗15吨水，排放36千克—300千克当量的二氧化碳，生产1千克牛肉所需的土地面积为1千克粮食生产所需土地面积的13倍。传统肉类生产方式难以满足人类对肉类蛋白的可持续需求。动物肉，特别是“红肉”富含胆固醇与饱和脂肪，摄入过多会增加肥胖及心脑血管疾病产生的风险。因此，人类一直在寻找替代蛋白，以期制造出健康又环保的“肉”。

目前替代蛋白主要有三类：植物蛋白、细胞蛋白、发酵蛋白，其中发酵蛋白最具发展前景。

“发酵蛋白也叫微生物蛋白，是一种以葡萄糖、淀粉、糖蜜、合成气、二氧化碳等为底物，利用微生物发酵方式生产的蛋白。”中国科学院天津工业生物技术研究所李德茂研究员介绍，发酵蛋白中的蛋白含量高达40%—80%，含有多种维生素、纤维素、碳水化合物、脂类、矿物质，以及丰富的酶类和生物活性物质等，且不含胆固醇，对心脑血管疾病患者更加友好。

“在口感上，相比于大豆为原料的植物蛋白，发酵蛋白无豆腥味。与利用动物干细胞制造的细胞蛋白相比，发酵蛋白成本也更低。”李德茂解释，蛋白质的主要成分是氨基酸，不同肉类的氨基酸比例不同，

通过调控微生物可以模拟生产出不同比例氨基酸的蛋白。例如，利用发酵蛋白制作的鸡肉，其在口感、香味、质地、咀嚼特性等方面的仿真度可达85%左右。

在制作工艺方面，人们一般利用含碳、氮、氧等元素的低成本原料，比如秸秆、工业废气、合成气以及二氧化碳等，通过控制发酵罐的温度、酸碱度和营养条件，来生产发酵蛋白。

“发酵蛋白的生产效率非常高，有研究表明，微生物发酵生产蛋白的速度是植物的500倍，是动物的2000倍。”李德茂介绍，一亩大豆田每年可收获约130千克大豆，获得52千克植物蛋白。而利用100吨发酵罐进行微生物发酵，一年能生产近100万千克发酵蛋白。

此外，发酵蛋白转化率较高。李德茂表示，通过微生物发酵方式利用1千克淀粉可以生产出190—200克蛋白，然而用1千克淀粉喂养家禽、家畜，仅能分别生产出47克和14克蛋白。

“发酵蛋白可以实现‘变废为宝’和高效的生物制造，与之相比，生产植物蛋白仍然需要以大豆为原料。”李德茂表示，目前我国每年要进口1亿吨左右的大豆，要实现进口大豆的国内生产，额外需要7.6亿亩土地，并消耗大量的水和化肥等生产资料。

细胞蛋白生产虽不受原料的限制，但培养条件苛刻，科研人员需从动物体内提取干细胞，并利用血清等多种营养物质“喂养”，使其不断“成长”，因此生产成本较高。

## 还能用于饲料制造和医疗领域

“目前，发酵蛋白也有应用于饲料和医疗领域的潜力。”李德茂介绍。

国际上，发酵蛋白食品层出不穷。自20世纪80年代开始，英国品牌Quorn就开始利用发酵蛋白技术进行食品开发。Quorn利用高通量筛选技术，用丝状镰孢菌发酵出高纤维、低饱和脂肪的优质蛋白。最早上市的产品为健身蛋白粉，2011年Quorn发布了第一款发酵蛋白“肉”汉堡，近来又推出了香肠、肉卷类产品，深受消费者喜爱。

美国公司Perfect Day利用微生物来制造乳清、酪蛋白等，模拟出真正的牛奶。而后该公司又推出了首款生物制乳蛋白冰淇淋，其口感和质地与牛奶冰淇淋无异。

Clara Foods是全球第一家生物合成蛋清蛋白的美国公司，该公司利用酵母菌生产蛋清蛋白作为烹饪和烘焙原料，其口感与鸡蛋相仿，且营养丰富，不含胆固醇。

## 解决这些问题才能实现进一步普及

以发酵蛋白为原料的诸多产品已实现商业化生产，且生产成本低廉，表现出良好的可扩展性。但若想让更多发酵蛋白食品进入大众视野，一些问题仍亟待解决。

“首先，发酵原料来源有待解决。”李德茂解释，目前，发酵蛋白主要原料来自淀粉产生的葡萄糖，而淀粉仍来源于农业生产。因此，我们要开发出更多低碳发酵技术，利用一些低成本原料，例如合成气、二氧化碳等，使发酵蛋白技术更加可持续。

其次，发酵蛋白食品若能够真正登上餐桌，其口感是关键。“目前发酵蛋白食品可通过物理加工方式改变蛋白的球状结构，制造出类似真实肉纤维的拉丝蛋白，更具动物肉的质感、咀嚼感和香味。”李德茂

表示，目前发酵蛋白食品以肉糜类为主，在制成汉堡、肉丸、鸡肉块、香肠等产品时口感与动物蛋白较接近，但仍无法制作成全切肉，也很难适应中国多样化的烹饪方式。

目前，饲料领域发酵蛋白生产成本仍然较高，为实现发酵蛋白产品替代传统蛋白产品的经济可行性，人们要进一步优化生物工艺设计，提高单位体积生产率，实现发酵蛋白规模化生产效益，降低发酵蛋白饲料领域生产成本。“虽然发酵蛋白还无法完全替代动物养殖蛋白，但是一批生物科技公司正在利用极具创新性的技术和产品不断带给人们信心。”李德茂表示，发酵蛋白的出现，对于改变人类的饮食习惯、改善环境具有积极且深远的意义。

“联合团队通过挖掘多功能酶、优化反应条件、提高多酶间和酶与辅酶间的相互适配性等，进一步解决了辅酶需求不匹配、固碳与氮素利用难以协同等问题。特别是针对限速环节——基于四氢叶酸的甲酸转化，我们做了一系列改进和强化，最终将甘氨酸产量提升至0.81毫摩尔，最高合成速度达8.69毫克每升每小时，最大法拉效率率达96.8%。”文章通讯作者，天津工业生物技术研究所研究员朱之光说。

此外，同位素标记结果可证实甘氨酸中的碳原子和氮原子均来自于二氧化碳和氨。经估算，该系统的最大理论能量效率可达50.3%（考虑电驱动辅酶再生反应过电势）到83.6%（不考虑过电势），这充分显示了生物电催化在能量效率上的优势。

对于产量和反应速度上的进一步提高，未来我们可重点针对四氢叶酸相关模块进行改造或者构建新的生物电催化二氧化碳转化人工途径。

该研究展示了一条利用生物电催化系统将二氧化碳加氢合成甘氨酸的新路线，也为以二氧化碳为原料合成更多含氮高值化学品提供了新思路，是二氧化碳到淀粉、蛋白、油脂等重大产品的人工合成路线的重要补充。

## 研究进展

## 我国科学家绘出首张蛛丝形成机制分子细胞图谱

新华社讯（记者柯高阳）电影里的蜘蛛侠抬手喷出蛛丝，这样的场景未来借用人造蛛丝或将成为可能。记者从西南大学获悉，该校科研团队通过揭示蛛丝合成的生物学机制，绘出首张蛛丝形成机制的分子细胞图谱，为人工合成蛛丝提供关键理论基础。

蜘蛛牵引丝是蜘蛛的大壶状腺分泌的蛋白质类纤维，由蛛丝蛋白、有机酸、脂类等物质组成，具有良好的机械性能和仿生应用潜力，广泛应用于生物医学、高强度复合材料等领域。“天然蛛丝主要来源于蜘蛛结网，且蜘蛛因同类相食的特性难以高密度养殖，从自然界获取的天然蛛丝产量非常有限。”西南大学种质创制大科学中心教授王翊介绍，长期以来科学界一直希望实现人工合成蛛丝，致力于对蛛丝的合成分泌过程进行研究。

王翊课题组选取在我国广泛分布的棒络新妇蛛为研究对象，构建出这种蜘蛛的染色体级高质量基因组，注释获得37607个蛋白质编码基因。研究发现，蜘蛛的大壶状腺蛛丝蛋白基因具有成两簇分布于染色体上的重要特征。课题组对蛛丝蛋白、有机酸、脂类等在大壶状腺尾部、囊腔、导管三段中的层级合成模式进行解析，首次完成蜘蛛大壶状腺的单细胞图谱和空间转录组图谱绘制，揭示了蛛丝腺发生与发育的分子机制。

“我们进一步研究发现，蜘蛛丝与蚕丝是同一套制作方式，只是‘原材料’和‘后期加工流程’有所不同。”王翊说，将蜘蛛大壶状腺与家蚕的丝腺进行多维度组学比较分析发现，蜘蛛丝腺的产生物质机制与蚕丝腺相似，二者均由具有趋同进化的三段式丝腺组织结构、同源基因表达模式、丝纤维的蛋白质和代谢物组成。

目前，王翊课题组的相关研究成果已由国际学术期刊《自然·通讯》在线发表。科学界认为，这项研究多维度地揭示了蜘蛛牵引丝三阶合成的生物学机制，为研究蜘蛛起源与进化、解析牵引丝性能决定因素、创制蜘蛛化蚕丝素材提供了关键理论基础。

## 东亚地区迁飞昆虫丰富度呈下降趋势

科技日报讯（记者马爱平）2月21日，科技日报记者从中国农业科学院植物保护研究所获悉，该所经济作物虫害监测与防控创新团队揭示了东亚地区迁飞性昆虫物种关系和生态服务功能的长期演化趋势，对推动全球变化背景下的生物多样性保护和农林有害生物防控工作有重要指导作用。相关研究成果发表在《科学进展》上。

植食性昆虫与天敌昆虫之间的营养互作关系是维护自然生态系统平衡和稳定的重要因素。迁飞是昆虫适应自然环境变化、保障种群繁衍的生存策略，每年有数以百亿计的植食性昆虫和天敌昆虫借助盛行季风在世界范围远距离迁移，发挥了重要的跨区域传粉和生态服务作用。植食性昆虫和天敌昆虫是迁飞昆虫的重要组成部分，以往对害虫—天敌昆虫种群关系的研究多聚焦于小尺度范围的监测评估，而对大尺度范围活动的迁飞昆虫的物种关系演化鲜有研究报道。

该研究工作在山东省长岛县北隍城岛上开展。该岛位于黄渤海交界线的中心位置，是昆虫和鸟类等生物随东亚季风季节性迁移的必经之地，也是研究迁飞昆虫生态学物种关系的适宜地。该团队利用昆虫雷达和高空测报灯，对夜间迁飞过境的昆虫进行了长达18年（2003—2020年）的持续监测。研究发现，迁飞植食性昆虫和天敌昆虫的丰富度皆呈下降变化趋势，而天敌昆虫的下降速度显著大于植食性昆虫；天敌昆虫能显著抑制植食性昆虫的种群增长，天敌昆虫的下降与多种重要农业害虫的种群上升有显著关联性；整个迁飞昆虫系统至少存在124对营养捕食关系（食物网），迁飞食物网天敌昆虫的生物量年均减少约0.7%，食物网关系的连接性显著下降。

## 棉纤维伸长分子机制获揭示

科技日报讯（记者马爱平 通讯员梁冰）2月20日，科技日报记者从中国农业科学院棉花研究所获悉，该所棉花分子遗传改良创新团队揭示了棉纤维进化的重要靶标基因GhPRE1A通过油菜素内酯信号途径调控棉花纤维伸长的分子机制，对棉花纤维品质的遗传改良具有指导意义。相关研究成果发表在《植物生物技术》上。

棉花是世界上最重要的天然纤维作物，棉纤维是全球纺织业的重要原料，纤维长度是评价棉花纤维品质的关键指标。现有研究表明，GhPRE1A是棉纤维进化的重要靶标基因，但GhPRE1A调控棉纤维伸长的分子机制尚不清楚。

该研究发现棉纤维伸长的正调控因子GhPAS1可以直接调控下游靶基因的表达，并促进棉纤维伸长；而棉纤维伸长的负调控因子GhAIF3可以抑制GhPAS1的表达，从而抑制棉纤维伸长。进一步研究发现，棉纤维进化的重要靶标基因GhPRE1A通过油菜素内酯信号途径，与GhAIF3相互作用，进而解除对GhPAS1的抑制作用，并重新激活GhPAS1对下游靶基因的调控，从而促进棉纤维伸长。



新华社记者 沙达提摄

# 巧用生物电催化，将二氧化碳高效合成氨基酸

◎本报记者 陈曦

二氧化碳的高效生物转化对推进绿色低碳发展，实现我国“双碳”目标具有重要意义，也是目前国内外关注的重大科技前沿之一。

2月20日，科技日报记者从中国科学院天津工业生物技术研究所获悉，该所体外合成生物学中心联合中国科学院微生物研究所和山东大学研究团队，在还原甘氨酸途径的启发下，构建了电能驱动的体外多酶催化系统，克服了热力学障碍，首次实现了一锅法生物电催化二氧化碳加氢合成甘氨酸。相关研究成果近日以封面文章的形式发表在《德国应用化学》上。

## 生物电催化二氧化碳转化需解决两个问题

由于二氧化碳是一种化学惰性分子，其转化利用需要能量的注入。而生物催化系统虽然具有高选择性，但往往反应条件温和、能量利用方式有限，这导致其转化二氧化碳的速率和效率难以与化学催化系统相比。

近年来，随着绿色发电技术的发展，

以清洁电能驱动生物催化的生物电催化技术越来越受到关注。结合了生物催化的高选择性和电催化高效清洁的优点，生物电催化技术在生物电化学传感、生物能量转换等方面潜力巨大。特别是在高电压化学合成方面，可以通过简单的电极代替辅酶再生共底物，成功实现一些材料和医药化学品的高效合成。

“利用电化学催化可将二氧化碳和氨合成氨基酸，但化学催化剂在转化二氧化碳方面选择性欠佳，难以高效合成多碳和含氮分子。而生物催化剂具有高选择性，再通过电能驱动为反应赋能，则有望实现二氧化碳到复杂分子的转化。”文章第一作者之一，天津工业生物技术研究所副研究员吴冉冉介绍。

但是生物电催化二氧化碳转化必须解决生物固碳元件性能不高以及电能难以高效再生还原力以驱动生物反应这两个问题。目前，生物电催化技术仅能实现二氧化碳转化为甲酸、甲醇等一碳产物，由于速度慢、得率低，还无法直接进一步耦合成氨基酸或多碳分子。

## 构建电能驱动的体外多酶催化系统

甘氨酸是自然界中分子结构最简单

的生物电催化技术在生物电化学传感、生物能量转换等方面潜力巨大。特别是在高值化学品合成方面，可以通过简单的电极代替辅酶再生共底物，成功实现一些材料和医药化学品的高效合成。

的氨基酸。在还原甘氨酸途径的启发下，联合团队成功构建了电能驱动的多酶催化二氧化碳加氢合成甘氨酸的系统。他们首先对二氧化碳还原到甲酸、基于四氢叶酸的甲酸转化、基于甘氨酸裂解系统的高效率辅酶再生模块，解决了辅酶易失活的问题，大幅提升了甲酸浓度，以便推动其后续生物转化。