

细菌“铁博弈”展示另类“战争与合作”

■本报实习生 李睿 记者 张双虎

在人类肉眼难以察觉的微观世界中，微生物无处不在，它们之间的博弈与互动构成了复杂的生态系统网络。

铁是微生物维持生存的必需元素，也是微生物之间博弈互动所争夺的核心稀缺资源。然而，微生物在铁元素博弈中遵循什么样的规则，它们如何竞争，如何合作，又是如何互动以争夺铁元素的？目前，生物学界仍缺少预测微生物次级代谢的有效方法。

近日，北京大学定量生物学中心教授李志远课题组联合南京农业大学 LorMe 实验室、瑞士苏黎世大学定量生物医学系教授 Rolf Kümmerli 开发了一种从序列到生态的分析方法，为理解细菌的铁元素“博弈”规则及微生物群落的生态和演化提供了新角度。相关成果发表于《科学进展》。

微生物的“餐具系统”

为解决“缺铁”问题，微生物进化出一套“餐具系统”——铁载体和受体。

简单来说，细菌为了获取铁元素，会分泌一种名为铁载体的特殊分子。它们在细胞外的环境中“巡逻”，一旦遇到铁离子就将其紧紧“抓”住，然后把它安全送回细胞内。为此，细菌进化出相应的“收货系统”，即受体。

尽管各种细菌都能制造铁载体并利用受体来接收，但它们之间通常并不“兼容”。

如果把铁载体理解为“钥匙”，把受体理解为“锁”，那么在细菌世界里，每把钥匙只能打开与之配套的锁。这种高度特异性就像一套特别的安保系统——细菌只能识别和使用特定型号的铁载体，对其余型号“视而不见”。论文第一作者、李志远课题组从事博士后研究的顾少华对《中国科学报》解释：“通过深入了解每个微生物拥有的‘钥匙-锁’类型，我们可以观察到一系列复杂的社会行为。”

在铁载体与受体的“钥匙”和“锁”的特异

性配对下，细菌展开了一场铁元素的“博弈”游戏。

破译细菌的“社会互动网络”

在微生物的铁元素“博弈”中，一直缺少高准确率的计算工具和研究方法。

在南京农业大学 LorMe 实验室读博期间，顾少华主要侧重于实验研究。然而，在涉足铁元素相关研究时，他注意到不同细菌之间存在较大差异，每一种细菌似乎都需要单独进行实验和测试。

“如果用实验方法，测试大约 100 种细菌就需要耗时半年到一年。”顾少华说，“此外，细菌之间的个体差异也让实验方法难以取得准确的量化结果。”

在研发出相应工具和算法之前，已有的计算模型只能简单判断生物生存所必需的一些初级代谢，对于“铁元素博弈”这种更复杂的次级代谢行为则无能为力。

顾少华认为，工欲善其事，必先利其器。

不久，顾少华来到李志远课题组进行博士后研究，这里擅长研究生信分析和网络建模，于是他的研究也从实验转向计算方向。此后，北京大学、南京农业大学两个团队一起，开发了生物信息学工具及相应的共进化算法，从基因组序列直接解析微生物社会互动网络，形成了首个针对天然产物的“从序列到生态”研究。

“从序列到生态”也是铁载体研究领域的一条“近路”。

与实验的逐一分析不同，这种方法可以进行大量计算和预测。顾少华通过分析大量基因组中的共进化信息，就能推断出每个菌株制造和吸收的铁载体类型，进而重构整个铁相互作用网络。

“该工作使用了来自人类、土壤、植物和水等栖息地的 1928 株非冗余假单胞菌的数据集。”顾少华说，“我们将所有编码的铁载体合成

酶与相应的受体基因组配对，发现细菌分泌的铁载体能够促进或抑制群落成员的生长。通过开展验证实验，发现算法的准确率超过 90%。”

基于这一生物信息学工具，顾少华进一步构建了群落层面的铁互作网络——不同栖息地 and 生活方式的细菌，其铁载体介导的互作模式也存在显著差异。具体来说，生活在土壤、水、植物内的菌株和非致病菌种之间形成了密集的铁载体共享和竞争网络，而来自人类的菌株和致病菌种之间则只存在零散的网络联系。

“从序列到生态”的方法实现了对数千种细菌菌株之间社会互动的分析，也为针对性调控微生物群落开辟了新路径。

绘制“铁网”，拓展应用领域

根据初步预测成果，在微生物“铁博弈”的游戏中，只有约 60% 的微生物有铁载体合成基因簇，但超过 90% 的微生物都装备了至少一个铁载体受体基因。

这表明在微生物世界中，铁元素的获取并非仅依赖“自给自足”，还存在“竞争”“合作”“盗用”等多元游戏规则。

“例如，某些细菌虽然自身能产生铁载体，但却拥有许多受体，它就会‘盗用’其他细菌的铁载体，这种行为类似一种‘欺骗’。那些仅有一个受体的细菌则相对‘老实’，只利用自身产生的铁载体。正是这种受体的多样性，催生了细菌之间有趣的互动关系，包括骗取、合作和竞争等多种形式。”顾少华解释。铁载体的多样性、铁载体-受体间的特异性配对关系，以及普遍存在的“借用”现象，编织了一个错综复杂的铁元素互动的微生物网络。

在这个网络中，铁载体既能促进细菌之间的合作，实现铁元素的共享，也可能被用作排挤竞争对手的“武器”。每个物种既可能是某种铁载体的“生产者”，也可能是其他铁载

体的“盗用者”。“顺手牵羊的‘盗用’可能比‘生产’更常见。”顾少华描述。

基于开发的生物信息学工具可以预测微生物制造什么、借用什么铁载体，进而绘制出这张“铁网”。

“铁网”中的互动关系可以理解成细菌的进餐，铁载体是“食物”，受体是“餐具”。成员们可能带来了自己的“食物”和对应的“餐具”，也可能带来了享用他人“食物”的“餐具”。

一部分微生物既是贡献者，也是“顺手牵羊”者。这种互相“借用”的行为形成了一个稳定的合作网络。还有一部分“独来独往”的微生物，只带一副“餐具”，只吃自己带来的“食物”。这种“独来独往”的特征常见于某些病原菌中。在微生物世界里，还有一部分“蹭饭专家”——它什么食物都不带，却带来一大堆餐具，专门利用别人的“投资”。这种纯粹的“欺骗者”策略也是一部分病原菌的特征。

看似简单的“铁元素聚餐会”揭示了微生物世界中复杂的社会行为——独立、合作、欺骗。微生物对铁元素的争夺描绘了细菌之间的“战争与合作”，也为多个领域的应用提供了新思路。

目前，顾少华主要从事土传病害的防控，如果运用得当，可以借助微生物互动关系进一步有针对性地调控微生物群落，从而减少病害的发生。

顾少华告诉《中国科学报》，未来这项研究有望拓展到更多领域。“如果利用好这一研究成果，不仅可以在土传病害防控方面发挥作用，还可以应用于重金属治理、植物营养成分吸收等多方面，在医学领域也可以应用于人类和动物病原微生物防控。此外，铁元素缺乏容易导致贫血等问题，这项研究对于理解和解决人类病原微生物侵袭和贫血等健康问题也具有重要意义。”

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1126/sciadv.sdq5038>

出要“实施高等教育综合改革试点”，而且用专章论述了“深化教育综合改革，激发教育发展活力”，对教育评价机制、人才与社会发展需要适配机制、依法治教机制、教育投入机制、一体统筹推进机制等改革进行了详细说明。

可以看出，这些改革与以往有很大不同，一方面，这些改革处于教育体制机制中的核心关键点，具有牵一发而动全身的作用，因此其改革必然带动教育整体发展，产生一加一大于二的效果；另一方面，这些改革的推进必须打破长期以来我国受计划经济影响而形成的条块分割思维，打破部门利益的桎梏，与多部门联动和协同将改革推向深入。

当今，我国教育改革已进入“深水区”，一些体制机制壁垒严重影响了教育的发展活力，因此深化综合改革的目的是要使教育发展摆脱这些束缚，打破教育内部以及教育与社会各种壁垒，激发出教育内在的发展动力和创新活力。

与综合改革这个关键词不同，自主创新作为一种要求，其精神内涵渗透到《纲要》的很多方面。首先，自主创新体现在创新性地自主设立标准方面，如教育强国的“六大特质”就是我国首创，也是我们建设教育强国的方向和引领。其次，自主创新体现在创新性的制度设计方面，如《纲要》提出的“健全与人口变化相适应的基础教育资源统筹调配机制”等，都是面向近年来教育发展的新形势、新问题而提出的创新性制度举措，其中蕴含中华民族的教育智慧以及改革开放以来我国逐渐形成的教育模式，以这些创新性举措推进教育强国建设，必能走出具有中国特色的教育强国之路。

最后，自主创新意味着要鼓励基层探索创新。《纲要》作为国家行动计划，在体现国家战略意图和改革方向的同时，也鼓励地方政府和各级各类学校不断探索创新。这就要求各类办学主体必须转变僵化封闭的观念，以创新的姿态投入教育强国建设，以《纲要》的思想精神为引领，以所面临的实际问题为出发点，通过创新不断解决教育问题，通过自身努力教育强国建设添砖加瓦。

（作者系厦门大学教育研究院副院长）

湖南首例沙子岭猪克隆猪诞生



湖南首例沙子岭猪克隆猪诞生。

受访者供图

本报讯(记者王昊昊 通讯员李玉莲)记者1月26日从湖南省湘潭市家畜育种站获悉,1月24日13时许,湖南省首例体细胞克隆沙子岭猪在湘潭县兴龙畜牧公司诞生。

原产于湘潭的沙子岭猪被列入“国家畜禽遗传资源品种名录”,是珍贵的畜禽遗传资源。为保护沙子岭猪遗传资源,湘潭市家畜育种站牵头,依托中国科学院院士、中国科学院亚热带农业生态研究所首席研究员印遇龙科研团队,以及岳麓山实验室、湖南农业大学、湖南省畜牧兽医研究所等单位,自2024年6月起开展沙子岭猪体细胞克隆试验。

据介绍,这两只活体克隆猪保存了沙子岭猪“短嘴筒、蝴蝶耳、大眼睛”的特征,呆萌可爱,各项身体指标正常。湘潭市农业农村局研究员吴买生表示,体细胞克隆技术能实现100%的遗传物质保存。他透露,2005年起,中南大学湘雅三医院教授王维团队与湘潭合作开展猪人异种移植研究,共研究了11个地方猪种,发现沙子岭猪的生物安全性最高,确认沙子岭猪是猪人异种移植最佳供体;用沙子岭猪胰岛细胞移植治疗糖尿病,成功率达95.45%。

吴买生表示,首例体细胞克隆沙子岭猪的诞生,实现了遗传资源的长期保存和活体恢复,也为优质地方猪种创新资源保护方式提供了良好的试验示范和引领。印遇龙进一步表示,通过基因工程技术,科学家可以在猪体内修改特定基因,提高异种移植的成功率。沙子岭猪作为食用动物、疾病模型和异种移植供体猪,具有广阔的应用前景。

(上接第1版)

从“液态黄金”提炼“固态宝藏”

“通过计算机模拟，我们可以验证每个反应路径是否可行。这不仅能指导实验，还能帮助我们理解反应机理，从而更好地开展下一步实验。”从事理论研究的贾瑜对《中国科学报》说。

“比如，从原子尺度来看，我们要确定究竟什么样的碳基材料原子结构最有利，能展现出最好的活性。在理论计算时，我们可以从不同角度建模。”同样从事理论研究的吕鹏解释说。

为了让研究结果尽快“面世”，时新建为合作团队建立了一个名为“冲鸭小分队”的微信群。群里平均每天都有更新，遇到问题立即展开讨论。有时，讨论到关键处，怕微信上说不清楚，时新建会立刻和“小分队”成员们一起到会议室将“线上”交流转到“线下”。“我们都在一个系，办公室相距只有几十米，所以理论跟实验互动非常频繁。”贾瑜说。

尽管快马加鞭，他们最初预计的投稿时间仍然一推再推，从预计的9月推迟到10月，最后推到了12月。

“没办法，要实验和计算的地方太多了。”时新建说，近一年的时间里，他们构建了近千个计算模型模拟实验过程，实验记录一度达到700多项，生成了500多幅数据图片。

好在功夫不负有心人，他们终于揭开了这项化学反应的精妙之处——高度的选择性。在碳基材料电催化作用下，尿液中的诸多成分里，只有尿素能与双氧水结合形成晶体，而其他物质则留在液相中，从而让研究者能够精准地将尿素以固体形式提取出来，转化为过碳酸胺晶体。经过简单的重结晶过程，其纯度近乎100%。

扎实的研究让他们在投稿仅经过一轮修改就被接收。其中一位审稿人指出：“这项研究具有很高的价值。它展示了一种利用可再生电力，通过使用过氧化氢从尿液中回收尿素的替代方法，可以为废弃物管理带来巨大的环境和经济效益。”

“不一定非得在名校才能做好的研究”

一直以来，工业上生产尿素需要在高温高压下让氨气和二氧化碳发生反应，能耗巨大。“我们的方法在温和条件下就能实现转化，不仅节能环保，还能保证产品的高纯度和尿素分子的完整性。而且，我们的碳基催化材料稳定性好、价格低廉。”时新建说。

这项从“液态黄金”提炼出“固态宝藏”的技术还蕴含着巨大的应用和转化价值。研究显示，该方法每日生产1吨过碳酸胺只需要100平方米的土地，以及来自6382户家庭或3800头奶牛的尿液，相比传统方法成本更低，且能产生更纯、更有价值的最终产物，具有很高的工程可行性。

令研究团队惊喜的是，这项工作还入选了期刊封面。“我们的封面设计图中，催化剂被设计成蝴蝶的翅膀，意味着尿液废水经过处理后，“蜕变”为环境友好型的高附加值产物和较为干净的液体。”时新建解释。

谈起研究从想法“蜕变”为现实的密码，他回答说：“因为有团队的协作努力，每个人都全力以赴。”

面向未来，时新建构想出一套城市废水处理产业化方案：设计出一个大型设备，尿液通过后，产生的固体被自动收集，液体继续往前流动。经过反应池后，液体会变得越来越纯净，尿素含量越来越低，最终将尿液转化为纯水、尿素以及其他无机盐三相分离，变废为宝。

不仅如此，在新能源领域，他所在团队还与多家企业合作，针对海上能源站开发了基于光伏和光催化技术的原位产氢装置创新技术。“不一定非要在斯坦福等名校才能做好的研究，大家更在意的是否在好的团队。我相信在河南大学一样可以建设这样的团队。”时新建说，“何况河南大学也有多个‘双一流’学科示范点，我们的材料专业也在快速向‘双一流’学科发展。”

每天穿梭在河南大学郑州校区古韵与现代气息交融的校园中，与同事和学生做着喜欢的研究，时新建觉得这就是最幸福的事情。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1038/s41929-024-01277-3>

以创新姿态推进教育强国建设

■赵婷婷

近日，中共中央、国务院印发《教育强国建设规划纲要（2024—2035年）》（以下简称《纲要》），对教育强国建设作出全面部署。

《纲要》自启动研制以来就备受瞩目。这是一份贯彻落实党的二十大重大战略、习近平总书记关于教育的重要论述、全国教育大会精神的“答卷”，是引领未来10年我国教育发展的纲领性计划。因此，深入学习贯彻《纲要》的核心要义，按照《纲要》指引切实将各项任务落到实处，不仅直接关系到我国教育强国的建设成效，更是服务中国式现代化建设的重要任务。

首个以教育强国为主题的国家行动计划

“教育强国”作为一个政策话语正式出现在政府文件中是在2010年。当年印发的《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》提出“加快从教育大国向教育强国迈进”。2017年，党的十九大报告提出“建设教育强国是中华民族伟大复兴的基础工程”，“建设教育强国”首次被写进党的工作报告之中。2019年印发的《中国教育现代化2035》又提出“到2035年总体实现教育现代化，迈入教育强国行列”。2022年，党的二十大报告进一步指出，要“加快建设教育强国、科技强国、人才强国”。

“教育强国”从一个政策话语到成为党和政府的重大战略部署，首先应归功于近20年来我国教育发展取得的巨大成就。改革开放以来，我国教育经历了恢复发展和系统性重建后，渐渐步入正轨。因此，2010年，基于当时教育的发展状况，我国提出加快从教育大国向教育强国迈进，那时我们还没有足够的信心提出“建成教育强国”。

但是，从《国家中长期教育改革和发展规划纲要（2010—2020年）》出台到今天仅仅过

去15年，我国教育就已经发生格局性变化，取得世界瞩目的成就。我们已具备了建成教育强国的坚实基础，中国的教育既可以在国家发展中发挥更大作用，也能够在世界教育体系中占据更重要地位。其次，“教育强国”作为国家重大战略部署，体现了新时代党和国家对教育属性认识的不断深化。

长期以来，教育更多被看作民生事业，它在国家发展中的巨大潜能并没有被充分认识。但是，自党的十九大报告明确提出“建设教育强国是中华民族伟大复兴的基础工程”以来，教育被提到了前所未有的战略高度，成为国家发展中的重要战略性支撑。《纲要》提出教育具有政治属性、人民属性、战略属性，这对教育属性认识的提升意义重大，不仅深刻洞悉了教育的本质，更抓住了国家强盛、民族复兴的根本所在。因此，作为首个以教育强国为主题的国家行动计划，《纲要》的发布凸显了新时代党和国家大力发展教育的决心。

教育科技人才一体统筹推进

党的二十大报告提出教育科技人才一体统筹推进的发展思路，这一思路在《纲要》中得到充分贯彻和落实。首先，《纲要》提出的教育强国“六大特质”充分体现了教育、科技、人才的内在关联性和共生性。“六大特质”指思政引领力、人才竞争力、科技支撑力、民生保障力、社会协同力、国际影响力。这些特质并非就教育论教育，而是将教育强国建设放在整个社会系统中进行思考。历史经验表明，世界教育强国的重要特征就是教育、科技、人才的内在共生性，教育强大的国家必然是世界人才集聚地和世界科技创新中心，因此教育强国绝不仅仅只是教育强，必然也是科技强国和人才强国。因此，深入认识三者之间的

关系，是建设教育强国的关键所在。

其次，《纲要》提出的建设任务充分体现了教育科技人才一体统筹推进的思路。一方面，教育强国建设与人才强国建设密切相关，但是人才强国建设并不只是培养人，还要通过不断提高各级各类教育的质量，进而提高我国人力资源水平，使我国从人力资源大国向人力资源强国转变。《纲要》强调，要通过做强基础教育，提升国民整体素质；通过做强高等教育，提升拔尖创新人才的自主培养能力；通过做强职业教育，提升劳动力从业水平；通过做强终身教育，为公民提供不断学习发展的机会。

另一方面，教育强国建设与科技强国建设的关系非常密切。历史和现实表明，科技是第一生产力，特别是在当前国际科技竞争、产业竞争日益激烈的今天，科技创新的战略意义进一步凸显，因此，教育尤其是高等教育应在国家科技竞争中发挥重大作用。《纲要》强调，高等教育应为国家高水平科技自立自强提供支撑，高水平研究型大学应进一步发挥创新策源地的作用，在重大基础研究、关键核心技术、前沿科技发展等领域实现原创性突破，培育壮大国家战略科技力量，助力我国科技在更多领域实现领跑，占据科技和产业发展制高点，为国家发展赢得先机。可以说，教育科技人才一体统筹推进打开了教育强国建设的思路，拓宽了教育强国建设的视野，真正把教育强国建设当成一项系统工程推进。

以综合改革和自主创新推进教育强国建设落实落地

《纲要》作为行动方案，提出了一系列教育强国建设的路径和举措。这些举措中有两个最为亮眼的关键词——综合改革、自主创新。从综合改革来看，《纲要》不仅在高等教育部分提

八上火麦溪

友，好不惬意。

在这个过程中，小山村也焕发出与昔日完全不同的生机和活力。

除了民俗和旅游，李鹏来还憋着一个大招，未来几年他的泉水梨产业“钱景可期”。来到湖北省农业科学院研究员伍涛去年指导过的那片果园，满眼都是水泥柱、铁丝网以及梨树条组成的整齐“矩阵”。

李鹏来笑着说：“伍涛老师夸我是‘听话的孩子’，我按照他说的方法修剪、施肥、搭架，梨树长势明显好起来了。”这片“泉水梨”园区是他和村民们的试验田，种下的近千棵梨树预计今年7月结果。

按照估算，5年后这片梨园将带来超过16万元的年收益。除此之外，这些梨树还有观赏价值。梨花盛开的季节，来火麦溪的游客看到的将是“千树万树梨花开”的盛景。

无限生机待来年

与往年不同，为了欢迎《中国科学报》采访组，老郑特意穿了一身深蓝色的西装，这还

是他当年获评劳模领奖时的穿搭。

“我不是为了拍照好看。我是想，贵客到，穿西服有个好气象，好兆头，希望一年更比一年好。”老郑说，现在自己无债一身轻，但绝不能停下来，还要继续做好三件事。

哪三件？一是做强一个好产业。他介绍，火麦溪山大人稀，自然环境适合搞养殖。现在自己的羊羊肉供不应求，下一步他打算带动更多人一起干，利用自己的渠道，带着大伙儿增收致富。

二是挖掘一口惠民井。火麦溪一带海拔高，枯水期灌溉用水不足，村民们用水不便。为了解决这个困扰几代人的问题，他翻山越岭找水，终于在崖壁之间、密林深处找到一处水源。

当地干部介绍，郑学群说的水源位于火麦溪深处一个叫老寨槽的山峰上。那里的海拔比火麦溪高100多米，藏着一处不为人知的山洞，山洞仅能容一人爬行。老郑只身钻进山洞，发现那里的水源非常充沛。目前镇里、村里也注意到了这处水源。

“现在政策好，镇里、县里都在帮忙，我是

劳模，得为大伙儿多做点事情。我有信心把这事办成，解决大伙儿的缺水问题。”说起找水，老郑信心满满。

三是打造一条景观路。10多里长的火麦溪阴坡公路，倾注了郑学群20多年的心血。现在，这条路已经成了当地村民的致富路。从去年开始，老郑决定在这条路的两旁有规划地栽种桂花树、银杏树、柿子树等本土苗木，打造一条景观路。

去年，老郑自己出钱、出工在进村公路两侧栽下了100多棵行道树，每隔五米栽一棵。2025年，他计划再种三四百棵，让这条曾经难以通行的山路变成火麦溪的“景观长廊”。

“到那时候游客开车上山，一路都是桂花香、甜柿香，咱火麦溪的景就更美了。”透过老郑坚毅的眼神，我们看到的还是偏远山村百姓改变家乡面貌的执着和坚毅。握住老郑粗糙的手，和他道别，并定下“来年再上山”的约定。

时光在变，岁月易老，土家族人靠奋斗改变生活面貌的决心却坚如磐石，令人肃然起敬。

火麦溪的变化，又何尝不是中国千千万万偏远山村，从打赢脱贫攻坚战到奋力实现乡村振兴的一个时代缩影？