空间中心实现月球极区撞击坑迷你尾迹的三维混合PIC模拟

作者：writer 来源：中国科学院

本文原地址：https://www.iikx.com/news/progress/29130.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！

空间中心实现月球极区撞击坑迷你尾迹的三维混合PIC模拟。

月球是距离地球最近的自然天体，也是人类深空探索的第一站。近年来，月球极区撞击坑的永久阴影区可能存在水冰分布的观点，成为国际月球探测和研究的热点。然而，由于地形遮挡，极区撞击坑附近的空间环境比较复杂。一方面一部分太阳风离子可通过双极扩散进入阴影区内，形成迷你等离子尾迹结构，并通过溅射作用造成月面物质损失，形成局部气体外逸层；另一方面，撞击坑内可带很强负电，并可能存在尘埃静电喷泉活动，形成局部尘埃云。

当前，由于尺度小且涉及复杂边界，关于极区撞击坑附近等离子体环境研究存在较多限制。理论模型方面，研究人员依据等离子体真空双极扩散理论，建立了撞击坑附近迷你尾迹的二维自相似扩散模型。然而，该模型需要满足等离子体准电中性假设。这一假设在撞击坑背风侧离子无法到达的区域并不成立，因而无法正确描述该区域的净电子分布特征。数值模拟方面，撞击坑的尺度一般小于电子回旋半径，需要通过静电全粒子模型来模拟。静电全粒子将电子和离子均当作粒子来处理，并通过求解线性泊松方程来计算表面充电及空间电势分布。因此，静电全粒子的计算效率较低。即使利用大型计算机，三维静电全粒子模拟只能模拟德拜尺度问题。对于月面撞击坑，科研人员只实现了米级撞击坑周围等离子体环境的三维静电全粒子模拟。而真实月面存在许多公里级的撞击坑，对月面空间环境与水分布的影响更大。因此，现有模型无法对公里级撞击坑周围的等离子体环境进行精确分析。

近日，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的科研人员等提出利用静电混合粒子模拟方法以解决上述难题。该方法提出撞击坑附近的电子近似满足麦克斯韦分布，可以用静电流体来处理，从而减少计算量。该研究通过求解非线性泊松方程，突破了传统静电PIC模型网格要小于德拜尺度的限制，可实现公里级撞击坑的三维静电PIC模拟。同时，该研究模拟了不同太阳风条件（密度、温度和速度）、不同撞击坑（深度和坡度）附近的等离子体环境，探讨了不同因素的影响。

模拟发现，由于地形遮挡太阳风离子不易进入到撞击坑内，在撞击坑的背风侧存在密度空腔，且其离子密度可低于0.001
cm^{-3}
。然而，电子以热运动为主，更易进入撞击坑内，造成撞击坑内带负电，并在背风侧形成净电子区。同时，该静电力反过来会阻碍电子和吸引离子进入撞击坑，使得一部分离子会通过双极扩散进入撞击坑内，形成一个离子锋面。计算发现，正常太阳风条件下，撞击坑内的电势可低于-60

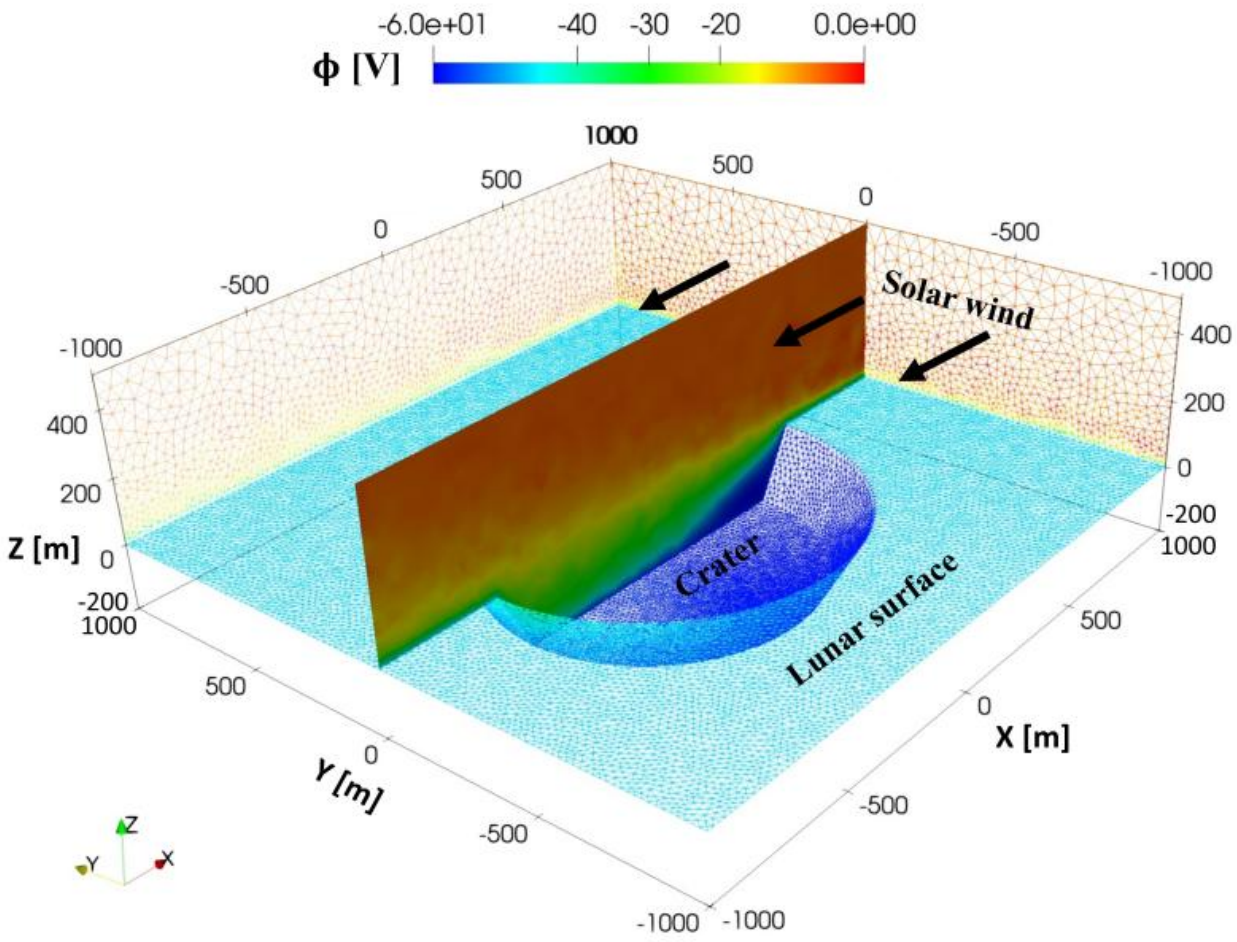
V，约是太阳风电子温度的4~5倍；双极扩散的静电场约为1mV/m，主要分布在离子锋面附近。此外，太阳风的双极扩散会带来向外传播的稀疏波。稀疏波波速近似等于太阳风离子声速。由于太阳风流是超声速的，因而该稀疏波会被限制在一个马赫锥中。模拟发现，该马赫锥可从撞击坑的上游开始，且锥角约为8.8°。

进入撞击坑的太阳风离子可以通过溅射作用造成撞击坑内物质的损失，因此需要计算撞击坑内的太阳风通量。
计算发现，约4%的太阳风
通量可以达到撞击坑的坑底，可造成6.4x$10^{8}$$m^{-2}$$s^{-1}$
的水分子损失率。而在撞击坑的迎风侧，约18%的太阳风通量可打到坑壁，造成更显著的溅射作用。同时，模拟结果会受到不同因素的影响。例如，更高的太阳风温度会带来更低的撞击坑电势以及更大的马赫锥角。更深或更陡的撞击坑会带来更低的撞击坑电势以及密度更低的等离子体空腔等。这些模拟结果和理论预期是一致的。

该模型给出了月球极区不同撞击坑附近的等离子体和电势分布，定量评估了太阳风离子溅射对极区永久阴影区造成的水损失率。研究提出，未来可结合蒙特卡洛模拟，来定量分析极区尘埃静电喷泉活动及其对永久阴影区水的影响。同时，这一模型给出了月球极区空间环境的精确空间分布，为研究月球极区水含量及成因机制提供了新视角。

相关研究成果发表在《地球物理学杂志：空间物理学》（*JGR: Space Physics*）上。

论文链接



公里级撞击坑的三维静电混合粒子模拟

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转发