

月球微磁层的探测^{*}

崔峻^{1,2,†} 王晓倩¹ 王晓栋¹ 刘建军¹ 李春来¹ 欧阳自远¹

(1 中国科学院国家天文台 北京 100012)

(2 南京大学天文与空间科学学院 南京 210018)

摘要 近月空间环境中的等离子体特性是嫦娥一号及二号卫星的重要科学探测目标之一. 基于嫦娥卫星上搭载的太阳风离子探测器(SWID)的测量结果, 文章作者对月球表面磁异常结构(LMA)与太阳风相互作用这一空间科学中的热点问题进行了探索, 并通过质子相空间分布的信息, 初步确认了磁异常结构可以对入射原始太阳风起到屏蔽及加热的作用, 形成所谓的“微磁层”结构. 这是国际上为数不多的微磁层存在证据之一. 文章作者期待这一研究(及后续工作)将不仅对月球表面空间风化效应的研究产生推动作用, 同时也将有助于百公里尺度上(即质子回旋半径与宏观尺度相当条件下)的磁层物理学研究的发展.

关键词 月球表面磁异常结构, 微磁层

Observations of lunar mini-magnetospheres

CUI Jun^{1,2,†} WANG Xiao-Qian¹ WANG Xiao-Dong¹ LIU Jian-Jun¹ LI Chun-Lai¹ OUYANG Zi-Yuan¹

(1 *National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China*)

(2 *School of Astronomy and Space Sciences, Nanjing University, Nanjing 210008, China*)

Abstract The study of the near-Moon plasma environment is one of the key scientific objectives of China's Chang'E-1 and Chang'E-2 missions. We investigate here specifically the interactions of the Lunar Magnetic Anomalies (LMA) with the Solar Wind (SW), based on the proton/ion data acquired by the Solar Wind Ion Detector (SWID) mounted on both lunar orbiters. Through the measured proton phase space distribution, we propose tentatively that the lunar magnetic anomalies could shield and heat the incident solar wind particles, with the possible formation of mini-magnetospheres near the anomaly. This study serves as one of the very few observational incidences of the presence of these plasma structures. This work, as well as follow-up studies, may contribute to the studies of both lunar space weathering and magnetospheric physics on scales where finite gyroradius effects are important.

Keywords lunar magnetic anomaly, mini-magnetosphere

1 月球与太阳风相互作用研究历史追溯

继嫦娥一号任务圆满完成之后^[1], 我国又于2010年10月1日成功发射了嫦娥二号卫星, 除了延续其以往的科学探测目标之外, 还将对后期的月球无人登陆计划做先导性研究工作, 包括登陆点的选址等. 在嫦娥二号上搭载的众多科学仪器中, 太阳风离子探测器(solar wind ion detector, SWID)可用于直接测量月球空间环境中的太阳风质子/离子相空间分布, 即单位时间单位面积单位立体角和单位

能量间隔内的粒子计数^[2]. 通过所获得的相空间分布, 我们可以计算月球附近的太阳风物理参数, 如密度、温度等, 从而通过与原始太阳风性质的对比来研究太阳风与月球表面的相互作用.

对月球空间环境的研究在空间物理中具有特殊的重要地位, 因为它是研究太阳风与无大气、无固有磁场的天体之间相互作用理想实验室. 传统的观点认为, 月球与太阳风相互作用机制比较简单, 即:

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 41174146, 11173038, 10903017)资助项目

2012-03-08 收到

[†] 通讯联系人. Email: jcui@nju.edu.cn

(1)在月球正面(白天),由于月球表面物质结构非常松散,入射太阳风粒子在月球表面被完全吸收(即散射粒子可以忽略不计),从而在月球背面(晚间)形成一个与其光学阴影区近似重合的柱状等离子体空腔(俗称“月球尾迹”,lunar wake);(2)在尾迹边缘,太阳风中的电子在热膨胀的作用下向尾迹内扩散,而太阳风中的质子/离子由于热运动速度较低,相比之下其扩散可以忽略;(3)电子相对于质子/离子的扩散过程会导致在尾迹边缘处建立起局域双极化电场(ambipolar electric field),使得外部太阳风中的质子/离子加速进入尾迹内.这种双极化机制在空间物理中(例如行星电离层中)非常常见,它保证了空间等离子体能够始终维持电中性状态.上述太阳风与月球相互作用的传统图像,不仅有理论上的预言^[3],而且也已经被很多深空探测数据所证实^[4].

近年来,随着亚洲的日本、中国及印度三国相继发射了月球轨道卫星,再加上早些时候基于美国的月球轨道卫星——月球探矿者号(lunar prospector, LP)的结果,空间科学界对近月等离子体环境的研究揭开了一个新的篇章.具体而言,这些观测所揭示的月球表面与太阳风相互作用的新特性主要包括两个方面:

(1)太阳风粒子在月球表面并不是简单地被完全吸收,而是有相当一部分会散射回行星际空间^[5,6],其中部分质子在散射前通过电子转移,经历一个中和(neutralization)的过程^[7].散射后的质子具有弥散的相空间分布,因此部分质子能在太阳风内秉磁场的作用下深入近月尾迹^[8,2],这种近月尾迹深处的粒子,用传统模型是无法解释的.

(2)月球虽然不存在全局的内秉磁场,但是已知存在很多局域化的强磁特性,俗称月球表面磁异常结构(lunar magnetic anomalies, LMA).虽然这些结构在上世纪60到70年代便被人们所初步认识,但是它们如何与太阳风相互作用长期以来一直是学术界没有解决的难题.Hood和Schubert于1980年提出,暴露于太阳风中的月球表面磁异常结构附近会形成所谓的“微磁层”(mini-magnetosphere),对入射太阳风等离子体流产生屏蔽等效^[9].这一观点和大多数行星(如地球)磁层与太阳风的相互作用有类似之处,并且目前这一效应已有部分实验数据支持^[10,11].

本文主要是针对上述的第二个问题进行详细论述.文章内容包括:(1)月球磁异常结构的背景知识;(2)嫦娥卫星上进行的等离子体实验简介及仪器特征;(3)嫦娥二号月球空间环境数据在微磁层探测上

的主要结果,以及与国际上同类结果的对比分析;(4)总结及对未来工作的展望.

2 月球磁异常结构(LMA)

LMA 是特指固定在月球上拥有强磁场的局部区域(尺度为百公里量级),通常这些区域的月球表面磁场强度可达到 10^2-10^3 nT,比太阳风磁场强度至少高 1—2 个数量级.美国 LP 探测器上搭载的磁强计和电子反射仪曾对月球附近(包括月球表面)的磁结构进行了普查,因此 LMA 的全月分布已为学术界所认识,如图 1 所示^[12-15].LMA 在分布上最重要的特点是其通常处于月球表面撞击坑的对峙面(impact basin antipodes).虽然迄今为止学术界对 LMA 的这种分布特点在理论上还没有达成一致认识,但是已存在一些合理的物理解释.例如,Hood 于 1987 年提出了一个复杂的磁流体力学模型^[16]:磁异常源于月球表面被撞击时所诱发的电离态气体尘埃改变邻近太阳风磁场,并通过热膨胀、等离子体束缚以及磁能耗散等机制在撞击坑的对峙面上“压缩”出一个强磁区;由于这种方式所产生的强磁区时标很短(通常不超过 1 天),因此这种暂时的强磁现象如何在月球表面固体物质中被保存下来,是模型需要解决的一个问题.

由于磁场分布对外界带电粒子流的运动状态能起到重要的调制作用(例如地球的内秉磁矩在与太

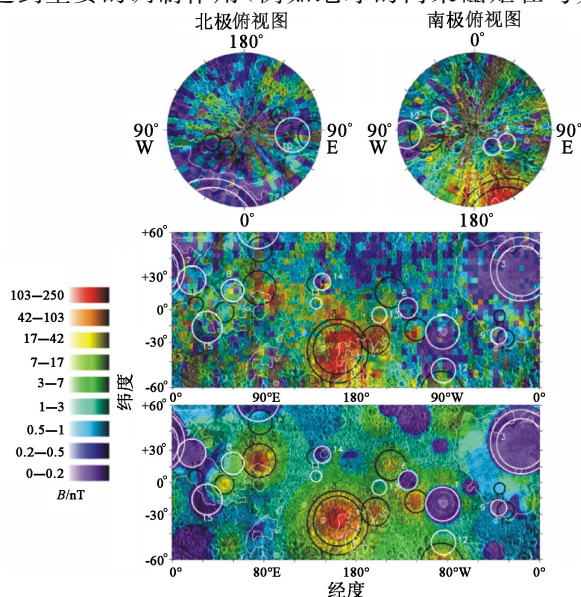


图 1 基于 LP 磁场数据的月球表面磁异常结构分布^[15](图中不同颜色标志着不同的磁场强度,黑色圆圈划出了主要的磁异常结构,而白色圆圈给出的是相应的对峙区范围(通常为显著的月球表面撞击坑),见《物理》网刊彩图,下同)

阳风相互作用过程中形成磁层),因此我们可以预期 LMA 也会对入射太阳风等离子体流产生类似的影响,诱发形成微磁层结构.一般而言,(微)磁层通过磁重连(magnetic reconnection)过程对外部太阳风起到屏蔽作用(使太阳风等离子体流发生偏转,如图 2 所示),同时伴随产生磁层边缘磁鞘区内等离子体的加热等效应.从相空间角度来看,这些现象意味着太阳风粒子的速度分布在接近 LMA 的过程中会逐步从“定向”趋于“弥散”.LMA 附近微磁层的形成过程已经在模型上得到推论,然而一直以来缺乏有利的观测结果支持(详见本文第 4 节:月球微磁层的观测).

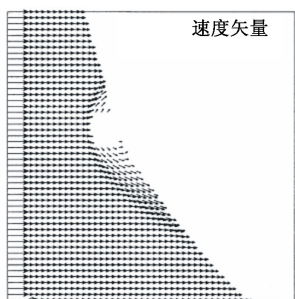


图 2 月球表面磁异常结构对太阳风的屏蔽作用示意图(取自文献[17]的磁流体力学计算结果,图中左侧有许多箭头符号,它们代表的矢量为流体速度,右侧白色区域为月球.太阳风等离子体流在磁异常结构附近的偏转效应非常明显)

考虑到微磁层对太阳风的屏蔽作用,LMA 的另外一个可能的观测特征是其与月球表面高光学反照率(albedo)区存在一定的地理相关性.通常情况下,月球表面物质的光学性质受空间风化(space weathering)作用的影响而改变^[9].例如,太阳风中的质子与月球表面铁元素相互作用使之还原,导致月球表面物质变得越来越“暗”,即降低光学反照率.由此可见,若 LMA 诱发的微磁层对入射太阳风等离子体流确实起到了显著的屏蔽作用,则月球表面物质受空间风化影响也相对较小,能保持较高的“原始”光学反照率.上述推论意味着月球表面 LMA 通常对应于较亮的区域,而这点也的确得到了一些深空探测数据的支持^[18,19](图 3 给出了一个典型的例子).然而,由于缺乏基于大样本的统计验证,现在尚不清楚这种相关性到底是个别现象,还是普适性质.初步研究结果表明:光学异常区通常都与 LMA 联系,而反之,并不是每个 LMA 都同时表现为光学异常^[20].

3 嫦娥卫星上的空间等离子体实验

嫦娥卫星上搭载的太阳风离子探测器(SWID)是一台静电分析仪,可用于测量月球附近空间的质

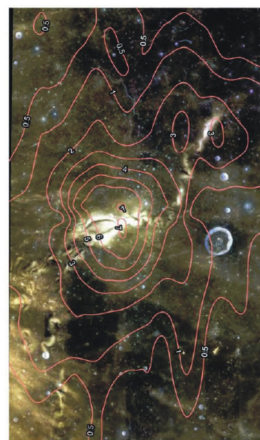


图 3 月球表面磁场强度与光学反照率的相关性^[19]. (图中红色曲线为等磁场强度线,高磁场区与月球表面高亮区重合)

子/离子相空间分布.其视场指向垂直于月球表面向外,具有两个正交扇状分布的特点(分别被称为 SWID-A 机和 SWID-B 机,简称 A 机和 B 机),其中一个扇形视场角与卫星飞行方向平行(在正飞期内,B 机视场平行于卫星整体速度,而在侧飞期内,A 机视场平行于卫星整体速度).每个扇状区域被分割为 12 个极角,每个极角覆盖约 $15^\circ \times 6.7^\circ$ 的视场范围,因此整个扇区的视场近似为 $180^\circ \times 6.7^\circ$.图 4 给出了嫦娥一号卫星 SWID 的典型姿态,其中 x 轴为卫星飞行方向, z 轴指向月心,数字 1 和 12 给出的是极角标号.嫦娥二号卫星的 SWID 姿态与之相近.由于嫦娥一号和二号均是三轴稳定卫星系统,因此我们无法利用卫星自转来获得质子/离子在整个 4π 相空间内的分布特征,这在一定程度上限制了质子/离子完整信息的获取.

在对每一个极角进行的观测中,仪器的能量覆盖范围为 40eV 到 20keV,能量分辨率为 5% 到 30%,分割为 48 个连续变化的能道.仪器记录的是每个极角内在每个能道上的质子/离子计数,并通过几何因子转换为物理通量.完成每个能谱的扫描所需时间约为 3s.与日本 SELENE 卫星以及印度 Chandrayaan-1 卫星上的类似装置相比,我国的仪器具有相近的性能,但是能道的数目较高(我国的仪器包含 48 个能道,日本和印度探月卫星上的离子探测器分别只包含 32 及 16 个能道),因此利用 SWID 所获取的能量分布信息也更完整.

4 月球微磁层的观测

微磁场的探测手段,除了直接测量其附近的磁场强度以外,更重要的是探测太阳风粒子在其附近

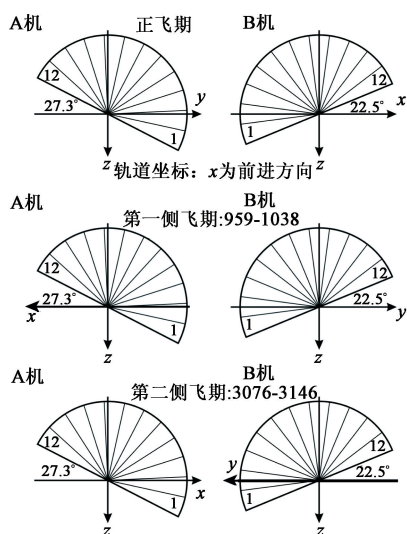


图4 嫦娥卫星太阳风离子探测器的姿态信息. 图中A机和B机给出的是仪器的2个扇形视场范围, 每个扇形分割为12个极角(1到12). A机和B机在卫星不同轨道期的指向不同, 其中一个总是平行于卫星的前进方向(图中数字959, 1038, ...等表示卫星绕月球运动的轨道圈数)

的相空间变化是否能表现出一定的“屏蔽”效应. 目前这方面的证据较少, 仅存在3次相关事例支持. 最早的观测证据来源于美国LP卫星的电子数据. 如图5所示, Halekas等人在2008年报道了在月球一个著名的LMA中的危海对峙区(Crisium antipode)附近, 可以探测到太阳风电子密度下降形成一个电子空腔, 这一效应很自然地解释为太阳风接近LMA时受到磁异常结构屏蔽作用的结果. 然而, 从图5中可以看出, 这一空腔结构并不十分明显, 只能认为是微磁层存在的初步证据.

其后, Wieser等人于2010年基于印度Chandrayaan-1探月卫星上搭载的H原子反射装置在同一个LMA中的危海对峙区附近所获取的数据, 报道了第二个相关证据^[11]. 图6(a)和图6(b)分别为仪器探测到的氢原子在150—600eV和30—100eV能量间隔内的总流量, 视场角为垂直指向月球表面的近似 2π 区域. 在高分段(150—600eV), 中心区域(点线内)与邻近区域相比H原子流量显著降低, 被解释为磁异常的屏蔽作用所引起. 虽然这一观测效应非常显著, 但是现象的解释依赖于一个假设, 即探测到的月球表面氢原子流量是太阳风质子撞击到月球表面后中性化并散射的产物. 因此, 可以说Wieser等人在2010年所报道的结果仅仅是月球微磁层存在的间接证据^[11]. 另外值得注意的是, 图6还显示了LMA周围存在一个具有高原子流量的环状区域(即点线和虚线中间的部分), 这可能意味着微磁

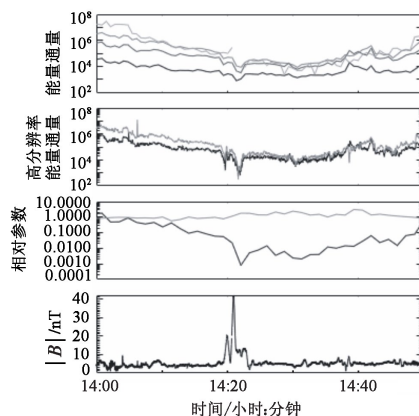


图5 LP电子数据在危海对峙区附近的分布特点^[10]. 4个图分别给出的是低分辨率能谱、高分辨率能谱、密度/温度以及磁场强度在LMA附近的变化趋势. LMA附近电子密度降低, 可以解释为微磁层对入射太阳风屏蔽的结果(图里第一幅中的4条曲线, 从浅至深, 分别表示37eV, 142eV, 337eV和803eV处的能量通量; 第二幅中的2条曲线, 从浅至深, 分别表示142eV和337eV处的高分辨率能量通量; 第三幅中的2条曲线, 从浅至深, 分别表示相对温度和相对密度; 第四幅给出的是相应的磁场强度大小)

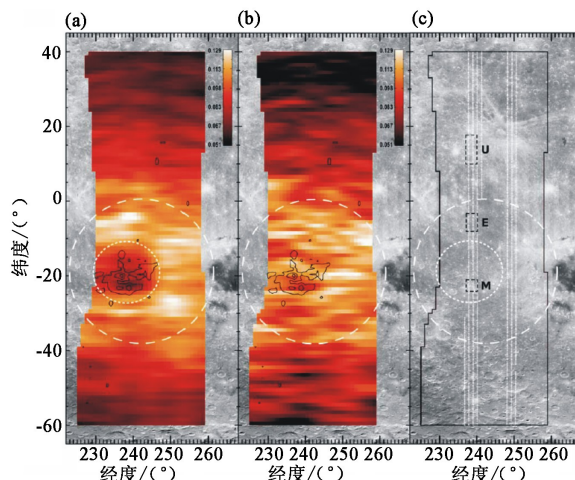


图6 基于Chandrayaan-1探测的危海对峙区附近氢原子反射数据^[11] (a) 氢原子通量150—600eV; (b) 氢原子通量30—100eV; (c) 750nm波长处的光学反照率

层在结构上也存在类似于“磁鞘”的特征.

近期, 我们利用嫦娥2号探月卫星获得的太阳风等离子体数据, 对这一现象进行了进一步的研究. 嫦娥2号卫星入轨之后的最初几个轨道“幸运”地落在月球表面另一个著名的LMA中的澄海对峙区(Serenitatis antipode)附近. 这意味着轨道的几何构型非常有利于观测太阳风质子相空间分布在磁异常结构附近的变化趋势. 观测得到的质子能谱如图7所示, 为24个不同极角方向上的能谱叠加的结果. 可以看出, 在能谱中心有一段显著的区域, 在此区域内, 质子流量计数降低, 形成一个质子空腔, 而这个空

腔恰好落在澄海对峙区的上方,揭示了磁异常结构对太阳风等离子体流存在显著的屏蔽作用.

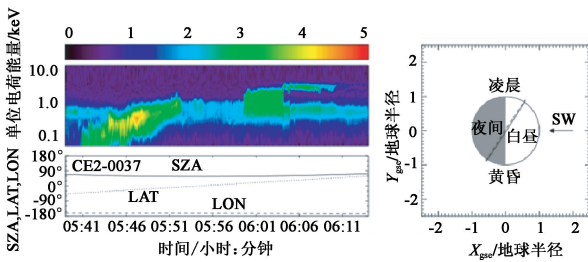


图7 左图为基于嫦娥二号卫星空间环境测量的澄海对峙区附近的质子能谱数据,以及沿轨道的太阳天顶角和地理纬度变化趋势(其中 SZA 为太阳天顶角, LAT 为纬度, LON 为经度);右图为相应的卫星轨道示意图,其中圆形区域表示月球,斜线表示从月球极地俯视的卫星投影轨迹,箭头表示太阳风入射方向

我们进一步利用速度矩(velocity moments)的方法从所测得的质子相空间分布计算相关物理参数,如密度、温度等.结果如图8所示:左,中,右三组图分别为3条不同轨道所测量的结果,从图8中可以明显观察到磁异常结构对太阳风的屏蔽作用导致等离子体空腔的形成,同时在这个空腔内质子温度也显著增加,这种加热现象也符合微磁层形成过程的理论预言.

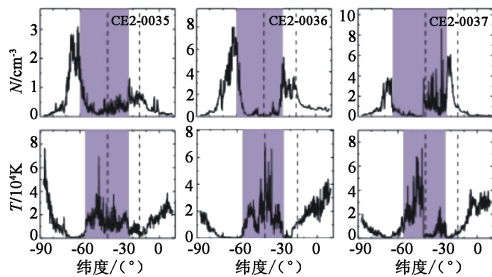


图8 由图7所示能谱通过速度矩方法计算得到的质子宏观物理量(密度 N 和温度 T)在澄海对峙区附近的变化行为(其中上面3张图给出的是3个轨道(CE2-0035, CE2-0036 和 CE2-0037)上的质子密度变化,而下面3张图给出的是相应的温度变化)

这里我们强调的是,嫦娥二号探月卫星的等离子体数据给出的探测结果是微磁层存在的直接证据,并且观测效应明显.然而,嫦娥卫星的这一结果是否确凿,还需要进一步的观测认证.这是因为:(1)质子密度及温度等相关物理参数的计算原则上依赖于整个 4π 角度内的相空间分布,而仪器的视场角并不是 4π ;(2)嫦娥二号卫星在相关的几个绕月轨道中姿态不是十分稳定,进一步导致了一些由未知视场角所引起的不确定因素.尽管如此,我们仍然认为嫦娥卫星的等离子体观测结果具有一定的科学真实性,这是因为仪器在不同极角内所获得的质子能谱在接近 LMA 附近表现出类似的观测特性,这种类

似性意味着在 LMA 附近质子相空间分布趋于“弥散”,因此我们可以近似假设仪器视场角能够较真实地反映整个相空间的分布,这点意味着通过速度矩方法所获得的宏观物理参数是可信的.这项研究更详细的结果及讨论见文献[21].

5 总结及展望

月球表面磁异常结构与太阳风的相互作用涉及磁层物理学的一个基本问题.通常意义上的磁层具有至少千公里级以上的行星尺度,在这种情况下,微观粒子(如质子、电子等)的回旋半径远小于宏观特征尺度,意味着整个系统可以合理地用磁流体动力学(magnetohydrodynamic)模型来描述.对于月球表面磁异常结构,在其特征磁场强度下,虽然电子回旋半径依然很小,但是质子回旋半径可以达到几百公里的量级,与问题所涉及的宏观尺度大致相当.这意味着磁流体动力学模型原则上并不适用(如上面图2所示的计算结果),而更合理的方法则是通过动力学(kinetic)模型或混合(hybrid)模型来进行月球微磁层研究.因此,月球附近的微磁层在空间物理中具有一定的特殊性,是验证上述这种“有限回旋半径效应”(finite gyroradius effect)的理想实验室.同时,类似的磁场分布与空间环境特点也在其他行星(如水星、火星等)上存在.由于这些地外行星的探测相对较难(特别是水星),因此研究太阳风与月球表面相互作用的意义远大于现象本身,将对整个行星/空间物理学的认识产生深远的影响.

在这篇文章中,基于嫦娥二号卫星的空间等离子体数据,为我们提出了月球微磁层存在的初步证据.然而目前并不清楚这究竟是代表着 LMA 的一个普遍现象,还是仅仅为一个特例.因此,对这个问题更全面的研究将依赖于大量数据的统计分析,从而使得对 LMA 与太阳风相互作用的研究从个别事例分析阶段进入更关键性的样本普查阶段.我们注意到,嫦娥一号卫星的轨道高度为 100 公里,低于嫦娥二号卫星 200 公里的高度,因此通过这些不同数据的对比,将有可能对微磁层的垂直尺度进行一定的限制.与此同时,微磁层对太阳风的屏蔽作用可能导致月球表面物质的空间风化程度与邻近磁场强度分布存在一定的相关性.描述这种空间风化效应的一个可能的物理量为月球表面光学反照率^[19],因此我们在后续工作中也将对 LP 卫星所获得的磁场数据与嫦娥卫星干涉成像光谱仪(imaging interfer-

ometer, IIM)^[22]所获得的光学反照率数据进行相关分析。最后我们需要强调,对于月球附近微磁层的研究也具有一定的现实意义,尤其是其对入射太阳风粒子的屏蔽作用可以为永久性月球基地的选址提供一定的参考意义。

致谢 感谢嫦娥探月工程地面应用系统全体工作人员的努力,正是这种努力保证了研究工作所依赖的数据可以及时获取并且得到完善的预处理。

参考文献

- [1] Ouyang Z Y, Jiang J S, Li C L *et al.* Chin. J. Space Sci. , 2008, 28:361
- [2] Wang X D, Bian W, Wang J S *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2010, 37:L07203
- [3] Farrell W M, Kaiser M L, Steinberg J T *et al.* J. Geophys. Res. , 1998, 103:23653
- [4] Ogilvie K W, Steinberg J T, Fitzenreiter R J *et al.* Geophys. Res. Lett. , 1996, 23:1255
- [5] Saito Y, Yokota S, Tanaka T *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2008, 35:L24205
- [6] Holmström M, Wieser M, Barabash S *et al.* J. Geophys. Res. , 2010, 115:A06206
- [7] McComas D J, Allegrini F, Bochsler P *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2009, 36:L12104
- [8] Nishino M N, Fujimoto M, Maezawa K *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2009, 36:L12108
- [9] Hood L L, Schubert G. Science, 1980, 208:49
- [10] Halekas J S, Delory G T, Stubbs T J *et al.* Planet. Space Sci. , 2008, 56:914
- [11] Wieser M, Barabash S, Futaana Y *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2010, 37:L05103
- [12] Halekas J S, Mitchell D L, Lin R P *et al.* J. Geophys. Res. , 2001, 106:27841
- [13] Richmond N C, Hood L L. J. Geophys. Res. , 2008, 113:E02010
- [14] Purucker M E. Icarus, 2008, 197:19
- [15] Mitchell D L, Halekas J S, Lin R P *et al.* Icarus, 2008, 194:401
- [16] Hood L L. Geophys. Res. Lett. , 1987, 14:844
- [17] Harnett E M, Winglee R M. J. Geophys. Res. , 2003, 108:1088
- [18] Richmond N C, Hood L L, Halekas J S *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2003, 30:1395
- [19] Blewett D T, Hawke B R, Richmond N C *et al.* Geophys. Res. Lett. , 2007, 34:L24206
- [20] Blewett D T, Coman E I, Hawke B R *et al.* J. Geophys. Res. , 2011, 116:E02002
- [21] Wang X Q, Cui J, Wang X D *et al.* Adv. Space Res. , 2012, in press
- [22] Ling Z C, Wang A, Jolliff B L. Icarus, 2011, 211:101