# 2 AU以内的"渐进型"太阳高能粒子事件模拟

敖先志<sup>1</sup>, 刘四清<sup>1,2</sup>, 沈 华<sup>1</sup>, 王晶晶<sup>1</sup>, 胡骏翔<sup>3</sup>, 李 刚<sup>3</sup>

(1.中国科学院国家空间科学中心,北京100190;2.中国科学院大学,北京100190;3.美国阿拉巴马大学汉茨维尔分校 空间科学系,汉茨维尔 35899)

摘 要:太阳高能粒子(Solar Energetic Particle, SEP)事件是影响地球空间以及深空辐射环境的主要因素之一。 "渐进型"太阳高能粒子事件中的高能粒子主要来自于日冕物质抛射(Coronal Mass Ejection, CME)所驱动的激波扩 散加速(Diffusive Shock Acceleration, DSA)过程。CME驱动的激波在行星际的传播过程中,其结构不断演化,进而 影响到高能粒子的加速过程。本文利用二维太阳高能粒子加速和传播模型,对发生于2014年4月18日的太阳高能粒子 事件实例进行了数值模拟。模型考察了黄道面上2AU的距离以内包含地球所在位置的4个不同点,分别计算了每个 点上高能粒子的通量。数值模拟的结果表明:黄道面内不同位置的观察点,与激波波前的磁力线连接不同,从而导 致观察点处高能粒子的通量有着显著的差异。该模型的计算结果可以为深空探测计划开展辐射环境研究提供必要的 输入。

关键词:太阳高能粒子事件;粒子加速;激波扩散加速;空间天气

中图分类号: P353.7 文献标识码: A 文章编号:2095-7777(2019)02-0156-09 **DOI**:10.15982/j.issn.2095-7777.2019.02.007

**引用格式:** 敖先志,刘四清,沈华,等.2AU以内的"渐进型"太阳高能粒子事件模拟[J]. 深空探测学报,2019,6(2):156-164.

**Reference format:** AO X Z, LIU S Q, SHEN H, et al. Modeling a realistic "Gradual" SEP event within 2 AU [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2019, 6 (2): 156-164.

## 引 言

太阳高能粒子事件是影响近地空间(1 AU)以 及深空辐射环境重要的甚至是主要的因素之一,对航 天器、人造地球卫星,以及宇航员的安全等构成巨大 的威胁。大规模的太阳高能粒子事件会造成严重的空 间灾害天气。因此,太阳高能粒子事件的观测、产生 形成机制以及相应的预报模式是当前国际空间物理学 界的最前沿课题之一。

太阳高能粒子事件往往可以分为两种类型:"脉 冲"(impulsive)型和"渐进"(gradual)型<sup>[1]</sup>。"脉 冲"型事件中的高能粒子表现在观测上的特征是仪器 测量到的高能粒子通量有个突然的、急剧的增强,然 后又快速下降,持续时间常常在一个或者数个小时左 右,就好像一个单脉冲一样;"渐进型"事件中的高 能粒子其典型观测特征是升高后的粒子通量缓慢、渐 进地下降,事件持续的时间很长,可以达到2天以 上。这两种形态的事件有时候会混合在一起<sup>[2-4]</sup>。在 实际观测中,"渐进"型的太阳高能粒子事件占大 多数<sup>[5]</sup>。

国外对于太阳高能粒子事件的观测和理论研究开展得比较早<sup>[1,6]</sup>。一般认为,"渐进型"事件中的高能粒子(主要成分为质子)是由日冕物质抛射驱动(CME-driven)的激波加速产生<sup>[7-11]</sup>。这种粒子加速机制通常被称为激波扩散加速(Diffusive Shock Acceleration, DSA)机制,其本质是一阶费米加速。这种加速机制可以轻而易举地把粒子加速到>100 MeV/nucleon。2000年,Zank等提出了基于DSA加速机制的太阳高能粒子加速和传播模型:PATH(Particle Acceleration and Transport in the Heliosphere)模型。这个模型在过去的10多年里得到了不断的发展和完善<sup>[12-20]</sup>。胡骏翔等进一步扩展了前人的研究<sup>[21-22]</sup>,建立了 iPATH(improved PATH)模型,将激波的演化从一维扩展到了二维,从而能够考虑方位角和垂直扩散系数对粒子

基金项目:科技委国防科技创新特区课题资助项目;国家自然科学基金资助项目(41604149);北京市科技重大专项资助项目(Z181100002918004)

收稿日期: 2018-10-15 修回日期: 2019-02-26

加速和传播的影响。

本文利用 iPATH 模型对发生于 2014年 04 月 18 日 的 CME 所引起的太阳高能粒子事件实例进行了数值 模拟,并将地球附近(1 AU)的数值模拟结果和卫 星观测进行了对比;在此基础上加以扩展,进一步给 出了深空环境中不同位置处太阳高能粒子通量的模型 计算结果。

## 1 iPATH 模型简述

iPATH模型是在PATH模型的基础上进行的扩展。 iPATH模型的运行主要包括3个步骤:①生成背景太阳风环境;②模拟CME驱动的激波并计算粒子在激 波附近的加速过程;③计算被激波加速的高能粒子在 行星际空间中的传播。

iPATH对背景太阳风的模拟使用了开源数值模拟 程序包ZEUS3D<sup>[23]</sup>来求解磁流体力学方程组为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0\\ \frac{\partial (\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \rho V V + \left( p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) I - \frac{BB}{\mu_0} \right] = -\rho \nabla \cdot \Phi \\ \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left[ \left( e + p + \frac{B^2}{2\mu_0} \right) V - \frac{(V \cdot B) B}{\mu_0} \right] = 0 \\ \frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (V \times B) \end{cases}$$
(1)

其中: ρ是流体的密度; V是流体的速度; p是流体的 热压强; B是磁感应强度; e是单位体积内的能量, 其定义包括内能和磁能; Φ是引力势能。

尽管 ZEUS3D 具有求解三维磁流体力学(MagnetoHydro Dynamics, MHD)方程组的能力,但是 iPATH 在当前只具有模拟二维条件下的粒子加速和传 播能力,因而在利用 ZEUS3D 程序包进行计算时, iPATH 模型将其中一个维度的大小设为1。具体来说, ZEUS3D 程序包的设置采用了球极坐标(*r*, θ, φ) 参考系,*r*, θ, φ分别为径向距离、仰角和方位角, 太阳位于中心, θ = 90°的平面是黄道面, iPATH 模型 的θ角取值被限定于只取 90°一个值,从而使得三维 模拟程序退化为二维数值模拟。这种方法的不足在于 二维数值模拟没有三维数值模拟更准确,但是对于太 阳高能粒子事件模拟来说可以减少计算资源、大幅提 高计算速度,尤其是对于空间天气预警和预报而言, 计算时间的减少,带来的是预警提前量的提升。

iPATH模型通过在内边界处引入持续一段时间的 扰动来模拟日冕物质抛射。内边界处的扰动参数包括 CME速度、密度、温度、磁场以及扰动持续时间, CME的角宽度也是参数之一,用于描述CME的扰动 速度分布的范围。为简单起见, iPATH 模型假设 CME的速度分布为高斯分布。

对于发生于2014年4月18日的CME事件,本文 所选择的初始扰动参数,尽量使得模拟结果符合日冕 仪和1AU处的太阳风的实际观测数据。与背景太阳 风数值模拟类似,iPATH模型采用MHD方程组来描 述扰动在太阳风中的传播。随着CME扰动的引入, CME驱动的激波开始在模型中传播和演化。ZEUS3D 程序包采用了交错网格和迎风格式。模型中的初始磁 场为简单的Parker螺旋场。

iPATH模型在计算激波参数时同步计算粒子的加速过程。对于粒子在激波附近经历加速过程的理论和数值模型,文献[12]~[22]有非常详尽的描述,本文不再重复叙述。文献[12]~[20]所发展的PATH模型在后期已经在一定程度上考虑了垂直扩散系数,但是鉴于PATH模型在处理激波时,采用的是一维模型,因此PATH无法解决扩散系数在φ方向上的变化。iPA-TH模型从一维扩展为二维空间,扩散系数进而可以表现为φ的函数,或者更为明确地说,激波波前不同位置具有不同的扩散系数。

高能粒子的注入率对被加速粒子能谱的形成具有 重要作用。注入率受到局地太阳风参数、湍流强度、 激波参数、粒子能量动量等各种因素影响,也是目前 高能粒子加速机制研究的一个重要对象。现阶段,在 iPATH模型里粒子的注入率是高能粒子能量动量的一 个函数。此外,iPATH模型假设:激波对粒子有加速 作用,而粒子对于激波的反作用可以忽略。iPATH模 型利用磁流体力学方程组来描述和模拟激波传播,然 而磁流体力学是没有办法来刻画高能粒子加速过程对 激波反作用的动力学特征的。这一点,有待于未来的 研究工作来解决。

被加速的高能粒子从激波附近逃逸并沿行星际空间磁力线传播,传播过程中被传播路径上的湍流所散射。粒子的传播过程服从聚焦传输(focused transport)方程,在 iPATH 模型中利用蒙特卡洛(Monte Carlo)方法来求解粒子的传播过程<sup>[21]</sup>。

### 2 数值模拟结果

数个 GOES (Geostationary Operational Environmental Satellites) 卫星从 2014年 04月 18日—2014年 04月 22日均观测到了强烈的太阳高能质子增强事件。 这次太阳高能粒子事件来源于一次大的日冕物质抛射 事件所驱动的激波。在 2014年 04月 18日,太阳活动 区AR12036爆发了一次M7.3级的耀斑,X射线的流 量在当天13:03UT左右达到了最大值。耀斑爆发大约 20 min 后,位于日地引力平衡点L1处的太阳和日球 层探测器 (Solar and Heliospheric Observatory, SO-HO)卫星所搭载的C2和C3日冕仪观测到了高速全 晕 CME。先进的成分探测器(Advance Composition Explorer, ACE) 卫星在20日大约10:20UT 左右观测 到了这一次CME爆发所驱动的激波。这次全晕CME 事件所引发的太阳高能粒子事件是一起孤立事件,事 件前后高能粒子的通量均无由于其它CME事件所带 来的明显扰动。GOES-15卫星的观测表明在事件之 前7天和之后9天的时间内,能量大于2.5 MeV的质 子通量保持在背景大小。因此,这次事件非常适合进 行数值模拟研究。实际上,在此次CME爆发的同一 天大约07:24UT 左右爆发了一个小的CME, 其速度 和角宽度经估算分别为大约387 km/s和84°。同时期 ACE卫星观测到的太阳风速度逐渐从大约400 km/s 增加到700 km/s,因而这一次小的CME事件不大可 能会引起 SEP 事件。另一方面, STEREO 的2 颗卫星 也观测到了这次小的CME事件。STEREO-A与地球 的夹角为165°,STEREO-B与地球的夹角为156°,这 两颗卫星上搭载的日冕仪观测图像结合 SOHO 卫星的 日冕仪图像,我们推断07:24UT左右爆发的小型 CME事件的抛射方向远离黄道面,与日地连线接近 垂直。故而,这次事件不会对本文的数值模拟造成非 常显著的干扰。

此次事件数值模拟计算域的物理尺度为

 $\begin{cases} r \in [0.1, 2.0] \\ \varphi \in [0, 360] \end{cases}$ 

其中: r的单位为AU; φ的单位为角度。

网格大小设置为黄道面上的1500×360个格点。 在r方向和φ方向上均为均匀网格划分,因此计算域 的内边界是一个半径为0.1 AU的圆。在计算背景太 阳风参数这一步中,为简化起见,采用了轴对称设 置,即内边界所有网格点上同一个物理量的数值是相 同。数值模拟所使用的内边界背景太阳风参数见表1 所示。图1给出了背景太阳风的模拟结果。图中横坐 标是离太阳的距离(以AU为单位),(a)是归一化 的太阳风数密度,即质子数密度乘以距离的平方; (b)是太阳风的速度。在1AU处,数值模拟的太阳 风数密度大约为5.9/cm<sup>3</sup>,速度大约为468 km/s。同 时期的ACE卫星在1AU的观测数据表明,太阳风数 密度围绕6/cm<sup>3</sup>上下波动,速度围绕500 km/s上下波 动。因此,采用表1中的内边界条件数值模拟得到的

#### 结果是符合实际太阳风状态的。

表1 数值模拟内边界参数 Table1 Inner boundary conditions		
参数	太阳风	扰动
数密度/(CM-3)	682	1 638
温度/MK	1.5	2.0
速度/(km·s <sup>-1</sup> )	408	1 290
径向磁场/nT	228	228
切向磁场/nT	-44	-44



图1 有京太阳风参级数值快报结末。上: 归一化的太阳风质于级? 度;下:太阳风速度。横坐标是r方向上的距离

Fig. 1 Numerical simulation of the background solar wind conditions

中国科学院国家空间科学中心所属空间环境预报 与研究中心(Space Environment Prediction Center, SEPC)部署了一套日冕物质抛射自动识别软件程序。 这套软件利用 Hough 变换和 J-maps<sup>[24:25]</sup>方法从 SOHO 卫星日冕仪的白光日冕图像中自动检测和识别 CME, 并进一步采用冰激凌锥模型<sup>[26]</sup>来反演 CME 的速度和 角宽度等参数。在某些情况下,例如全晕 CME,自 动识别和反演程序可能会把1个 CME 识别成2个或者 多个 CME, SEPC 的 CME 识别软件同时提供人工干 预接口以除去明显不合理的结果。

图2是计算机程序自动识别和人工干预识别对2014年04月18日的CME爆发进行识别的对比图。图2(a)是自动识别的结果,图2(b)是人工干预识别的结果。自动识别将此次全晕CME识别为2个CME,本文在识别CME时进行了人工修正。将CME 识别结果利用冰激凌锥模型进行反演,结果见图3。 图3(a)是将图2(b)的结果输入冰激凌锥模型反 演的结果,图3(b)是全自动反演的结果。显然, 图 3 (b) 结果不是真实的。因此,本文在后续的数 值模拟中采用图 3 (a) 的结果:速度1 290 km/s,角 宽度120°。此外,数值模拟所采用的CME持续时间为1.5h,其它的CME参数见表1。



(a) 秋日初頃初日来 图2 SOHO卫星白光日冕图像CME识别与提取 Fig. 2 CME detection and recognition based on SOHO coronagraph images

注:绿色星形代表该时刻CME前沿的位置,自动识别软件把一个全晕CME爆发识别成了两个CME事件,红色"+"代表该时刻CME的前沿位置。



图4所示为CME/激波在黄道面内传播的数值模 拟结果。每个小图中,太阳位于中心,以白色表示; 绿色代表地球所在的位置,蓝色、红色和黄色代表另 外3个假想的观测点,其中红色和黄色观测点的方位 角分别为30°和5°,地球和蓝色观测点的方位角为 90°; 黑色曲线代表磁力线; 颜色棒表示的是速度的 大小,单位为km/s。观测点和激波波前的磁力线连 接位置(Connecting with the OBserver Point, COB-Point) 在太阳高能粒子事件中起着非常重要的作用。 这几个观测点在研究磁力线联通与SEP事件之间的关 系具有相当的代表性。例如,红色观测点在爆发开始 时,磁力线连接在激波最强的中心区域,随着时间的 推移,连接点(COBPoint)逐渐向激波右侧边缘移 动; 黄色观测点的磁力线连接点(COBPoint)起初 位于激波左侧边缘, 随激波传播逐渐向激波中心区域 移动; 蓝色观测点在开始时刻几乎不与激波波前具有 磁力线连接。图3中径向距离的单位为AU,黑色实 线圆为1 AU的地球轨道。图4中可以直观地看到, 激波法向和磁力线的夹角随激波波前位置不同而变 化。图4中每一个小图,激波中间部分压缩比大,向 两侧,压缩比逐渐减小。因此,不同位置处被加速的 粒子也具有不一样的能谱。

高能粒子的注入率在 SEP 事件数值模拟中扮演着 非常重要的作用, SEP 事件中的粒子通量均与之相 关。假设粒子的注入率为<sup>[20]</sup>



图4 CME/激波在黄道面内传播



注: 绿色的圆点代表地球,蓝色、红色和黄色三个点的位置分别为:(1.5 AU, 90°)、(1 AU, 30°)和(1.5 AU, 5°)。颜色棒表示的是流体的速度,黑色曲线代表行星际磁力线。

$$\varepsilon = \chi \cdot \left(\frac{E_0^*}{E_0}\right)^{1-\delta} \tag{2}$$

其中: $\theta$ 为激波法向和磁力线的夹角; $E_0$ 是质子在平 行激波条件下的注入能; $E_0^*$ 是质子在斜激波条件下 的注入能,它是 $\theta$ 的函数,( $-\delta$ )是种子粒子的能谱分 布函数的幂指数。

当 $E_0^*(\theta) = E_0^*|_{\theta=90^*} = E_0$ 时的注入率,即平行激波 条件下的注入率,此时 $\varepsilon = \chi$ 。在iPATH数值模型里,  $\chi$ 是一个可以调整的参数, $\chi$ 在此次SEP事件中取值 为2%,计算所得结果较为符合GOES卫星观测到的 大于10 MeV能量的粒子积分通量。

在深空环境下,很少有机会能够直接将观测结果 和模拟结果进行对比。本文利用地球轨道的观测结果 来确定数值模型的参数,再以同样的参数来模拟深空 环境下的SEP事件。如前所述,假设粒子注入率中的  $\chi = 2\%$ ,数值模拟所得的2014年04月18日SEP事件 在1AU地球附近的高能质子的单向积分通量见图5。

图6是数值模拟所得到的地球附近的高能质子的 单向微分通量,图6给出了6个不同能段粒子的单向 微分通量。总而言之,对于2014年04月18日的SEP 事件在地球附近的表现所进行的数值模拟基本上能反 映实际的观测结果,本文利用地球观测的结果所确定 的数值模拟参数,将模拟范围扩大到1AU以外,进 一步对深空环境下的SEP事件进行模拟。

图 5 中虚线是地球同步轨道 GOES 卫星的观测结果,实线是 iPATH 模型的模拟结果。红色、蓝色和绿

色曲线分别代表能量大于10、50、100 MeV 的高能 质子的单向积分通量。以大于10 MeV的高能质子为 例,数值模拟的结果在事件发生后的前12h内和观测 较为吻合,之后我们模拟的积分通量开始下降,与之 相比观测值仍然维持了很长时间才开始下降。通过与 GOES 卫星观测的高能质子的单向微分通量以及软 X 射线的观测进行对比发现,在事件发生的大约前12 ~24 h,数值模拟的结果相对于观测结果偏小,其原 因可能与行星际太阳风结构有关。在大约27h后,太 阳有一次小的耀斑爆发,耀斑爆发产生的入射粒子可 能作为种子粒子注入激波附近进一步增强了这次 SEP 事件中 >10 MeV 能量粒子的通量,但是其对更高能 的粒子 >50 MeV 的通量影响不大。事件发生后的前 12h内,对于 >50 MeV 和 >100 MeV 的高能粒子,本 文数值模拟的结果偏大。



图5 地球附近SEP事件单向积分通量观测和模拟对比 虚线为同步轨道 GOES 卫星观测值,实线为数值模拟结果 Fig. 5 Comparison between the observed unidirectional integral flux (dashed lines) by GOES satellite and the simulated results (solid lines)



图6 地球附近SEP事件单向微分通量的数值模拟结果 Fig. 6 The simulated unidirectional differential flux at near-Earth space

图7所示为1AU距离30°处的观测点高能质子单 向积分通量的数值模拟结果。由于该位置处的磁力线 在 CME 爆发开始时刻就连接于激波波前中心区域, 因而高能粒子的通量迅速达到最高值,随着激波快速 向外传播,磁力线在激波波前的连接点(COBPoint) 也迅速地移动到激波波前边缘,在事件发生后大约 15h后,各个能段高能粒子的单向微分通量渐渐回归 到背景大小(图8)。



图9~10是位于黄道面上90°, 1.5 AU 处高能粒 子的数值模拟结果。由于事件开始时刻观测点的磁力 线并未很好地连接在激波波前,因此起初在该位置较 低能段高能粒子的通量没有抬升,而较高能段的高能 粒子由于横向的扩散,其通量仅有较小的抬升,在最 初的5h左右,>50 MeV的高能质子通量的数量级从 10<sup>-2</sup>上升为10<sup>-1</sup>。随着激波向外传播,该处的磁力线

25

30

35

40

20

时间/h

红色观测点位置处的 SEP 事件单向微分通量数值模拟结果

Fig. 8 The simulated unidirectional differential flux

at location of the red spot

10

10

10

图8

ō

5

10

15

在激波波前的连接点(COBPoint)向激波中间区域 移动,低能段的高能粒子通量也开始抬升,但是由于 激波在传播过程中逐渐减弱,对高能粒子的加速作用 也降低,因而高能段的高能粒子通量的抬升也不大, 从图10中可以看到,18 MeV的高能粒子单向微分通 量最高到了大约0.4 个/(cm<sup>2</sup> s sr MeV),而1.1 MeV 的高能粒子的单向微分通量最高则上升了到了接近 100 个/(cm<sup>2</sup> s sr MeV)。



(3) 盖已必须点也直见的 SEF 事件平内依分地重数值接续有为 Fig. 9 The simulated unidirectional integral flux at location of the blue spot



图 10 蓝色观测点位置处的 SEP 事件单向微分通量数值模拟结果 Fig. 10 The simulated unidirectional differential flux at location of the blue spot

图 11~12 是位于黄道面上 5°, 1.5 AU 处的 SEP 数值模拟结果。在事件初始时刻,此处磁力线在激波面上的连接点(COBPoint)靠近左侧,伴随连接点逐渐向激波中心区域移动,高能粒子的通量开始抬升,到达最高点后开始下降。随着连接点逐渐向激波

右侧边缘移动,激波的加速作用很快降低,在大约 25h后观测点处的高能粒子通量基本恢复到背景 水平。



Fig. 12 The simulated unidirectional differential flux at location of the yellow spot

## 3 结 论

本文利用 iPATH 模型对发生于 2014年04月18日 爆发的 CME 所驱动的激波引起的行星际空间太阳高 能粒子事件进行了数值模拟。数值模拟局限于2个天 文单位距离以内的二维黄道面内。本文在模拟中选取 了4个具有代表性的观察点,其中一个观察点是地球 所在位置。通过对比模拟结果和 GOES 卫星的观测结 果来确定合适的数值模拟参数,并以此为基础扩展到 了更遥远的深空。结果表明:黄道面内不同距离不同 角度的位置,在一次 SEP 事件中可以经历完全不同的 过程。 现阶段太阳高能粒子事件的数值模拟还较为粗 略,由于整个SEP事件的物理过程非常复杂,iPATH 模型做了必要的简化,所采用的方法和结果不但揭示 了深空环境中SEP的物理过程,而且也为深空环境的 高能粒子辐射分析提供了参考。深空探测计划必然需 要考虑项目实施过程中来自太阳高能粒子事件的影 响,本研究工作所获得的成果可以在这方面得到 应用。

#### 参考文献

- CANE H V, MCGUIRE R E, VONROSENVINGE T T. Two classes of solar energetic particle events associated with impulsive and longduration soft X-ray flares[J]. Astrophysical Journal, Part 1, 1986 (301):448-459.
- [2] CANE H V, ROSENVINGE VON T T, COHEN C M S, et al. Two components in major solar particle events[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(12):1-4.
- [3] TYLKAA, COHEN C, DIETRICH W F, et al. Shock geometry, seed populations, and the origin of variable elemental composition at high energies in large gradual solar particle events[J]. The Astrophysical Journal, 2005, 625(1):474-495.
- [4] LI G, ZANK G P. Mixed particle acceleration at CME-driven shocks and flares[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(2):1-4.
- [5] REAMES V D. The two sources of solar energetic particles[J]. Space Science Reviews, 2013, 175(1-4):53-92.
- [6] GOSLING J T. The solar flare myth[J]. Journal of Geophysical Research. 1993,98(A11):18937-18950.
- [7] AXFORD W I, LEER E, SKADRON G. The acceleration of cosmic rays by shock waves[C]//International Cosmic Ray Conference, 15<sup>th</sup>.
   Plovdiv, Bulgaria: ICRC, 1977.
- [8] KRYMSKII G. Regular mechanism of charged-particle acceleration on shock-wave front[J]. Doklady Akademii Nauk Sssr, 1977, 234 (6):1306-1308.
- [9] BLANDFORD R D, OSTRIKER J P. Particle acceleration by astrophysical shocks[J]. Astrophysical Journal, Part 2, 1978 (221): 29-32.
- [10] BELL A. Acceleration of cosmic-rays in shock fronts 1[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1978, 182(1): 147-156.
- BELL A. Acceleration of cosmic-rays in shock fronts 2[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1978, 182(2):443-455.
- [12] ZANK G P, LI G, FLORINSKI V, et al. Particle acceleration at perpendicular shock waves: model and observations[J]. Journal of Geophysical Research:Space Physics,2006,111(A6):1-16.
- [13] ZANK G P, LI G, VERKHOGLYADOVA O. Particle acceleration at inter-planetary shocks[J]. Space Science Reviews, 2007, 130 (1-4): 255-272.
- [14] LI G, ZANK G, RICE W. Energetic particle acceleration and

transport at coronal mass ejection-driven shocks[J]. Journal of Geophysical Research(Space Physics),2003,108(A2):1-22.

- [15] LI G, ZANK G, RICE W. Acceleration and transport of heavy ions at coronal mass ejection-driven shocks[J]. Journal of Geophysical Research:Space Physics, 2005, 110(A6): 1-14.
- [16] LI G,SHALCHI A, AO X Z, et al. Particle acceleration and transport at an oblique CME-driven shock[J]. Advances in Space Research, 2012,49(6):1067-1075.
- [17] RICE W K M, ZANK G, LI G. Particle acceleration and coronal mass ejection driven shocks: shocks of arbitrary strength[J]. Journal of Geophysical Research, 2003, 108(A10):1-14.
- [18] VERKHOGLYADOVA O P, LI G, AO X Z, et al. Radial dependence of peak proton and iron ion fluxes in solar energetic particle events: application of the path code[J]. The Astrophysical Journal, 2012, 757 (1):1-9.
- [19] VERKHOGLYADOVA O P, LI G, ZANK G P, et al. Modeling of radial dependence of Fe/O elemental abundance ratio in mixed SEP events with the PATH code[C]//SOLAR WIND 13: Proceedings of the Thirteenth International Solar Wind Conference. [S.I]: AIP, 2013.
- [20] VERKHOGLYADOVA O P, ZANK G P, LI G. A theoretical perspective on particle acceleration by interplanetary shocks and the Solar Energetic Particle problem[J]. Physics Reports, 2015 (557) : 1-23.
- [21] HU J,LI G,AO X, et al. Modeling particle acceleration and transport at a 2-D CME-driven shock[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 2017, 122(11):10938-10963.
- [22] HU J X, LI G, FU S, et al. Modeling a single SEP event from multiple vantage points using the iPATH model[J]. The Astrophysical Journal Letters, 2018, 854(2):1-5.
- [23] CLARKE D A. A consistent method of characteristics for multidimensional magnetohydro dynamics[J]. The Astrophysical Journal, 1996(457):291-320.
- [24] SHEELEY N R, WALTERS J H, WANG Y M, et al. Continuous tracking of coronal outflows: two kinds of coronal mass ejections[J]. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 1999, 104 (A11): 24739-24767.
- [25] DUDA R O, HART P E. Use of the hough transformation to detect lines and curves in pictures[J]. Communications of the ACM, 1972, 15(1):11-15.
- [26] XIE H, OFMAN L, LAWRENCE G. Cone model for halo CMEs: Application to space weather forecasting[J]. Journal of Geophysical Research:Space Physics, 2004, 109(A3): 1-13.

#### 作者简介:

**敖先志**(1978-),男,副研究员,主要研究方向:太阳高能粒子、 空间等离子。 通信地址:北京市海淀区中关村南二条1号(100190) 电话:(010)62586419 E-mail:xzao@nssc.ac.cn

# Modeling a Realistic "Gradual" SEP Event within 2 AU

AO Xianzhi<sup>1</sup>, LIU Siqing<sup>1,2</sup>, SHEN Hua<sup>1</sup>, WANG Jingjing<sup>1</sup>, HU Junxiang<sup>3</sup>, LI Gang<sup>3</sup>

(1. National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. Department of Space Sciences, University of Alabama in Huntsville, AL 35899, USA)

**Abstract:** Coronal Mass Ejection (CME) -driven shocks, as a primary source of Solar Energetic Particles (SEP), can evolve significantly while propagating away from the Sun. Their characteristics are crucial to understand the underlying particle acceleration mechanism, considered to be the Diffusive Shock Acceleration (DSA) process. Modeling the propagation of CME-driven shocks and the consequent DSA process is important to both space weather research and forecasting. By utilizing an improved particle acceleration and transport model, a realistic "gradual" SEP event that happened on April 18<sup>th</sup>, 2014 was modelled. Four locations in the ecliptic plane within 2 Astronomical Units (AU) from the Sun, including the location of the Earth, are examined with the model. Our results show that shock geometry plays a very important role in determining the energetic particle fluxes.

Key words: Solar energetic particles; particle acceleration; diffusive shock acceleration; space weather

#### High lights:

- Numerical simulation on solar energetic particle event is conducted, providing input for deep space radiation research.
- The effect of 2D shock geometry on SEP events is considered in the proposed model.
- Based on the calibrate model parameters according to near-Earth satellite observations, it can be expanded to the simulation of the solar energetic particle event in the deep space.

[责任编辑: 高莎, 英文审校: 朱恬]