

# 超70%基因功能未知？科学家给微生物“上户口”

■本报记者 李晨

尽管人们与自身肠道中数以亿万计的微生物“朝夕相处”，但对它们的功能所知甚少。迄今为止，超过70%的人体微生物基因功能仍是未解之谜。这些功能未知的微生物基因被科学家统称为微生物组功能“暗物质”。

中国农业科学院深圳农业基因组研究所研究员张艳聪团队与美国哈佛大学教授Curtis Huttenhower团队合作，开发了一种名为FUGAsseM的蛋白质功能预测人工智能模型，为系统解析微生物组功能“暗物质”提供了全新解决方案。近日，这项突破性研究成果发表于《自然·生物技术》。

## 微生物世界的“暗物质”难题

人体肠道微生物组编码的基因数量是人体基因组编码数量的150倍甚至更多。根据统一人类肠道基因组(UHGG)计划构建的资源库，科学家已经发现了超过1.7亿条蛋白序列。面对如此庞大的蛋白质世界，传统的实验方法显得力不从心。

“人类微生物组研究面临的最大挑战之一，是我们仍然不了解大多数细菌具体发挥什么作用。”论文通讯作者Huttenhower指出，虽然该领域已发展了许多先进的工具与技术，可以精确测量微生物组的组成，但对其功能的解读依然困难。

“部分微生物已被深入研究，但仍有很多种类尚不清楚其功能。值得注意的是，微生物堪称‘化学高手’，能够分解人类无法利用的食物成分，也能改变化合物的结构，使药物产生活性。”Huttenhower说，这项研究的重点就是深入解析微生物组中的蛋白质与代谢分子

功能，并揭示这些作用如何进一步影响人体健康。

论文第一作者、共同通讯作者张艳聪告诉《中国科学报》，长期以来，学界主要采用序列相似性原则预测未知基因的功能，但基因的表达模式不同，导致了预测结果的局限性。

面对这一挑战，该团队另辟蹊径，开发了不依赖于序列相似性的新模式。“FUGAsseM的特色在于它利用多组学数据信息，包括宏转录组中的共表达信息、宏基因组中的共定位信息、序列相似性信息，以及蛋白结构相似性信息，整合成多维网络结构，然后利用机器学习方法学习这些网络。”

这种方法的核心是“循证推理”理念。张艳聪用一个比喻解释道：“可以把基因想象成工厂里的工人。如果一些工人(未知基因)总是和负责同一生产线的熟练工(已知功能基因)一起上班、一起加班，那他们很可能在参与同样的生产流程。”

研究团队收集了1595份宏基因组和800份宏转录组数据，这些数据来自109人持续一年的追踪研究——每两周采集一次样本，最终形成了高质量的数据集。通过这些数据，他们进一步训练人工智能学习8万多个已知功能基因的表达模式，从而让人工智能具备了预测未知基因功能的能力。

在处理数据时，团队还攻克了一个重要技术难题。“宏转录组数据是多个物种混合的数据集，我们需要区分基因表达量高是由于拷贝数多，还是本身表达能力强。”张艳聪团队开发了新的标准化处理方法，有效排除了跨物种拷贝数的干扰，为人工智能学习提供了清晰信号。

## 卓越性能：精准预测的突破

FUGAsseM在测试中表现优异。张艳聪介绍了两类验证方式：对已知功能基因，FUGAsseM能以95%的准确率复现其功能；对未知基因，则采用时间留存验证方式，用2019年的数据训练模型得到预测结果，用2022年国际上公开的实验数据进行验证，结果显示预测准确率仍然很高。

具体而言，仅基于宏转录组的模型已达到平均71%的准确率，整合多类证据后，准确率可达95%，媲美甚至优于当前单菌方法预测模型等。在完全独立的实验验证数据上，FUGAsseM依然达到80%的预测准确率，显著优于依赖同源性的方法。

将FUGAsseM应用到人体肠道微生物组研究，团队取得了丰硕成果。

“我们预测出44万多个基因家族的功能，其中82.3%此前未被表征。”张艳聪表示，“更重要的是，我们发现了3万多个全新的蛋白家族，包括2.7万个弱同源蛋白家族和6000余个完全无同源性的新型蛋白家族。”

Huttenhower表示，完全无同源性的蛋白家族的发现尤其令人振奋。“这些蛋白与已知蛋白没有序列相似性，我们通过它们的共表达模式预测功能，验证了循证推理模式的有效性。”

在这些新发现的蛋白中，有些与人体健康密切相关。“我们在益生菌*Faecalibacterium prausnitzii*中预测到新型噬菌体防御。”张艳聪指出，这种益生菌在健康人体内丰度较高，而在疾病患者中较低，新发现的基因可能帮助其抵御噬菌体侵染，维持肠道健康。

研究还揭示了大量此前未知的代谢与环

境互作功能，包括铁离子稳态、氨代谢、毒素处理及宿主相关的跨膜转运功能等，为理解肠道菌群与宿主互作提供了新视角。

## 从工具到应用：多领域潜力巨大

尽管这项研究以肠道微生物组为应用案例，但FUGAsseM的设计具有广泛适用性。“它是一个广谱性的工具，不仅可以应用于人体微生物组，还可以用于环境微生物组、农业中的根际微生物组或土壤微生物组等。”张艳聪强调。

“FUGAsseM能够精准注释人体微生物组中大量此前未知的‘暗物质’功能基因，与当前国际前沿研究方向高度契合，在深入理解微生物组功能方面取得了关键突破。”一位审稿人对这一工具给予高度评价。

另一位审稿人则称赞：“其代码质量极高，既便于初学者快速使用，也易于资深研究人员扩展与贡献，体现了该工具的专业性与可持续性。”

FUGAsseM的出现标志着微生物组研究从描述性研究迈向智能化功能解析的新阶段。这一工具不仅为理解肠道菌群与宿主在免疫、代谢和疾病中的复杂互作提供了关键资源，也为揭示环境微生物在养分循环与生态平衡中的作用奠定了方法学基础。

张艳聪表示，随着更多数据的积累和工具的完善，他们能更全面地解析微生物世界的功能密码，这对疾病研究、益生菌开发、环境功能预测和农业生态调控都具有重要意义。

相关论文信息：  
<https://doi.org/10.1038/s41587-025-02813-7>

## 第十一届全国中子散射会议在深圳召开

本报讯(记者朱汉斌 通讯员张玮)近日，第十一届全国中子散射会议暨国家中子源多学科应用研讨会在深圳召开。会议聚焦国家中子源设施的进展与前沿交叉领域展开了深入研讨。

中国物理学会中子散射专业委员会主任、中国原子能科学研究院研究员陈东风在致辞时表示，中国先进研究堆(CARR)、中国绵阳研究堆(CMRR)、中国散裂中子源(CSNS)三大科学装置相继建成投用，使得我国中子散射技术从“跟跑”迈向“并跑”，并在部分领域实现“领跑”，为全球科技发展贡献了中国智慧。

会议设置了主会场、4个专题分会场与中子讲习班。主会场报告系统介绍了三大中子源装置的开放运行与应用进展，并就如何提升装置性能、促进重大成果产出听取了用户建议；专题分会场安排了近80场学术报告，全面展现了中子散射技术广阔的应用场景与我国在该领域的蓬勃发展态势。

中国科学院高能物理研究所东莞研究部副主任梁天骄介绍，作为我国首台脉冲型中子源、探索物质微观结构的“超级显微镜”，CSNS高效稳定运行，完成用户课题2500余项，覆盖国家重大战略需求、前沿研究及产业研发领域，成功破解了一系列关键技术瓶颈。目前，CSNS二期工程已完成加速器注入区改造，各项工作进展顺利。

此次会议由中国物理学会中子散射专业委员会、中国科学院高能物理研究所、中国原子能科学研究院、中国工程物理研究院核物理与化学研究所共同主办，北京大学深圳研究生院和散裂中子源科学中心承办。

## 以法治利剑破解生态环境监测困局

■周城雄

生态环境监测数据的真实性直接关乎环境决策的科学性与环境治理的有效性。然而，长期以来，监测数据造假、市场秩序混乱、监管执法乏力等问题，成为制约环境治理效能的“顽疾”。

近日，《生态环境监测条例》(以下简称条例)公布，将于2026年1月1日起施行。作为我国首部生态环境监测领域的综合性行政法规，条例以“全链条责任体系”和“最严密法治”为抓手，为破解监测困局提供系统性解决方案，标志着我国生态环境治理迈入法治化、规范化、智能化的新阶段。

## 数据造假“顽疾”倒逼立法变革

生态环境监测数据失真“顽疾”，是环境管理的“心头大患”。部分排污单位在自行监测中“偷工减料”，甚至通过篡改设备参数、伪造记录等方式掩盖超标排放；一些技术服务机构为牟取利益，出具“量身定制”的虚假报告，导致环境决策偏离实际、监管措施失效。

例如，某地一企业通过篡改监测设备数据，长期逃避治污责任，最终引发区域性水污染事件，造成巨大经济损失。此类案例暴露出原有法律体系的短板：尽管环境保护法等法律对监测工作有原则性规定，但缺乏系统性、专门性的上位法支撑，部门规章法律位阶较低，对复杂违法行为的震慑力不足。

条例的出台正是对这一痛点的精准回应。其通过构建“事前准入—事中规范—事后追责”的全链条责任体系，将监测数据质量纳入法治轨道。

例如，针对数据造假行为，条例明确规定：对监测数据弄虚作假的机构，处10万元



珍稀食用菌冬荪首次在广东实现仿野生栽培

广东省科学院微生物研究所科研人员2020年发现并命名的冬荪新种，近日首次在广东成功实现人工仿野生栽培。

这种大型真菌新种原本产自贵州毕节。作为新种的代表，“大方冬荪”享有“国家地理标志产品”的美誉。为实现珍稀食用菌冬荪在广州的仿野生栽培，在广东南岭森林生态系统国家野外科学观测研究站研究员周平团队协助下，广东省科学院微生物研究所团队充分发挥自身在大型真菌生长条件领域的研究优势，与贵州工程应用技术学院研究人员展开了深度合作。

此次栽培成功，不仅为广东农业增添了一个高价值新品种，更为地理标志产品的跨区域推广提供了科技范本。图为广东仿野生栽培的冬荪。 本报记者朱汉斌 通讯员李诚斌报道，黄明敏/摄

双管齐下。条例规定，机构对出具的监测数据的真实性、准确性负全责，实行“谁出数、谁负责，谁签字、谁负责”的终身责任制。同时，要求机构建立符合国家技术规范的质量管理体系，涵盖人员资质、方法验证、仪器校准、全过程质量控制等环节。

## 制度创新：从“原则”到“规则”的可操作性突破

条例的突破性在于将抽象的法治原则转化为可核查、可追溯的具体规则，解决了长期困扰监管的“操作难题”。

首先是资质准入方面，备案承诺制压实机构能力。技术服务机构需向生态环境主管部门提交书面承诺，涵盖设施设备、技术能力、技术人员和管理能力四大核心要素。

例如，从事检验检测活动的机构，必须依法取得检验检测机构资质认定，形成“备案+资质认定”的双重准入机制。这种设计将机构能力要求从隐性条件变为显性标准，避免“劣币逐良币”的市场乱象。

其次是行为规范方面，独立性原则与全过程可追溯。条例明确要求机构独立、客观、公正开展监测服务，禁止同时接受可能存在利益冲突的委托。例如，某机构若同时为排污企业提供治理方案和监测服务，将被认定为违规。此外，机构需建立运行维护记录制度，保存业务相关数据、报告、记录及委托合同，确保监测活动全链条可追溯。

协同治理方式中，推动部门联动与公众参与。条例明确生态环境主管部门会同有关部门组织监测网络，统一规划监测站点设置，解决信息融合不足、重复规划等问题。同时，鼓励公众通过举报平台参与监督，对查证属实的举报给予奖励，形成“政府主导、企业履责、社会参与”的治理格局。

最后是数据责任方面，终身制与标准化

## 产业影响：从“数量扩张”到“质量优先”的转型契机

条例的实施将推动生态环境监测产业向“规模化、专业化、智能化”方向升级。

第一是净化市场生态，遏制低价恶性竞争。过去，部分机构通过压低价格、出具虚假报告抢占市场，导致行业陷入“劣币驱逐良币”的困境。条例通过统一标准、明确责任、强化惩戒，提高了违法成本，压缩了低质机构生存空间。

第二是催生技术需求，加速利用智能监测终端与数据分析平台。条例要求主要监测点位安装视频监控设备，并鼓励使用无人机、卫星遥感、走航监测等先进技术。这将推动物联网模块、数据加密与防篡改技术等与传统监测设备的深度融合，催生新一代“智能监测终端”。同时，AI数据分析平台需求激增，可为企业提供实时预警、趋势预测等增值服务。

第三是提升国际竞争力，鼓励对接全球环境治理规则。条例对监测数据质量、技术标准的严格规定，有助于我国监测机构参与国际竞争。

通过提高违法成本，明确行为边界、强化过程监管，条例为构建“政府主导、企业履责、社会参与”的现代环境治理体系提供了坚实的制度保障。展望未来，随着条例的深入实施，我国生态环境监测将实现三大转变：从“人工监测”向“智能监测”升级，从“数据孤岛”向“信息共享”迈进，从“低效监管”向“精准治理”跃迁。这一法治化进程必将为美丽中国建设注入强劲动力，为全球环境治理贡献中国智慧。

(作者系中国科学院科技战略咨询研究院研究员)

## 发现·进展

中国科学院大连化学物理研究所

## 开发出全固态电池界面优化新工艺

本报讯(记者孙丹宁)近日，中国科学院大连化学物理研究所研究员陈伟忠团队创新性地提出了一种电诱导加速聚合的界面修复策略，有效解决了固态电解质隔膜在应用过程中面临的界面不稳定、空气敏感及易产生裂纹等问题，为全固态电池的规模化应用开辟了新思路。相关成果发表于《自然·通讯》。

固态电池因其高能量密度和本征安全性而被视为下一代储能技术的重要方向，但其商业化进程仍面临许多挑战。其中，氧化物固态电解质虽然具有较高的离子电导率和优异的化学稳定性，但因其本身的脆性而在制备与应用过程中易产生微裂纹和孔隙，导致界面接触不良。同时，固态电解质与金属负极之间存在润湿性差、界面电阻高、在长循环过程中易发生副反应等问题，进一步诱发枝晶穿透和界面失效。这些固有缺陷不仅限制了离子在界面的高效传输，也显著降低了电池的循环稳定性和可靠性。因此，如何实现对固态电解质界面的有效调控与稳定化，是推动全固态电池走向实用化的关键科学问题之一。

该工作中，团队创新性地引入了带电“修复胶”微滴，并通过电引发加速聚合过程，将聚合速率提升至原来的21.4倍。该方法借助电润湿效应在界面原位形成均匀涂层，可优先填充电解质表面的裂纹与孔隙，从而增强金属钠与电解质的界面接触稳定性，并有效阻止枝晶诱导的裂纹扩展。在此作用下，钠离子动力学性能显著提升，实现了高达6.8mA cm<sup>-2</sup>的临界电流密度，并在1.0C倍率下稳定循环超过1000圈。

基于该策略构筑的Ah级全固态软包电池，在无外部夹持压力的条件下，仍表现出优异的长循环稳定性，充分验证了这一界面修复新工艺的可扩展性与应用潜力。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1038/s41467-025-64612-7>

南京航空航天大学

## 新型超级电容器有望让无人机“机身即电池”

本报讯(记者陈彬)南京航空航天大学教授朱孔军团队研发的新型碳纤维结构超级电容器有望让无人机“机身即电池”，为破解无人机“续航载重不可兼得”的困局提供全新思路。近日，相关研究成果发表于《先进材料》。

随着我国“双碳”目标推进，无人机已广泛应用于机场巡查、城市配送等领域。当前的主流无人机机身采用航空级碳纤维复合材料，密度仅为钢的1/4，强度却是钢的7倍，能最大程度减重。然而，传统的电池系统却成了减重的“绊脚石”。

据计算，一架载重5公斤的物流无人机，电池重量就达到3公斤，同时还需要增加0.5公斤配重保持平衡。一些企业为了让无人机能够飞5公里，不得不减少1公斤负载。这种不得已的“取舍”让很多企业陷入两难。

在一次国际会议上，朱孔军接触到“结构储能一体化”概念，灵光一闪：“能不能让机身结构本身储能？”此后，他便带领学生着手研发碳纤维结构超级电容器。

在朱孔军指导下，南京航空航天大学2023级硕士生周恒将碳纤维电极和环氧树脂基固体电解质相结合，尝试做成“能承重的储能器件”，历经近百次试验后，终于做出了达标样品。“还原氧化石墨烯像‘电流高速公路’，让电传得快；钒氧化物像‘能量仓库’，能存更多电。”朱孔军表示，“一层薄薄的涂层，就有望让碳纤维储电量提升数倍。”

“普通储能设备受压后储量会下降，我们的反而更好。”周恒解释，材料受压时结合更紧密，电传输更顺畅。更难得的是，该材料还具有抗损坏能力，用刀片划口子、用钻头钻孔后仍能进行工作。此外，它们还可以像搭积木一样，根据实际需求进行灵活组合：需要更高电压时就串联，需要更大容量时就并联。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1002/adma.202514323>

南方科技大学等

## 新技术实现无标记线粒体活检

本报讯(记者刁蕙蕙)南方科技大学机械与能源工程系副教授胡程志团队联合香港科技大学助理教授顾红日，开发出一种新型自动化多功能纳米探针平台，能够在活细胞内实现高时空分辨率的无标记线粒体提取。近日，相关成果发表于《科学进展》。

作为细胞内的“能量工厂”，线粒体在细胞功能和疾病机制中扮演着关键角色。传统的线粒体活检技术通常依赖于荧光标记，不仅易造成光损伤和细胞毒性，还会干扰后续生物学分析。此外，现有细胞内操作技术在精度、微创性及操作效率方面仍面临许多挑战。

研究团队开发了一种新型自动化多功能纳米探针平台。该纳米探针集成了两个可独立控制的纳米电极，可实时监测线粒体代谢所产生的活性氧/活性氮，从而精确定位目标线粒体，利用介电泳力完成线粒体的捕获、操控与提取。

该纳米探针采用小尺寸尖端设计，结合精准的机器控制，使细胞操作侵入性极低，细胞存活率高达96%。它作为传感器时，时间分辨率达1000赫兹，空间分辨率为1微米；作为执行器时，空间分辨率为1.8微米。

研究人员介绍，该纳米探针既能检测线粒体，又可实现其捕获与提取。此外，该探针无需荧光标记，有效避免了光损伤与细胞毒性，为后续多种生物分析提供了便利。该技术还实现了线粒体的细胞间移植，移植后的线粒体能成功融入受体细胞的线粒体网络。

这一成果不仅为探索线粒体功能及相关疾病机制提供了有力工具，也为单细胞手术与细胞治疗开辟了新的技术路径。

相关论文信息：<https://doi.org/10.1126/sciadv.adx4289>