

这条从长三角“转”到黄三角的“‘硼’友圈”，提气！

■本报记者 赵广立

6月22日，夏至刚过。中国科学院院士、先进纤维材料全国重点实验室主任朱美芳自上海抵达山东东营时，已是晚上。匆匆用过晚饭后，她向工作人员提出：“时间还早，能不能现在就去现场看看？”

这个让朱美芳深夜都想要去的“现场”，是坐落在山东合益气体股份有限公司(以下简称合益气体)的国内首套高丰度硼-10同位素分离装置。而合益气体距离她下榻的东营宾馆，不堵车也要半小时车程。

翌日，在高丰度硼-10同位素产业化成果发布会上，朱美芳在致辞中谈起她的“深夜造访”，高度评价道：“非常震撼，不虚此行！”

这套装置到底有何迷人之处，能让让已花甲的朱美芳不辞舟车劳顿、星夜前往？它让化工领域的院士专家感到“震撼”的，究竟是什么？

这还要从硼-10同位素这个核工业的“好朋友”说起。

“两副面孔、难分难解”的硼

自然界中，硼有“两副面孔”——硼-10和硼-11，二者的天然丰度分别约为20%和80%。别看只相差1个中子，硼-10有着极为优异的中子吸收特性，是众多关键领域不可替代的核心战略材料。

硼-10最核心的应用场景在核电领域。上海化工研究院院长商照聪向《中国科学报》介绍，硼-10酸作为中子吸收剂添加到一回路的冷却剂中，相比天然硼酸，总用量可大幅减少，能显著降低回路设备的腐蚀风险，是国产第三代“华龙一号”核电机组的关键材料。

此外，在船用核反应堆的小型化设计中，硼-10同样不可或缺。在高端医疗领域，肿瘤治疗中著名的“硼中子俘获治疗”法，其中的“硼”就是指硼-10同位素。

硼-10和硼-11是一对“孪生兄弟”，差异极小，但要将高丰度的硼-10同位素“单拎出来”，是一项世界难题。

“硼-10和硼-11仅有1个中子数的差异，两者性质极为相近，分离难度极高。”上海化工研究院精细化工研究所副所长吴高胜告诉《中国科学报》，高丰度硼-10同位素产业化面临多重技术与工程化难点，不仅反应条件苛刻，设备容易腐蚀、结焦，而且分离过程中对设备的稳定性要求极高，控制稍有偏差就难以稳定达标。此外，传统方法提取硼-10的过程能耗、物耗巨大，缺乏经济性。

“工业化生产要解决设备腐蚀、结焦堵塞、能耗



▲国内首套高丰度硼-10同位素分离装置现场。
▼鸟瞰国内首套高丰度硼-10同位素分离装置。
上海化工研究院供图

物耗高等一系列工程难题，这也是我国半个多世纪以来未能实现稳定量产的核心原因。”吴高胜说。

记者了解到，硼-10的制备技术和市场长期被美国、日本等国外的企业垄断，我国对高丰度硼-10的需求严重依赖进口。近年来，美、日已开始限制硼-10相关产品的出口，国内存在极大的“卡脖子”风险。

我国自上世纪五六十年代便启动硼同位素相关研究，但始终未能攻克高丰度硼-10同位素富集及规模化量产的核心技术，无法稳定产出满足核工业级标准的合格产品，这也导致我国在硼-10高端应用领域长期处于空白状态。

因此，莅临活动现场的中国科学院院士、华东理工大学副校长朱为宏向《中国科学报》表示：“国产高丰度硼-10同位素核心技术和关键装置，是我国高水平科技自立自强的典型代表。”

“长三角”搭台，“黄三角”唱戏

6月23日，《中国科学报》记者造访了那个让朱美芳感到“非常震撼”的“现场”——一座十多层楼高的连体建筑，一米粗的冷凝管盘旋在楼顶，交换塔与精馏塔整齐排列，整座楼本身就是一套硼-10同位素产业化装置，气势恢宏。

年产百吨是什么概念？以往这种丰度的硼-10产品，国内只能实现公斤级的生产，且代价非常大。”商照聪对记者说，“该项目仅用

一年半时间，就完成了百吨级装置从设计、建设到达产的全流程，实现一次性开车成功。目前，装置已稳定产出25吨合格产品，在国外对我国限售前及时实现了破局。目前，硼-10产品最高丰度达到99.7%，且仍有进一步提升空间。”

从被“卡脖子”到打破国外垄断，再到创下新纪录，其间发生了什么？

这背后，是位于“长三角”的上海化工研究院“搭台”，先行完成硼-10的实验室富集研发，继而完成成套工艺设计，实现高丰度硼-10富集的核心技术突破；再联手位于“黄三角”的合益气体，共同推动硼-10同位素产品工程放大，实现百吨级产业化成果落地。

成立于1956年的上海化工研究院，是我国首批重点化学工业研究院，也是国内领先的稳定同位素开发和产业化基地，在同位素领域有着数十年的技术积累，成功开发了氘(重水)、氧-18、氮-15、氦-22、硼-11、碳-13等多种同位素产品。商照聪告诉记者，此次硼-10的成功量产，正是“站在”硼-11分离的“肩膀”上实现的。

他介绍，作为半导体器件制造过程中离子注入的掺杂源，高丰度硼-11是保障高端芯片性能、可靠性及产业链安全的关键战略材料。上海化工研究院与位于黄河三角洲地区的合益气体联手，历时3年成功搭建起“基础研究-工艺优化-规模化量产-产品质控”四位一体的成熟产业体系，在国内首次实现高丰度硼-11的规模化生产，产品

指标达到国际先进水平，并成功应用于国内高端半导体企业。

“这为硼-10同位素分离的产业化攻关奠定了基础。”商照聪介绍，硼-11、硼-10的分离均基于化学交换法原理，但硼-10天然丰度更低，且需要长期维持裂解系统的稳定，技术难度更上一个台阶。不过，他们在硼-11电子特气产业化过程中积累的工艺控制、设备防腐、分析检测等技术经验，可直接为硼-10分离提供借鉴，大幅缩短了研发周期。

合益气体是三氟化硼(生产硼-10同位素的原料)行业的隐形冠军。该公司与上海化工研究院联手，共同完成了这个故事的完整拼图。

“为什么上世纪八九十年代就有团队做出了硼-10同位素产品，却一直未能实现产业化？我们深入行业才知道，除了当时的技术相对落后之外，还有两个重要原因，一是缺乏原料供给，二是大量副产品无处消纳。”合益气体总经理刘喜民向《中国科学报》解释说，这些原因使得当时无法实现硼-10的规模化生产，也进一步导致成本高企。“在我们做出来之前，要几千元一吨，现在几百万元一吨，售价只有原来的1/10。”

“大客户”下场参与产业化落地

硼-10同位素产品的量产，离不开“需求驱动”的力量。

为黑土地“强筋健骨”，这群“手艺人”守护中国饭碗

■本报记者 赵宇彤

五月的东北大地，一场场热火朝天的春播，持续播撒着新的希望。

在这里，除了辛勤耕耘的农户，还有一群人用心守护每一寸黑土地的生机。他们是来自中国科学院的“黑土卫士”。

2021年，中国科学院联合东北三省一区实施“黑土粮仓”科技会战，集结院内外27家研究机构、院外71家单位共1300余人，由中国科学院东北地理与农业生态研究所(以下简称东北地理所)作为一线指挥部。

“黑土地是‘耕地中的大熊猫’，保护黑土地就是保护国家粮食安全与生态安全的根基。本次‘黑土粮仓’科技会战以区域资源优化与生态屏障为核心底座，以水文调控、立体监测、侵蚀阻控为基础支撑，旨在破解黑土退化百年难题，构建长效保护体系，为东北黑土高质量发展指明方向、奠定基础。”中国科学院院士、“黑土粮仓”科技会战专项科学总顾问张佳宝说。

经历5年攻关，建成7个核心示范区，黑土耕作层厚度增加约14厘米，产量提升10%以上……围绕黑土地保护与利用，他们交出了一份亮眼的“成绩单”。

“把脉问诊”黑土地

“黑土地‘没劲儿了’。”从2005年“五一”国际劳动节起，20余年深耕一线的东北地理所研究员邹文秀，常常听到农户的“抱怨”。

东北平原沃野千里，区域内现有黑土耕地面积5.63亿亩，粮食产出约占全国总量的1/4，是我国粮食生产的“稳压器”和“压舱石”。

然而，沃土之下隐忧丛生——黑土耕作层有机质持续流失、水土侵蚀加剧、土壤结构硬化板结，整体呈现“变瘦、变薄、变硬”的退化格局。

“农户能感受到黑土地‘病’了，但他们找不到原因，更别说对策了。”邹文秀回忆道，这也是摆在科研人员面前的难题——要想“用好养好”黑土地，首先要开展退化阻控的机制研究。

但面对广袤的黑土地，如何精准高效地识别不同区域的“病症”，成了第一道坎。

“我们建立了多等级、多层次、代表性采样的技术体系。”“黑土粮仓”科技会战总工程师贾仲君告诉记者，面向平原、丘陵等不同立地条件，综合考虑地形、气候、水文等因素，团队提升了采样的效率与准确度。

目前，他们已建成国内最大的黑土地样本库和数据库，将黑土地空间异质性表征精度提升至93%，全面完成黑土信息“一张图”，涵盖



邹文秀(右)在进行技术讲解。
受访者供图

全域黑土区土壤属性与退化、作物种类与种植结构等6个类型、18个子类的核心数据集。

针对黑土地有机质流失“变瘦”的问题，贾仲君团队提出“固碳保氮、以氮促碳”的双轮驱动模式，借助同位素标记法，在全球首次定量测算出不同来源的土壤有机质对黑土肥力的相对贡献。

“在此基础上，我们也与红壤、潮土进行了土壤有机质的比较，进一步凸显了黑土地的优势。”贾仲君告诉记者。

然而，这片孕育了“北大仓”的沃土上，还藏着一道道犹如伤疤的侵蚀沟——漫川漫岗的地形地貌，春季融雪、夏季暴雨及呼啸的风，不断侵蚀着地表的黑土。

同时，东北地区区域差异性较大，纬度低、温度高的松嫩平原南部以薄层黑土区为主，纬度高、温度低的松嫩平原中北部则主要是中厚层黑土区。不仅自然条件各不相同，人为活动对黑土地的影响也存在显著差异。

“我们首次定量评价了自然因素和人为因素对黑土地侵蚀的贡献值。”贾仲君说，团队解决了漫川漫岗黑土地侵蚀估算的世界性难题，发现风蚀、水蚀、融蚀对黑土地侵蚀的贡献分别为11.2%、72.3%、16.5%。

基于以上工作，他们系统查明了近40年黑土地退化速率，并实现了黑土地退化耕地精准分区，划定5个退化等级、21个一级分区、844个二级分区，制定分级分类精准阻控6大分区方案。

“这为国家黑土地保护与利用工程和战略的制定提供了重要的本底数据和关键依据。”贾仲君自豪地说。

带着科学问题出发

有了黑土退化机制研究的科学指导，一场黑土地“保卫战”全面铺开——建立了7个万亩示范区，总覆盖面积达19.35万亩，技术推广面积5.4亿亩。

“5月1日正式播种，今天已经出苗了。”五月中旬，记者跟随东北地理所研究员梁爱珍的脚步，走进吉林省长春市农安县的万亩示范区，只见秸秆覆盖在黑土地上，两三厘米高的幼苗钻出地面，焕发蓬勃生机。

“我们完成了秸秆还田保育型耕作、保护性耕作米豆轮作、高效精准施肥与黑土智慧农业谷等功能区建设。”梁爱珍说，这里是他们升级打造“梨树模式2.0”的攻关战场。

薄层黑土区秸秆覆盖春季地温回升慢、播种和出苗质量差导致粮食增产潜力受限，是他们要攻克的重点难题。梁爱珍团队通过秸秆覆盖还田条耕、秸秆混播耕作等技术改善土壤结构，提升土壤生物多样性，进而增加土壤有机质含量。

蹲在苗带边上的梁爱珍，仔细观察着出苗情况，在秸秆覆盖量大的地块还会挖出种子看看发芽情况。

在这里，秸秆覆盖还田宽窄行免耕和条带耕作、秸秆覆盖-深翻交替还田耕作、秸秆

扎根黑土地治理一线的20余年，邹文秀无比感慨。

“手艺人”的坚持

“现在的土壤墒情很好。”梁爱珍摸了摸松软的黑土地，点了点头。面对这片常年黝黑的土地，科研人员是怎样判断好坏的？

答案就在他们“手”上。和黑土地打了10余年交道，温度、湿度、松软程度……摸一摸就能了解个大概。但真要说起这门“手艺”，还是农户更加娴熟。

因此，“梨树模式2.0”“龙江模式”等黑土保护综合技术体系的示范推广，离不开和农户的交流。“我们的技术必须要让农户看懂。”这是邹文秀始终如一的原则。他们走村串户，挨家挨户讲解“龙江模式”的优势，同时定期与农户沟通，收集意见，动态调整施肥、品种选择、病虫害防控等方案。

这不是她一个人的坚持。实际上，自“黑土粮仓”科技会战启动以来，千余名科研人员走进黑土地，苦练这门“手艺”。

通过集体协同攻关，团队系统厘清了黑土地“变瘦、变薄、变硬”的退化过程与阻控机制，构建了区域适配的标准化保育技术体系，精准实现了耕层结构优化、有机质提升、节肥增效、稳产增产的综合治理成效。

随着黑土退化阻控机理研究持续推进，相关技术逐步落地，黑土地生态状况明显好转，这也对科研人员精准施策提出了更高要求。

“近年来，黑土地有机质含量稳步回升，但外源输入的有机质能否全部转化为作物可利用的有效养分，仍有待进一步科学论证。”邹文秀表示，作物生长不仅依赖有机质，还需要多种营养元素，土壤养分失衡同样会抑制作物生长。

“从整体情况来看，各地黑土地均存在不同程度的微量元素缺失问题。”这也是邹文秀团队下一阶段的研究重点。“黑土地同样需要‘营养师’，如何实现养分科学配比，仍有待深入探索。”

此外，在技术推广示范方面，落地到速率偏低、作业标准不统一等难题还有待解决。

“结合不同区域实际条件，耕作、施肥、深松等全流程技术规范，标准化体系仍需进一步完善。”梁爱珍表示，如今农户虽已逐步接纳新型种植模式，但普遍找不到适配自身地块的技术方案。因此还需持续加强技术培训，提升技术落地成效，推进全程标准化管理。

前路虽充满挑战，团队依旧干劲十足。在农安县的万亩示范区，“筑牢黑土粮仓，端稳中国饭碗”的标语在阳光下熠熠生辉。