

架起智能计算的“通用桥梁”

■本报记者 田瑞颖

“上大舞台，做大事。”这个信念早已融入清华大学教授汪玉团队的科研基因。

在国家迈向人工智能(AI)强国的进程中，算力已成为新一代关键基础设施。然而，一个严峻的现实摆在面前：AI 算法对算力的需求每 3 至 4 个月翻一番，远快于硬件性能 18 至 24 个月的迭代周期。特别是在先进制程工艺受限的背景下，如何利用现有硬件资源突破算力瓶颈、提升计算能效，成为亟待攻克的核心难题。

国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目“面向智能应用场景的大规模多源异构计算架构研究”(以下简称企业创新发展联合基金项目)，为这一瓶颈的突破带来了希望。

汪玉团队联合中国科学院计算技术研究所研究员杜子东团队、中国电子科技集团公司第十五研究所(以下简称中电十五所)首席专家兼研究员杨军团队，开启了一段为期 4 年的协同攻关。他们在纷繁复杂的智能应用与多样化的计算硬件之间，架设一座高效、统一的“桥梁”。

“通过企业创新发展联合基金项目，我们真正实现了企业‘出题’、科学家‘答题’。”汪玉在接受《中国科学报》采访时表示，“我们以国家智能算力能效瓶颈为牵引，聚焦多源异构计算架构创新，在智能应用的真实场景中进行架构级创新，回应了国家在智能计算领域提升自主可控能力的迫切需求。”

破解智能时代的“算力迷宫”

AI 的世界，犹如一个巨大的“算力迷宫”。“迷宫”的上层是千变万化的应用场景，从需要毫秒级响应的智能推理，到处理海量数据的大规模训练；从服务类机器人到智能车联网，任务需求复杂多样。而“迷宫”的下层是形态各异的硬件“军团”，诸如通用性强但能效偏低的中央处理器(CPU)、适合大规模并行计算但成本高昂的图形处理器(GPU)、灵活可编程能效较高的可编程门阵列(FPGA)、以及为特定算法定制的极致能效的应用集成电路(ASIC)芯片等。

汪玉解释，提升计算能效通常有三条主要路径：一是缩小工艺和芯片尺寸，二是设计面向特定任务的定制化加速器，三是通过新器件与新模型协同发展突破现有架构瓶颈。

为了弥补 AI 算力需求与硬件性能之间日益扩大的差距，他们希望通过异构计算将上述



汪玉在课堂上。

受访者供图

三条路径的优势进行融合。“异构计算能够根据不同应用场景选取最匹配的硬件类型，并在具体场景中灵活结合上述能效提升手段，从而有效应对 AI 计算面临的能效挑战。”汪玉说。

2020 年，清华大学等 3 家单位正式合作，启动了企业创新发展联合基金项目，旨在通过在多智能计算框架和多智能计算硬件平台中引入中间层抽象，实现对多框架多硬件的统一接口，并进一步实现智能计算任务在数据中心的快速与高效调度。

“企业创新发展联合基金项目启动时，大模型还没有像今天这样席卷全球，但我们已经预见到，应用和硬件的双重多样性将使它们之间的‘匹配’变得异常困难。”汪玉说。

他进一步解释，如果有 N 种应用框架需要映射到 M 种硬件平台上，没有统一的中间层，就需要设计“N×M”种映射方法，这种复杂度和工作量是不可持续的。而这个问题在产业界表现得尤为突出，中电十五所的很多关键应用场景就因此受制。

多家单位联合攻关下，一种创新解决方案应运而生，那就是在应用与硬件之间构建一个“中间表示层”。这个中间层通过统一的算子抽象和硬件虚拟化，将复杂度从“N×M”降低至“N+M”，最终提高在异构硬件平台上的开发及计算效率。

“中电十五所作为重要的产业需求方，他

们在信息化建设中遇到的真实问题为我们的研究提供了明确的方向和验证场景。”汪玉表示。

从“单兵作战”到“国家队”

企业创新发展联合基金项目的资助让 3 个团队实现了强强联合，优势互补，打造了“基础—应用—工程”贯通的研究体系，从源头上突破传统单一学科、单一机构的研究边界。

汪玉团队在低功耗电路与软硬件协同优化领域拥有多年研究经验，在机器学习加速器硬件结构与软件优化方面处于国际领先水平，曾获中国计算机学会技术发明奖一等奖；杜子东团队在深度学习硬件加速器领域处于国际领先水平；杨军团队在高效分布式计算架构、大规模智能应用部署与中间件支持方面有很多积累，中电十五所还基于多种异构 CPU 构建了自主可控的云高效计算资源调度平台，具有实际的应用异构算力和应用场景。

在企业创新发展联合基金项目的资助下，科研团队经过 4 年的潜心研究与工程实践，在关键技术上取得了一系列进展。

在基础理论层面，团队在算子定义与抽象方面取得了重要进展。他们提出的面向神经网络的一算子抽象，实现了稀疏/超稀疏算法的高效硬件加速。实验数据显示，这项技术可以将特定算法速度最高提升 10 倍，同时将存储需求最多压缩至十分之一。

在核心技术层面，硬件资源抽象方面的创新尤为突出。研究团队构建的快速系统仿真框架，将多任务分布式异构硬件仿真速度提升了 1 到 2 个数量级，同时将算法迁移性能下降控制在 1% 以内。这项技术的突破，使得大规模异构计算系统的调试和优化效率实现了质的飞跃。

在系统优化层面，他们在异构任务调度方面实现了“架构—调度—映射”的联合优化。通过创新性的调度算法，他们将调度开销降至十

分之一以下，能耗延时积最低降至九分之一。这项技术创新显著提升了系统能效比，为绿色计算提供了技术支撑。

在平台建设层面，研究团队搭建的原型系统支持 PaddlePaddle、PyTorch 等多种 AI 框架，以及国产 CPU、ASIC、FPGA 和英伟达 GPU 等硬件，确保统一中间层技术的可落地、可验证。

“我们从‘单兵作战’变成了协同共进的‘国家队’。”汪玉说。

“上大舞台，做大事”

“科研成果不应只满足于‘上书架’，要确保成果能够转化为实际应用，实现‘上货架’的目标。”汪玉说。

在开展企业创新发展联合基金项目期间，研究团队承接了一项极具挑战性的任务，为某单位智能计算基础平台竞赛搭建支撑系统。这意味着他们要在 2 个月内，将研究成果转化为能稳定支撑近 200 台服务器、180 余支队伍、近千名选手在线竞技的实战平台。

所有人员都进入了“战时状态”，平均每天近 16 小时的工作是常态。在这支队伍中，不乏刚步入科研生涯的学生和青年科研人员，没有人感到倦怠，反而斗志昂扬。“大家想的就是上大舞台，做大事，机会来了，那就抓住干！”汪玉说。

最终，他们顺利地完成了这次“大考”，获得了参赛队伍对系统稳定性的一致好评。“那段时间虽然披星戴月地工作，但看着系统一天天稳定起来，最终完美地支撑那么多选手同台竞技，这种成就感是无可替代的。”对于这段经历，汪玉团队成员曾书霖感慨道。

《中国科学报》：你和团队在企业创新发展联合基金项目的科学研究中，对协同攻关有哪些切身体会？

汪玉：在企业创新发展联合基金项目的实施中，我们有了更高的使命感和责任感，必须解决产业的真问题，啃下“硬骨头”。

这一系列成果的取得得益于在企业创新发展联合基金项目支持下，团队共享平台、算力、数据和测试资源，直接推动了科研资源流动与成果转化。

这些成果迅速走出了实验室，形成了既“上书架”又“上货架”的良性循环，展现出巨大的应用价值和战略意义。

企业创新发展联合基金项目中孕育出的技术已深度应用于中电十五所的“小可”大语言模型等产品中，致力于在国产芯片上实现高效的训练与推理。“在一些特定环境下，数据无法公开，必须在一个私域内用国产芯片进行高效计算。我们的技术让这成为可能，并在重点领域得到了应用。”汪玉说。

基于上述技术的启发，汪玉希望推动科技成果转化走向产业化应用。2023 年 5 月，在清华大学的支持和推动下，汪玉团队成立了上海无问芯穹智能科技有限公司(以下简称无问芯穹)。该公司专注于解决大模型在多元异构芯片上的高效部署问题，支撑包括大语言模型、科学计算在内的多种智能计算应用，旨在大力推动企业创新发展联合基金项目成果实现产业化应用。

成立第二年，无问芯穹就获得了“2024 年上海市重点服务独角兽(潜力)企业”“2024 年中国 AI 算力层创新企业”“2024 年中国人工智能行业高科技高成长企业”等荣誉。截至目前，无问芯穹已获得超 10 亿元的融资，市场前景广阔。

汪玉告诉《中国科学报》，通过参与企业创新发展联合基金项目，青年科研人员和研究生培养了系统思维和工程能力。“学生在这个过程中能看到整个闭环，能感受到产业是什么样的，而不仅仅停留在实验室里。”

无问芯穹的联合创始人戴国浩就是从该项目中走出来的青年代表。“参与项目的过程，让我深刻理解了从实验室技术到产业产品的完整路径。这种经验对于我们在企业推进技术创新至关重要。”

《中国科学报》：请问你对企业创新发展联合基金项目未来部署有什么具体建议？

汪玉：着眼于联合基金的未来发展，我建议进一步强化“科研+中试”的联动，打破科研与中试阶段的衔接壁垒，推动技术研发与工程化验证的深度融合，让实验室成果更顺畅地走向产业化前端；设立更大力度的后续滚动支持机制，让那些在联合基金项目中表现出色、展现出巨大应用潜力的团队，获得持续、稳定的支持。

一个“边缘”作物的顶天立地路

■本报记者 冯丽妃

10 月，正值稻谷归仓。从江苏盐城的沿海滩涂到宁夏贺兰山下的盐碱地，再到山东东营黄河入海口盐碱地，一片片高大的甜高粱在风中摇曳，而籽粒沉甸甸的红色穗头压弯了茎秆。

“高粱是个‘骆驼植物’，天生耐旱、耐盐碱、耐贫瘠。”中国科学院遗传与发育生物学研究所(以下简称遗传发育所)研究员、玉米等作物种质创新及分子育种国家重点实验室主任谢旗说。这是他开展甜高粱研究的第 18 个年头。

回望来路，谢旗不曾料到，当初他心中那个跃跃欲试的念头，如今已在全国 50 多万亩盐碱地上开花结果。围绕高粱这个人们眼中的小众“边缘”作物，他和团队不仅实现了产业化推广，还挖掘出一系列关键耐逆基因，在国家饲料粮安全主战场发挥着重要作用。

近日，谢旗接受《中国科学报》专访时，回顾了这段从零起步到“顶天立地”的科研历程。他表示，获批国家自然科学基金联合基金重点支持项目“经济作物甜高粱耐盐碱分子机制及种质创新”(以下简称联合基金项目)，是其中至关重要的一个转折点。

从零起步，锁定“骆驼植物”

遗传发育所里谢旗的办公室桌上，放着一大瓶形态各异的高粱样本。那是他和团队多年来选育的甜高粱品种，也是他们科研路上最真实的见证。每当有客来访，他总会热情介绍：“这是抗鸟食的高粱，这是颖壳易脱的高粱，这是带‘稻花香’味的高粱……”

一切的起点，要回溯到 2007 年。彼时的谢旗已是植物逆境生物学领域的知名学者，在模式植物——拟南芥的耐逆机制研究中成果丰硕，发表多篇高水平论文。然而，一个问题始终萦绕在他心头：“我们揭示了许多漂亮的分子机制，但它们怎么才能真正用到田里，解决农民的实际问题？”

模式植物研究难以回答这个问题。谢旗的目光最终落在了高粱上——这种起源于非洲撒哈拉沙漠边缘的“骆驼植物”，天生可在逆境中生存，还能通过气生根与微生物联合固氮，减少化肥依赖。

更重要的是，谢旗从小在江苏如皋长大，记忆里就有吃“甜秆儿”的习惯。“长江以南种

甘蔗，我们长江以北就种甜高粱。夏天，我们那里家家户户都会种一小块甜高粱地，种出的甜高粱像甘蔗一样嚼着吃。现在网上还能买到。”

这个童年记忆，点燃了他的科研灵感。

2007 年起，谢旗开始系统收集甜高粱种质资源。他发动家人帮忙，开着小卡车在上海崇明岛和江苏南通等地挨家挨户走访农民，尝甜度、看长势，并带回第一批农家品种。此后，他又与地方农业科学院、农业高校合作，逐步建立起如今涵盖全球超 1200 份材料的甜高粱种质资源库。

2009 年，谢旗与江苏沿海地区农业科学研究所合作，在盐城滩涂试种甜高粱。那是他第一次真正把实验室搬到盐碱地上。他那时的思路很简单——先做应用推广，满足农民和产业的实际需求，借助地方和企业的支持让研究持续进行。

“一开始没经费、没人手，只有我和一名研究助理收样本、做试验、跑田间。”他回忆说，“那时不敢让研究生参加，因为没积累，怕耽误他们毕业。”

不过，那段最困难的日子还是坚持下来了。2012 年，试验初见成效。他们与企业合作，在盐城建立起一套盐碱地循环农业模式。甜高粱整株粉碎后进行青贮发酵，用于养殖；千亩养殖区年出栏羊可达 30 万只，羊粪经发酵处理又还田作为有机肥，形成“高粱—畜牧—有机肥—土壤改良”的生态闭环。

这一年，这套盐碱地循环农业模式让谢旗和团队获得中国科学院 8 万元精准扶贫示范推广资助，开始在山东、宁夏、内蒙古等地将甜高粱作为优质饲料加以推广，既能助力农民增收，又能缓解饲料粮短缺问题。

随着田间实践的深入，团队系统收集了材料，积累了种植经验，还在种植和生产的过程中发现了一系列的科学问题。2016 年起谢旗开始招收高粱研究方向的研究生，系统布局甜高粱的基础机理研究，目标是“反向指导品种改良，让品种更实用、更好用”。

厚积薄发，驶入“快车道”

真正的转折发生在 2019 年。谢旗牵头申请的联合基金项目获批。这不仅是一笔关键经费，更是国家对他们研究方向的认可。“这笔资



谢旗(右二)团队在试验田。受访者供图

金如同及时雨，让我们能真正放手开展深入的基础研究。”谢旗说。

在他看来，联合基金项目的特点是既要追求自由探索的科学高度，也要服务于地方的产业需求。这正与他“从田间来，到田间去”的想法契合。

有了稳定支持，研究迅速驶入“快车道”。短短 5 年间，他们在基础研究领域接连取得突破。利用基因编辑技术，培育出带有“稻花香”气味的甜高粱，让动物更爱取其茎叶，并提升了高粱酒、高粱醋的风味品质；发现鸟类避食的高粱种子富含单宁，并解析其代谢通路，为抗鸟害育种提供分子标记；找到控制种子包壳的关键基因位点 GC1，有助于大幅降低人工脱粒成本，提升机械化播种效率；在高粱中克隆主效耐碱基因 AT1，若全球 20% 盐碱地种植 AT1 改良作物，每年可增产粮食 2.5 亿吨以上，该成果入选两院院士评选的 2023 年度“中国十大科技进展新闻”和 2023 年“中国科学十大进展”；今年发现可像“开关”一样调控高粱对寄生植物的抗性基因，为抗寄生育种提供新路径。

这些成果不仅登上《科学》《细胞》等期刊，还有助于反哺育种实践，推动分子设计育种。基于此，研究团队培育出“中科甜”系列 6 个国家登记品种，具有耐盐碱、高生物量、高蛋白等特点。其中，“中科甜 968”株高可达 4.35 米，堪称“小巨人”，亩产秸秆 4 至 10 吨，籽粒 200 至 400 公斤，饲喂奶牛可使其日产奶量提升 0.5 至 2 公斤，成为盐碱地高效利用的“明星品种”。

如今，谢旗团队的甜高粱已在山东、江苏、宁夏、甘肃、新疆、黑龙江等地推广种植超 50

万亩。不同特性品种各展所长：适口性好、蛋白质高的品种可以给滩羊、湖羊等做饲料；可分蘖品种能适应干旱区种植，弥补出苗率不足；一些南方品种一年可收割 6 茬，极大提高土地利用效率；在北京通州，他们还种出“彩高粱”——白、黄、红三色错落有致，助力观光农业发展。

“我们的推广靠地方政府、企业和公益基金会共同驱动。”谢旗指出，这种“科研+企业+政府”的多方协作模式，确保了技术的有效落地与持续生命力。

感到欣慰，研究帮农民解决问题

在谢旗看来，做科研既要攻难题，也要育

《中国科学报》：对探索之路上的青年科学家，你有什么建议？

谢旗：第一，扎实的基础科学一定要做好，这是根本；第二，作物研究一定要走到田间去，科学问题是从田间发现的，不是办公室想出来的，要跟农民、产业界的人交流，知道他们需要什么，比如我们观察到“鸟不吃某种高粱”这一现象，揭示了影响鸟类选择性取食的机制，进而将其用到育种和酿酒质量调控上；第三，不要贪多，要集中攻克一两个问题，做深做透才能出成果，“东方不亮西方亮”的想法会导致什么都做不好；第四，要关注国家重大需求，解决真问题。

《中国科学报》：你多次获得国家自然科

学基金的资助，在申请方面有什么经验可以分享？

谢旗：国家自然科学基金的申请者水平较高，竞争激烈。我认为关键在于两点：一是基础扎实，国家自然科学基金是我国资助基础研究的主渠道，我们从 2007 年开始积累相关研究成果，材料、数据、技术的储备都达到了一定要求；二是要有好的想法，但这个想法不能脱离实际，应当结合国家重大需求，具备应用导向；三是要提前布局，18 年前我做盐碱地饲料作物时，还没有相关布局，现在这个领域已经很多人在做了；四是要有耐心，不要急于求成，建议青年学者深耕一个方向，慢慢积累，专注才能出成果。