

在地球上寻找宇宙线的源头

中青报·中青网记者 张 渺

黑洞是宇宙中最具吸引力的神秘天体之一。近日，中国科学院高能物理研究所发布了高海拔宇宙线观测站（LHAASO，拉索）两项具有里程碑意义的科学成果，都与黑洞有关。

其一是黑洞吸积驱动的微类星体是银河系中强大的粒子加速器，能够将质子加速至拍电子伏（PeV，1PeV=1000 万亿电子伏）能段；另一项成果是宇宙线质子能谱“膝区”显现超出预期的高能组分，黑洞正是其最可能的候选源天体。

“这几乎颠覆了我们对黑洞的传统理解。”中国科学院院士、拉索首席科学家曹臻说。

“黑洞一个鲜为人知的重要特性”

11月16日，位于北京的中国科学院高能物理研究所多学科大楼内，风已将树叶摇落，这正是引力作用的生动体现。而齐聚在这里的物理学家们，则在共同关注着不知多少光年之外黑洞的引力牵引——那里，宇宙线正被极端引力加速，形成壮观的喷流。

当天发布的两项成果，不仅揭示了宇宙线起源的关键机制，也为理解黑洞系统的极端物理过程开辟了一条新途径。它们由中国科学院高能物理研究所、南京大学、中国科学技术大学、罗马第一大学等机构完成，分别发表于《国家科学评论》（英文版）和《科学通报》（英文版）。

“这次的发现为何如此特殊？首先，什么是黑洞？大家在传统意义上如何理解黑洞？黑洞是否只是吞噬一切的存在？它疯狂地吸收周围的一切，再也不会吐出，连光都无法逃逸，因此被称为黑洞。然而，我们这次发现了黑洞一个鲜为人知的重要特性：它竟然是一个高能粒子加速器。”曹臻感慨道。

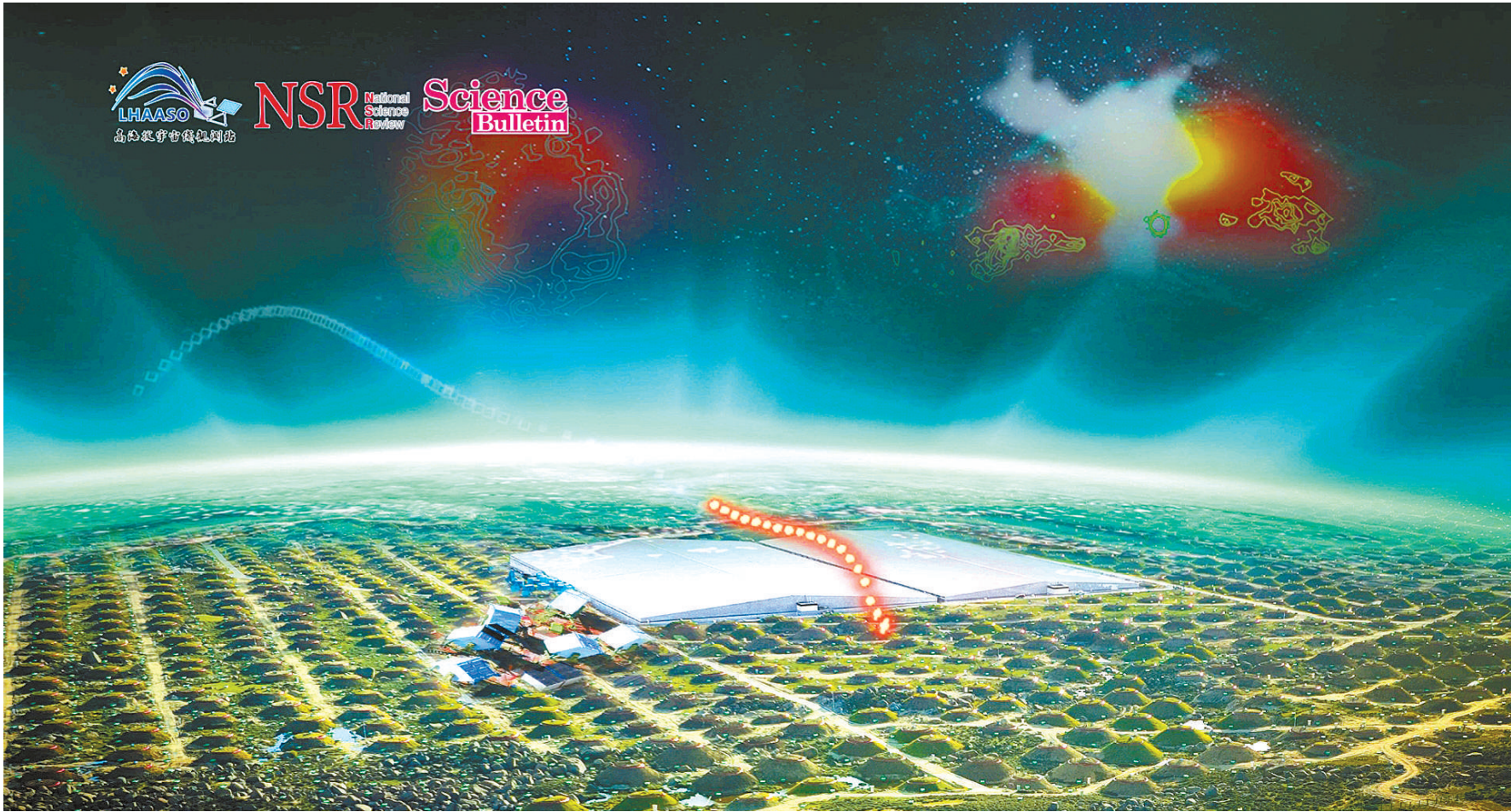
据他解释，在吸收物质的过程中，黑洞会释放出大量高能物质。处于双星系统中的黑洞在吸积伴星物质时可产生相对论性喷流，形成“微类星体”。而这一次，拉索系统性地探测到来自5个微类星体的超高能伽马射线。

“大家可以想象一个巨大的漩涡，黑洞就像这样一个漩涡，将周围的物质吸引过来，绕着它旋转，最终落入其中。然而，在旋转过程中，粒子越靠近黑洞，旋转速度越快，从而产生强烈的物质外流抛射。这些抛射出的物质形成了类似风的现象，更强烈的则形成中间的喷柱，称为喷射流。喷射流一旦喷出，便会与周围物质相互作用，成为加速粒子的关键源头。”曹臻试着向记者讲明白这一现象的原理。

在这次观测的5个微类星体中，SS 433的超高能辐射与周围巨型原子云重合，强烈暗示来自被黑洞加速的高能质子与物质的碰撞。分析表明，该系统加速的质子能量超过1PeV，总功率约每秒10²⁹焦耳。而来自微类星体V4641 Sgr的伽马射线能量达到0.8PeV，成为又一个“超级PeV粒子加速器”，即产生这些伽马射线的父辈粒子能量超过10PeV。

这就使得微类星体成为银河系内非常重要的一类PeV粒子加速器。用中国科学院高能物理研究所副所长鲁巍的话说，虽然不能断言这是唯一来源，但这一发现为人类理解宇宙线提供了重要依据，也揭示了宇宙中多种高能粒子产生机制的存在。

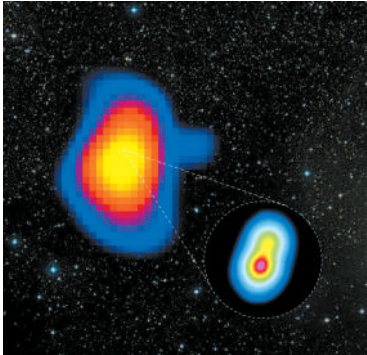
“宇宙里面有各种不同的产生高能粒子的机制。有些是已经发现，有的其来源至今仍未明确。现有的理论多为推测或模型，缺乏实验或观测证据支持，这说明宇宙中存在多种尚未被发现的粒子加速机制。而这次我们发现，黑洞很



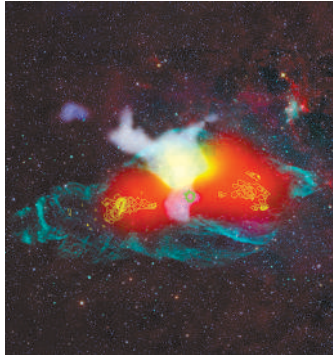
拉索测量到宇宙线质子的能谱，与阿尔法磁谱仪2和悟空号等空间探测器一起，揭示了宇宙线存在低能、中能和高能三个组分，暗示了银河宇宙线的多种来源特征。拉索测到的高能组分很有可能来自于图中右上方显示的微类星体，而更低能量的宇宙线质子更可能来自传统的超新星遗迹的加速。左上方展示的是拉索最新发现的一个超新星高能伽马辐射。



位于天鹅座的微类星体 Cygnus X-1, 是最早发现的微类星体之一。不同颜色表示了拉索测到的伽马射线强度, 红色-黄色-白色表现了强度由弱到强的变化。



位于南天区的微类星体 V4641 Sgr, 是拉索测到的具有最高能量的伽马射线源。不同颜色表示了拉索测到的伽马射线强度, 红色-黄色-白色表现了强度由弱到强的变化。



距离地球最近的著名微类星体 SS 433, 中央绿色的等高线显示出黑洞附近吸积过程产生的x射线分布, 左右两侧比较对称的等高线显示了喷流端头粒子加速区发出的x射线分布, 与之对应, 红色表征了拉索测到的TeV伽马射线辐射分布。靠近中上的黄色显示了拉索首次测到的超高能伽马射线辐射分布, 与白色显示的原子气体很好重合, 支持超高能伽马射线的强子起源, 表明SS 433能够把质子加速到PeV能区。

可能是产生高能宇宙线的重要来源之一。”鲁巍对中青报·中青网记者说。

建造拉索,就是去找宇宙线的源

这次发布的成果，解决了困扰科学家多年的一个难题：银河系内公认的宇宙线源是超新星遗迹，但观测和理论都发现它们无力将宇宙线加速到宇宙线“膝”及以上的高能。

据拉索团队解释，宇宙线能量分布图上有一个关键转折点，由于其形状酷似人的膝盖，称为“膝”，大约在3PeV处，能量更高的宇宙线数量急剧减少。近70年前发现“膝”以来，一直未弄清其成因，只是被推测为加速源天体加速能力极限所致，呈现为宇宙线能谱从一个简单的“幂律谱”转换为另一个简单的“幂律谱”。要真正理解这个问题，必须精确测量宇宙线各成分的能谱及各自的“膝”。

然而，“膝区”的宇宙线稀少，卫星探测器面积有限，探测如同大海捞针；地面实验受大气层干扰，很难清晰地将质子从大量其他原子核产生的事例中识别出来。

长期以来，这一测量是公认不可能完成的任务。

拉索巧妙利用其强大的地面观测装置，采用多参数测量技术成功筛选出大统计量的高纯度质子样本，从而精确测量其能谱，精度媲美卫星实验。这一突破性的测量揭示了完全超出预期的能谱结构，清晰展现出一个新的“高能组分”。

拉索的新结果与阿尔法磁谱仪测得的低能组分、“悟空号”卫星测得的中能组分一起，揭示了银河系内存在多种类的加

速源，每一类有各自独特的加速能力和能量范围，而“膝”正是产生高能组分的源的加速极限表现。

质子能谱的复杂结构表明，PeV能段的宇宙线质子主要来自微类星体这类“新源”，它们具有明显高于超新星遗迹的加速极限，能够产生超过“膝”的高能宇宙线。两项成果相互印证，构建起一个完整的科学图景。这不仅为解决困扰学界近70年的“膝区成因”难题迈出关键一步，也为理解黑洞在宇宙线起源中的作用提供了重要的观测证据。

“这些现象早已被观测到，人们知道喷流的存在及其效应，如粒子加速过程中伴随的强烈X射线和射电波段辐射，甚至低能量伽马射线的辐射。然而，未知的是，这些现象能将粒子加速到如此高的能量，以至于我们能够观测到极高能量的辐射。”曹臻说。

据他解释，喷流的加速区域还不是最惊人的。更惊人的，团队观测到，这些高能粒子并不完全停留在喷流中，而是在另一个方向被他们观测到。

之所以能观测到，是因为目标黑洞周围存在一块由原子气体组成的“云”。这表明，喷出的物质可能不仅朝两个方向喷射，而是向各个方向都有喷射。喷射后的加速粒子到达这片云中，撞击云层，产生出被观测到的超高能光子。而且，这一现象并没有在能量较低的波段里发现，只有超高能光子才在此处产生。

“这使得我们意识到，没有先进的观测设备，我们无法发现这一现象。”曹臻说，“我们建造拉索，就是去找宇宙线的源，现在这个发现，就是一个非常明确的证据，证明我们已经找到了

这个源。”

逐步解决宇宙线起源的科学问题

拉索由中国科学家自主设计、建设并运行，在伽马天文探测与宇宙线精确测量两方面具备高灵敏度。拉索团队成员、南京大学天文与空间科学学院研究员柳若愚也提到，之前，理论上也曾对黑洞与宇宙线起源的关联有过相关猜测，但都缺乏观测证据。“这是因为之前没有足够灵敏的探测设备，能在超高能区有效观测，无法建立观测与理论的关联。即使有些理论讨论，也未能引起广泛关注。”柳若愚说。

而这次，拉索装置凭借前所未有的灵敏度，首次在超高能伽马射线波段清晰观测到这类源的存在，才将黑洞与宇宙线起源直接联系起来。

据研究团队解释，拉索的复合型探测器阵列设计，使他们既能够通过超高能伽马射线探测宇宙射线的源天体，也能够对太阳系附近的宇宙线粒子进行精确测量，既从天体源端看到了PeV能量的加速能力，又从宇宙线端看到了这类源所贡献的能谱特征。

这是第一次在观测上将“膝”结构与具体类型的天体——黑洞喷流系统关联起来。

“寻找宇宙线起源的研究已迈出重要一步。我们已经找到了一个典型例子，且这一例子并非孤例。”曹臻提到，在银河系中，根据其他波段的观测，团队预计在观测范围内应有12个同样的黑洞，目前已发现5个。

“随着时间的推移和更多观测证据的积累，我们有望发现更多有趣的、能产生

高能宇宙线的源，逐步解决宇宙线起源的科学问题。”曹臻说。

在他看来，这次结果显然是一个重要突破，团队也已经开始推动后续相关工作。“这是我们第一次真正看到一种能对宇宙线产生贡献的天体类型。未来是否会发现更多此类天体，能否通过观测更清晰地了解它们对宇宙线的贡献，将是未来研究的重要内容。”

鲁巍也提到，高能宇宙线的研究为高能物理学家“提供了新的思路”，例如通过尾场加速等机制，将少量粒子加速到极高能量，而非追求对撞机的高重频率和高粒子数。这样可以在实验室中模拟宇宙中的高能物理过程，检验现有理论如量子电动力学在极高能区的适用性，甚至可能发现新的物理现象。

曹臻也思考了一个问题，如今，研究团队已用黑洞解释了现有最高能量级的宇宙线现象，未来如果出现更高能量的新现象，还有什么工具和理论来解释？

“这是一个非常有趣的问题。领域内的专家们正聚焦于尽快找到下一个观测范本，这是一个巨大挑战和有趣的研究话题。再往下探测，会不会又出现一个新的‘鼓包’？”他充满期待地说，“我们还不能确定，这确实难以预测，这些都是我们未来需要去探索的问题。”

他坦承，这些遥不可及的黑洞、宇宙线的问题，暂时都无法转化为科技成果，是基础研究中的基础研究。

但正如中国科学院院士、实验高能物理学家王贻芳曾经在采访中中青报·中青网记者所说的那样，这些看上去“暂时没什么用”的物理学重大突破，最终都会“推动文明的发展”。

中青报·中青网记者 王璟瑄

地球内部，究竟是一幅怎样的图景？又该如何利用AI观测？

近日，北京大学地球与空间科学学院讲席教授宋晓东和心理与认知科学学院/人工智能研究院助理教授朱毅鑫领衔的跨学科团队，在计算机里模拟了5万次“地震”（包含不同样式的“虚拟地震波”），训练出一个掌握了物理规律和大规模地震波传播模拟数据的AI，并用其精准观测到地球内部的深层结构，就像为传统地球科学配备了一台高精度CT扫描仪，结合算法与科研，有望揭开地壳之下的神秘面纱。

长期以来，地球深处结构探测研究是地球科学的核心。地球内部的结构仿佛一个谜团，人类无法用肉眼直接观察。而地震波，则成了可以“利用”的中介。当地震发生时，产生的振动会穿过地球内部。振动抵达不同岩层之时，又会产生不同的变化。通过分析全球各地记录到的地震波及其波动变化，科学家可以反推地球内部结构，这个过程也就是“反演地震层析成像”。

传统成像技术，存在着速度慢、不精确等问题。模拟一次全球地震波传播，需要花费大量时间；想要获得清晰的地球内部图像，则需要进行数以万计的重复模拟。宋晓东与朱毅鑫领衔的跨学科团队，将人工智能技术引入这一领域，带来了革命性突破，以前所未有的速度和精度看清了地球内部结构。

研究团队使用了一种特殊的模拟方法（AxisEM3D:轴向谱元法），在计算机里模拟了无数次、不同样式的“虚拟地震波”，训练了一个既掌握物理规律又掌握大规模地震波传播模拟数据的AI，并利用“物理感知深度学习神经算子”技术，把地震波传播过程中必须遵守的物理定律（如弹性波动方程）直接编入了AI的学习程序。

这使得AI学会了从地震源头（震源）到地震波传播场域（波场），再到地球内部结构（速度结构）之间复杂的、符合物理规律的对应关系。在此前提之下，即便给AI一个全新的地震数据，它也有能力在顷刻之间推算出地震波的传播方式，观测到地球内部的深层结构。这种方法可以代替传统方法预测地震波场，用更少量的参数表示地球内部结构，系统实现了对全球地震波传播过程的快速预测和结构反演。

该项研究的数据组成了首个全球成像基础数据集GlobalTomo, 2.6TB大小的数据集中包含了1.6亿张全波形地震图。这些数据和开发的算法能够帮助更精确地绘制地球内部的三维成像，揭示地幔对流、地核动力学等奥秘，回答关于地球形成与演化的重大科学问题，也能更清晰地“看到”地下数公里深处的地质结构，为定位石油、天然气、地热能等战略资源提供关键信息，降低勘探风险与成本。与此同时，还能检测地下结构潜在危险性，为地震风险评估和防灾减灾提供更可靠的科学依据。



北京大学地球与空间科学学院讲席教授宋晓东和心理与认知科学学院/人工智能研究院助理教授朱毅鑫领衔的跨学科团队 北京大学供图

2025年10月30日发表于《科学》（Science）期刊。

值得注意的是，这已是马丁团队一年内第二项发表于《科学》的相关成果。今年2月，团队发布了零碳排放的工业制氢新方案；此次“近零碳排放”费托合成则攻克了传统化工过程的排放难题。

“光有‘绿氢’还不够，如果费托合成中三分之一的碳仍以二氧化碳形式排出，那是对‘绿氢’的巨大浪费。”马丁表示，这项研究补上了关键一环。

在马丁看来，此类原创成果反映了我国科研体系对解决关键问题的重视，也推动科研范式从“追赶”向“引领”转变。

展望未来，这项近零碳排放费托合成技术的工业化前景同样值得关注。马丁介绍，这一策略具有良好的普适性，对现有商业催化剂同样有效，无需更换催化剂或反应器，只需在原料气中加入ppm级卤代物即可。此外，催化剂在不同条件下可连续稳定运行450小时以上，且操作简便，在乙烯环氧化等成熟工业体系中已有类似微量调控策略的成功先例。

曾经，依赖传统工艺的费托合成让人们的生活建立在高碳排放的物质基础上；如今，由我国科学家提出的“原创答案”让煤化工生产烯烃的产业焕发“低碳新生”，这一成果为提升碳效率提供了关键的底层技术。

中青报·中青网记者 王璟瑄

从30%降至不足1%，微量的改变却能引发一场化工业的绿色革命。

费托合成（Fischer-Tropsch synthesis, FTS），是我国“富煤、贫油、少气”资源禀赋下生产烷烃、烯烃等燃料和化工原料的关键技术。其中烯烃是塑料、橡胶和纤维等基础材料的重要原料，在现代化工业生产中占据核心地位。

据了解，目前工业上高度依赖铁基催化剂的费托合成，其最大缺陷是在典型条件下，合成气中的碳源，一氧化碳有高达18%至35%被转化成二氧化碳废气。每生产1公斤烯烃，就要在费托合成环节排放0.5公斤左右的二氧化碳，这既造成了巨量碳排放，也是对碳资源的巨大浪费。

如今，这一阻碍“双碳”目标的痛点，已经由北京大学化学与分子工程学院马丁教授与中国科学院山西煤炭化学研究所温晓东研究员主导的联合团队突破，并正在走向工业化落地。

联合团队通过向铁基费托合成反应气体中添加百万分之一浓度的卤素化合物，成功将二氧化碳副产物从传统工艺的30%左右降至1%以下，实现“近零碳排放”，同时将高附加值烯烃产率提升至85%以上，为绿色合成气转化和低碳化工制造提供了新策略。

“这就像在烹饪中加入一滴‘分子级



联合团队人员在实验室开展科研工作。

北京大学供图

调味料’。”温晓东说，这项成果的核心是对费托合成复杂反应网络的“精准调控”。

团队青年学者刘兴武进一步介绍，工

业铁催化剂表面同时存在生成烃类的主反应路径和生成二氧化碳的副反应路径，团队发现了一种高效简单的选择性抑制方法：在原料合成气中加入百万分之一

（ppm级）的卤代甲烷（如溴甲烷），即可近乎完全抑制副反应路径。

为了获得这一解决费托体系长期存在的高二氧化碳副反应问题的关键突破，自2009年建组以来，马丁领导的团队就开始深入研究费托合成反应的催化剂及其构效关系。2024年，马丁团队与温晓东团队紧密合作，形成了从催化剂合成、反应评价到反应机理研究、催化剂表征、理论计算的完整研究体系。

尽管拥有扎实基础，团队在研究推进过程中仍遇到多重挑战。马丁回忆，以往一些结构调控策略，如使用疏水二氧化硅包覆等，仍然会生成10%—13%的二氧化碳，且常伴随活性下降，难以从根本上解决问题。因此，他们将注意力转向在其他催化体系中常被视为“毒物”的卤素。

温晓东告诉中青报·中青网记者，团队中的青年学者和博士生为研究工作作出了突出贡献。

在传统认知中，卤素往往被视为会毒化铁基催化剂的“抑制剂”，通常会导致活性显著下降。然而在一次常规实验

中，刘兴武意外观察到微量卤素并未造成失活，反而表现出与传统理解不一致的正向作用。基于在铁基费托体系上长期的研究积累和对反应特征的敏感判断，刘兴武第一时间意识到这一“反常现象”可能具有重要科学意义，并组织进一步的验证工作。

在刘兴武的指导下，博士生蔡毅围绕关键条件开展了系统实验，对比不同铁基活性相的响应，最终确认微量卤素能够选择性抑制二氧化碳副反应而保持费托主反应的活性。随后团队进一步明确：只有在ppm级的微量范围内，卤素的这一独特调控效应才会稳定显现。

在确认这一现象后，团队仍需回答一个更本质的问题：卤素究竟是如何改变催化剂表面反应路径的？

“如果不能回答这一问题，就无法完全建立其科学性。”马丁说。

为此，马丁的博士生王茂林利用瞬态动力学等先进实验手段，揭示了卤素抑制多个副反应基元步骤的机理，从根源上切断了二氧化碳的形成路径，成为理解调控机制的关键证据。

最终，这一突破性成果的论文于