

中图法分类号: TP301 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)03-0488-07

论文索引信息: 张田, 孙延奎, 唐泽圣. 嫦娥一号太阳风离子数据在月表分布的可视化 [J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(3): 488-494

# 嫦娥一号太阳风离子数据在月表分布的可视化

张田<sup>1)</sup>, 孙延奎<sup>1)</sup>, 唐泽圣<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup>(清华大学计算机系, 北京 100084) <sup>2)</sup>(澳门科技大学资讯科技学院, 澳门)

**摘要:** 根据嫦娥一号探月卫星获取的近月空间太阳风离子流量数据的特点, 提出了对该数据的一种可视化表达方法。该方法首先从一个月的太阳风离子流数据中分离出向阳面或背阳面数据, 从每一条记录中抽取所需的能级部分对其流量求和作为该记录的流量强度; 根据当时卫星下点的经纬度坐标将其投影到月球的均匀经纬度网格中, 并求出每个网格中的平均离子流量强度, 然后对该经纬度网格进行一种地图投影并选择一种色彩方案以表示不同强度的流量, 从而得到离子流量在月表向阳面或背阳面的直观可视化结果。借助该方法能够对大量的太阳风数据在月面附近空间分布的总体变化趋势及特点进行显示与分析。实际数据实验结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 科学可视化; 嫦娥一号; 近月空间环境; 太阳风离子流量

## Visualization of the distribution of the solar wind ion flux data above the moon surface based on Chang' E-1 exploration

Zhang Tian<sup>1)</sup>, Sun Yankui<sup>1)</sup>, Tang Zesheng<sup>1), 2)</sup>

<sup>1)</sup> (Department of Computer Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084 China)

<sup>2)</sup> (Faculty of Information Technology, Macau University of Science and Technology, Macao SAR China)

**Abstract:** Based on the characteristics of the solar wind ion flux data fetched by Chang' E-1 (CE-1) moon-orbiting spacecraft, a new visualization analysis method for these data is developed. First, all the data fetched in a month is separated depending on whether they are obtained on the day-side or the night-side of the moon. Then the total flux intensity distributed in certain energy levels is calculated as the sole flux intensity value for each data record, and these flux intensity values are projected to an even longitude-latitude grid of the moon surface and an average intensity value is calculated for each grid which has multiple intensity values projected in. Finally after a map projection, e. g. Hammer projection to give a more conventional representation of the moon surface and a color theme is chosen to represent different intensities of ion flux, and so an intuitive visualization result of the distribution of ion flux on the day-side or the night-side of the moon in a month is obtained. By using this method it is possible to visualize and analyze the mass data of the distribution and fluctuation of solar wind ion flux in cislunar environment. The validity of this method is proven by the results of actual experiments.

**Keywords:** visualization; Chang' E-1; cislunar space environment; solar wind ion flux

## 0 引言

太阳风是太阳上层大气射出的高速带电粒子流, 主要成分是质子和电子, 此外也包含少量更重元

素(如氦、锂等)的原子核, 其速度可高达 350 ~ 700 km/s。太阳风对地月空间环境的形成影响很大, 它与地磁场的相互作用是地球的磁层结构形成的直接原因, 剧烈太阳活动释放出的高能太阳风结构可能会诱发极光、磁暴, 对通信、电力的安全运行产生

收稿日期: 2010-09-01; 修回日期: 2010-11-02

基金项目: 澳门科技发展基金项目(003/2008/A1); 国家自然科学基金项目(60971006)。

第一作者简介: 张田(1983—), 男, 清华大学计算机科学与技术系硕士研究生, 主要研究方向为医学图像处理、科学计算可视化。E-mail: kasperlzhang@gmail.com。

重大影响,同时太阳风还是月壤中丰富的 He-3 储量的主要来源,而 He-3 元素被认为是一种极具潜力的核聚变燃料。因为太阳风的重要性,近年来各国进行的多次探月活动中都对太阳风的观测进行了重点观测,如日本的月亮女神<sup>[1]</sup>(SELENE,)月球探测计划<sup>[1]</sup>、印度的月船一号<sup>[2]</sup>(Chandrayaan-1)探月卫星和 NASA(美国国家航空航天局)的月球勘测轨道器<sup>[3]</sup>(LRO)等。而且多年来各国研究者对太阳风的产生、组成、结构及其与地月环境的互相影响进行了大量的研究工作<sup>[4-7]</sup>。我国于 2007 年 10 月发射的嫦娥一号探月卫星上也携带了专门用于探测太阳风离子流成分、能谱和流量的设备,即太阳风离子探

测器,并获取了大量重要数据。

嫦娥一号携带的太阳风离子探测器(SWID)<sup>[8]</sup>能够探测能量从最低 0.05 keV 到最高 20 keV 的太阳风离子的流量,按对数尺度分为 48 个能级。SWID 的视角为 $6.7^\circ \times 180^\circ$ ,即具有一个近似 2 维的视角,能够接受一个平面内来自一半方向( $180^\circ$ )范围内的太阳风离子。而该平面内这  $180^\circ$  的方向被均分为 12 份,每部分各  $15^\circ$ 。为了弥补这个近似 2 维的视角的局限性,卫星安装了两个相同的 SWID,分别称为 SWIDA 和 SWIDB,并且互相垂直的安装在卫星上,从而使其能够探测更广方向范围内的太阳风离子流分布,如图 1 所示。

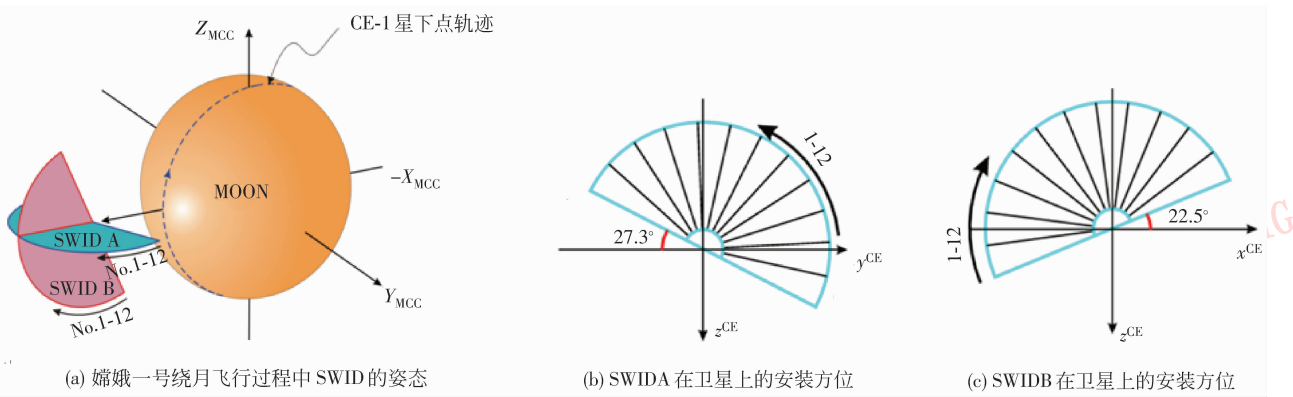


图 1 嫦娥一号卫星上携带的太阳风粒子探测器的结构和安装示意图

Fig. 1 The structure and installation of SWIDs on CE-1

SWIDs 的数据以 PDS(planetary data system)标准格式<sup>[9]</sup>存储,一条记录包括当前时刻、离子流量数据(一个用于保存分布在 48 个能级和 12 个方向上的太阳风离子流量为  $48 \times 12$  的矩阵)、卫星的 GSE(地心黄道系统)坐标、MCC(月心坐标系)坐标等,其中一个数据样本如表 1 所示。

表 1 SWIDB 在 2007 年 12 月 14 日的一条数据样本

Tab. 1 A data sample of SWIDB on Dec. 14, 2007

数据项	单位	数据样本
时刻	无	2007-12-14T00:49:39.536
离子流量	counts/keV · cm <sup>2</sup> · s · sr	48 × 12 的矩阵
GSE 坐标	地球半径	40.409 5, 45.996 2, -1.512 9
MCC 坐标	km	54.806 7, -29.459 2, 1 938.368 3
太阳入射角	度	86.897 1, 175.082 4, 93.811 3

因为 SWID 约每 3 s 就能收集一条这样的数据,所以在其两小时左右的一个绕月轨道中就会收集 2 000 多条数据。而目前已经公开的数据中共有 SWID 在 1 400 多个绕月轨道中收集的数据,总容量

超过 57 GB。要研究、分析如此庞大的数据,除了应用统计分析方法之外,另一个重要途径则是开发一种有效的科学数据可视化方法,目前国外在空间物理数据可视化方面已经进行了相当多的工作<sup>[10-11]</sup>,但国内这方面研究尚较为缺乏。因此,为了对嫦娥一号获取的海量太阳风离子流数据进行有效的可视化分析,以便于研究者直观地观察、研究在较长时间、较大范围内,在地磁场的影响下,太阳风离子流在近月空间的宏观分布和变化规律,提出了一种基于月面经纬度网格对嫦娥一号卫星获得的近月空间向阳面和背阳面的大量太阳风离子流量分布数据进行可视化的新方法。

## 1 可视化方法

### 1.1 可视化方法原理

可视化方法的主要原理是利用嫦娥一号卫星完成一次全月覆盖的周期和月球绕地公转周期的同步

性(均为 1 月左右),设计一种能对大量太阳风离子流强度数据在月表附近的分布进行宏观可视化分析,同时也能够直观体现月球随地球公转过程中位于地磁场不同位置时太阳风离子流强度的不同特征的可视化方法。

嫦娥一号卫星运行在月表上空约 200 km 的极轨工作轨道上,即它的绕月轨道近似于沿着月球的经线方向,绕月周期为两小时左右。因为月球对太阳风的遮蔽作用,在卫星绕月飞行的一个轨道中,在月面的向阳面的半个轨道和背阳面的半个轨道测得的太阳风离子流分布具有截然不同的特性,因而我们在此只单独考虑各个轨道中当前感兴趣的向阳面或背阳面的半个轨道,以下均以向阳面的半轨为例。由于月球自西向东的自转的影响,卫星两条相邻轨道的轨道面相对于月面会有一些自东向西的偏移,大约为  $1^\circ$ (经度)左右。在 1 个月里,月球完成 1 次自转,从而卫星的向阳面的半个绕月飞行轨道也会以月球自转轴为轴自东向西旋转 1 周,回到初始的位置,即大致位于同一条经线的上方,从而使卫星的星下点在这一个月的时间内完成一次全月覆盖。

而 1 个月也正是月球绕地球公转的周期,即在这 1 个月中月球会经历从地磁场外到地磁场各个不同位置处的一个循环,如图 2 所示。

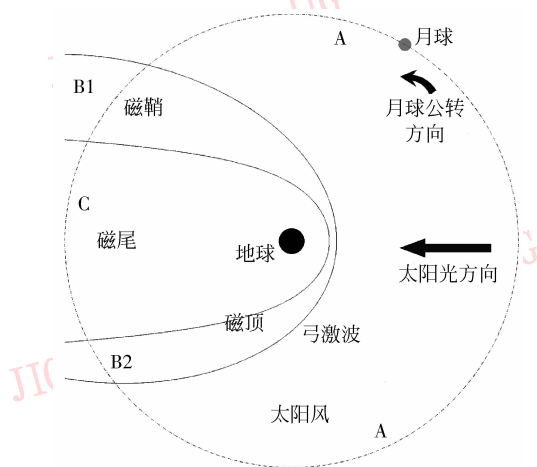


图 2 地磁场结构示意图

Fig. 2 The Structure of magnetosphere

图 2 为在太阳风影响下形成的地磁场结构<sup>[12]</sup>示意图,由于太阳风的压力,地磁场被吹向背离太阳的方向,面向太阳一侧的地磁场被压缩,背向太阳的一侧则被拉长,形成了地磁场的磁鞘和磁尾等结构。因此,在 1 个月的绕地公转周期中,月球将会依次经

历 3 种状态:1) 位于地磁场外部,直接暴露在太阳风中,即图 2 中的 A 区域,在这个区域中,由于基本没有地磁场的影响,一般认为太阳风相对较为温和稳定;2) 位于磁鞘中,即图 2 中的 B1 和 B2 区域,这一区域既是磁场最强的区域,也是太阳风流量最大最紊乱的区域;3) 位于磁尾中,即图 2 中的 C 区域,由于地磁场的遮蔽作用,太阳风的流量在这个区域中最为微弱。

由于上面介绍的卫星轨道遍历月面和月球绕月公转的同步性,使得卫星当前位置的经度值与月球在地磁场中所处的位置具有了一一对应的关系。例如某月中,当月球处于地磁场的磁鞘之中,即位于图 2 中的 B1 区域时,在这 2~3 天的时间里,不妨假设卫星的星下点将会完全覆盖月面上从东经  $120^\circ$  到东经  $90^\circ$  的范围;接下来月球公转到运行在磁尾区域即图 2 中的 C 区域时,这段时间内卫星的星下点将会完全覆盖月面上从东经  $90^\circ$  到东经  $30^\circ$  的范围;接下来随着月球陆续通过 B2、A 区域,卫星的星下点也会陆续覆盖月面上更往西的区域;最后经过 1 个月,在月球完成 1 次绕地公转的同时,卫星也完成 1 次全月覆盖,绕月轨道回到月初的经线上空。

根据这种月球在绕地公转轨道上所处位置与卫星在月面上的星下点的经度值的对应关系,我们设计了一种基于月表经纬度坐标系对卫星测得的太阳风离子流强度分布进行可视化的方法:根据卫星的各时刻的星下点经纬度坐标将其测得的太阳风离子流强度数据投影到月面经纬度网格中,则沿着一条经线方向上的可视化结果表示卫星在某个轨道上测得的数据,而不同经度范围上的可视化结果的对比则能体现在较大时间间隔下卫星处于不同的轨道上、而月球也处于地磁场内外不同位置上时测得的数据的不同特点。从而得到一种能从宏观上反映在地磁场影响下,近月空间太阳风离子流强度分布规律的可视化方法,它最多能够同时可视化卫星在 1 个月的时间、全月面范围内测得的全部向阳面或背阳面的大量离子流数据。

## 1.2 可视化方法流程

可视化方法的基本流程如图 3 所示。

首先,需要对嫦娥的数据进行预处理,选取感兴趣的时间段内(最多 1 个月内)的太阳风离子流数据,抽出位于所需的向阳面或背阳面的一半轨道的数据。并根据实际需要选取所需能级的数据,从每一条记录中作为一个  $48 \times 12$  的矩阵存储的太阳风

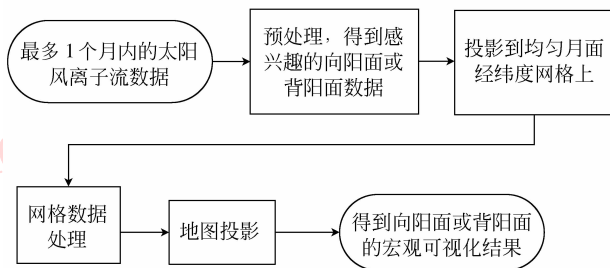


图3 可视化方法流程图

Fig. 3 The flowchart of the visualization method

离子流量数据中抽取所需的部分对其求和即可得到一个表示流量强度的标量值,例如需要分析48个能级中最高的5个能级的离子成分的总流量时只需将矩阵中对应的5行元素的值求和即可,而如果需要的是来自某一特定方向范围的离子流强度,则只需将对应的几列数据相加。

然后,将月球表面按经纬度细分为一张均匀经纬度网格,这里选用的均为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 为一格,也可根据实际需要改为更粗或更细的网格。对经过第1步预处理后的所有数据根据卫星的星下点经纬度坐标投影到这张均匀经纬度网格上,然后求取每个网格内的离子流量的平均值,缺失数据的网格中以0填充,因此,在最后的可视化结果中出现的深蓝色的带状区域即表示该区域实际上没有卫星获得的数据。

最后选择一种地图投影方式对这张网格进行投影,示例中选用最常用的Hammer投影,将矩形的月面经纬度网格投影为更符合通常习惯的类椭圆形表示,类似于常见的世界地图的投影方式。同时选取一个色彩方案用以表示离子流的不同强度,目前选用的方案为深红色和深蓝色分别代表最强和最弱的离子流,在每个可视化结果下方的色度条中即可看到。

## 2 实验与分析

选用太阳风离子流数据最全的3个月:2007年12月、2008年1月和6月的离子流数据进行实验与分析。

### 2.1 2007年12月数据的可视化

2007年12月里,卫星在覆盖全月面过程中SWIDA和SWIDB获取的向阳面所有能级的太阳风离子总流量强度数据在月表的分布按上述可视化方法绘制得到的可视化结果如图4所示。显示的范围

为全月面,即图中从上到下为纬度从北纬 $90^\circ$ 到南纬 $90^\circ$ ,从左到右为西经 $180^\circ$ 到 $0^\circ$ 到东经 $180^\circ$ ,类似于一张世界地图,以下各图也同样如此。每一张图中各种颜色代表的具体的离子流强度在该图下方的色度条中可以查到,例如中深蓝色代表离子流强度接近于0,而深红色则代表 $10^9 \text{ counts/keV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr}$ 数量级的离子流。

由于可视化方法原理中介绍的月球在绕地公转轨道上所处位置与卫星在月面上的星下点的经度值的对应关系,图4中月表上的以经度值划分的A、B、C区域和图2中的以地磁场的各条边界划分的A、B(B1和B2)、C区域具有一一对应的关系。即当卫星位于图4中A区域的经度范围内时,月球此时会处于地磁场之外,直接暴露在太阳风之中,即位于图2中A区域;当卫星处于图4中B区域的经度范围内时,月球同时会位于磁鞘之中,即处于图2中B1或B2区域;图2和图4中C区域的对应关系同理。这个可视化结果基本体现了在地磁场的影响下,近月空间太阳风流量分布的不同规律,即B区域(磁鞘区域)最强,A区域(太阳风区域)次之,C区域(磁尾区域)最弱。另外,由于卫星在1个月的绕月飞行之中并不总能保证时时开机,所以有的轨道上可能存在数据缺失,表现为图中的一些深蓝色的带状区域,例如图4D区域,即表示在卫星位于这些轨道上时,SWID没有开机,从而没有能够获取太阳风离子流量数据。

不过,虽然地磁场与太阳风的相互作用决定了太阳风流量强度分布的总体规律,但实际中还有其他因素对太阳风离子流量强度产生影响,例如太阳的活动和宇宙射线的变化等。其他这些因素的影响使得可视化结果在总体上体现地磁场和太阳风互相影响的一般规律的同时,也体现出不同程度的波动性和特殊性,通过对1个月内和不同的月份之间的数据可视化结果进行对比分析能够发现很多值得关注的特殊现象,有助于在较长时段的大量数据中迅速定位空间环境的变化,并分析研究其起因和规律。

例如在图4中,一个显著的现象就是图中右侧A区域(太阳风区域)的数据(大约在12月6—10日获得)比左侧A区域中(大约在12月1—5日获得)太阳风离子流量明显更强,甚至接近相邻的B区域(磁鞘区域)的太阳风强度。这说明在2007年12月上旬,太阳风处于一个逐渐加强的过程,可能指示着太阳活动的增强。

图 5 是同一月中(2007 年 12 月)SWIDs 在月球背阳面获取的离子流强度分布的可视化结果。由于月球的遮蔽作用,背阳面测得的太阳风流量显著小于向阳面,由图 5 和图 4 的对比可以清楚地看到这一点。一般认为,在背阳面中只有在月球的极地区域会有较显著的太阳风流量,在图 5 中可以看到 2007 年 12 月南北两极都有相对较强的太阳风流量分布,尤其是北极附近相当强烈。作为对比,图 6 是 2008 年 6 月的背阳面的太阳风离子流强度分布可视化结果,这个月中在南极附近流量则更强。对背阳面两极区域的太阳风分布的研究是近月空间环境研究的一个重要课题,这种可视化方法能对这方面研究提供有益的帮助。

在图 4 中可以看到的一个特殊现象是,赤道附近的离子流强度明显地比相邻的较高纬度地区强。但这并不是真实的太阳风流量分布的反映,而是由于卫星携带的太阳风离子探测器的视角限制和安装方位引起的。在图 1 中可以看到,两个离子探测器之一的 SWIDA 安装在垂直于卫星绕月公转轨道面的平面上,所以只有当卫星飞到临月球赤道上空时,SWIDA 才能较好地接收到基本与月球赤道面平行的太阳风流量。而图 4 中可视化的是 SWIDA 和 SWIDB 所探测到的所有太阳风离子流量的总和,因此在赤道附近区域的数值明显大于其他的 SWIDA 基本接收不到太阳风流量的区域。为排除这个干扰,可以只绘制 SWIDB 的数据,可视化效果如图 7 所示,可以看到这阳的可视化结果中,月面赤道附近不再有异常的较强离子流,而卫星在地磁场的不同区域接收到的离子流的强度变化则能体现的更为充分。为了排除上面介绍的离子探测器的组成结构和安装方位对结果造成的影响,以下的可视化结果和

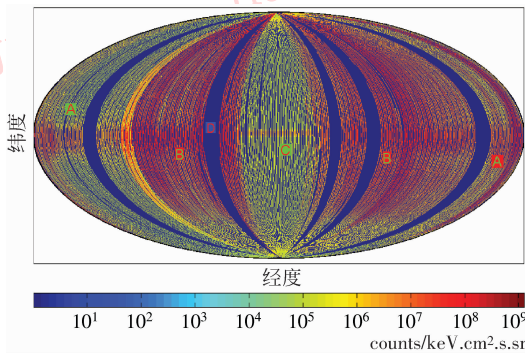


图 4 2007 年 12 月 SWIDs 测得的向阳面的离子流强度分布  
Fig. 4 The distribution of Solar wind ion flux on the day-side of the moon in December, 2007

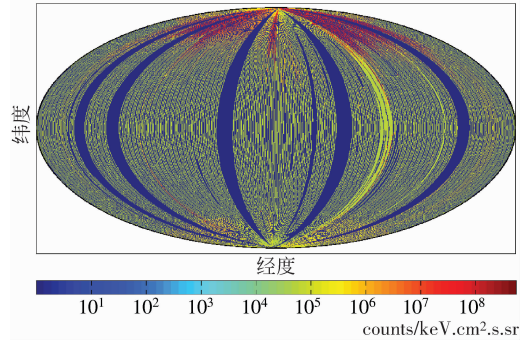


图 5 2007 年 12 月 SWIDs 测得的背阳面的太阳风离子流强度分布

Fig. 5 The distribution of Solar wind ion flux on the night-side of the moon in December, 2007

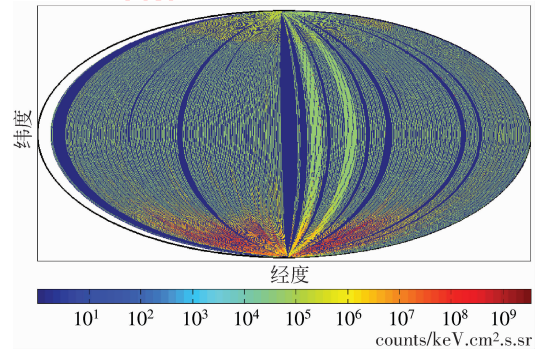


图 6 2008 年 6 月 SWIDs 测得的背阳面的太阳风离子流强度分布

Fig. 6 The distribution of Solar wind ion flux on the night-side of the moon in June, 2008

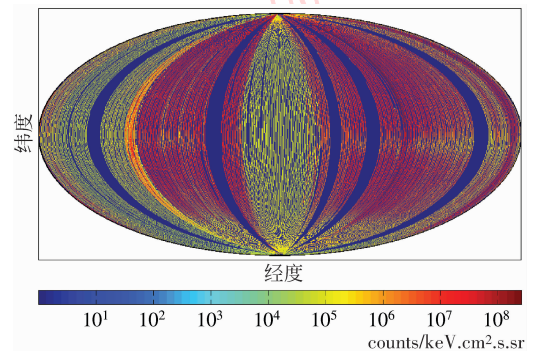


图 7 2007 年 12 月 SWIDB 测得的向阳面的太阳风离子强度分布

Fig. 7 The distribution of Solar wind ion flux fetched by SWIDB on the day-side of the moon in December, 2007

分析均只针对 SWIDB 的数据进行。

2.2 2008 年 1 月和 6 月数据的可视化及对比分析  
通过两个不同月份的离子流强度分布的可视化

结果进行对比分析有助于比较大时间间隔内太阳风的变化趋势,为此绘制了另外两个数据较全的月份即 2008 年 1 月和 6 月 SWIDB 测得的数据的可视化结果,如图 8 和图 9 所示,图中的绿色曲线是人为标记用以区分地磁场不同区域的分界线。

从图 8 和图 9 的对比分析中可以看到如下现象:

1) 在这两个月中,当月球处于地磁场不同区域中时,近月空间中离子流的强度变化没有 2007 年 12 月那么清晰地体现地磁场不同区域影响的界线划分,一个可能的原因是这两个月中太阳活动相对较不稳定,但总体仍能体现出磁鞘区域最大,磁尾区域最小的宏观趋势。

2) 2008 年 6 月的太阳风离子流量明显强于 1 月,说明 6 月的太阳活动更为剧烈,释放出更为强烈的太阳风结构。而在同一个月中离子流量也可能有较大变化。例如图 8 左侧的 A 区域(地磁场外区域)有非常强烈的离子流,表明这一时段(1 月初)可能有较强的太阳活动。

3) 从图 9 中可以看到,6 月份的离子流量分布还有一个不同于其他月份常态的特殊现象,即 C 区域(磁尾区域)也有相当大的离子流量,说明这一时段(6 月 20 日左右)有较强的太阳风结构到达地磁场区域,或者这段时间内地磁场较为紊乱。

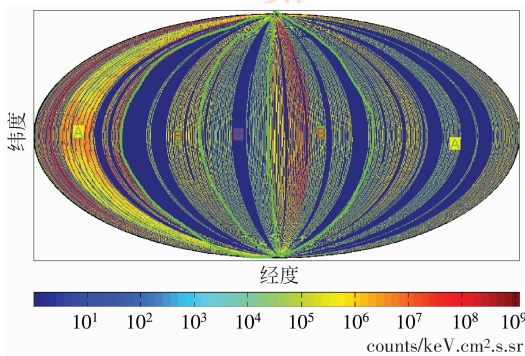


图 8 2008 年 1 月 SWIDB 测得的向阳面的太阳风离子强度分布

Fig. 8 The distribution of Solar wind ion flux on the day-side of the moon fetched by SWIDB in January, 2008

### 2.3 特定能级段的太阳风离子流量可视化

以上实验结果均为对卫星获得的全部 48 个能级的离子总流量数据进行可视化,根据实际需要,也可选择只可视化某一特定能级或者特定能级段的离子流量数据,从而能够分析感兴趣的特定能级段的离子流量分布的特殊性质。例如 2007 年 12 月 SWIDB 在月面向阳面测得的最低 5 个能级(1~5 能

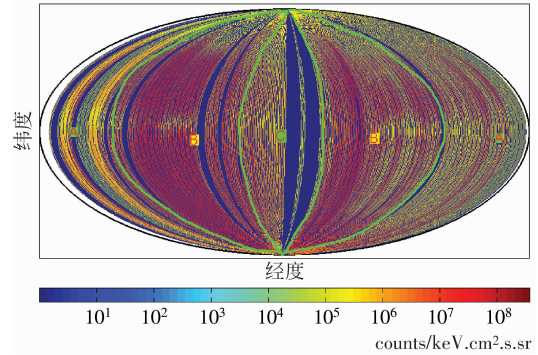


图 9 2008 年 6 月 SWIDB 测得的向阳面的太阳风离子强度分布

Fig. 9 The distribution of Solar wind ion flux on the day-side of the moon fetched by SWIDB in June, 2008

级)和最高 5 个能级(44~48 能级)的数据可视化结果分别如图 10 和图 11 所示。

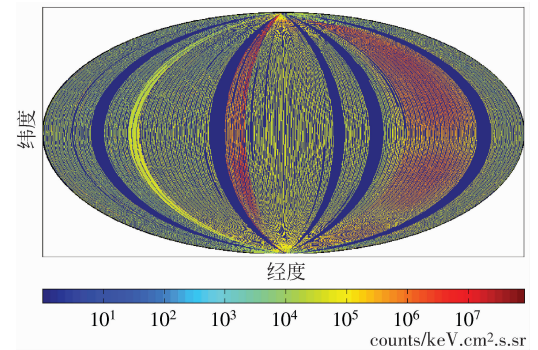


图 10 2007 年 12 月 SWIDB 测得的向阳面的最低 5 能级的离子流量

Fig. 10 The distribution of Solar wind ion flux of the 5 lowest energy levels on the day-side of the moon fetched by SWIDB in December, 2007

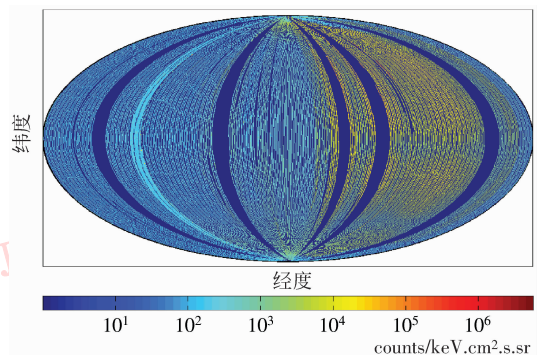


图 11 2007 年 12 月 SWIDB 测得的向阳面的最高 5 能级的离子流量

Fig. 11 The distribution of Solar wind ion flux of the 5 highest energy levels on the day-side of the moon fetched by SWIDB in December, 2007

对比图 4 中同一月份中所有能级的离子总流量的可视化结果,可以看到离子流量总量相当的一些区域,某一特定能级段的离子流量可能有较大的差别。例如图中右侧的 B 区域(磁鞘区域)比左侧的 B 区域的高能级离子流量大得多,而左侧磁鞘区域的低能级离子流量则较大,说明右侧的磁鞘区域的离子流中高能级成分较高而左侧的低能级成分更高。这证明通过选择性的可视化感兴趣的特定能级段的离子流数据,能够体现出离子流中不同能级成分的组成特征。

通过上述实验和分析可以看到,这种新的可视化方法既能够同时可视化最多一个月内获取的大量离子流数据,从而在宏观层面展现出在地磁场影响下,近月空间太阳风离子流量的总体分布变化趋势,又能使研究者在大量数据中迅速定位感兴趣的特殊现象发生的时间和区域,有助于分析其产生原因和规律。此外本文方法也允许研究者根据其研究重点选择其所感兴趣的数据成分例如特定能级段或方向的离子流量数据进行可视化分析。

### 3 结 论

基于月面经纬度坐标系对嫦娥一号的太阳风离子流强度分布进行可视化的新方法,通过同时可视化卫星在较长时段内获得的大量数据,帮助研究者对较长时间内的太阳风分布特征进行宏观把握和分析,在直观的体现在地磁场与太阳风相互影响下近月空间的太阳风离子流量分布的一般规律的同时,也能在大量数据中迅速定位各种特殊现象并对其进行分析研究。此外通过灵活选取用于可视化的数据组成,使研究者能够着重可视化其感兴趣的特殊成分的太阳风离子流分布,并且可选择月球向阳面或者背阳面的太阳风分布,从而为嫦娥一号探月工程获取的大量近月空间太阳风离子流数据的分析和研究提供了一种宏观和直观的可视化分析方法。

### 参考文献 (References)

- [ 1 ] Sasaki S, Iijima Y, Tanaka K, et al. The SELENE mission: Goals and status [J]. *Moon: Science, Exploration and Utilisation*, 2003, 31(11): 2335-2340.
- [ 2 ] Goswami J N, Annadurai M. Chandrayaan-1: India's first planetary science mission to the moon [J]. *Current Science*, 2009, 96(4): 486-491.
- [ 3 ] Tooley C R, Houghton M B, Saylor R S, et al. Lunar reconnaissance orbiter mission and spacecraft design [J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1-4): 23-62.
- [ 4 ] Galvin A B, Ipavich F M, Cohen C M S, et al. Solar wind charge states measured by Ulysses/SWICS in the south polar hole [J]. *Space Science Reviews*, 1995, 72(1-2): 65-70.
- [ 5 ] Richardson I G, Cliver E W, Cane H V. Sources of geomagnetic activity over the solar cycle: Relative importance of coronal mass ejections, high-speed streams, and slow solar wind [J]. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 2000, 105 ( A8 ): 18203-18213.
- [ 6 ] Bochsler P. Solar abundances of oxygen and neon derived from solar wind observations [J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2007, 471(1): 315-319.
- [ 7 ] Chandran B D G, Hollweg J V. Alfvén wave reflection and turbulent heating in the solar wind from 1 solar radius to 1 AU: an analytical treatment [J]. *Astrophysical Journal*, 2009, 707 (2): 1659-1667.
- [ 8 ] Sun Huixian, Dai Shuwu, Yang Jianfeng, et al. Scientific objectives and payloads of Chang' E-1 lunar satellite [J]. *Journal of Earth System Science*, 2005, 114(6): 789-794.
- [ 9 ] Jet Propulsion Laboratory. Planetary Data System Standards Reference Version 3. 8. [S/OL]. (2009-02-27) [2010-05-12]. <http://pds.nasa.gov/tools/standards-reference.shtml>.
- [ 10 ] Li Hongwei, Fu Chiwing, Hanson A J. Visualizing multi-wavelength astrophysical data [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2008, 14(6): 1555-1562.
- [ 11 ] Fraedrich R, Schneider J, Westermann R. Exploring the millennium run-scalable rendering of large-scale cosmological datasets [J]. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 2009, 15(6): 1251-125.
- [ 12 ] Stern D P. The Exploration of the Earth's Magnetosphere [EB/OL]. (2003-11-20) [2010-11-2]. <http://www.spcf.gsfc.nasa.gov/Education/Intro.html>.