

有关嫦娥五号月壤样品的最新研究成果相继发表

科学家从月壤里“挖”出了这些宝

◎ 实习记者 都芃

发现嫦娥石、找到月壤水……在秋高气爽的金秋时节，月壤研究也迎来了大丰收，一系列有关嫦娥五号月壤样品的最新研究成果相继发表，人们对于距离我们最近的“邻居”——月球的认知不断

挖掘月球的潜在价值

今年9月9日，国家航天局、国家原子能机构联合宣布，来自中核集团核工业北京地质研究院(以下简称核地研院)的研究团队首次在月球上发现新矿物，并命名为“嫦娥石”。“嫦娥石”也是人类发现的第六种月球新矿物，其单晶颗粒的粒径只有10微米大小，不到一根头发丝直径的1/10。

核地研院月球研究团队带头人李子颖表示，虽然“嫦娥石”所属的磷酸盐矿物在地球上很常见，但和“嫦娥石”化学成分一致的，地球岩石中至今还未发现。这也证明了“嫦娥石”形成的环境和条件不同于地球。通过对“嫦娥石”形成条件的研究，可以倒推月球演化过程，对认识月球起源与演化意义重大。此外，“嫦娥石”所含的高含量稀土是否具有开发价值，也值得进一步研究。

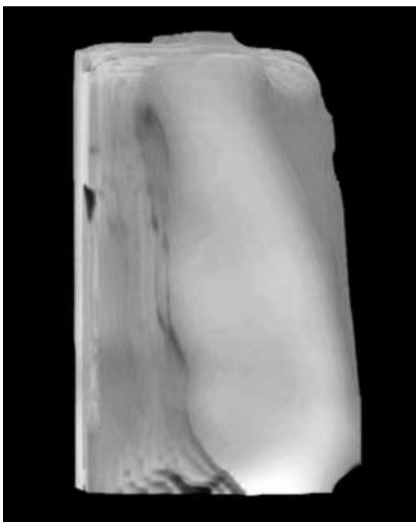
不仅是“嫦娥石”，核地研院的研究团队还首次成功获得嫦娥五号月壤样品中氦-3的含量和提取参数。氦-3一直被视为未来重要的清洁能源之一。而月球则是储存氦-3的天然“仓库”。核地研院第一批月球样品使用责任人黄志新介绍，目前的核聚变实验主要利用氘-氘反应来开展，但这种方式的核聚变会产生中子，具有一定危害性。而以氦-3为原料的聚变过程不会产生有害物质，并且反应释放的能量更大，堪称是完美的清洁能源。氦-3虽好，但在地球上却储量极低。氦-3的主要来源是太阳风，由于受地球磁场和大气的阻挡，能够到达地球的氦-3微乎其微。但与月球相反的是，月球由于缺少大气层保护，常年受太阳风吹拂，月壤中含有大量的氦-3资源，且月壤中的钛铁矿对氦-3有较好的储存作用。种种因素使得在地球上稀缺的氦-3，在月球上却储量惊人。探月工程首席科学家、中国科学院院士欧阳自远曾估算，月壤中的氦-3含量可满足长达万年的地球能源需求。黄志新表示，对嫦娥五号月壤样品中氦-3含量及最佳提取参数的测定，将为中国后续对月球氦-3资源的遥感预测、总量估算、未来开发和经济评价提供基础科学数据。

除了存在潜在能源外，“浑身是宝”的月

得到刷新。

从2020年12月嫦娥五号返回器携带1731克月壤样品成功返回地面至今，共计有4批50余克月壤样品被分发至了100多个科研团队，研究范围涉及月球地质演化历史、月球资源分析等。

正是透过这些细微、不起眼的月壤，月球的神秘面纱正在被一点点揭开。



“嫦娥石”真实颗粒CT扫描三维形态图
新华社发(中核集团核工业北京地质研究院供图)

壤或许还有更多用途。今年5月，我国研究团队在详细分析嫦娥五号月壤样品中的元素和矿物结构后发现，月壤中的一些活性化合物具有良好的催化性能。研究团队以其为催化剂，利用人工光合成技术，借助模拟太阳光，成功将水和二氧化碳转化为氧气、氢气、甲烷、甲醇。在此基础上，研究团队还进一步提出了利用月壤实现地外人工光合成的策略与步骤。该研究主要负责人之一、南京大学教授姚颖方表示，如果将月壤提取成分作为月球上的人工光合成催化剂，未来也许只需要月球上的太阳能、水和月壤，便能产生氧气和碳氢化合物，实现低能耗和高效能量转换，为建立适应月球极端环境的原位资源利用系统提供潜在方案。同时姚颖方也指出，目前月壤的催化效率低于地球上可用的催化剂，但研究团队接下来将对月壤中的有效催化成分进行分离、提炼，力求得到更好的催化效果，并争取实现地外人工光合成技术在未来航天计划中的搭载试验，从而进行真实环境验证。

探寻月球水的真正成因



中国科学院地质与地球物理所的实验人员在手套箱里打开月壤样品 人民视觉供图

水作为生命之源，是人类太空探索中始终绕不开的话题。月球上有水吗？答案是肯定的。在过去的许多年间，一系列观测数据都间接地证明了月球上水的存在。但“听说过没见过”，除了用望远镜或探测器远远给月球“相个面”，证实“命中有水”外，人类还没有真的从月壤中直接发现

水。但就在不久前，中国科学院地球化学研究所的唐红、李雄耀团队发表的相关研究成果证实，嫦娥五号月壤样品矿物表层中存在大量的太阳风成因水，为月球有水再添“实锤”。

水不会凭空产生，那么月球上的水是从哪来的？关于这一问题，科学界目前主要认为，月球水可能来自月球内部岩浆或外部太阳风、彗星、流星体和微流星体的撞击。但红外光谱数据显示，整个月球表面都有水的分布，而月球上的水若来自月球内部岩浆或来自外部天体撞击的话，其在月球表面的分布将会十分不均，这似乎无法解释为何水会遍布月球表面。因此，科学家普遍认为太阳风是月球水的主要来源之一。太阳风中带有带正电的氢离子，当其不断轰击月球表面时，其中的氢离子会与月表物质中的氧原子结合，从而在整个月球表面生成羟基或水分子，这样便可解释为何整个月球表面都有水

的存在。

此次唐红、李雄耀团队的研究便围绕着月壤中的太阳风成因水展开。研究团队运用红外光谱和纳米离子探针针对嫦娥五号月壤样品开展深入分析，其结果显示嫦娥五号月壤样品的矿物表层中存在大量的太阳风成因水，估算其水含量至少为170ppm(1ppm为百万分之一)，这一数值显著高于月球内部的水含量；并且分析结果还显示，月壤中水含量的差异主要归因于测试深度的差异，矿物中的水主要分布在极表层内，并且其氢同位素比值与太阳风的十分接近，主要以羟基的形式存在。这些证据全部有力证实了，太阳风质子注入就是嫦娥五号采样地区月壤中水的主要来源。

虽然整个月球表面都有水的存在，但并不意味着月球上每个区域月壤的水含量都相同。一部分的太阳风成因水会在太阳的照射下“蒸发”，还有一部分则会迁移并沉降到温度极低的两极永久阴影区，经过漫长的地质活动后形成大量水冰。而此次嫦娥五号月壤样品的研究结果也显示，由于月表存在翻腾作用，月壤颗粒暴露在太阳风中的时间不同，导致了矿物中注入的太阳风质子总量不同，进而也会致使不同区域月壤中的太阳风成因水含量不同。通过对嫦娥五号采样地区月壤成熟度的测定，结合此前遥感探测发现的月表中纬度地区太阳风成因水与月壤成熟度正相关这一现象，研究团队进一步提出，在与嫦娥五号采样区有着相似月壤成熟度的月表中纬度地区，其月壤中的太阳风成因水含量应大致相同。而在月壤成熟度更高的如风暴洋西北侧高地，其月壤中的水含量可能更高。这一看法不仅为未来月表水资源利用提供了重要依据，也为探索太阳系内其他无大气天体，如水星、小行星等表层土壤中的太阳风成因水的形成机制和分布规律提供了重要参考。

此外，嫦娥五号月壤样品中能够发现水，很大程度上得益于其采样地点的独特。嫦娥五号的月壤样品采样地点位于月球最大的月海——风暴洋的东北部，这里以前从未有人踏足，与以往别国任务的采样点相距甚远。而同位素定年结果更是表

推演月球的来龙去脉

作为地球唯一的天然行星，月球地质活动的历史一直是科学家关注的重点。通过对嫦娥五号月壤样品的深入研究，许多此前关于月球地质活动模棱两可的问题，如今有了更为清晰的答案。

中国科学院紫金山天文台研究员徐伟彪及其行星化学科研团队联合南京地质古生物研究所，对月球样品进行研究后发现，样品中有极高含量的高钛玄武岩。研究团队据此推测，嫦娥五号月球着陆区或曾有多次火山喷发。

徐伟彪表示，在目前所有收集到的月球陨石中基本没有发现高钛玄武岩，这是因为钛铁矿处于月球浅层，一般分布在月亮下、月幔以上的区域，而玄武岩是月球深处月幔物质经高温熔融产生的岩浆喷发到月表，冷却后凝固而成的一种岩石。因此在正常情况下，玄武岩中的钛含量应该很低。徐伟彪进一步解释说，之所以会出现高钛玄武岩，可能是由于钛铁矿比重较重，造成了月幔上重下轻的重力不稳定结构，钛铁矿经过翻转下沉到深部月幔，经过熔融后，与岩浆一起喷发出来，冷却后被“封锁”在了玄武岩中。

研究团队结合此前在嫦娥五号月壤样品中已经发现的低钛、中钛月海玄武岩大胆推测，嫦娥五号着陆区历史上至少发生过3次火山喷发活动。徐伟彪认为，这一结论将为研究月球演化提供重要线索，也有望解答月幔源区不同物质成分来源、火山岩浆形成的能量来源和月球晚期火山活动的精细时空分布规律等多项重要问题。

如果月球上曾经有过如此密集的火山喷发活动，那它们又是在何时停止的？嫦娥五号月壤样品同样给出了刷新过去认知的答案。在此之前，美国和苏联的月壤样本，以及地球上的月球陨石研究都表明，月球的岩浆活动至少持续到大约28亿到30亿年前。

由中国科学院地质与地球物理研究所和国家天文台主导，多家研究机构团队联合对嫦娥五号月壤样品展开研究。他们利用超高分辨率铀-铅定年技术，对嫦娥五号月壤样品玄武岩岩屑中50余颗富铀矿物进行分析，确定其形成年龄约为20.3亿年，这意味着月球直到20亿年前仍存在岩浆活动，将以往月球样品限定的岩浆活动停止时间向后推迟了约8亿—9亿年。

除了岩浆活动，嫦娥五号月壤样品研究

明，该区域月壤样品的年龄约为20亿年，是目前获得的最年轻的月壤样品。

更为重要的是，嫦娥五号月壤样品中的主要组成物质是辉石、斜长石和橄榄石，而这三种矿物恰恰都是探究太阳风成因水储量的最佳载体。

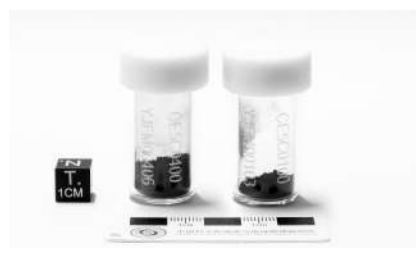


也为我国科研人员“看清”太空风化作用机制提供了重要参考。中国科学院地质与地球物理研究所的研究团队利用单颗粒样品操纵、扫描电镜形貌观察、聚焦离子束精细加工、透射电镜结构解析等一系列分析方法，获得了单个嫦娥五号月壤颗粒表面的硅酸盐、氧化物、磷酸盐和硫化物的太空风化作用信息。通过与来自月球低纬度地区的美国阿波罗计划月壤样品的分析结果进行对比，研究人员发现，嫦娥五号月球样品和阿波罗样品的表层微观结构特征没有表现出较大的差异。这能够帮助我们更好地认识月球中纬度的太空风化作用，也为月球遥感光谱校正模型在月球中纬度的适用性提供了支撑。

今年6月，中国地质大学地球科学学院地球化学系教授宗清涛和汪在聪与合作者在嫦娥五号月壤化学成分研究方面取得了重要进展：他们在2毫克和4毫克样品消耗量的条件下，对不同批次的嫦娥五号表取月壤中48种主量和微量元素同时进行了准确测定，并详细讨论了嫦娥五号月壤样品的均一性、外来物质加入量以及着陆区玄武岩的成因。

研究人员对两批月壤样品的7次分析结果揭示嫦娥五号月壤样品在毫克水平上非常均一，与遥感预测值基本一致。除了极个别元素(镍)外，嫦娥五号月壤的主量和微量元素含量与其中玄武岩玻璃和岩屑的元素含量高度一致，表明嫦娥五号着陆区所在的风暴洋北部月海区域受到外来高地物质和KREEP(富钾、稀土和磷的一种月球物质)冲击后混入的量非常有限。

该研究系统评估了嫦娥五号月壤的化学组成，定量分析了月壤中外来物质的混入量，为认识月球年轻岩浆活动和后期改造过程提供了新的制约。



嫦娥五号部分月壤样本 人民视觉供图

天闻频道

太空跨尺度能量如何传输？ 我国学者有最新发现

◎ 本报记者 代小佩

宇宙中存在着多种不同尺度的物理行为，从电子回旋运动和离子回旋运动表征的微观尺度，一直延伸到与行星大小相当的宏观尺度，跨越超过8个数量级。这些不同尺度的物理过程如何耦合？能量如何在它们之间传输？

记者获悉，9月23日，北京大学地球与空间科学学院教授宗秋刚带领的研究团队在国际学术期刊《自然·通讯》上发文，提出在空间和天体等离子体中，跨尺度波动—粒子相互作用(即带电粒子同时和不同尺度的等离子体波动相互作用)可导致能量从宏观尺度到微观尺度的快速传输。这一新发现的机制有助于解释空间和天体系统中的能量耗散问题以及等离子体的加热加速问题。

等离子体充斥着整个宇宙，构成了各种各样的天体和空间系统，例如行星磁层、太阳日冕、太阳风和日球层以及星际介质等。要理解这些等离子体系统的历史和演化，其中一个重要的问题是宏观的、定向运动的能量如何转化成微观的、随机运动的能量。

类似于大气中充斥着声波，空间和天体等离子体中也充斥着各种等离子体波动。但由于构成等离子体的组分(通常为质子和电子)的质量相差悬殊，等离子体波动具有多种不同的时间和空间尺度。最粗略地，等离子体波动可以根据尺度划分为三大类：流体尺度波动、离子尺度波动和电子尺度波动。其中第一种波动又被称作宏观尺度波动，而后两种被统称为微观尺度波动。

不同尺度的等离子体波动会以不同的方式和带电粒子相互作用。例如，地球磁层中的超低频波动是一种典型的宏观尺度波动，它可以通过漂移—弹跳共振加速带电粒子，从而产生会危害航天器和宇航员安全的杀手电子等。而电磁离子回旋波则是一种典型的微观尺度波动，其常通过回旋共振和带电粒子相互作用，这种作用的结果之一就是导致空间中的带电粒子沉降到地球大气中，这些沉降粒子还可以通过后续的过程产生极光等现象。但无论哪种具体的作用方式，波动—粒子相互作用都可导致电磁场和带电粒子间的能量交换。

对于一个具体的空间和天体等离子体系统而言，电磁相互作用又有多种不同的形式，从而可以以多种不同的方式介导能量的跨尺度传输。目前主流的跨尺度能量传输机制是湍流串级模型，其认为能量是通过一系列相近的尺度逐渐从宏观尺度传输到微观尺度。为了更好地理解各种空间和天体系统中的能量过程，寻找湍流串级之外的跨尺度能量传输机制是当前空间物理和天体物理领域的研究热点之一。

宗秋刚带领的团队通过分析观测资料证实，跨尺度波动—粒子相互作用是一种可能的跨尺度能量传输机制。

在这项研究中，宗秋刚团队通过分析美国国家航空航天局(NASA)的磁层多尺度任务获得的数据，发现空间中的离子可以同时和宏观尺度的超低频波、微观尺度的电磁离子回旋波相互作用。通过这一相互作用，能量首先从超低频波传递到离子，然后从离子传递到电磁离子回旋波，最后通过电磁离子回旋波—离子回旋共振耗散。

与传统湍流串级模型不同，在这一跨尺度波动—粒子相互作用中，能量可以直接从宏观尺度传递到微观尺度，无需经过中间尺度的介导。对观测数据的定量分析表明，跨尺度波动—粒子相互作用的时间尺度约为1分钟，远小于各种空间和天体能量过程的时间尺度，证明其是一种有效的跨尺度传输能量的机制。

除了介导能量的跨尺度传输，该项研究还发现跨尺度波动—粒子相互作用可导致不同尺度的动态过程相互耦合，以及空间等离子体加热和加速。这些发现为进一步理解极光、地磁脉动以及空间高能粒子的产生提供了新的思路。

“失去的卫星”理论 或可解释土星两大谜团

◎ 新华社记者 张莹

土星是太阳系第二大行星，它以相对于轨道平面成26.7度的倾斜角度自转，主要由水冰小颗粒组成的土星环是它的标志性特征之一。长久以来，科学界对土星自转轴倾角和土星环的成因未有定论。美国《科学》杂志近日发表的一项建模研究认为，土星自转轴倾角和土星环的形成可能与一颗1亿多年前被摧毁的卫星有关。

“卡西尼”探测数据带来新进展

如同旋转中的陀螺一样，土星的自转轴会随时间推移发生周期性运动，这种现象称为旋进。由于土星旋进速率与海王星几乎相同，天文学家此前认为，土星自转轴倾角是它与海王星发生引力关联的结果，又称轨道共振。

美国航天局“卡西尼”探测器环绕土星运转10多年间的观测数据，使科学界的看法发生转变。科学家发现，土星最大的卫星土卫六正以比此前预计更快的速度远离土星。科学家根据土卫六向外迁移的速度及其引力推测，土卫六可能是导致土星自转轴倾斜并保持与海王星共振的原因。

这个解释能否成立，一个关键因素是土星的转动惯量，而计算转动惯量需要知道土星内部的质量分布。

在最新研究中，美国麻省理工学院等机构参与团队利用“卡西尼”探测器对土星周围引力场的精确观测数据，模拟了土星内部的质量分布。结果令研究人员惊讶，土星的转动惯量表明它接近与海王星共振的状态，但恰好相差了一点。这意味着两颗行星可能一度处于轨道共振状态，但目前土星已摆脱与海王星的共振。

寻找使土星摆脱共振的原因

研究团队检验描述土星旋进规律的方程后发现，如果从土星曾拥有的全部卫星中去掉一颗，便可解释土星目前的状态。研究团队认为，如今拥有83颗卫星的土星曾至少拥有一颗多出的卫星，他们将这颗卫星命名为“蝶蝠”。

研究团队通过模拟得出“蝶蝠”的一些基本属性。它与土星第三大卫星土卫八大小相当，曾与“兄弟姐妹”一起环绕土星运转数十亿年。它对土星的引力使土星保持一定自转轴倾角，并与海王星形成轨道共振。

研究人员推测，距今2亿年到1亿年间的某个阶段，“蝶蝠”进入一个混乱的轨道区。经历数次与土卫八和土卫六的近距离相遇后，它与土星“擦肩而过”时被巨大的引力撕成碎片。失去这颗卫星使土星脱离与海王星的共振，并形成目前的自转轴倾角。“蝶蝠”的大部分残片可能已撞向土星，少部分碎片可能仍悬浮在轨道上，最终分解成小冰块，形成了标志性的土星环。

研究人员表示，“失去的卫星”理论不仅可以解释土星自转轴倾角的形成，还与对土星环年龄的研究结论相吻合。此前有研究显示，与形成于45亿年前的土星相比，土星环的历史相对短暂，它形成于约1000万年至1亿年前。

就像“破茧成蝶”一样，“这颗卫星休眠了很长时间，突然变得活跃起来，然后(土星)环出现了。”麻省理工学院行星科学教授、研究论文主要作者杰克·威斯德姆说。威斯德姆强调，就像任何其他理论假说一样，“失去的卫星”理论还须由其他研究人员进行检验。