

基于射电观测的日冕物质抛射驱动激波的统计特征研究

周坤论 丁留贯 王智伟 封莉

Statistical analysis of shock properties driven by coronal mass ejections based on observations of type II radio bursts

Zhou Kun-Lun Ding Liu-Guan Wang Zhi-Wei Feng Li

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 139601 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20190223

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190223>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

行星际日冕物质抛射引起福布斯下降的一维随机微分模拟

Interplanetary coronal mass ejection induced forrush decrease event: a simulation study with one-dimensional stochastic differential method

物理学报. 2017, 66(13): 139601 <https://doi.org/10.7498/aps.66.139601>

隔离段激波串流场特征的试验研究进展

Review of recent experimental studies of the shock train flow field in the isolator

物理学报. 2015, 64(19): 199401 <https://doi.org/10.7498/aps.64.199401>

激波汇聚效应对球形气泡演化影响的数值研究

Numerical simulation of convergence effect on shock-bubble interactions

物理学报. 2017, 66(6): 064701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.064701>

基于范阿伦卫星观测数据的等离子体层嘶声全球分布的统计分析

A statistical analysis of the global distribution of plasmaspheric hiss based on Van Allen Probes wave observations

物理学报. 2017, 66(3): 039401 <https://doi.org/10.7498/aps.66.039401>

激波与SF6球形气泡相互作用的数值研究

Numerical investigations on the interaction of shock waves with spherical SF6 bubbles

物理学报. 2015, 64(1): 015201 <https://doi.org/10.7498/aps.64.015201>

射电天文用太赫兹三通带频率选择表面设计

Design of triple bandpass frequency selective surface in terahertz wave band for radio astronomy

物理学报. 2015, 64(17): 174103 <https://doi.org/10.7498/aps.64.174103>

基于射电观测的日冕物质抛射驱动 激波的统计特征研究*

周坤论¹⁾ 丁留贯^{1)2)3)†} 王智伟¹⁾ 封莉³⁾

1) (南京信息工程大学空间天气研究所, 南京 210044)

2) (南京信息工程大学滨江学院, 南京 210044)

3) (中国科学院暗物质与空间天文重点实验室, 南京 210008)

(2019年2月20日收到; 2019年4月29日收到修改稿)

本文基于 Wind/WAVES 和 STEREO/SWAVES 等多卫星射电观测资料, 选择第 24 太阳活动周 2007 年 1 月至 2015 年 12 月期间 77 个 II 型射电暴样本事件, 拟合其激波速度, 分析了激波参数与日冕物质抛射 (CME)、耀斑和太阳高能粒子 (SEP) 等参数的相关关系及变化规律, 并探讨了射电增强对这些关系的影响. 研究结果显示: 1) 在 II 型射电暴十米百米 (DH) 波段范围起始时刻, 激波高度比 CME 前沿高度略高一点, 即激波脱体距离 (standoff distance) 约 0.4 Rs, 且这个高度随 CME 向外传播而增大. 在低日冕和高日冕, 激波脱体距离随 CME 速度的变化呈现明显相反的规律; 在低高度上, CME 速度快, 激波脱体距离大, 而在高高度上, CME 速度慢, 脱体距离大. 2) 射电增强伴随事件的 CME 速度明显大于无射电增强事件; 射电增强伴随事件的激波速度与 CME 质量、动能的相关性明显好于无射电增强伴随事件. 3) 有射电增强伴随的 II 型射电暴 DH 波段持续时间与 CME 速度、质量、动能之间无明显相关性, 而无射电增强事件的 DH 波段持续时间与这三个量之间呈正相关. 4) 产生 SEP 事件的激波速度明显大于未产生 SEP 事件的激波速度; 有射电增强伴随的 II 型射电暴 (激波) 事件产生 SEP 事件的比例略高于无射电增强事件 ($73.5\% > 67.4\%$), 但射电增强事件产生大 SEP 事件 (large SEP event) 的比例 (67.6%) 明显高于无射电增强事件 (37.2%). 进一步表明, II 型射电暴射电增强可作为其驱动源 (激波) 大概率产生大 SEP 事件的辨别信号之一.

关键词: II 型射电暴, 日冕物质抛射, 射电增强, 日冕激波

PACS: 96.60.ph, 96.25.Tg, 96.50.Pw, 02.70.Rr

DOI: 10.7498/aps.68.20190223

1 引言

日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 是太阳活动的重要形式, 能在短时间内将巨大的磁化等离子体和磁通量抛射到太阳风中, 是太阳大气中尺度最大的爆发现象. 典型的 CME 爆发期间所释放的能量约 10^{29} — 10^{32} 尔格, 伴随多个波段电磁

辐射增强, 同时会加速产生大量的太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP), 如质子、电子和重离子, 能对地球空间环境造成强烈的扰动和危害, 严重威胁航空航天安全.

在太阳爆发过程中当物质运动速度超过背景 Alfvén 速度时, 就会在运动物质前沿产生激波 (快模激波)^[1-4]. 此时, 在射电波段出现剧烈而且短促的流量增强的现象叫做太阳射电暴, 如 II 型射电

* 国家自然科学基金天文联合基金 (批准号: U1731105)、江苏省基础研究计划面上项目 (批准号: BK20171456)、江苏省青蓝工程项目和中国科学院暗物质与空间天文重点实验室开放基金资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dlg@nuist.edu.cn

暴,主要是由于激波加速的电子在局地等离子体频率处产生的辐射所引起的,是用来判断爆发活动是否产生激波的重要依据^[5,6]. II型射电暴与日冕激波之间不是充分必要关系. 通常认为, II型射电暴的发生表征着存在日冕激波,但是反之不一定,这是由于 II型射电暴的产生相对于日冕激波需要更苛刻的物理条件,比如需要大的压缩比和马赫数^[7].

研究表明,日冕激波常伴随米波 II型射电暴而行星际激波常伴随十米百米 (deca-hectometric, DH) 波 II型射电暴^[8,9]. 耀斑或其他源可以在低日冕驱动激波并加速电子^[10,11]. Reiner 等对 17 个富射电 (radio-rich) 事件进行分析研究表明,由 DH 波段 II型射电暴频率漂移计算的激波速度与 CME 速度呈正相关,而由米波 II型射电暴计算的激波速度与 CME 速度无明显相关^[12]. II型射电暴大部分产生于 CME 驱动激波的前沿,也有部分事件中 II型射电暴产生于 CME 激波的侧翼与冕流相互作用区域. Maia 等利用 Nancy 射电成像仪 (NRH) 观测分析表明,米波 II型射电暴的源靠近 CME 前沿,且射电源与 CME 具有相同的速度^[13]. 同时,他们也指出米波射电频移通常较弱,不易被射电频谱仪观测到. Bain 利用射电成像及频谱观测研究表明, II型射电暴源处于等离子体团热核的前沿,但结果显示激波速度大于等离子体团的抛射速度^[14]. Reiner 等发现, II型射电暴并不总是产生于激波顶部,也有可能是在激波扫过的高密度冕流区产生^[15]. Cho 等人的统计工作和 Feng 等人的事例分析都证实了这一点^[16-18]. 冕流除了影响 II型射电暴的产生,在激波传播过程中也能影响 II型射电暴在动态频谱中的形态^[18,19]. 由于射电源空间位置不同,由 II型射电频谱反演得到的激波表观速度与其驱动源 (如 CME) 的前沿速度会显示出较大差异^[17].

快速 CME 和慢速 CME 之间发生相互作用会导致 II型射电暴的射电增强现象^[20]. Gopalswamy 等人的研究都显示,在 CME 相互作用过程中, II型射电暴增强可作为富太阳高能粒子 (SEP-rich) 和贫太阳高能粒子 (SEP-poor) 的重要信号^[21]. Ding 等人的最新统计结果也进一步应验了 Gopalswamy 等人的结论. 最近, Al-Hamadani 等人对射电增强成因做了比较详细的观测研究,发现射电增强可分为 5 类,他们认为当 II型射电暴与 CME 高度相符时射电增强主要原因是 CME 与先前 CME 或其

残留物质发生相互作用,而 II型射电暴高度明显低于 CME 前沿高度情况下的射电增强则是由于 CME 与冕流相互作用形成的^[22].

激波是缓变型 SEP 事件产生的必要条件,研究高能粒子与激波或 CME 属性的关系则是 SEP 研究的关键问题之一. 太阳高能粒子事件的能量粒子峰值通量与 CME 的投影速度存在较强的正相关,但分布比较分散^[23]. 此研究中假设 CME 速度与激波速度相等,由于激波产生的位置不唯一,所以与 CME 速度比一定都相等. 是否产生 SEP 事件也不能仅依据 CME 速度. 例如, Shen 等人研究就表明,由于日冕环境差异,快速 CME 仅产生较弱的激波且没有产生 SEP 事件,伴随较弱持续时间短的 II型射电暴;而另一个慢速 CME 产生了较强的激波并且产生了 SEP 事件,伴随持续时间较长的较强 II型射电暴^[24]. 这也显示,相比 CME 速度而言, II型射电暴特性可更好地用来判断 SEP 事件的产生与否. Gopalswamy 等人的统计结果显示绝大部分伴随跨越米波-百米波的 II型射电暴与 SEP 事件相关,而少部分无 SEP 事件伴随的事件可能和源区与地球磁联接不好有关^[25]. Winter 等人研究也表明所有峰值大于 15 pfu 的大 SEP 事件全部伴随 DH II型射电暴^[26]. 此外,有研究表明,存在少数较小的 SEP 事件观测不到明显的 II型射电暴伴随^[27]. 由于源区位置的原因,多卫星多经度联合 SEP 观测和射电观测可在一定程度上降低由于磁联接不好而造成的事件遗漏情况.

本文主要对 2007 年至 2015 年期间的 77 个 DH II型射电暴的频谱结构进行拟合,结合 II型射电暴增强,分析激波与 CME、SEP 等相关参数的关联,从而探索 II型射电暴及射电增强信号在研究激波加速高能粒子过程中的作用.

2 数据处理

2.1 数据源

本文基于 CDAW 数据库 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html) Wind/WAVES DH II型射电暴列表,根据 II型射电暴频谱强度及持续时间,结合 Wind/WAVES 和 STEREO/SWAVES 频谱观测图像,根据可清晰辨别出 II型射电暴频谱形态结构为标准筛选出第 24 太阳活动周以来 (2007 年至 2015 年) 的

81个 DH II型射电暴候选事件. 事件对应 CME 速度、质量、动能、耀斑等级等相关参数均取自 CDAW数据库.

本文中太阳高能粒子数据主要采用 25—60MeV 的高能质子数据, 数据来源于 SOHO/COSTEP EPHIN^[28] 和 STEREO-A(B)/HET^[29]. 在处理 SEP 事件强度时, 我们采用文献 [21] 和文献 [30] 中的方法进行处理, 修正后的 SOHO EPHIN 通量峰值与 STEREO-A(B)HET 通量峰值中取最大值作为 SEP 事件的强度, 并选择 $0.0114(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{MeV})^{-1}$ 作为 SEP 事件的判断标准.

2.2 II 型射电暴处理方法

根据 II 型射电暴频谱结构, 基于不同日冕密度模型, 对所有 II 型射电暴进行拟合, 反演得到 II 型射电暴对应驱动源激波的速度. 本文主要采用文献 [31] Vršnak 和文献 [32] SPM 两种密度模型进行拟合. 如基频和谐频同时出现, 选取基频作为拟合对象. 根据 II 型射电暴的起始时间和太阳爆

发时间, 确定与射电暴发对应的 CME 及耀斑. 通过选择不同密度模型和不同密度倍数, 确定与 CME 速度最为匹配的激波速度 [33–35].

图 1 为典型的 II 型射电暴事例. 图 1(a)、(c) 分别为 2013 年 10 月 25 日和 2014 年 08 月 28 日观测到的 II 型射电暴频谱, 基于 Vršnak 密度模型和 SPM 密度模型及频率与日冕密度关系, 分别对事例中的频谱漂移进行拟合, 假定在拟合高度内激波速度为常数 (即线性拟合), 图中白色虚线为最佳拟合结果. 图 1(b)、(d) 为基于密度模型假设拟合得到的激波高度-时间变化曲线, 红色点为与激波对应的 CME 前沿高度-时间数据, 黑色实线为其线性拟合. 图 1(b) 中绿色实线为选取 2 倍 Vršnak 密度模型拟合的结果, 图 1(d) 中蓝色实线为选取 2 倍 SPM 密度模型拟合的结果, 可以看出此时拟合的激波速度和其对应 CME 速度符合较好. 而这两个事例采用另外一种密度模型则得不到较合理的结果, 即激波高度时间曲线和 CME 高度时间曲线有交叉, 或激波高度远小于 CME 高度. 对于正

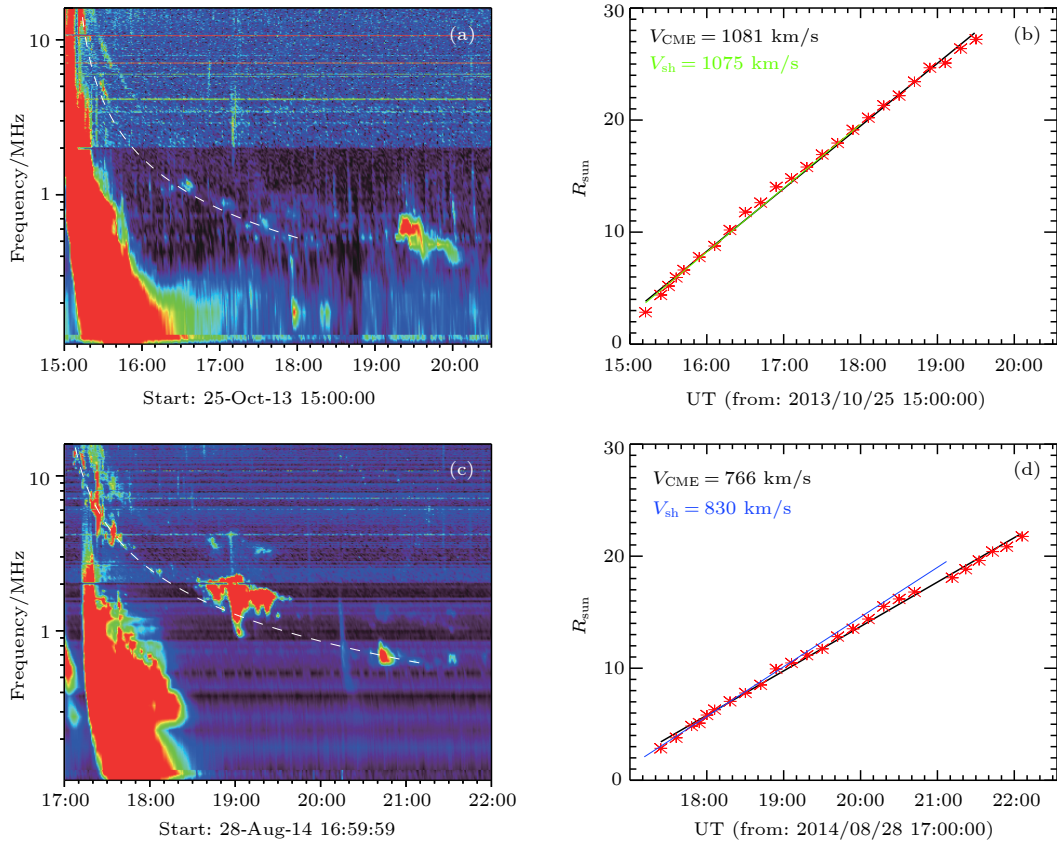


图 1 典型 II 型射电暴频谱图及所采用不同密度模型拟合激波高度-时间变化图

Fig. 1. Spectrum diagram of a typical type-II radio burst and the linear fitting results of spectrum with different coronal density model.

常产生于激波前端的 II 型射电暴而言, 考虑到频率宽度和拟合误差等因素, 激波高度应该和 CME 前沿高度差不多或略高一点较为合理. 对于少部分产生于激波侧翼的 II 型射电暴而言, 拟合的激波高度则整体比 CME 前沿高度低; 在利用不同密度模型拟合时, 得不到与 CME 速度和高度符合的拟合结果或只能得到较低的激波径向拟合速度. 对于这部分事例另外分析, 本文不做讨论.

在判别 II 型射电暴有无射电增强方面, 我们参照文献 [20] 和文献 [21] 的射电增强事例, 采用人工识别方法判断 II 型射电暴有无明显射电增强, 并结合在此增强时间内有无相邻 CME 相互作用进行甄别. 如图 1(c) 中显示 II 型射电暴在持续时间内射电暴频谱有明显增强现象.

2.3 事件筛选

如一个 II 型射电暴在 Wind/WAVES 和 STEREO/SWAVES 同时被观测到, 我们选取拟合速度与 CME 速度最接近的那一个作为此事例的激波速度. 所有 81 个候选事件的拟合激波速度与相应 CME 速度的关系如图 2. 图 2(a) 为所有候选事件拟合激波速度与 CME 速度之间的关系. 从所有事件的分布来看, 有 4 个事件的拟合速度明显低于 CME 速度 (异常事件), 而绝大部分事件的拟

合速度基本等于或大于 CME 速度 (正常事件). 我们对速度符合较好的事件进行线性拟合, 相关系数为 0.99, 线性拟合 (蓝色实线) 斜率为 0.99, 整体略高于 1:1 线 (黑色虚线), 符合激波速度接近 CME 速度而激波前沿高度略高于 CME 前沿速度的事实. 如考虑 4 个异常事件, 则相关系数降为 0.93, 线性拟合线与 1:1 线交叉. 图 2(b) 为 II 型射电暴持续时间内拟合激波速度与 CME 速度差的分布图, 4 个异常事件和正常事件均值分别为 -662.75 km/s 和 47.7 km/s , 表明本研究中正常事件的激波速度平均比 CME 速度快约 48 km/s .

一般而言, II 型射电暴的起始频率平均为 99 MHz, 起始高度平均在 $1.8 R_s$ 左右 (以起始时刻 CME 高度计算)^[25]. Mittal 等对 DH II 型射电暴的起始频率统计, 其中 85% 的事件起始频率处于 1—14 MHz 之间, 平均约为 11 MHz, 起始高度 $2.2—4.5 R_s$ ^[36]. 本文所选研究对象为 DH 波段的 II 型射电暴, 起始频率最高只能识别到 16 MHz, 对于部分起始于米波波段的射电暴可能存在起始时刻偏晚或起始频率偏低的情况. 参考 Mittal 等的统计结果, 这部分事例最多占 15% 左右, 对本文的统计分析不会产生很大的影响. 本文中选择 II 型射电暴在 DH 波段的开始时刻作为该射电暴的起始时刻.

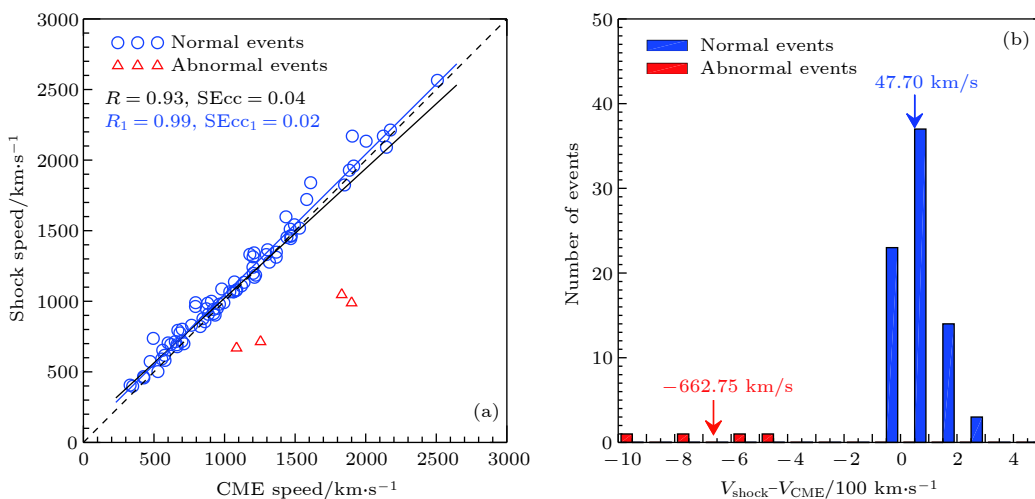


图 2 (a) 81 个候选事件拟合激波速度与 CME 速度之间的关系. 蓝色圈代表激波速度与 CME 速度相符事件, 红色三角代表拟合激波速度远小于 CME 速度事件, 黑色实线是所有事件的线性拟合, 蓝色实线是所有相符事件的线性拟合; (b) 拟合激波速度与 CME 速度之差的统计直方图

Fig. 2. (a) Scatter plot of fitting shock speed and CME speed for all 81 candidate events. The blue circle represents the shock speed coincides with the CME speed event, the red triangle represents the events that the fitting shock speed is much smaller than the CME speed, the black solid line is the linear fit of all events, and the blue solid line is the linear fit of all 77 coincident or normal events. (b) Distribution of the speed difference between shock speed and CME speed.

图 3(a) 为所有事件 II 型射电暴起始时刻激波高度随 CME 高度变化关系, 相关系数为 0.81. 蓝色圈是正常事件, 红色三角圈是异常事件. 若只考虑正常事件, 相关系数为 0.92. 从线性拟合来看, 拟合线非常接近于 1:1 线, 表明激波高度与 CME 高度相当, 这一结果与文献 [21] 的研究结果一致. 由图 3(b) 可以看出, 正常事件中激波平均起始高度略高于 CME 高度 (0.43 Rs), 此结论符合 CME 鼻区前沿驱动激波的物理图像, 此高度差即为激波脱体距离 (standoff distance). 而异常事件的平均高度差为 -3.5 Rs, 也就是说激波产生 II 型射电暴

的高度低于 CME 前沿高度, 这种情况通常在激波与冕流相互作用时发生 [16-17]. 结合拟合激波速度和起始高度与 CME 速度和高度的差异, 我们后面的分析中暂不考虑异常事件.

根据以上方法我们选取了共 77 个拟合激波速度、起始高度与 CME 相符的事例作为以下统计研究的样本事件. 其中, 伴随射电增强的事件有 34 个, 无射电增强的事件有 43 个; 产生 SEP 事件的有 54 个, 无 SEP 事件伴随的有 23 个. 下面我们主要基于这些样本事例分析射电增强与否对激波属性与 CME 的关联、激波加速 SEP 等的影响.

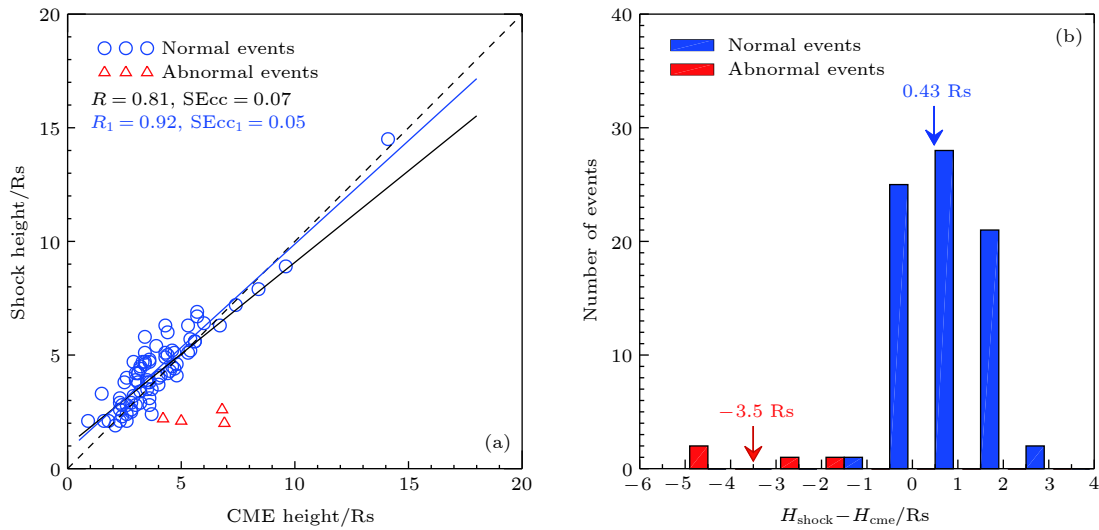


图 3 所有候选事件 DH II 型射电暴起始时刻激波高度与 CME 高度之间的关系. (a) 蓝色圈是正常事件, 红色三角是异常事件, 黑色实线是所有事件的拟合线, 蓝色实线是正常事件起始高度的拟合线, 黑色虚线斜率为 1. (b) DH II 型射电暴起始时刻激波高度与 CME 高度差的直方图, 蓝色条为正常事件, 红色条为异常事件

Fig. 3. Scatter plot of shock height and CME height at the onset of type II radio burst for all 81 candidate events. (a) The blue circle is a normal event, the red triangle is an abnormal event, the black solid line is the fitted line for all events, the blue solid line is the fitted line for the normal event start height, and the black dotted line slope is 1. (b) histogram of the difference between the shock height and the CME height at the start of the type II radio burst. The blue bar is a normal event and the red bar is an abnormal event.

3 统计结果

3.1 激波速度与 CME 参数的关系

图 4(a) 显示激波速度和 CME 速度的关联, 可以看到射电增强与否对于这两者之间的相关性无明显的影响. 射电增强与无射电增强事例的激波-CME 速度相关系数分别为 0.993 和 0.986, 相关性非常高, 且拟合直线的斜率分别为 0.95 和 1.04. 这个关系说明 CME 驱动激波主要是由于 CME 速度和周围等离子体的 Alfvén 波速度确定的, 且激波速

度基本与 CME 速度基本相当; 而射电增强表明激波强度增加, 这与周围等离子体环境有关, 产生射电辐射的源增强, 不影响激波的速度. 图 4(b) 显示了射电增强事件与无射电增强事件的 CME 速度差异. 射电增强事件的 CME 平均速度为 1316.47 km/s, 而无射电增强事件的 CME 平均速度为 919.02 km/s, 两者表现出明显的差异. 结果表明, 在有 II 型射电暴产生的 CME 中, 有射电增强的 CME 速度通常大于无射电增强的 CME, 或速度快的 CME 更容易产生 II 型射电暴增强, 这与文献 [21] 的研究结果一致.

图 5 显示了 DH II 型射电暴起始时刻激波高度和 CME 前沿高度的分布. 可以看到开始产生 II 型射电暴的高度主要分布在 10 Rs 以下. 有射电增强事件的激波起始高度平均为 5.09 Rs, 而无射电增强事件的激波起始高度平均为 3.81 Rs. DH II 型射电暴起始时刻, 有射电增强的 CME 前沿高度均值为 4.41 Rs, 而无射电增强为 3.58 Rs, 与 Mittal 等的统计结果 2.2—4.5 Rs 相符 [36]. CME 高度低于激波高度, 符合 CME 驱动激波在鼻区产生 II 型射电辐射的图像. 结果显示, 有无射电增强

情况加, 激波起始高度存在表达差异, 射电增强事件的激波起始高度通常大于无射电增强事件.

激波面至 CME 前沿之间的区域为鞘层, 它们之间的距离称之为激波脱体距离 [33], 如图 3 中的 $H_{\text{shock}} - H_{\text{CME}}$ 可用来表示这个距离. 为了进一步研究激波脱体距离随 CME 高度变化关系, 我们选取了五个 CME 高度 3.5 Rs、4.0 Rs、5.0 Rs、10 Rs、15 Rs, 分析这几个高度上激波脱体距离的变化规律. 其中, 激波高度和 CME 高度均根据高度时间拟合线计算得到. 图 6(a) 显示了不同速度区间内

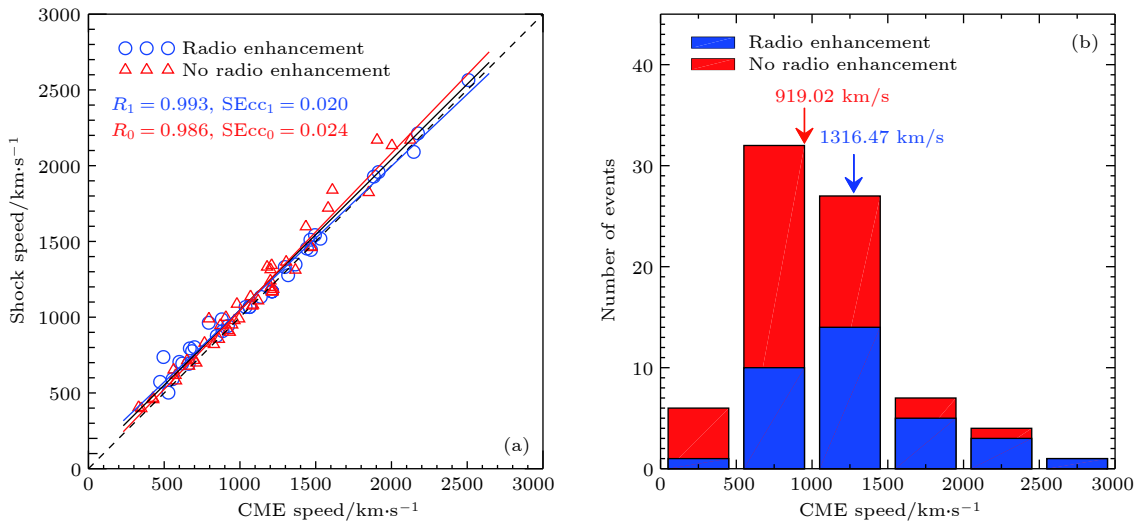


图 4 有无射电增强对激波速度与 CME 速度关系的影响

Fig. 4. Difference between groups of radio enhancement and of no radio enhancement on shock speed and CME speed for normal events.

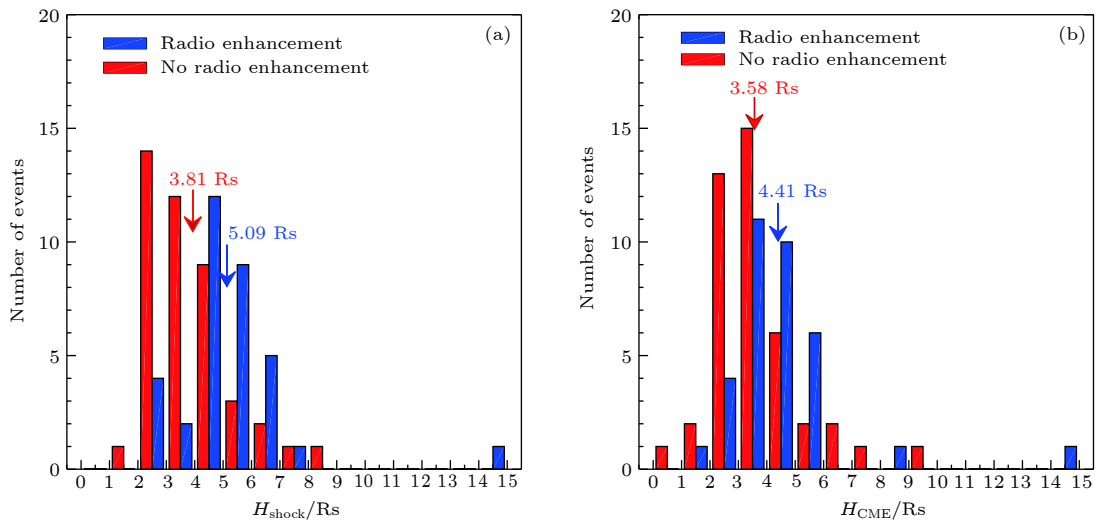


图 5 DH II 型射电暴起始时刻 (a) 激波高度和 (b) CME 前沿高度的统计直方图. 蓝色为有射电增强的事件, 红色为无射电增强的事件

Fig. 5. Statistical histogram of the shock height and the CME leading edge height at the start time of DH type II radio bursts for normal events. Blue is an event with radio enhancement, and red is an event with no radio enhancement.

平均脱体距离的分布. 结果显示, 在每个 CME 速度区间内, 激波脱体距离基本随 CME 高度变大而变大. 但激波脱体距离随 CME 速度变化关系则在低高度和高高度上出现截然相反的变化规律, 在较小的 CME 高度上 (如 3.5 Rs、4 Rs、5 Rs), CME 速度越大, 脱体距离越大; 而当 CME 到达较大高度时 (如 10 Rs、15 Rs), 速度较慢的 CME 对应的激波脱体距离反而越小, 这与 Mujiber Rahman 等对行星际 1 AU 处的激波脱体距离的研究结果一致^[37]. 当然, 激波脱体距离不仅跟 CME 的速度有

关, 还跟激波的压缩比、马赫数、等离子体比热等有关. 图 6(b) 显示了不同 CME 高度上激波脱体距离的变化. 可以看出, 随着 CME 高度越高, 激波脱体距离越大, 当到达行星际 1 AU 附近时, 这个平均距离可达到 29 Rs 左右^[37].

图 7(a) 为 DH II 型射电暴对应激波速度与 CME 质量的相关关系. 激波速度和 CME 质量呈正相关, 相关系数为 0.65; 其中对于射电增强事件, 相关系数明显高于无射电增强事件 ($0.74 > 0.51$). 图 7(b) 为 DH II 型射电暴对应激波速度与 CME

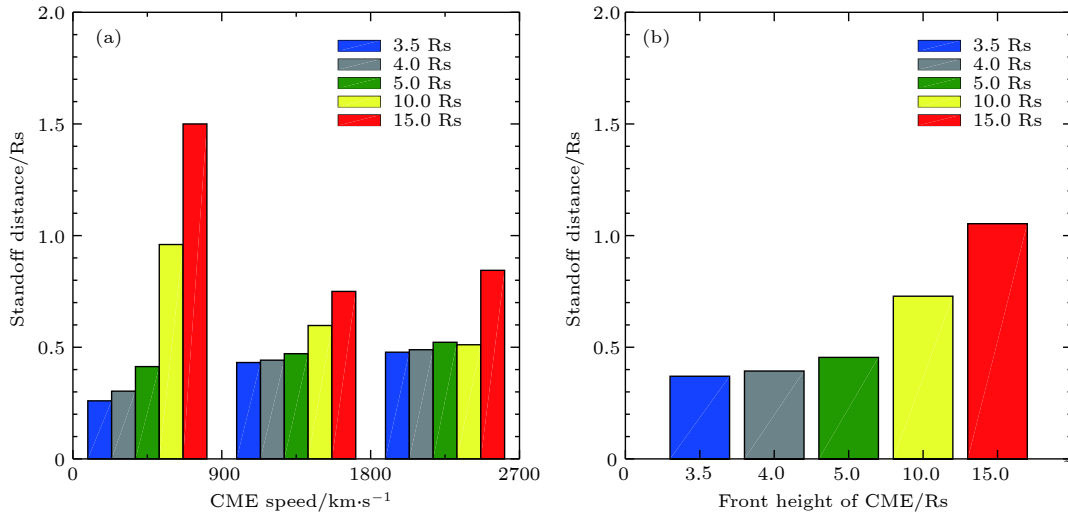


图 6 激波脱体距离随 CME 高度变化统计图

Fig. 6. The histogram of the standoff distances as a function of CME heights.

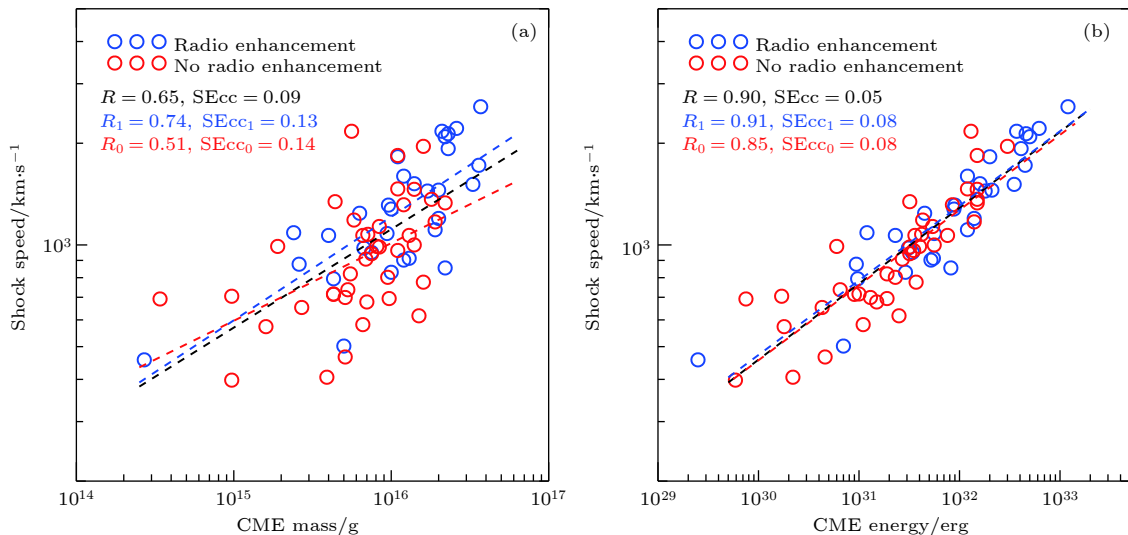


图 7 (a) 激波速度与 CME 质量的相关性, (b) 激波速度与 CME 动能的关系. 蓝色圈为有射电增强的事件, 红色圈为无射电增强的事件, 黑色虚线为所有事件的拟合线, 蓝色虚线为有射电增强事件的线性拟合, 红色虚线为无射电增强事件的线性拟合

Fig. 7. Scatter plot of shock speed and CME mass, kinetic energy for normal events. The blue circle is an event with enhanced radio enhancement, the red circle is an event with no radio enhancement, the black dotted line is the fitted line for all events, the blue dashed line is a linear fit result for radio-enhanced events, and the red dashed line is a linear fit result for no radio-enhanced events.

动能的相关关系. 激波速度与 CME 动能之间存在很强的正相关, 相关系数达到 0.9. 对于有射电增强的事件, 其相关系数略高于无射电增强的事件 ($0.91 > 0.85$). 从统计结果可以看出, 激波速度与 CME 质量、动能之间都存在明显的正相关关系, 但与动能的相关性明显高于质量. 也就是说, CME 质量和动能两者中, CME 动能更能决定其驱动激波的速度. 总体而言, CME 质量越大、动能越大就越容易产生速度快的日冕激波. 此外, 有射电增强事件中的激波速度与 CME 质量、动能的相关性都明显高于无射电增强的事件.

图 8 显示了激波速度与耀斑等级的相关性. 所有事件激波速度和耀斑等级的相关系数为 0.47, 有射电增强的为 0.49, 无射电增强的为 0.32. 可以看出, 激波速度与对应 CME 爆发伴随耀斑的等级之间呈现弱相关, 明显低于与 CME 速度、质量、动能的相关性. 这也从另一个方面显示了本文所分析 II 型射电暴对应的激波都是由 CME 驱动的.

3.2 DH II 型射电暴持续时间分析

图 9 显示了 II 型射电暴在 DH 波段内的持续时间与 CME 速度、质量、能量的关系, 其中持续时间是指在 DH 波段内 II 型射电暴从开始到最后结束的时间间隔. 需要说明的是, 如果 II 型射电暴开始于米波波段, 则本文中持续时间将比 II 型射电暴的实际持续时间要短一些. 从图 9 中可以看出, 射电暴持续时间与 CME 的三个参数之间无明显

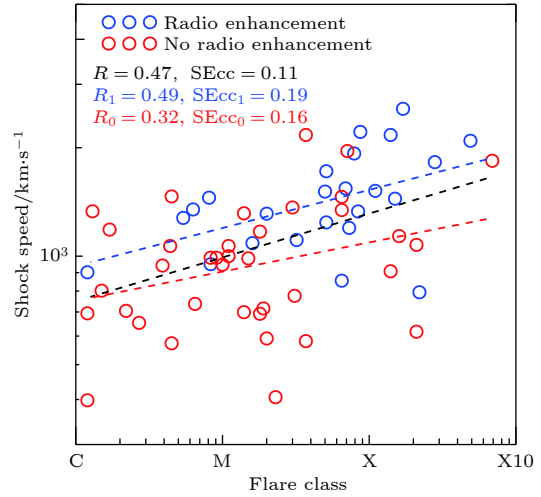


图 8 激波速度与耀斑等级的相关性, 蓝色圈为有射电增强的事件, 红色圈为无射电增强的事件, 黑色虚线为所有事件的线性拟合, 蓝色虚线为有射电增强事件的线性拟合, 红色虚线为无射电增强的线性拟合.

Fig. 8. Scatter plot between shock speed and flare class for normal events, blue circle for radio-enhanced events, red circle for no radio-enhanced events, black dashed line for linear fitting of all events, and blue dashed line is a linear fit for radio-enhanced events, the red dashed line is a linear fit for no radio enhancement events.

的相关性, 相关系数仅为 0.41、0.39、0.33. 这与 Mittal 等的统计结果类似 [36], 但若按有无射电增强对事件进行分类, 则相关关系呈现明显的差异. 有射电增强的事件 II 型射电暴持续时间与 CME 速度、质量、能量呈弱的负相关或无明显相关, 而无射电增强的事件的 II 型射电暴持续时间与 CME 速度、质量、能量之间呈现正相关, 相关系数分别为 0.50、

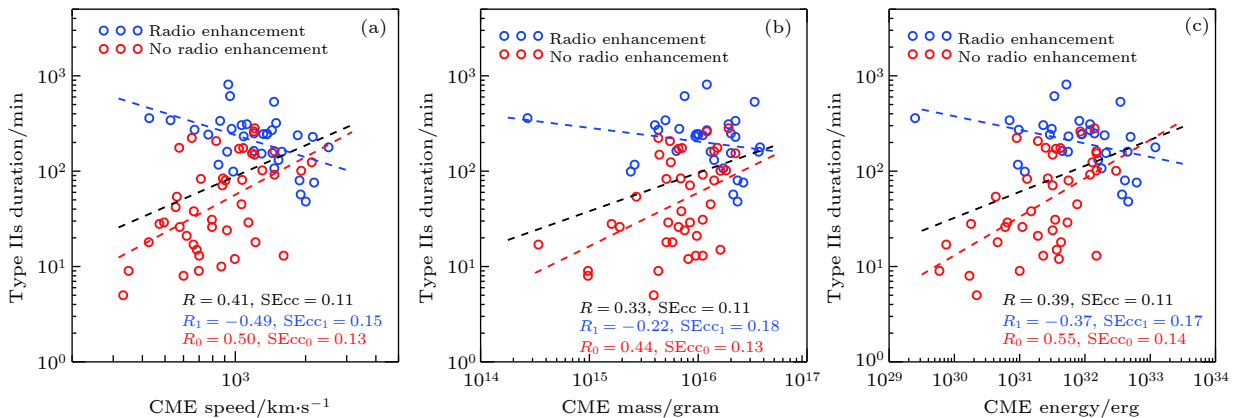


图 9 DH II 型射电暴持续时间与 CME 速度 (a)、质量 (b) 和动能 (c) 的相关性, 蓝色圈为有射电增强的事件, 红色圈为无射电增强的事件. 黑色虚线为所有事件的线性拟合, 蓝色虚线为有射电增强事件的线性拟合, 红色虚线为无射电增强的线性拟合

Fig. 9. Scatter plot of DH type II radio burst duration and CME speed(a), CME mass(b) and CME kinetic energy(c) for normal events. The blue circle is an event with radio enhancement, and the red circle is an event with no radio enhancement. The black dashed line is a linear fit for all events, the blue dashed line is a linear fit for radio-enhanced events, and the red dashed line is a linear fit for no radio-enhancement events.

0.44 和 0.55. 一般而言, CME 速度越快、质量越大、动能越大, 其驱动激波所激发的 II 型射电暴的持续时间也就越长, 正如图中无射电增强事件显示的关系. 而若存在射电增强, 则由射电增强的机理可知在 CME 传播的过程中存在与其他 CME 相互作用的可能^[21]. 由于与其他 CME 的相互作用, 从而改变了射电持续时间与 CME 速度、质量、动能的关系, 变得无明显相关.

3.3 太阳高能粒子分析

为验证射电增强是否与 SEP 事件有关, 我们对有无射电增强情况下 SEP 事件的伴随情况进行了统计, 如图 10. 图 10(a) 为 34 个有射电增强的事件, 其中大 SEP 事件占 67.60%, 小 SEP 事件占 5.90%, 无 SEP 事件伴随的占 26.50%. 图 10(b) 为 43 个无射电增强的事件, 其中大 SEP 事件占 37.20%, 小 SEP 事件占 30.2%, 无 SEP 事件占 32.6%. 统计结果显示, 不管是有射电增强还是无射电增强, 有 II 型射电暴的伴随的 CME 产生 SEP 事件的比例都达到 60% 以上. 这可以理解为, II 型射电暴的

发生反映有激波产生, CME 一旦驱动形成激波就很容易加速粒子产生 SEP 事件. 单从产生 SEP 的角度看, 有射电增强和无射电增强无明显差别. 但是, 如果看大 SEP 时间的产生比例, 则有射电增强的事件中产生大 SEP 事件的比例约为无射电增强事件的两倍. 这一结果表明, 有射电增强的 II 型射电暴事件更容易有大 SEP 事件伴随, 其驱动的激波更容易加速产生大的 SEP 事件, 这一结论与文献 [13] 的一致. 这可以理解为, 伴随射电增强的事件其驱动的激波更强, 且射电增强经常在与其它 CME(如先行 CME) 相互作用时产生, 具有更多的种子粒子, 自然也就更容易加速产生大 SEP 事件.

图 11(a) 为 SEP 事件通量峰值与激波速度的相关关系, 两者呈现正相关. 所有事件、有射电增强事件的相关系数分别为 0.65、0.68、0.47. 图 11(b) 为有无 SEP 事件的激波速度分布情况, 产生 SEP 事件的激波平均速度 (1234.13 km/s) 明显大于未产生 SEP 事件的激波速度 (926.43 km/s). 这一结论表明, 有 II 型射电暴伴随的 CME 爆发, 其驱动的激波速度越快, 就越容易产生 SEP 事件.

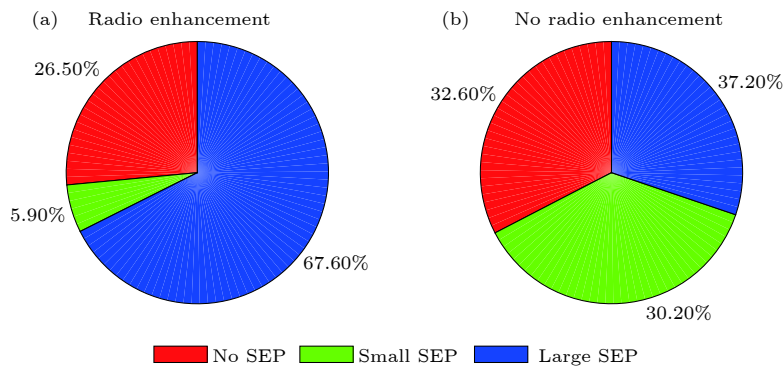


图 10 (a) 有射电增强和 (b) 无射电增强的事件中大 SEP、小 SEP 和无 SEP 事件所占百分比. 蓝、绿、红分别代表大 SEP、小 SEP 和无 SEP 事件

Fig. 10. Percentage of large SEP, small SEP, and no SEP events with(a) or without(b) radio-enhancement for normal events. Blue, green, and red respectively represent large SEP, small SEP, and no SEP events.

4 结果与讨论

本文结合多卫星观测资料, 主要分析了第 24 太阳活动周 2007 年 1 月至 2015 年 12 月能在射电频谱观测上清晰识别出 II 型射电暴的 77 个事件. 采用 Vršnak 和 SPM 密度模型对 II 型射电暴进行拟合, 计算其对应激波速度. 通过分析激波参数与 CME、SEP 参数的相关关系, 探讨射电增

强对他们的影响. 主要得到以下结论:

1) 由 DH 波段 II 型射电暴计算的激波速度与 CME 速度强相关, 此结果与 Reiner 等的一致^[12], 但相关系数更高. 激波速度比 CME 速度略快. 在 II 型射电暴起始时刻, 激波高度比 CME 前沿高度略高一点, 此时激波脱体距离约 0.4 Rs. 激波脱体距离在低日冕和高日冕、行星际呈现截然相反的规律: 在低高度范围, 激波脱体距离基本随 CME 速度增加而增大; 而当 CME 传播到较高范围时, 激

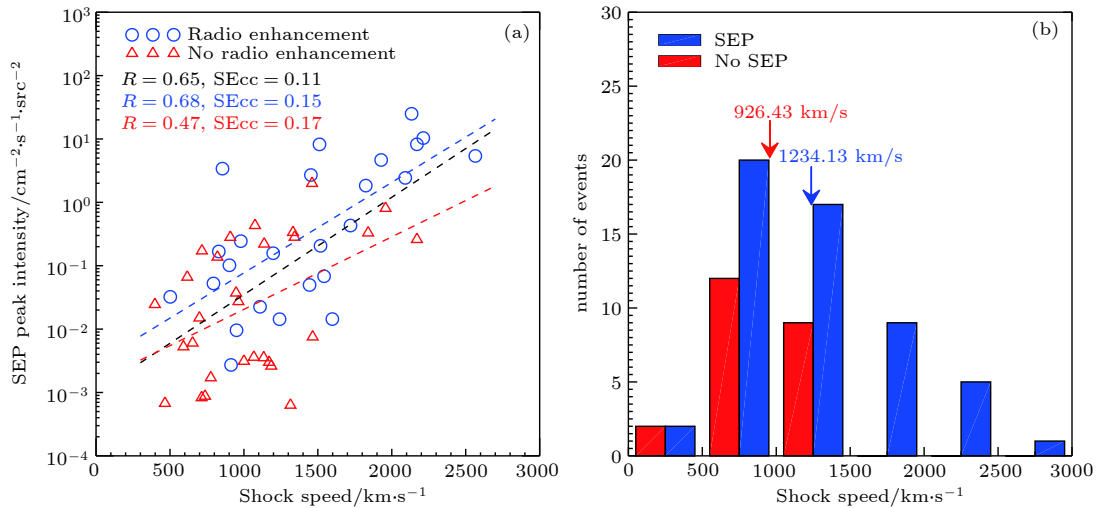


图 11 (a) SEP 事件峰值与激波速度的相关关系, 黑色虚线为所有事件的线性拟合, 蓝色虚线为有射电增强事件的线性拟合, 红色虚线为无射电增强的线性拟合. (b) 有无 SEP 事件的激波速度的统计直方图

Fig. 11. (a) Scatter plot between SEP event peak and shock speed for normal events. black dashed line is a linear fit for all events, blue dashed line is a linear fit for radio enhanced events, and red dashed line is a linear fit for no radio enhancement. (b) Statistical histogram of shock speed associated with or without SEP events for normal events.

波脱体距离反而是在 CME 速度越较慢时较大, 此结论与 Mujiber Rahman 等人 1 AU 附近的研究规律一致. 此外, 结果显示激波脱体距离随 CME 高度增加而增加.

2) 射电增强事件对应激波的速度和起始高度明显高于无射电增强事件; 射电增强事件的激波速度与 CME 质量、动能的相关关系明显好于无射电增强伴随的事件.

3) 相比射电增强事件, 无射电增强事件的 II 射电暴持续时间与 CME 速度、质量、动能之间呈现正相关. 这可能与射电增强因素 (如 CME 相互作用等) 的干扰有关.

4) 统计结果显示 II 型射电暴事件产生 SEP 事件的比例达到 60% 以上; 其中, 射电增强伴随的 II 型射电暴 (激波) 事件更容易产生大 SEP 事件. 表明, 射电增强信号反映出实例中的激波更强, 其加速粒子的能力更强, 与其相互作用的 CME 可提供更多的种子粒子, 自然粒子加速效率更高, 更容易产生大 SEP 事件. 这与文献 [21] 的结论一致. 结论表明, II 型射电暴的射电增强可作为其驱动源激波大概率产生大 SEP 事件的一个信号.

感谢 CDAW 数据库 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html) 提供了 DH II 型射电暴、CME 和耀斑的相关数据, <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html> 网站提供了 Wind/WAVES、

STEREO/SWAVES 频谱观测图像和 STEREO/HET 仪器数据, <http://www.ieap.uni-kiel.de/et/ag-heber/costep/data.php> 网站提供了 SOHO/EPHIN 仪器数据.

参考文献

- [1] Stewart R T, McCabe M K, Koomen M J, Hansen R T, Dulk G A 1974 *Sol. Phys.* **36** 203
- [2] Vršnak B, Lulić S 2000 *Sol. Phys.* **196** 181
- [3] Vršnak B, Cliver E W 2008 *Sol. Phys.* **253** 215
- [4] Hundhausen A J, Holzer T E, Low B C 2012 *J. Geophys. Res.-Space.* **92** 11173
- [5] Kahler S W 1982 *Astrophys. J.* **261** 710
- [6] Cane H V, Erickson W C, Prestage N P 2002 *J. Geophys. Res.-Space.* **107** 1315
- [7] Su W, Cheng X, Ding M D, Chen P F, Ning Z J, Ji H S 2016 *Astrophys. J.* **830** 70
- [8] Wild J P, McCready L L 1950 *Aust. J. Chem.* **3** 387
- [9] Cane H V, Stone R G, Fainberg J 1981 *Geophys. Res. Lett.* **8** 1285
- [10] Gopalswamy N, Kaiser M L, Lepping R P, Kahler S W, Ogilvie K, Berdichevsky D, Kondo T, Isobe T, Akioka M 1998 *J. Geophys. Res.-Space.* **103** 307
- [11] Kahler S W 2007 *Space. Sci. Rev.* **129** 359
- [12] Reiner M J, Kaiser M L, Bougeret J L 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 12
- [13] Maia D, Pick M, Vourlidas A, Howard R A 2000 *Astrophys. J.* **528** 49
- [14] Bain H M, Krucker Säm, Glesener L, Lin R P 2012 *Astrophys. J.* **750** 44
- [15] Reiner M J, Vourlidas A, Cyr O C S, Burkepile J T, Howard R A, Kaiser M L, Prestage N P, Bougeret J L 2003 *Astrophys. J.* **590** 533
- [16] Cho K S, Lee J, Moon Y J, Dryer M, Bong S C, Kim Y H, Park Y D 2007 *Astron. Astrophys.* **461** 1121
- [17] Cho K S, Bong S C, Kim Y H, Moon Y J, Dryer M,

- Shanmugaraju A, Lee J, Park Y D 2008 *Astron. Astrophys.* **491** 873
- [18] Feng S W, Chen Y, Kong X L, Li G, Song H Q, Feng X S, Ying Liu 2012 *Astrophys. J.* **753** 21
- [19] Kong X L, Chen Y, Li G, Feng S W, Song H Q, Guo F, Jiao F R 2012 *Astrophys. J.* **750** 158
- [20] Gopalswamy N, Yashiro S, Kaiser M L, Howard R A, Bougeret J L 2001 *Astrophys. J.* **548** 91
- [21] Ding L G, Wang Z W, Feng L, Li G, Jiang Y 2019 *Res. Astron. Astrophys.* **19** 1
- [22] Al-Hamadani F, Pohjolainen S, Valtonen E 2017 *Sol. Phys.* **292** 127
- [23] Kahler S W 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 10
- [24] Shen C L, Wang Y M, Ye P Z, Zhao X P, Gui B, Wang S 2007 *Astrophys. J.* **670** 849
- [25] Gopalswamy N, Aguilar-Rodriguez E, Yashiro S, Nunes S, Kaiser M L, Howard R A 2005 *J. Geophys. Res.* **110** 12
- [26] Winter L M, Ledbetter K 2015 *Astrophys. J.* **809** 105
- [27] Marque C, Posner A, Klein K L 2006 *Astrophys. J.* **642** 1222
- [28] Müller-Mellin R, Kunow H, Fleißner V, Pehlke E, Rode E, Röschmann N, Scharmberg C, Sierks H, Rusznayak P, Mckenna-Lawlor S, Elendt I, Sequeiros J, Meziat D, Sanchez S, Medina J, Peral L D, Witte M, Marsden R, Henrion J 1995 *Sol. Phys.* **162** 483
- [29] Von Roseninge T T, Reames D V, Baker R, Hawk J, Nolan J T, Ryan L, Shuman S, Wortman K A, Mewaldt R A, Cummings A C, Cook W R, Labrador A W, Leske R A, Wiedenbeck M E 2008 *Space. Sci. Rev.* **136** 391
- [30] Wang Z W, Ding L G, Zhou K L, Yue G M 2018 *Chin. J. Geophys.* **61** 3515 (in Chinese) [王智伟, 丁留贯, 周坤论, 乐贵明 2018 *地球物理学报* **61** 3515]
- [31] Vršnak B, Magdalenic J, Zlobec P 2004 *Astron. Astrophys.* **413** 753
- [32] Saito K, Poland A I, Munro R H 1977 *Sol. Phys.* **55** 121
- [33] Gopalswamy N, Yashiro S 2011 *Astrophys. J.* **736** 17
- [34] Mäkelä P, Gopalswamy N, Akiyama S, Xie H, Yashiro S, Recently M 2015 *Astrophys. J.* **806** 13
- [35] Kocharov L, Pohjolainen S, Mishev A, Reiner M J, Lee J, Laitinen T, Didkovsky L V, Pizzo V J, Kim R, Klassen A, Karlicky M, Cho K S, Gary D E, Usoskin I, Valtonen E, Vainio R 2017 *Astrophys. J.* **839** 79
- [36] Mittal N, Verma V K 2017 *New. Astron.* **50** 60
- [37] Mujiber Rahman A, Shanmugaraju A, Umopathy S, Moon Y J 2013 *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* **105** 106

Statistical analysis of shock properties driven by coronal mass ejections based on observations of type II radio bursts^{*}

Zhou Kun-Lun¹⁾ Ding Liu-Guan^{1)2)3)†} Wang Zhi-Wei¹⁾ Feng Li³⁾

1) (*Institute of Space Weather, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

2) (*Binjiang College, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China*)

3) (*Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

(Received 20 February 2019; revised manuscript received 29 April 2019)

Abstract

In this paper, we investigate 77 type-II radio burst events' data observed by Wind/WAVES and STEREO/SWAVES from January 2007 to December 2015. By fitting the frequency-time profile to obtain the corresponding shock velocity, we study the relationship between the parameters of shock and those of coronal mass ejection (CME), solar flare and the associated SEP events, and explore the influences of type II radio enhancement on these relationships. Our findings are as follows. 1) In general, at the onset time of type II radio bursts within deca-hectometric (DH) waveband, the shock front is about 0.4Rs ahead of the leading edge of CME (shock standoff distance), and this distance increases as the CME propagates outward. In the low and high corona, the relationship between shock standoff distance and CME speed indicates a significant difference; the shock standoff distance is correlated with the CME speed positively at the low altitude, but negatively at high altitude. 2) The CME speed of the events with radio enhancement is significantly larger than that with no radio enhancement; and comparing with the events with no radio enhancement, the correlation coefficient between the shock speed and the mass and kinetic energy of the associated CME is significantly high for the events with radio enhancement. 3) There is no correlation between the duration of type II radio burst in DH waveband with enhancement and the speed, mass and kinetic energy of CME. However, it presents a positive correlation for the events with no radio enhancement. 4) Usually the speed of shock that can produce SEP event is obviously higher than that with producing no SEP event. The probability of the SEP generated by the events associated with radio enhancement is slightly higher than with no radio enhancement (73.5% > 67.4%), but for the large SEP events, the generation probability (67.6%) associated with radio enhancement is about one-order of magnitude higher than that with no radio enhancement (37.2%). This conclusion indicates that the type II radio enhancement can be used as one of the signatures of the shock or the radio source that more probably produces a large SEP event.

Keywords: type II radio burst, coronal mass ejection, radio enhancement, coronal shock

PACS: 96.60.ph, 96.25.Tg, 96.50.Pw, 02.70.Rr

DOI: 10.7498/aps.68.20190223

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1731105), and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant No. BK20171456), and the Qing Lan Project of Jiangsu Province for Ding L.G., and the Specialized Research Fund for Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, CAS.

[†] Corresponding author. E-mail: dlg@nuist.edu.cn