

解码矿物演化 支撑战略需求

■本报记者 高雅丽

在地球46亿年的漫长演化史中，矿物是最忠实的记录者。它们如同镌刻在地球深处的“时光档案”，封存着板块碰撞、岩浆活动、生命诞生与环境变迁的密码。

然而，要真正破译这些密码，仅靠传统的矿物结构描述与成分分析远远不够。2019年起，在国家自然科学基金委员会创新研究群体项目(以下简称创新研究群体项目)的持续支持下，中国科学院院士、中国科学院广州地球化学研究所研究员何宏平带领研究团队，以矿物研究为纽带，打破学科壁垒，深化交叉融合，在国际矿物学领域闯出一条中国道路。

2025年，该项目完成结题验收。团队不仅成长为具有国际影响力的创新研究群体队伍，更在矿物生长机制、早期地球演化、关键金属成矿等领域取得一系列原创成果。

当前，地球系统科学正处在重大理论突破的前夜，各国竞相布局。何宏平坚信：“我们应当积极争取率先突破，提出中国人主导的理论，发出中国人最强的声音，引领国际地球科学的发展。”

“聊”出来的交叉融合

20世纪90年代，传统矿物学研究遭遇了前所未有的困境。何宏平所在实验室的人员从80多人锐减至不足20人，仪器老化、经费短缺、研究方向分散，不少人纷纷转行。这个地球科学中最基础的学科之一，眼看就要断档。

“那时候我借了几万块钱，一个人开始干。”何宏平回忆。他拜访即将退休的老师，请教经验，争取支持。他坚信，矿物是地球的基本单元，就像细胞之于生命，没有矿物学的突破，很多重大地质问题永远找不到答案。

早期地球的矿物种类只有60多种，经过40多亿年的演化，如今已增至6200多种。在这一漫长过程中，如何控制元素的循环与富集？这是认识重大地质事件、成岩成矿过程的核心问题。何宏平意识到，要回答这些问题，矿物学绝不能受困于传统研究方法，必须打破学科壁垒，走向交叉融合。

他一点点梳理方向，一步步搭建团队，等待着一个合适的时机。2017年，何宏平开始酝酿申请创新研究群体项目。这个项目不支持单一方向的深入研究，而要求多学科交叉融合，何宏平看中的正是这一点。

他找到几位分别从事深部地质、矿床学、实验地球化学研究的同事，大家聚在一个研究所，过去却鲜有交集。何宏平一个一个聊，讲



何宏平(左)在广东梅州稀土矿山进行野外考察。受访者供图

他的想法。

“我很多想法不是看文献看出来的，是聊天聊出来的。100句话中99句没用，那一句有用的，抓住了就行。”何宏平说。

2019年，何宏平牵头申报的创新研究群体项目“矿物演化”正式获批。这不仅是一笔科研经费的支持，更是对团队多年坚守的认可，为学科发展注入了强心剂。项目围绕“矿物演化与元素循环”，老中青三代研究者同心协力，向着国际科学前沿发起冲击。

“石头真的会生氧气”

何宏平团队的第一个重大突破直指地球科学的基础问题之一：早期地球氧气从何而来？

长期以来，科学界普遍认为，地球早期氧气主要来自大气光化学反应。但在2015年左右，有学者通过模型计算提出，大气光化学反应产生的氧气量太少，不足以解释地球的氧化过程。

看到这个研究后，何宏平从矿物演化的角度切入，冒出了一个想法：早期地球表面只有石头和水，氧气如果出现，很可能来自石头与水的相互作用。

他们首先尝试黄铁矿，做了两年，却测不出氧气，二价铁会把刚产生的氧气迅速消耗掉。

转机来自一次闲聊。团队中有人提到石英的压电性：用力挤压石英晶体，会产生电荷。何宏平脑海中闪过一个念头：会不会是机械力作

用让石英与水反应产氧？

实验设计得很简单，把石英砂放进搅拌机，加水，在无氧环境中模拟海浪对沙石的磨蚀。他们惊喜地发现，当石英、长石等矿物受到机械外力作用时，表面会产生大量自由基，这些自由基与水发生界面反应，能够直接生成过氧化氢等活性氧物种。

更令人意外的是，通过氧同位素标记示踪，他们发现这些氧气中约70%的氧原子来自矿物本身，而不是水。

“石头真的会生氧气！”何宏平激动不已。这意味着，早期地球的初始氧可能来自最普通的矿物和水界面的反应。这一发现彻底颠覆了传统认知，为解释地球宜居环境的诞生、生命起源的化学基础提供了全新视角，被国际同行评价为“重新认识地球早期氧化过程的重要工作”。

在矿物形成机制这一基础领域，何宏平团队同样打破经典理论。传统矿物学认为，矿物生长遵循层生长或螺旋生长模式，如同盖房子，一层一层有序堆砌。而何宏平团队在地球岩石和月壤样品中，发现了“晶粒堆砌”“蘑菇式生长”两种全新的非经典生长途径。这一发现为丰富矿物生长机制提供了关键依据，让中国矿物学研究站上国际舞台。

“更要心里装着国家”

“做科研不能只盯着论文，更要心里装着国家。”这是何宏平常对团队说的话。在创新研

究群体项目支持下，何宏平团队始终坚持“基础研究顶天、应用研究立地”，将矿物演化的前沿探索与国家战略资源安全、绿色技术研发、矿产勘查突破紧密结合。

稀土是高端制造不可或缺的战略资源，但长期以来，传统开采技术依赖大量铵盐浸取，不仅资源利用率低，还带来生态环境压力。何宏平团队从矿物、微生物和流体相互作用入手，发现微生物在稀土矿形成中扮演关键角色，创新性地提出了电驱绿色开采新技术。

在战略矿产勘查领域，何宏平团队同样成果丰硕。斑岩铜矿是全球最重要的铜矿类型，也是我国紧缺的战略矿产。团队通过大量实验模拟与微区分析，揭示了钾化蚀变与铜矿化的内在耦合机制。这一理论突破，为全球斑岩铜矿勘查提供了全新的找矿模型，得到国际矿床学界高度认可。

从基础理论到应用技术，从实验室到矿山，何宏平团队用实实在在的成果，证明了“矿物学研究不仅能解答‘地球是如何改变的’这一科学问题，更能支撑‘国家需要什么’的战略需求”。

在国内，何宏平团队以创新研究群体项目为抓手，带动整个学科交叉融合发展。他们与深部地质过程、矿床勘查、环境科学等领域团队强强联合，将矿物微观演化机制与宏观地质过程相结合，形成全新的研究范式。广东省依托何宏平团队成立战略金属与绿色利用基础学科研究中心，投入4000万元资金支持，打造从基础理论、技术研发到示范推广的全链条创新平台，推动科研成果落地转化。

此外，在创新研究群体项目支持下，何宏平团队坚持“开放合作、互利共赢”，构建起覆盖全球的学术合作网络，与美国加州大学圣地亚哥分校、澳大利亚塔斯马尼亚大学、德国地学研究中心等国际顶尖机构建立长期稳定合作，让中国矿物学研究在全球舞台发出响亮声音。

敢于“扛事儿”的科研团队

“创新研究群体项目，不仅是出成果的团队，更是出人才的平台。”在何宏平看来，青年学者的成长与成才、实现学科的代际传承与可持续发展，都得益于创新研究群体项目。

走进何宏平的实验室，会发现一些“特别”的规矩。每天晚上11点到12点，何宏平会准时翻看聊天群，检查各实验室的检查报告；卫生情况、设备状态、有无异常。团队管理细化到67项工作，每项都有明确分工，谁负责、谁没到位，一目了然。

“我不是要管着他们，是要培养学生一种责任心。”何宏平说。团队构建了一套科学、精细、有温度的人才培养体系，把“立德树人”融入科研全过程。针对不同阶段学生的特点，何宏平提出清晰的培养理念：“本科生做填空题，夯实基础；硕士生做简答题，提升能力；博士生做论述题，挑战原创。”

何宏平团队内不搞“保姆式”指导，而是给学生足够的探索空间，允许试错，让年轻人在解决真问题、攻克真难题中练就真本领。

他鼓励学生关注“失败”的实验。“所谓的‘失败’往往藏着有价值的内容，因为大家都能想到的路，很难有惊喜；真正的突破，常常藏在那些你想不到的结果里。”

何宏平更注重给年轻人压担子、搭平台。团队立下一条不成文的规矩：负责人不超过50岁，让青年骨干牵头课题、负责项目、组织交流，在实践中提升科研能力与管理能力。

“没当过家，不知道柴米油盐贵。”何宏平坚信，年轻人只有真正扛起责任，才能快速成长为独当一面的学科带头人。

在项目执行期间，一大批青年人才脱颖而出，获得重要的学术奖项，30多次在国际学术组织和学术期刊任职，为学科发展注入源源不断的活力。

从冷门小众到国际前沿，在创新研究群体项目的支持下，何宏平团队用坚守与创新、严谨与担当，解开了一个个地球演化的矿物密码，走出了一条基础研究与国家需求相结合的科研道路。

但何宏平想得更多，他最近在构思一个更大胆的框架：矿物演化与生命演化到底有没有关系？可能存在什么样的关系？

“生物从元素到细胞到组织到生物体，矿物有没有类似谱系？从基本晶胞到不同矿物到岩石组合，会不会也有演化树？”他停顿了一下说：“也许我们能发现一些现在还没认识到的东西，就像暗物质一样。”

“基础研究是整个科学体系的源头，是所有技术问题的总机关。”何宏平团队用数十年的坚守充分证明，基础研究地基打得牢靠，在科学前沿实现突破以及为国家需求提供支撑是必然的，这充分说明基础研究在整个科学体系中的基础性、战略性、前瞻性地位。

未来，这支充满活力的创新研究群体团队将继续向着地球科学更深层次的未知领域探索前行，在矿物演化的浩瀚世界里，为保障国家战略资源安全、解答地球生命起源重大科学问题贡献更大力量。

摸清家底，为气候环境治理“算好账”

■本报记者 甘晓

温室气体和大气污染物无形无迹、难以捉摸。要想精准施策、科学开展气候环境治理，首先必须有一份摸清排放家底的精准“账本”。

2020年，国家自然科学基金创新研究群体项目“大气成分变化及气候环境影响”(以下简称项目)启动。清华大学地球系统科学系一支汇集了大气科学、环境科学、气候变化经济学等多学科骨干力量的科研团队集结成立。

在项目的支持下，科研团队构建了高分辨率温室气体和大气污染物排放数据库，并在此基础上揭示了气候变化与空气污染的协同应对机制及减排策略，为减排降碳协同应对国家重大战略需求提供了科技方案。2025年，该项目完成结题验收。

“基础研究应当始终紧盯国家需求，为解决实际问题提供科学支撑。”近日，中国科学院院士、清华大学地球系统科学系教授张强告诉《中国科学报》：“正是这样的初心，让我们能在一个方向上坚持多年，取得了一系列理论与应用成果。”

原创理论孕育中国方案

治理大气污染，首先要“摸清家底”。过去，人们往往只看到哪里污染严重，却难以明确是谁排污、排了多少。因此，要开出精准药方，就必须将模糊的定性判断转化为精确的定量数据，搞清污染物在时空上的具体分布与结构。

早在2016年，张强就在青年科学基金项目(A类)资助下，围绕人类活动产生的大气污染源排放展开研究。这些工作主要聚焦于定量分析复杂的人类活动到底释放了多少污染物，不同部门和行业的排放构成如何，它们在时空上呈现怎样的分布特征。

针对全国范围各类污染源构成复杂、体量巨大的特点，张强带领团队构建了大气成分源排放精细化动态表征技术体系，建立了中国大气污染物高分辨率排放清单数据库。这一数据库在技术层面显著提升了我国大气污染源排放表征能力，应用层面则为精准治污提供了决策依据。

气候变化与空气污染存在“同根同源”的关系。“这两个问题都主要源自化石燃料的燃烧与利用过程。该过程既产生二氧化碳，又排放各类污染物。”张强介绍，“像中国这样的发

展中国家往往同时面临治理空气污染和应对气候变化的压力，如何统筹考虑不同大气成分的气候环境影响，走出一条温室气体和大气污染协同治理的道路，是广大发展中国家共同面临的重大课题。”

针对这一国际公认的前沿方向缺乏系统完善理论体系的现状，张强带领团队决定迎难而上。“我们瞄准‘大气成分变化及气候环境影响’这一主题，申报创新研究群体项目，致力于提出一套由中国科学家设计的减排路径。”

恰逢2018年《打赢蓝天保卫战三年行动计划》颁布实施，张强团队深刻认识到，攻克这一科学前沿问题与国家重大战略需求高度契合。回应国家呼唤、勇担科研重任，成为团队共同的信念。“我们期望提出新的减排路径，为气候治理与空气质量改善提供关键的科学支撑。”

2020年，项目正式启动实施。

学科交叉破解复杂问题

面对如此复杂的问题，张强团队深知单一学科难以胜任。“要真正实现协同治理，光懂自然科学不够，还得算好经济账。”张强解释道，“同样的减排措施，在不同地区、不同行业实施，成本差异巨大。如果不考虑经济效益，政策就难以落地。”

该项目为跨学科组队攻关提供了良好平台。张强作为学术带头人，特意从海外高水平机构邀请具有气候变化经济学背景的关大博和刘竹“入群”，并与清华大学地球系统科学系从事气候模拟的罗勇、林岩鑫等学术骨干联合，组建起这支多学科融合的队伍。

张强还记得项目申请答辩时一位评委的犀利提问：“你们对中国的问题研究得很好，但这套体系放到全球是否依然适用？”正是这一问，促使团队深思基础研究成果如何从立足中国迈向服务全球。

几年来，在项目支持下，张强团队圆满完成了既定研究任务，相关成果取得前沿性的科学突破，兼具重要的学术价值与广泛的国际影响力。在排放源表征技术层面，团队创建了一套新方法，成功使大尺度排放表征的空间精



张强在工作中。受访者供图

度从行政区水平跃升至排放源个体水平，并据此构建了全球重点行业设施尺度大气成分排放数据库。在这一数据库基础上，团队发展了大气科学、环境科学与经济学多学科交叉模型方法，设计出高度融合气候治理与空气污染治理措施、充分释放减排协同减排潜力并兼顾成本效益的路径，从而达到切实保护人群健康的目的。

与此同时，一系列研究成果已深度融入国家环境治理决策体系。例如，排放源表征方面的成果有力支撑了国家大气排放源清单业务体系构建及“大气污染物和温室气体融合排放清单编制”工作；团队揭示了“双碳”目标下中国未来中长期PM2.5污染演变进程，阐明了实现碳中和目标对中国从根本上改善空气质量的重要作用。

对此，张强自豪地表示：“技术研判结果显示，中国科学家在排放源表征领域的研究在国际上已实现了从‘并跑’到‘领跑’的跨越，意味着我国科学家已在全球大气环境科学体系中占据了一席之地。”

久久为功，终有回报

时间回到2009年，张强回国加入清华大

学时，关于空气污染问题的基础研究尚处于起步阶段，经费短缺、关注度低是常态。“当时排放源研究是‘冷门’，数据量大、难度高、出成果慢，科研氛围很‘安静’，但我坚信这是解决环境问题的根本所在。”张强回忆道。

回国后的最初几年，张强团队始终聚焦排放源研究这一方向，在“冷板凳”上默默耕耘。他们花费大量时间收集整理各类排放数据，建立起一套适合中国国情的排放核算方法体系。

2013年起，面对国家环境治理的紧迫需求，团队前期的积累迅速转化为实战能力。张强表示，该研究具有突出的需求牵引特点，“治污任务迫使我们边研究边产出应用，及时响应治理一线不断升级的新要求”。

如今，当科研成果化作肉眼可见的蓝天白云，当百姓切实感受到环境的改善，这种超越所有论文指标的成就感成为激励团队年轻一代前赴后继、矢志不渝的精神源泉。

据了解，项目团队是一支典型的青年军。2020年项目启动时，张强只有42岁，核心骨干中还有两位39岁和34岁的青年才俊。

“早让有活力的青年人挑大梁、担重担，去攻坚与国家战略需求高度契合的重大科学问题，年轻队伍才能真正成长起来。”张强深有

感触。他认为，关键在于赋予年轻人清晰的方向感，让他们相信自己所从事的是服务国家、造福人民的前沿工作。

与此同时，张强团队也鼓励成员交叉合作、错位发展。“如果大家都跟着负责人的方向做，最后成果同质化，既不利于脱颖而出，也会导致内部过度竞争。”他说，“大家各自开拓新的方向，同时又保持合作，才能实现‘1+1>2’的效果。围绕同一个目标努力，久久为功，最终肯定会有回报。”

“我们的任务更重了”

常有人问：“现在空气质量已经这么好了，你们是不是可以歇歇了？”面对这样的疑问，张强回答：“恰恰相反，我们的任务更重了。”

PM2.5对人群的健康影响巨大。刚刚颁布实施的环境空气质量新标准，将PM2.5年均浓度二级限值由35微克/立方米调整为25微克/立方米。在张强团队看来，只有将PM2.5控制在更低水平，才能真正构筑起保护人民健康的防线，尤其是为儿童、老年人等脆弱群体提供更安全的环境。这正是他们面向人民生命健康开展科学研究的新坐标。

2025年，张强团队成功获批国家自然科学基金委员会专门针对青年科学家团队设立的卓越研究群体项目(B类)。张强介绍，在卓越研究群体项目(B类)的支持下，他们联合了中国科学技术大学、中国气象科学研究院等高校和科研机构，在大气成分智能感知方面形成了更强大的攻坚合力。

面向未来，他们期待通过自主研发大气成分协同变化智能感知技术，构建全球大气成分三维立体感知数据库，并在此基础上深入研究大气成分的协同演化机制以及气候健康效应，进而为全球气候环境治理提供更具针对性的科学支撑。

采访最后，张强特别为自然科学基金委专门支持青年科学家的新举措点赞。“创新研究群体和卓越研究群体项目都设立了专门支持青年科学家团队的类别。这类项目鼓励青年人基于优秀的想法自发‘抱团’，只要展现出解决重大科学问题的潜力，就能获得稳定支持，及早挑大梁、唱主角。”他表示。