



惜陨“卫星”，不落征帆

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“电离层变化性及其相关物理过程”

■本报记者 李晨阳

地球电离层，是地球上空60~1000公里范围内电离化的高层大气。普通人或许很少意识到它的存在，但渗透于我们生活方方面面的信息通讯、卫星导航，乃至雷达探测、飞行器运行等，都与电离层息息相关。

2013—2019年间，中科院院士、中科院地质与地球物理研究所（以下简称地质地球所）研究员万卫星作为负责人，在连续两期国家自然科学基金创新研究群体项目（以下简称创新研究群体项目）支持下，围绕“电离层变化性及其相关物理过程”开展了深入研究。不幸的是，万卫星院士近日辞世。

探索“爱发脾气”的电离层

创新研究群体的主要研究对象——地球电离层，被科学家们戏称为一个“爱发脾气”的家伙——受磁层能量注入、低层大气波动上传和背景热层等综合作用，电离层呈现出复杂多变的特点，有时还会发生剧烈的电离层暴和其他扰动现象。

要探究地球电离层千变万化背后的秘密，特别是揭示电离层在大时间尺度上的变化，就不得不把目光投向温室气体排放和地球磁场变化这两大影响因素。

“温室气体和地球磁场如何影响电离层变化？研究这个问题难度很大。”地质地球所研究员刘立波对《中国科学报》说，“第一个‘难’，是需要足够长时间跨度的探测资料，但空间物理学起步较晚，积累的数据在时间跨度上相当有限；第二个‘难’，是不仅要准确提取变化趋势，还要分离导致这些变化的因素。”

幸运的是，地质地球所拥有我国电离层观测历史最为悠久的台站之一——武汉空间环境野外科学观测研究站。自1946年建立以来，武汉站积累了70多年的电离层资料，这在全球范围内都实属难得。研究人员花费大量精力，对浩繁的纸版、胶卷等原始记录开展了数字化提取，形成了该领域国际最长电子化数据序列，保证了数据的时间跨度。此外，他们还采用人工智能等方法，准确提取出电离层参数的变化趋势，发现

武汉电离层高度在70年间下降了7千米。

为了确认电离层变化的影响因素，也为了将认知拓展到更长的时间尺度和更大的空间尺度，研究人员采用了夏威夷观测的CO₂资料、美国DMSP卫星资料，甚至还有从韩国古籍中整理出的2211条极光记录，他们从树木年轮推算太阳辐射信息、从冰芯中推算CO₂浓度的历史变迁……终于重构了长达12000年的全球电离层的电子变化情况，为未来的电离层长时间尺度变化研究打下了基础。

“我们还进一步把视角从地球拓展到其他行星，如火星等，证明了行星磁场对行星大气的保护作用。”刘立波说。

欲善其事，先利其器

作为一门实验科学，空间科学的成果突破，在很大程度上依赖于先进的平台和设备。

地质地球所原本就拥有北起漠河、途经北京和武汉、南到三亚的综合空间环境探测台链。在创新研究群体的资助下，这些台链得到了进一步升级，还建成了覆盖全国的全球导航卫星系统（GNSS）电离层天气监测网络。

电离层非相干散射雷达探测是代表一个国家实力的尖端技术，国外一直严格封锁技术。面对这种情况，万卫星带领同事们走访国内大型雷达研制单位，多方考察并精心设计，提出了适应我国情况的科学目标和技术方案。2015年，作为国家自然科学基金重大仪器研制项目，“三亚非相干散射雷达”获批通过，开始了如火如荼的建设。

“万老师曾经说过，这个雷达是我国电离层物理领域几代人的梦想。”创新研究群体项目成员之一、地质地球所研究员乐新安告诉《中国科学报》，“雷达预计今年年底竣工，它能显著提升南海电离层的综合探测能力，助力南海导航通讯应用。”

“在这些‘重器’的基础上，我们还充分发挥了台链、台网优势，以我国为主进行国际合作，开展了系列国际联合组网探测。”刘立波说。

创新研究群体一路走来，硕果累累，发展了数字电离层关键技术，拓展了古电离层和行

星空间环境等新兴领域……成果获得了2015年度国家自然科学基金二等奖，团队主要成员也收获了何梁何利科技奖、中国青年科技奖、赵九章奖等奖励。

薪尽火传，征途不息

“我们的征程是星辰大海”——创新研究群体的科研成员们有时会如此打趣。

然而，2020年5月20日，年仅62岁的万卫星因病与世长辞。这位中国空间科学和行星物理领域的学术大家、中国首次火星探测项目的首席科学家，遗憾地停下了奔向星辰大海的步伐。

万卫星的英年早逝，给创新研究群体的每个人留下了深深的哀痛。“卫星”惜陨，征帆不落——而今，这份悲痛化作更加坚定的力量。

“你们的工作现在怎么样了？”“请放心，一切都在正轨。”

面对研究所领导的关怀和询问，项目组成员们坚定地回答。

在创新研究群体执行的过程中，万卫星有意识地重点培养了一批年轻人才。这些项目启动时才30岁出头的青年科研人员，经过几年的历练，大多已成长为我国空间科学领域的中坚力量。在创新研究群体的“80后”成员中，至少已“繁育”出5名研究员、6名副研究员。再加上引进的一批年轻人才，如今已经形成了一支行星空间科学研究的有力队伍。

2015年归国的乐新安，从第二期开始加入创新研究群体项目。在万卫星确诊重疾后，他肩负起了建设三亚非相干散射雷达的相关工作。

“这对我而言是很大的挑战，也是很大的锻炼。”乐新安说，在创新研究群体的支持下，他和同事们不仅开展基础科研攻关，也在雷达建设一线为工程奔波，“在这个过程中，每个人都收获颇丰，成长很多。”

在乐新安看来，创新研究群体的资助模式，能够确保一支科研团队在数年的时间里，把精力集中在一件事情上。“我最欣赏的是这个项目对科研人员的信任和尊重，这让我们能尽最大努力去做最重要的工作。”



万卫星生前在漠河台站检查流星雷达天线。课题组供图

电离层研究：立足地球，面向群星

《中国科学报》：创新研究项目结束后，接下来的研究任务还有哪些？

乐新安：创新研究项目进行了不少观测设备建设，接下来还要充分利用这些观测数据进行相关的科学研究，比如利用GNSS北斗监测网进行电离层天气研究和应用，利用多手段多波段流星观测系统进行电离层不均匀体和流星天文研究；我们之前已经开展了火星空间环境预先研究，接下来会结合我国“天问一号”火星探测器的观测进行特色火星研究，服务我国火星探测项目和深空战略；在数字电离层系统的初步构建基础上，后续将继续结合我国的具体数据，进行应用示范系统构建，满足实际工程需求。

《中国科学报》：今年年底三亚非相干散射雷达建成以后，会给研究带来哪些新机遇？

乐新安：三亚雷达建成后，我们将具备自主的可连续运行的非相干雷达观测能力，可以开展东亚地区电离层区域特性研究、低纬电离层—热层—磁层耦合研究、我国南方电离层闪烁与不均匀体监测等工作。

《中国科学报》：如何评价我国学者近年来在地球电离层领域取得的进展？在国际上处于什么地位？

乐新安：我国学者在地球电离层的各个细分领域都有广泛深入的研究，包括空地基多手段多参数观测方法和设备发展、多重尺度电离层变化特性及机理、大气层—电离层—磁层耦合、数值模拟与数据同化等。

整体来讲，我国的电离层研究特色鲜明，成果的数量也是领先的，而整体研究质量还有待提高。

《中国科学报》：世界范围内，电离层研究

领域还有哪些重要问题尚未得到解答？研究难点在哪里？

乐新安：我个人认为尚未解决的重要问题是很多电离层小尺度结构和过程还不明确，如低纬地区的不均匀体、高纬的极化流等，主要的难点是研究手段欠缺，比如观测没有那么高的时间或者空间分辨率，观测参量覆盖有限，理论模式存在太多的参数化过程，且各种小尺度过程的物理机制并不明确，因此理论模式研究小尺度过程目前能力有限。

此外，电离层精确预报和短临预报能力还有待提高，主要难点在于观测数量和质量相对低层大气还相差甚远，通过数据同化预报很难满足实际需求。

《中国科学报》：未来的电离层研究最有可能在哪些领域取得突破？地质地球所是否已经有了相关布局？

乐新安：最可能取得突破的领域应该是小尺度电离层结构及机理研究。我们目前建设的中国GNSS北斗监测网、流星多手段多波段观测系统、三亚非相干散射雷达都将为该方面的研究提供一手数据；同时正在建设的海南三站式非相干散射雷达和三亚高频雷达，建成后具备电场漂移速度的矢量探测能力和超远程不均匀体的监测能力，将极大提升电离层不均匀体的研究能力。

还有就是比较行星电离层研究，不同行星系统由于磁场、大气等差异很大，其电离层形态和特性差异较大，通过开展比较行星研究可以更好地进行机制理解，并对过去和未来进行预测。地质地球所已经成立了专门的行星物理研究团队，在地球、火星、金星电离层方面进行了系列研究。



吴孔明（右二）与团队成员一起观察棉铃虫饲养情况。课题组供图

6月中旬，新疆库尔勒的棉田里，棉花进入一年一度的蕾花期。棉铃正在快速生长，它们逐渐膨大、成熟，而后脱水吐絮，完成生长季。此时，嫩而多汁的棉铃，也为棉花害虫的生长提供了优渥条件。

站在熟悉的棉田里，中国农业科学院植物保护研究所（以下简称植保所）研究员陆宴辉注意到棉花蚜虫种群的些许变化。他与远在北京实验室的同事们进行交流，以获得有关棉花及其害虫之间的新规律。

2014年以来，在连续两期国家自然科学基金创新研究群体项目（以下简称创新研究群体项目）支持下，植保所研究员、中国工程院院士吴孔明带领陆宴辉等科研人员，围绕“棉花—害虫—天敌的互作机制”开展研究。

三代人的奋斗

1997年，我国开始商业化种植转基因抗虫棉花“Bt棉花”。这是一种经过基因工程改造的可以表达苏云金杆菌蛋白（Bt）的棉花，目的是让Bt蛋白杀死棉铃虫，实现在减低农药需求的同时提高棉花产量。

2014年，全国Bt棉花面积近400万公顷。为探索Bt棉花种植中的基础科学问题，国家自然科学基金启动创新研究群体项目“棉花—害虫—天敌的互作机制”。

回顾历史，我国植物保护领域三代人的奋斗和智慧凝聚其中。1950年，我国植物保护学科奠基人之一的齐兆生留学英国后回国，组建了植保所棉花害虫实验室，发明了化学农药处理种子通过内吸传导防治蚜虫的方法。随后的30年里，实验室完成了棉花害虫化学防治技术体系的研发。

上世纪80年代末到90年代，由中国工程院院士郭元奎牵头，研究团队发展了棉花害虫综合防治技术体系。“控制棉铃虫猖獗危害配套综合防治关键技术”“中国主要粮棉作物病虫害综合防治技术体系的创建和成效”先后获得国家

级和原农业部奖励。

2000年以来，接力棒交到吴孔明手中。“Bt棉花的种植让棉花产区形成了新的农业生态系统，这种以转基因技术产品为核心的生态系统不可避免地改变了传统生态系统中的物种关系。”吴孔明向《中国科学报》表示。

那么，棉花、害虫与天敌之间，会呈现出什么样的新关系？Bt棉花要如何开展大面积种植，才能真正实现既不危害生态系统、又不遭受害虫侵害？这些问题无疑向植物保护学者提出了新的挑战。

从基因到生态系统

创新研究群体项目执行6年来，研究人员从基因、个体到种群、群落，再到生态系统，开展了从微观到宏观的全尺度研究。

在基因层面，研究主要在实验室里围绕棉铃虫的抗性机制展开。和细菌对抗生素的抵抗一样，棉铃虫作为一个物种，也有很强的“求生欲”——它们长期食用Bt棉花后进化出抗性，导致Bt蛋白丧失杀虫活性。

吴孔明介绍，研究人员从生理机制、分子机制入手，阐明了由钙黏蛋白CAD、转运蛋白ABC、polycalin蛋白等基因突变介导的棉铃虫、红铃虫对Bt棉花抗性演化的机制。同时，还验证了CRISPR/Cas9技术应用于棉铃虫Bt抗性分子机制研究的可行性。

种群层面的研究则在田间进行。2005—2017年，研究人员系统监测我国13个省区市的221个棉铃虫田间种群对Bt—Cry1Ac蛋白的抗性水平，进而明确抗性演化趋势。数据表明，田间棉铃虫种群对Cry1Ac的敏感性水平降低，但尚未产生明显的抗性，Bt棉花仍然可以高效控制棉铃虫的发生与危害。

生态系统层面的空间尺度更大，土地利用、Bt棉花种植、气候条件等因素对棉花害虫种群调控作用机制，以及由盲蝽发生加重导致的Bt棉田害虫种群地位演替新机制等问

从田间到实验室：

“候鸟”式奔波探究虫口夺棉

——记国家自然科学基金创新研究群体项目“棉花—害虫—天敌的互作机制”

■本报记者 甘皓

题得以阐明。

“团队中，研究人员在田间与实验室开展各自的工作，同时保持着紧密协作。”陆宴辉告诉《中国科学报》。他自2011年起就在新疆的试验基地开展田间工作，观察、总结棉花害虫呈现出的新现象、凝练科学问题，与团队其他成员一起在田间、在实验室中解决这些问题。

在他的课题组里，研究生们像大雁一样随着棉花生长的周期“迁徙”。3月份到9月份的棉花生长季，他们都在新疆棉田里；9、10月份则回到北京一头扎进实验室中。

做“顶天立地”的研究

从田间提出问题，在基础科学上深挖，再回到田间，才能解决产业面临的问题，这是团队成

员的共识。

第二期创新研究群体项目重点布局的化学通讯方向，便是这样一个典范。植保所研究员王桂荣主攻昆虫嗅觉识别分子机制，重在实验室研究。在他看来，他研究的科学问题并不是从浩瀚文献中来，而是从团队关注的棉花害虫与天敌的行为出发。2016年，他们通过比较基因组学结合神经电生理记录等技术，揭示了蚜虫感受报警信息的神经和分子新机制。

“田间研究发现，昆虫在交配繁殖和觅食这两种行为上具有显著特点，基于这些观察，我们利用最新的CRISPR/Cas9基因编辑技术结合神经电生理记录等技术，揭示了性信息素拮抗剂参与调控棉铃虫最优交配时间，并阐明了其作用的分子机制。”他告诉《中国科学报》。

棉花害虫治理经验可复制

《中国科学报》：我国棉花害虫治理经历了什么样的历史过程？

吴孔明：棉铃虫是我国主要的棉花害虫，对它的防控策略经历了化学防治、以化学防治为主的综合防治和以转基因抗虫棉花（Bt棉花）为主的综合防治三个阶段。上世纪70年代，我国农业工业体系逐渐完善后，化学农药受到农民普遍欢迎。但很快，棉铃虫对此产生抗性，进而生态失衡，最终导致上世纪90年代初棉铃虫种群失控、环境恶化等一系列问题。

1997年河北省开始应用转基因抗虫棉花防治棉铃虫，2000年黄河流域转基因抗虫棉花种植比例超过棉花总面积的80%，并很快在长江流域等棉区推广应用。我们看到，转基因抗虫棉花的种植切断了棉铃虫取食小麦、棉花和玉米等作物的季节性食物链条，不仅高效控制了棉铃虫对棉花的危害，也大大降低了其对玉米和小麦等其他作物的危害。农业生态系统天敌数量持续增加，生防服务功能得到恢复，棉铃虫区域性灾变问题得到了有

效解决。

可以说，棉铃虫治理经验能够复制到其害虫的防治上。

《中国科学报》：以你们正在开展的草地贪夜蛾为例，棉铃虫的经验如何复制？

吴孔明：草地贪夜蛾的防控要采取两步走的策略。现阶段，要以实施化学防治为主的综合防治策略解决应急防控问题，防止因严重为害玉米和小麦等作物而发生粮食安全问题。预计自2020年起，草地贪夜蛾将在春、夏两季随季风向北逐代迁移进入我国长江流域、黄河流域和东北小麦、玉米等重要农作物主产区发生为害，形成对国家粮食生产安全的长期性威胁。

对照棉铃虫化学防治产生的后果以及以转基因抗虫棉花为主的防治技术的成功，第二个阶段应考虑采取以转基因抗虫玉米（Bt玉米）为主的防治策略。农业农村部2019年对两个转基因玉米品种颁发了农业转基因生物安全证书，这表明转基因抗虫玉米的应用技术已经趋于成熟。

在害虫与寄主植物通讯机制方面，他们则开发并生产出棉铃虫、盲蝽诱剂产品。

回顾创新研究群体的历程，吴孔明深有感触：“农业科学往往有三个阶段，一是‘躺在地上’，指的就是仅仅着眼于生产实际；二是‘坐在地上’，即集成现有技术形成新技术；三是‘站在地上’，指的是深耕基础研究，通过理论创新切实提高生产力。”

在这个阶段中，只有重视基础研究，才能让农业科学真正“顶天立地”。

如今，他带领团队正在开展草地贪夜蛾防控研究，这正是对棉铃虫等重大农业害虫防控理论创新的进一步应用和推广。“鉴于用Bt棉花治理棉铃虫的成功经验，应尽快制定实施以Bt玉米等高新技术为核心的草地贪夜蛾可持续治理策略。”吴孔明说。

因此，要充分利用应急防控阶段所能提供的3至5年窗口期，尽快制定实施以转基因抗虫玉米等高新技术为核心的草地贪夜蛾可持续治理策略。

《中国科学报》：第二个阶段，以转基因抗虫玉米（Bt玉米）为主的防治策略中的关键技术有哪些？

吴孔明：构建绿色可持续控制技术体系需要沿用先进的种群迁飞监测预测、成虫迁移阻隔和幼虫高效控制关键技术。

例如，现代信息技术的发展为害虫监测预警工作提供了前所未有的支持。目前，中国昆虫雷达的应用技术已趋于成熟，基本具备组建国家昆虫迁飞雷达监测网的条件。雷达网的大尺度监测和高空灯、地面灯、性诱捕器的小尺度监测网的一体化运行，可以精准定位定量草地贪夜蛾的成虫迁移动态，并通过网络实时发布。

此外，诱饵产品的研发和商业化应用，联合在相关区域建设灯诱、诱饵的天罗地网，将最大限度地降低成虫发生密度。