
空间中心揭示太阳风与月面相互作用能量特征

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：<https://www.iikx.com/news/progress/25693.html>

本文仅供学习交流之用，版权归原作者所有，请勿用于商业用途！

月球是无大气天体代表。月球表面没有浓密大气和全球性磁场保护。来自周围空间的各种辐射粒子可以直接与月表相互作用，并引起月壤物理和化学属性改变，即太空风化效应。在月球绕地球公转过程中，约有四分之三时间在太阳风中，因此太阳风是月球主要的空间粒子源。在太阳风与月壤相互作用过程中，约有0.1%-1%的太阳风质子直接以质子形式被散射，10%-20%的太阳风质子在月壤相互作用的过程中捕获一个电子以能量中性原子（Energetic Neutral Atom，ENA）的

²
O、纳米铁等，是月表风化和水的主要来源之一；另一方面会将月面的固体成分溅射出来，且溅射出的原子被认为是月球气体外逸层的主要来源之一。因此，研究太阳风-月面相互作用过程，可以帮助科学家剖析月面太空风化、月球水和气体的产生和迁移，为探讨月表物质、太阳风和地球风的演化历史提供线索，并为研究空间等离子体与其他无大气天体（如水星、小行星、木星冰卫星）的相互作用提供重要参考。

太阳风与月表相互作用可分为太阳风散射、溅射以及植入三个物理过程。由于在月表散射的大部分太阳风是ENA的形式，散射ENA能量特征蕴含了太阳风质子在月壤中传输过程的丰富信息，使得我们可推断太阳风注入深度等重要参数。可以说，ENA观测是我们了解太阳风月面相互作用的实时窗口。然而，以往月球ENA观测主要来自绕月飞行的轨道器（如月船一号和星际边界探测器卫星），其离月面有几十到上百公里距离，且能量分辨率较低，月面ENA的真实情况仍不清楚。嫦娥四号是人类首个着陆在月球背面的探测器。

嫦娥四号携带的中性原子探测器（ASAN）可实现月表ENA的就位测量，同时相比以往轨道器载荷具有更高的能量分辨能力（图1）。中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气重点实验室博士研究生仲天华、

副研究员谢良海、中国科学院院士王赤等，与国内外单位合作，在消除了低能量段污染、磁异常遮挡等影响因素后，发现了ASAN测得的ENA能量和太阳风能量具有很好相关性（相关系数达0.9165）。此外，该研究还分析了ENA能量损失率随太阳风能量以及太阳天顶角的变化关系，发现随着太阳风能量变大或太阳天顶角变小，ENA能量损失率越高（图2）。上述成果是以往轨道器观测未能看到的新现象。

为了解释观测现象，该研究利用SDTrimSP软件对太阳风与月面相互作用进行了数值模拟。模拟结果显示，在太阳风质子与月壤相互作用的过程中，能量损失分为电子损失项和核碰撞损失项两部分。其中，电子损失项起主导作用。而通过电子损失项损失的能量被认为和太阳风质子在月壤中移动的路径长度成正比。研究通过数值模拟发现，随着太阳风能量变高或太阳天顶角变小，太

阳风质子会有更大的注入路径长度与注入深度（图3），导致更大的能量损失率，从而解释了观测现象。

上述研究预示着由于注入深度和路径长度的变化，太阳风入射能量及入射角度是影响月表太空风化效应以及月表水产率的重要因素。以往遥感结果发现，月球表面光谱特征有纬度依赖性而被归因于太阳风数通量随纬度的变化所致。本研究表明不同太阳风入射角带来的不同注入深度也是影响因素之一。此外，月面磁异常附近有光谱特征异常的漩涡结构，曾被归因于磁异常遮挡太阳风造成数通量降低。然而，近期相关模拟结果显示磁异常对太阳风数通量的屏蔽效应并不明显，而主要是对太阳风能量造成减速，因此漩涡结构的空位形与太阳风能通量相关性更好。从实验室模拟角度，有研究发现羟基产率会随氢离子注入能量和通量增加而升高。而当通量高过一定临界值，羟基产率只依赖于注入氢能量而不是通量。这是由于矿物表层给定深度羟基产率会饱和，之后更高的注入能量带来的更大注入深度才会增加羟基产率。考虑饱和效应，太阳风注入深度将是影响太空风化过程和月表水产生率的重要因素。

该研究利用嫦娥四号就位ENA观测数据，首次揭示了月表ENA能量与太阳风能量及天顶角关系，并结合数值模拟证明了太阳风入射能量及入射角度对太阳风注入深度的影响。这一成果可为月面太空风化及太阳风成因水研究提供重要依据和约束。同时，该成果可被广泛应用于研究其他无大气天体（水星、冰卫星、小行星等）与周围空间粒子的相互作用。

相关研究成果发表在《天体物理学杂志快报》（The Astrophysical Journal Letters）上。

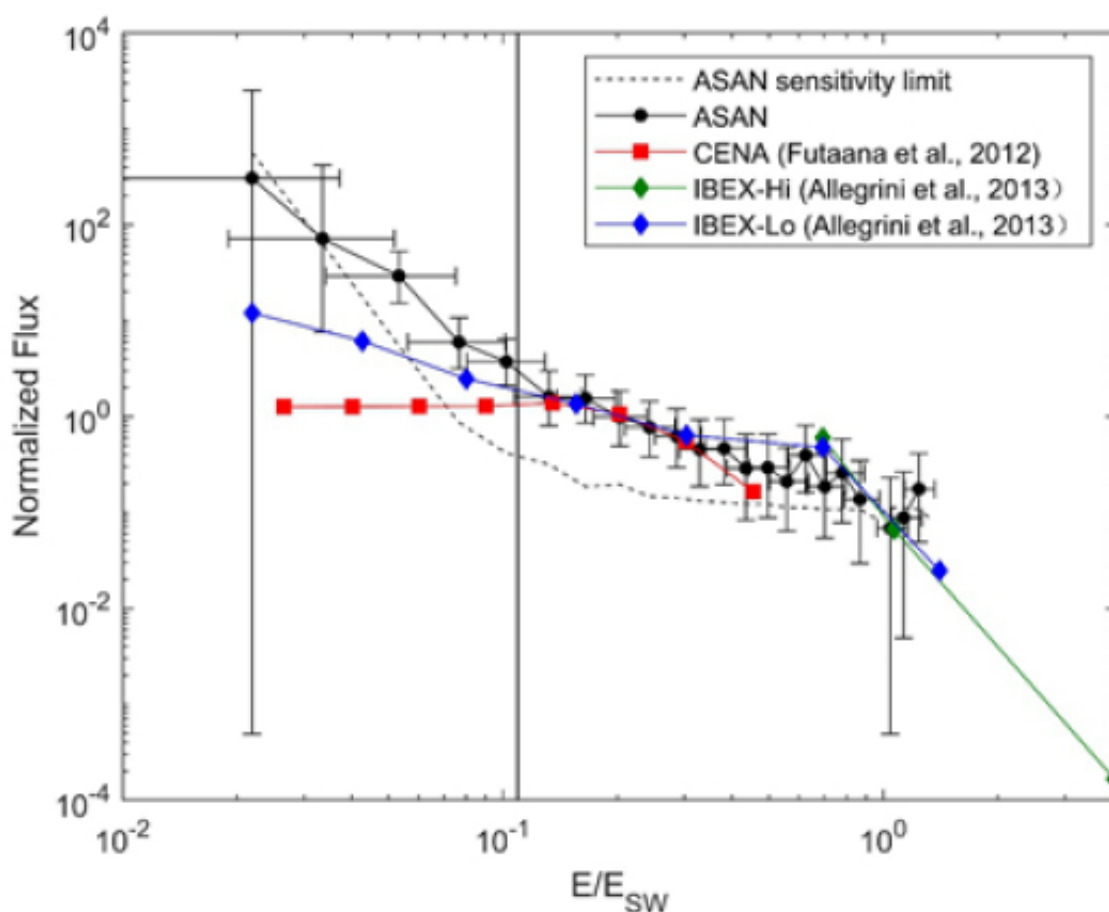


图1. 嫦娥四号ASAN观测的ENA能谱以及与以往轨道器观测能谱对比

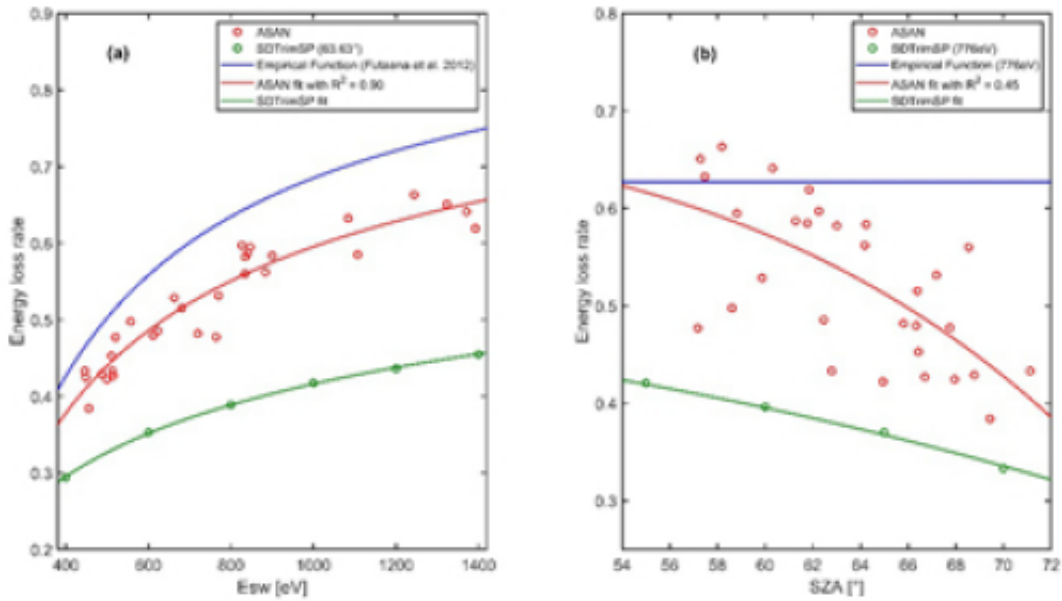


图2. ENA能量损失率和太阳风能量 (Esw) 及太阳风天顶角 (SZA) 关系

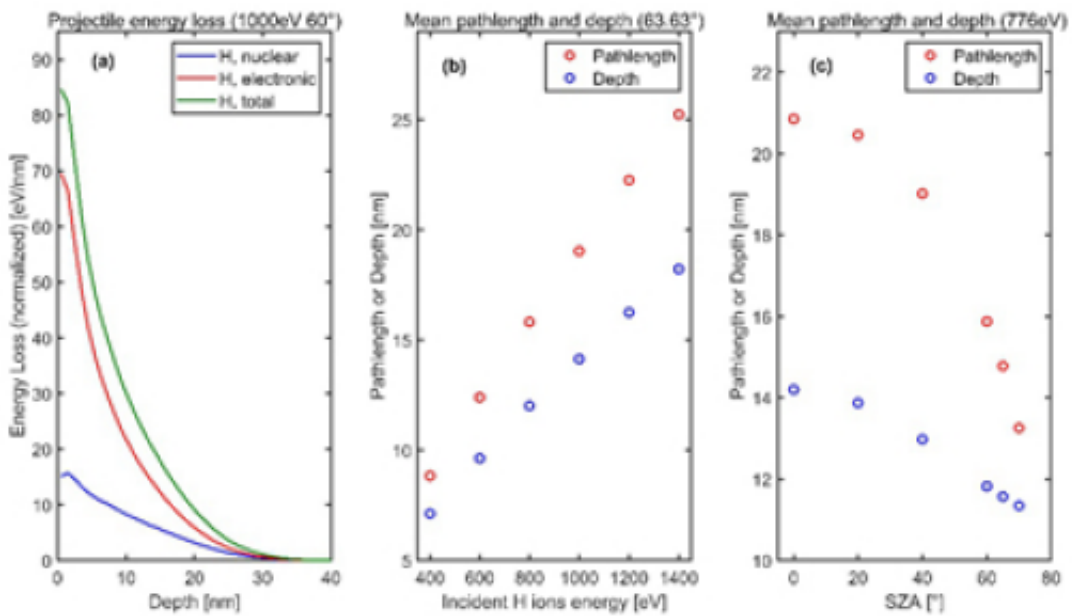


图3. SDTrimSP模拟给出的能量电子损失和能量核碰撞损失随深度分布，以及注入路径长度和深度随太阳风入射角和入射能量变化

研究团队单位：国家空间科学中心

更多 科学进展 请访问 <https://www.iikx.com/news/progress/>

本文版权归原作者所有，请勿用于商业用途，[爱科学iikx.com](http://www.iikx.com)转发