

II 型射电暴射电增强与太阳高能粒子事件关系的统计*

周坤论¹⁾ 丁留贯^{1)2)3)†} 钱天麒¹⁾ 朱聪¹⁾ 王智伟¹⁾⁴⁾ 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)

4) (中国极地研究中心, 上海 200000)

(2020 年 1 月 7 日收到; 2020 年 5 月 8 日收到修改稿)

本文基于 Learmonth 等地面台站和 Wind/WAVES, STEREO/SWAVES 等卫星射电观测资料, 筛选了第 24 个太阳活动周 2007 年 1 月至 2015 年 12 月期间 82 个米波-十米百米波 (meter-decahectometric, M-DH)、十米-百米波 (deca-hectometric, DH) II 型射电暴事件, 其中 39 个射电增强事件和 43 个非射电增强事件. 研究结果显示: 1) 射电增强事件的日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 速度、质量、动能和耀斑等级普遍高于无射电增强事件的; 无论有无射电增强, 产生太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP) 事件的 CME 速度、质量和动能均明显大于无 SEP 事件的 CME. 2) 特征时间分析显示高能粒子起始释放时间普遍早于射电增强开始时间, 由此表明射电增强不是导致高能粒子事件产生的直接原因. 3) 无论有无射电增强, SEP 事件伴随的 II 型射电暴开始高度略低于无 SEP 事件的; 而 II 型射电暴结束高度, 产生 SEP 的事件明显高于无 SEP 的事件; 伴随射电增强的 II 型射电暴结束高度显著大于无射电增强事件, 即表明有射电增强事件中的激波更强且可持续到更高高度. 4) 当快速 CME 完全扫过另一个先行 CME 时, CME 相互作用更易产生射电增强, 而是否产生 SEP 无明显差异. 本文结果表明, 射电增强是 CME 激波与其他 CME 相互作用而增强的表现, 增强的激波可能增强粒子加速过程而更易产生大的 SEP 事件, 但射电增强并非产生 SEP 事件的直接原因.

关键词: II 型射电暴, 射电增强, 太阳高能粒子, 激波增强

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

DOI: 10.7498/aps.69.20200041

1 引言

日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 是太阳大尺度爆发活动的重要形式, 能将大量的日冕物质和磁通量快速抛射到行星际太阳风中, 它们在太阳风中称为行星际日冕物质抛射 (interplanetary

coronal mass ejection, ICME). 当 CME 在日冕中的运动速度超过局地阿尔芬 (Alfvén) 速度时, 就会在 CME 的顶部或者侧翼产生激波^[1]. 此时, 在射电波段出现剧烈且短促的流量增强现象叫太阳射电暴, 根据其频谱形态可分为 I, II, III, IV, V 型射电暴及伴随的精细结构, 而 II 型射电暴通常作为日冕激波的最佳示踪器.

* 国家自然科学基金联合基金 (批准号: U1731105)、江苏省基础研究计划面上项目 (批准号: BK20171456)、中国科学院暗物质与空间天文重点实验室开放课题、南京信息工程大学滨江学院院级科研课题 (2020 年)、国家重点研发计划 (批准号: 2018YFC1407304, 2018YFF01013706) 和电波环境特性及模化技术重点实验室基金 (批准号: 201801003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dlg@nuist.edu.cn

CME 爆发驱动激波加速粒子能产生太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP) 事件. 普遍认为 SEP 有两种不同的加速源: 耀斑加速^[2]和 CME 激波加速^[3,4], 分别称之为脉冲型 SEP 事件和缓变型 SEP 事件. 也有研究认为耀斑加速和 CME 激波加速在部分大 SEP 事件中都起作用, 并称这类事件为混合型事件^[5,6], 且这类混合型事件往往具有脉冲型事件的观测特点^[7,8]. Kahler 的研究表明, 缓变型 SEP 事件的能量粒子峰值通量与 CME 的投影速度呈较强的正相关, 但同一速度区间 CME 产生的 SEP 事件强度跨越几个量级^[2]. 早期部分研究认为, 耀斑加速可能在缓变型 SEP 事件的通量上升上占主导地位^[8,9]. Le 等^[10,11]近期的研究结果表明, CME 激波加速主要贡献在低能量段, 而高能量段 (如 > 30 MeV) 主要由耀斑加速产生, 高能段的粒子强度与耀斑软 X 射线强度比 CME 速度具有更高的相关性. Wu 和 Qin^[12]通过能量谱参数分析显示, 地面水平增强 (ground level enhancement, GLE) 事件明显可分为两类: 激波加速和非明显激波加速. 此后, Zhao 等^[13,14]的研究也进一步表明, 部分 GLE 事件中 GeV 量级的相对论高能粒子是由耀斑加速产生的. 耀斑加速的部分粒子可被 CME 激波继续加速^[13]. Mason 等^[15,16]提出 CME 驱动的激波速度和种子粒子 (seed population) 可能是决定 SEP 事件强度的两个重要因素. 种子粒子可能来自耀斑或先前的 CMEs^[17-19].

除 CME 速度外, CME 驱动激波的强弱是判断能否产生 SEP 事件的另一个重要因素. 研究显示驱动激波的强弱并不仅仅与 CME 速度有关. 如 Shen 等^[20]的研究显示, 慢速 CME 可驱动较强激波并产生 SEP 事件, 同时伴随长时间 II 型射电暴, 而快速 CME 仅能驱动较弱的激波且未能产生 SEP 事件, 同时只伴随较短时间 II 型射电暴. Gopalswamy 等^[21]的统计结果表明大部分伴随跨越米波-百米波的 II 型射电暴与 SEP 事件相关. 近年来, Winter 和 Ledbetter^[22]的统计结果表明, 大 SEP 事件 (峰值通量大于 15 pfu) 普遍伴随十米-百米 (deca-hectometric, DH) 波段 II 型射电暴, 进一步也表明, II 型射电暴 (激波强弱) 特性可作为

判断 CME 能否产生 SEP 事件的重要标志.

普遍认为 II 型射电暴射电增强主要由 CME-CME 相互作用产生, 但也不是所有的 CME-CME 相互作用都能产生 II 型射电暴增强. Gopalswamy 等^[23]的研究表明, 快速 CME 追赶慢速 CME, 合并过程发生相互作用可导致 II 型射电暴射电增强; 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^[17]. Ding 等^[24]在研究 CME 相互作用与 SEP 事件关系时发现, 主 CME 前沿追赶上先行 CME 后沿的时间恰好与射电增强开始时间及 SEP 近太阳附近起始释放时间基本一致. 此后, Ding 等^[25]的统计结果进一步显示伴随射电增强的 CME 更容易产生 SEP 事件. Al-Hamadani 等^[26]的研究表明: 当 II 型射电暴形成高度明显低于 CME 前沿高度时, 射电增强成因可能是 CME 与冕流相互作用; 而 II 型射电暴形成高度与 CME 前沿高度相当时, 射电增强主要是 CME 与相同或者相邻源区的先行 CME 或其残留物质发生相互作用引起的.

本文主要对 2007 年至 2015 年期间的 82 个 II 型射电暴的频谱结构进行拟合, 结合有无 SEP 以及 II 型射电暴射电增强与否, 进一步分析 II 型射电暴 (激波) 与 CME, SEP 相关参数的关联, 从而研究 II 型射电暴及射电增强信号与 SEP 事件的关联.

2 数据处理

2.1 数据来源

本文主要基于 CDAW 数据库 Wind/WAVES DH II 型射电暴列表^①, 结合 Learmonth, YNAO^②以及 BIRS^③等地面站的米波射电观测与 Wind/WAVES 和 STEREO/WAVES 的 DH 波段频谱观测图像, 筛选出 2007 年 1 月至 2015 年 12 月 82 个可清晰辨别出 II 型射电频谱形态结构的射电暴事件. CME 观测数据来源于 SOHO/LASCO C2, C3^[27], II 型射电暴事件对应爆发活动伴随的 CME 参数均取自 CDAW 数据库, 耀斑等

① https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html

② <http://secchirh.obspm.fr/index.php>

③ <http://www.astro.umd.edu/~white/gb/index.shtml#events>

级、活动区位置信息取自 CDAW, LMSAL^①和 SolarMonitor.org^②.

太阳高能粒子数据主要采用能量为 25—60 MeV 的高能质子通量数据, 数据来源于 SOHO/COSTEP EPHIN^[28] 和 STEREO-A(B)/HET^[29]. 此外, 本文采用参考文献 [25,30] 中的方法和标准, 以 $0.0114 (\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr} \cdot \text{MeV})^{-1}$ 作为大 SEP 事件的判断标准; 并取 SOHO 与 STEREO-A(B) 中通量峰值最大值作为该事件的强度. 太阳高能粒子近太阳附近起始释放时刻的估算采用速度离散分析方法 (velocity dispersion analysis, VDA)^[6,31–33]. 假设 SEP 沿行星际磁力线无散射传播, 则能量为 E 的粒子在近太阳附近的起始释放时间 t_{rel} 可表示为

$$t_{\text{rel}} = t_0 - L/v(E),$$

其中, t_0 为 SEP 在 1 AU 处的爆发时间; L 为粒子传播路径长度 (使用文献 [5] 假设, 取 $L = 1.2$ AU); $v(E)$ 为粒子传播速度. 本文考虑粒子的相对论效应, 能量为 E 的粒子速度可估算为

$$v(E) = c \left[1 - 1/(1 + E/(m_p c^2))^2 \right]^{1/2},$$

其中, c 为光速, $m_p c^2$ 为质子的静能量 938.27 MeV.

2.2 处理方法

本文在判断 II 型射电暴有无明显射电增强方面, 采用文献 [23,25] 中的方法, 即对 II 型射电暴频谱进行人工识别判断有无明显射电增强, 并结合日冕观测视频, 判断该事件对应 CME 有无相同或相邻源区 CME 爆发, 以及射电增强时间内二者有无相互作用. 本文判断 CME 相互作用主要依据两个 CME 在 SOHO 和 STEREO 观测视界中投影传播方向是否基本一致, 且 CME 前沿高度-时间轨迹曲线是否有交叉, 即保证后一个快速 CME 是否能追赶上前一个慢速 CME. 基于 Newkirk^[34], Vršnak^[35] 和 SPM^[36] 三种日冕密度模型分别对米 (M) 波和 DH 波 II 型射电暴频谱进行拟合, 反演得到 II 型射电暴对应激波速度. 基于 II 型射电辐射最大概率发生在激波前沿的假设, 通过选择适合的密度模型及密度倍数, 确定与 CME 速度最相符的激波速度^[37–39]. 如有 II 型射电暴事件在 Wind/WAVES 和 STEREO/WAVES 同时被观测到, 则

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. 对射电增强区域拟合时, 选取该事件非增强区域拟合时所采用的日冕密度模型, 并假设射电增强最大概率发生在激波前沿^[40], 从而确定密度模型倍数.

此外, 根据射电增强 II 型射电暴对应 CME (称为主 CME, 记为 CME2) 的爆发时间、源区位置、耀斑爆发时间等, 筛选来自相同或者附近活动区的 24 h 内所有先行 CME^[41], 判断可能与 CME2 发生作用而引起 II 型射电暴增强的先行 CME (记为 CME1)^[26]. 本文假定射电增强主要起因于 CME-CME 相互作用^[23,42].

图 1 为 II 型射电暴射电增强和无射电增强的典型事例. 图 1(a) 为 2013 年 5 月 22 日的 II 型射电暴频谱, 显示 II 型射电暴在持续时间内射电频谱有明显增强现象 (时间约为 14:02—17:10, 频率约为 1.98—0.34 MHz, 高度约为 11.4—38.1 Rs, CME2 与 CME1 前沿轨迹相遇时间约为 16:30, 见文献 [24]). 该事例基于 Vršnak 密度模型及频率与日冕密度的关系, 分别采用 4 倍和 4.5 倍 Vršnak 密度模型对事例中的频谱非增强区和增强区进行拟合. 图 1(c) 为 2012 年 4 月 15 日的 II 型射电暴频谱, II 型射电暴持续时间很短 (时间约为 02:37—02:53, 频率约为 6.6—3.0 MHz, 高度约为 3.9—5.7 Rs). 该事件拟合时采用 1 倍 Vršnak 密度模型, 且存在 CME-CME 相互作用, CME2 (前沿轨迹) 追赶上 CME1 的时间约为 04:40, 但没有出现射电增强. 本文采用文献 [43] 的方法, 假定在拟合高度内激波速度为常数 (即线性拟合). 图 1(a) 和 (c) 中白色紫色虚线为 II 型射电暴 (非增强区域) 和射电增强区域对应的拟合结果. 图 1(b) 和 (d) 为基于日冕密度模型拟合得到的激波高度-时间变化曲线, 黑色虚线和实线分别为 CME1 和 CME2 高度-时间线性拟合, 绿色和紫色实线分别为 II 型射电暴非增强区和增强区的拟合结果. 由图 1 可以看出, 拟合的激波速度与 CME 速度、射电增强时间和高度与 CME 相互作用时间和高度等符合较好. Newkirk 密度模型不适用于图 1 中 DH 波段低频拟合; 若采用 SPM 密度模型, 则 CME 前沿高度-时间曲线与反演的激波高度-时间曲线发生交叉,

① http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html

② <https://solarmonitor.org>

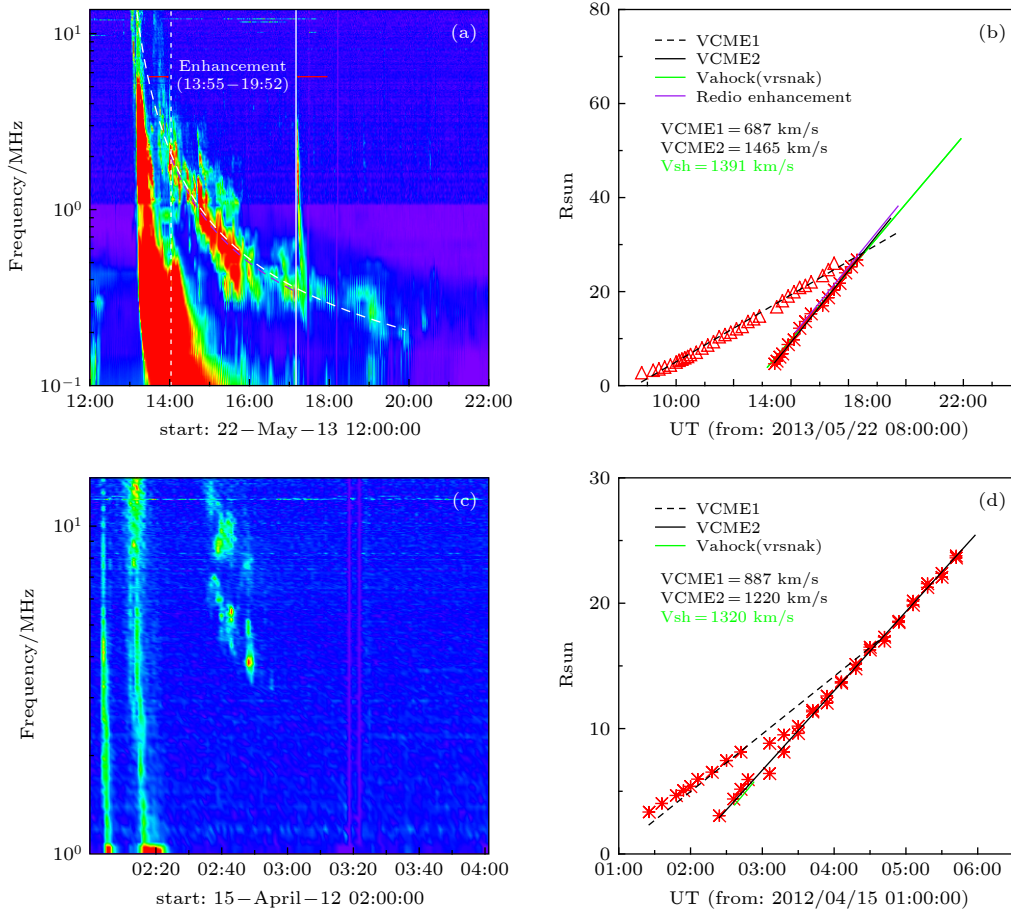


图 1 (a, c) 有射电增强和无射电增强的 II 型射电暴频谱图; (b, d) CME1, CME2 及拟合激波高度-时间变化图
 Fig. 1. (a, c) Spectrum diagram of a type II radio burst with and without enhancement; (b, d) the height-time profile of CME1, CME2 and its shock.

或者激波高度明显小于 CME 前沿高度, 这与本文假设不符. 对于正常产生于 CME 激波前端的大部分 II 型射电暴事件而言 [44], 拟合激波高度应该约等于或稍高于 CME 前沿高度较为合理. 而对于少部分产生于激波侧翼的 II 型射电暴 [45-49] 而言, 拟合的激波高度则整体比 CME 前沿高度低, 且只能拟合得到较低的激波速度.

3 统计结果

通常认为 II 型射电暴射电增强是由 CME-CME 相互作用引起的 [17,25,42], 但并非所有 CME 相互作用都能产生射电增强现象. 为了探讨射电增强事件和非射电增强事件之间的特征差异以及与 SEP 事件之间的关联, 将 82 个事件分为两类: I) 39 个 II 型射电暴增强事件 (Group I); II) 43 个无增强 II 型射电暴事件 (Group II). 其中, Group I 有 30 个 SEP 事件, 9 个无 SEP 事件, Group

II 有 27 个 SEP 事件, 16 个无 SEP 事件. 下文分别对两类事件的 CME 速度、质量、动能和耀斑等级进行分析, 并比较不同组中 SEP 事件差异以及 II 型射电暴, CME, 激波的关联等.

3.1 CME, 耀斑, SEP 事件属性

图 2 为所选样本事件对应的 CME 的速度、质量、动能和耀斑等级统计直方图. 统计结果显示, 射电增强事件的 CME 速度、质量、动能和耀斑等级均值分别为 1368 km/s, 1.6×10^{16} gram, 2.0×10^{32} erg 和 M8.6, 而无射电增强事件的均值分别为 895 km/s, 8.1×10^{15} gram, 4.8×10^{31} erg 和 M5.3. 显然, 伴随射电增强的 II 型射电暴事件对应的 CME 速度、质量、动能和耀斑等级等明显高于无射电增强事件, 即伴随射电增强的 II 型射电暴事件对应的 CME 通常具有更高的能量, 爆发更剧烈.

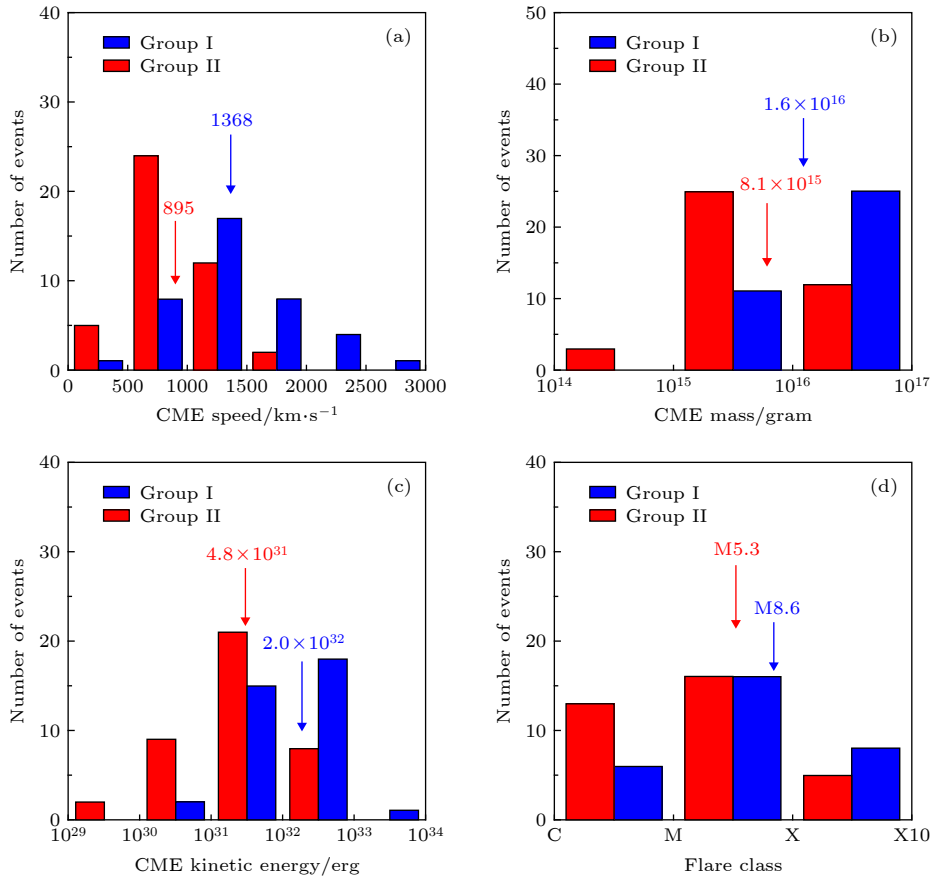


图 2 CME 速度、质量、动能和耀斑统计直方图. 蓝色为有射电增强事件 (Group I), 红色为无射电增强事件 (Group II)

Fig. 2. Histogram of CME velocity, mass, kinetic energy and flare class. Blue denotes radio enhancement events (Group I), and red denotes no enhancement events (Group II).

图 3 为 II 型射电暴伴随的 SEP 事件峰值通量统计. 由图 3 可知, 射电增强事件的 SEP 峰值普遍高于 0.01 (SEP 通量单位为 (cm² s sr MeV)⁻¹), 最大峰值超过 100, 均为大 SEP 事件, 即大于 0.0114. 无射电增强事件的 SEP 峰值分布在 10⁻⁴—10, 绝

大部分事件峰值小于 1. 比较二者可以看出, 有射电增强事件伴随的 SEP 峰值通量普遍较大, 且明显高于无射电增强事件, 也就是说有射电增强的 II 型射电暴对应太阳爆发具有更高的大 SEP 事件产生概率.

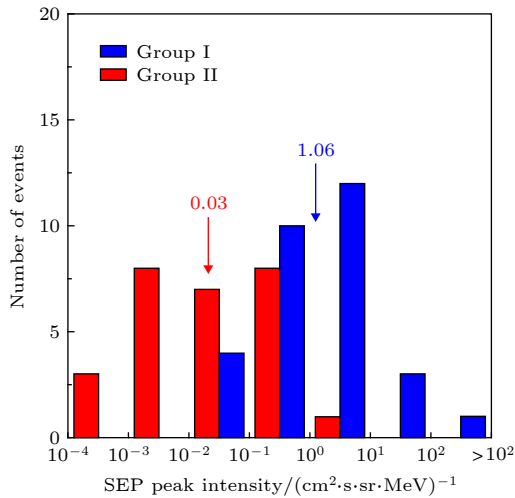


图 3 SEP 事件峰值通量统计直方图

Fig. 3. Statistical histogram of SEP peak intensity.

3.2 射电增强与 SEP 事件

为深入了解射电增强事件和无射电增强事件与 SEP 事件产生之间的关联, 对样本事件进行分组来讨论 CME 属性之间差异以及与 SEP 事件之间的关联 (图 4), 由图 4 可知, 无论有无射电增强, 产生 SEP 事件的 CME 速度、质量、动能等明显高于无 SEP 事件的. 在有射电增强的事件中, 无 SEP 事件对应的 CME 速度、质量、动能普遍偏小 (低速、低质量、低动能), 而产生 SEP 事件的 CME 速度、质量、能量普遍偏大 (速度 > 1000 km/s, 质量 > 10¹⁶ g, 动能 > 10³² erg, 高速、高质量、高动能). 无射电增强事件中, 产生 SEP 事件的 CME 速度、质量、动能等也明显高于不产生 SEP 事件的 CME.

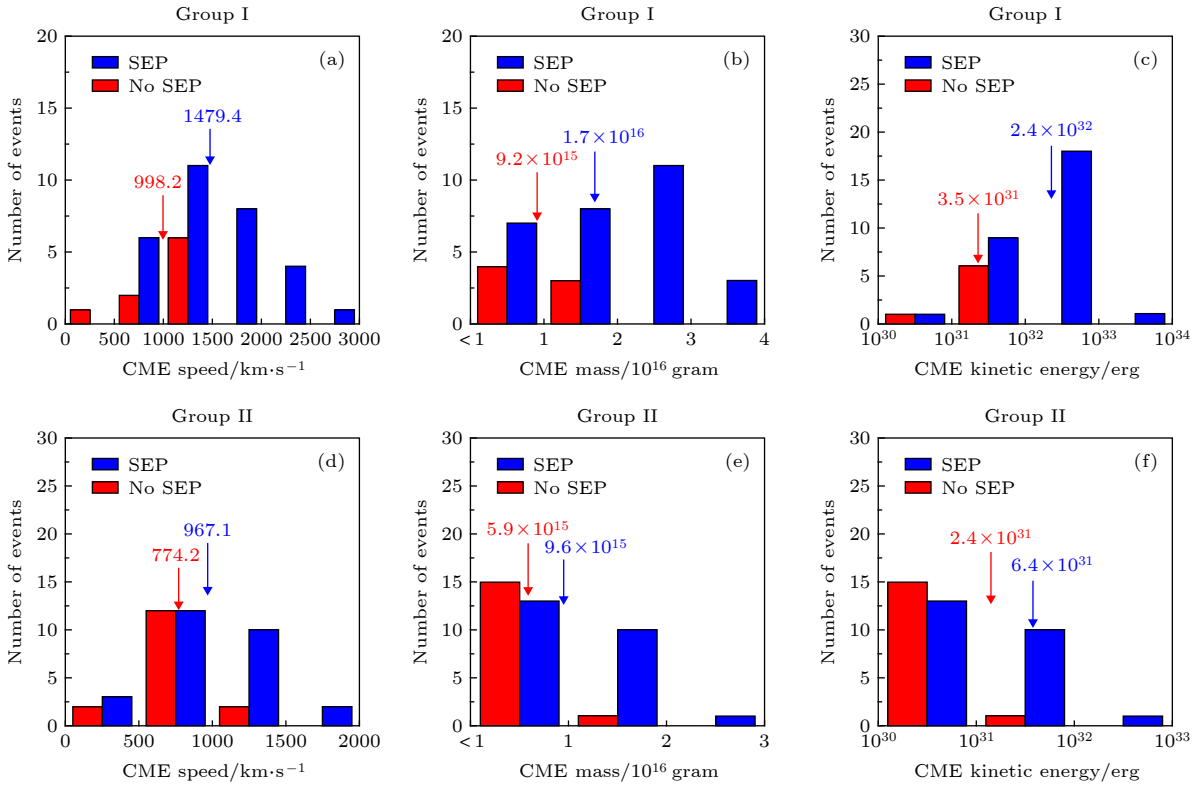


图 4 CME 速度、质量、动能与 SEP 事件关联的统计直方图. 蓝色是有 SEP 事件, 红色是无 SEP 事件

Fig. 4. Histogram of CME velocity, mass, kinetic energy with SEP/No SEP, and blue denotes the events with SEP, and red denotes the events without SEP.

对比图 4 中 Group I 和 II 可知, 有或无射电增强, 产生 SEP 事件的 CME 比不产生 SEP 事件的 CME 具有更高的速度、质量和动能. 相对于无射电增强事件, 无论产生 SEP 与否, 有射电增强事件的 CME 具有更高的能量. 无论有无射电增强, 产生 SEP 事件的 CME 通常比同情形下无 SEP 产生的 CME 具有更高的能量. 也就是说, 不管射电增强与否, CME 若要产生 SEP 事件, 都需要具有较高的速度、质量、能量.

3.3 特征时间分析

为了进一步研究射电增强是否与 SEP 事件产生有关, 本研究组分析了射电增强开始时间与高能粒子起始释放时间的先后顺序. 图 5 为有射电增强事件中的 SEP 事件, 以每个事件的 SEP 近太阳附近起始释放时刻作为参考点 0, II 型射电暴及射电增强开始、结束时刻和 SEP 的峰值时刻与参考点之差的统计分布图. 结果显示, 除了一个事件外, 所有事件的 II 型射电暴开始时间都早于 SEP 起始释放时间, 即所有高能粒子都是在激波产生 (假设以 II 型射电暴开始为标志) 之后一段时间内开始

释放或产生的. 除 4 个事件的射电增强开始时间在 SEP 起始释放时刻之前外, 其余 26 个事件射电增强都是在 SEP 起始释放之后才开始, 这表明绝大部分事件中高能粒子在射电尚未增强之前就已

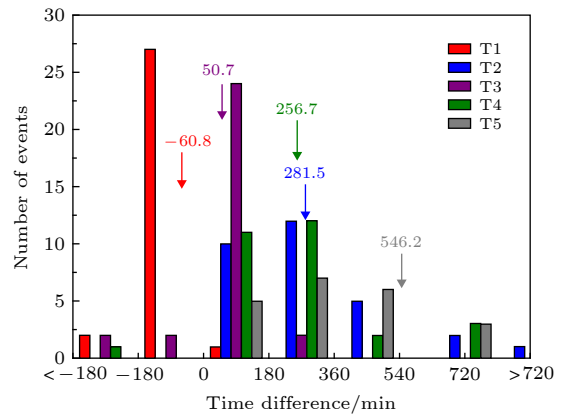


图 5 以 SEP 事件起始时刻作为参考点 0, 各时间点与参考点之差的统计直方图. II 型射电暴起始 (T1 红色) 和结束时刻 (T2 蓝色)、射电增强起始 (T3 紫色) 和结束时刻 (T4 绿色)、SEP 峰值时刻 (T5 灰色)

Fig. 5. Uses the starting moment of the SEP events as the reference point (0), histogram of the difference between type II radio burst start /stop time(T1/T2), radio enhancement start/stop(T3/T4), SEP stop time(T5) and the reference point respectively.

经产生. 特别地, 有一个事件的射电增强开始、结束时间都在 SEP 起始释放时刻 (参考值 0) 之前. T1, T2, T3, T4, T5 的均值分别为 -60.8, 281.5, 50.7, 256.7, 546.2 min. 通过对比 T1(-60.8 min), 0(SEP 起始释放时刻), T3(50.7 min) 可以看到: 首先, CME 驱动激波并产生 II 型射电暴; 其次, 经过一段时间加速, 粒子产生 SEP 并向外释放, 这一过程通常在激波产生后不久就开始发生; 此后, 较强的高能量 CME 与先行 CME 或残余物质发生作用, 并伴随射电增强, 这一过程通常在 SEP 产生之后, 也就是发生在较高高度范围内. 若考虑传播路径长度假设带来的误差, 可选取更长的粒子传播路径 (如 1.7 AU), 结果表明绝大部分 II 型射电暴 (25/30) 的起始时间仍早于粒子起始释放时间, 与上述结论基本一致.

通过对比射电增强开始时刻 T3(50.7)、结束时刻 T4(256.7) 与 SEP 起始释放时刻 (参考值 0)、SEP 峰值时刻 T5(546.2), 发现大部分事件射电增强持续时间在 SEP 事件起始释放至峰值这段时

间内.

3.4 II 型射电暴开始、结束高度

1) 有射电增强伴随

图 6 为射电增强事件, 图 6(a) 和图 6(b) 分别为 II 型射电暴起始、结束高度区间均值随 CME 速度的变化关系; 图 6(c) 和图 6(d) 分别为 II 型射电暴起始、结束高度的统计分布, 红色为无 SEP 事件, 蓝色为有 SEP 事件. 从图 6(a) 可以看出, 无 SEP 事件的 CME 速度全部小于 1500 km/s, 且 II 型射电暴起始高度均值随 CME 速度增大而逐渐下降; 有 SEP 事件的 CME 速度全部大于 500 km/s, II 型射电暴开始高度均值小于 6 Rs. 图 6(c) 显示有 SEP 事件产生的 II 型射电暴开始高度略低于无 SEP 事件产生的 II 型射电暴开始高度 (均值 4.03 Rs > 3.50 Rs). 产生 SEP 事件的 II 型射电暴或激波具有更低的开始高度, 这与文献 [4,5] 中 CME 激波的开始高度越低就越容易产生 SEP 事件的结果相符.

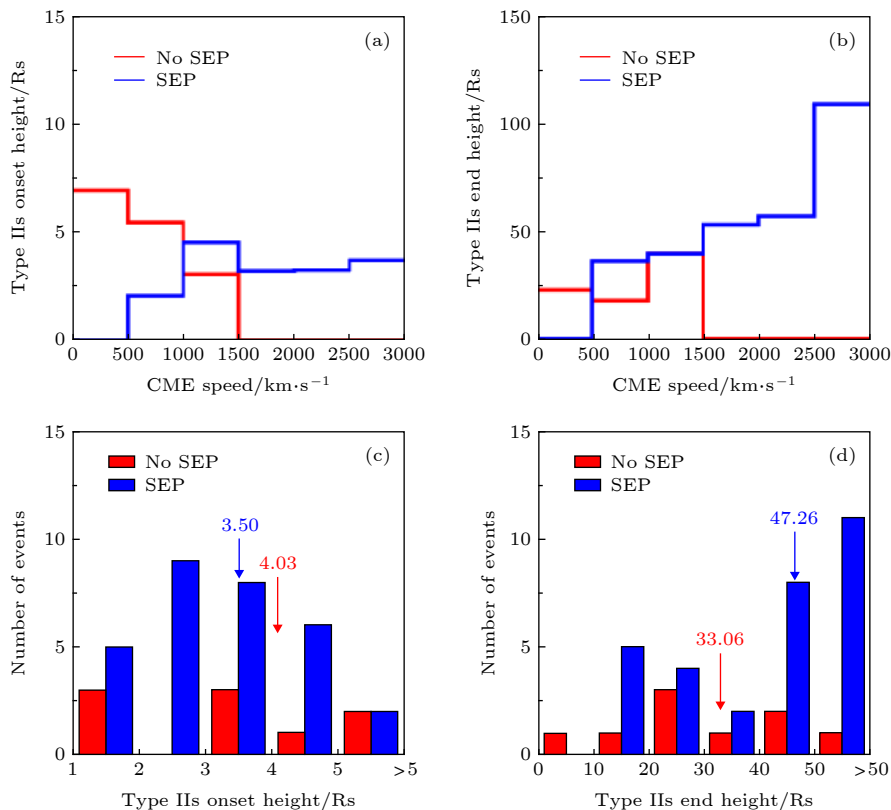


图 6 射电增强事件 (a, b) II 型射电暴开始、结束高度在不同速度区间内的均值分布; (c, d) II 型射电暴开始、结束高度的统计直方图

Fig. 6. For radio enhancement events, (a, b) the bin-average distribution of the type IIs start/stop height in different speed intervals; (c, d) the histogram of the type IIs start/stop height.

图 6(b) 和 (d) 为 II 型射电暴结束高度分析. 从图 6(b) 和 (d) 可以看出, 有 SEP 事件产生的 II 型射电暴结束高度明显高于无 SEP 事件的 (均值 $33.06 \text{ Rs} < 47.26 \text{ Rs}$), 且有 SEP 伴随的 II 型射电暴结束高度均值随 CME 速度的增大而明显增大. 部分超强 II 型射电暴的结束高度可到达 100 Rs 以上.

2) 无射电增强伴随

图 7 为无射电增强事件, (a), (b) 为 II 型射电暴开始、结束的高度区间均值随速度分布情况; (c), (d) 为 II 型射电暴开始、结束高度的统计直方图. 从图 7(a) 可以看出, 在无射电增强事件中, II 型射电暴开始高度均值普遍小于 6 Rs , 有无 SEP 事件无明显差别. 从图 7(b) 可以看出: 无射电增强事件中, II 型射电暴结束高度普遍小于 30 Rs ; II 型射电暴结束高度均值都随 CME 速度的增大而升高, 且有无 SEP 事件无明显差异. 从图 7(c), (d) 可以看出: 产生 SEP 事件的 II 型射电暴开始高度一般较低而结束高度较高 (均值为 $3.53\text{--}12.81 \text{ Rs}$), 也就是对应激波具有较大的持续

高度范围; 而没有产生 SEP 事件的 II 型射电暴开始高度一般较高而结束高度较低 (均值为 $3.85\text{--}7.97 \text{ Rs}$), 即激波持续高度范围较小.

对比图 6 和图 7, 总体上有 SEP 事件的 II 型射电暴起始高度比无 SEP 事件的略低, 约为 3.5 Rs . 无论有 (无)SEP 事件, 有射电增强事件的 II 型射电暴结束高度为 47.26 Rs (33.06 Rs) 显著大于无射电增强事件的 12.81 Rs (7.97 Rs).

3.5 射电增强区与非增强区日冕密度

图 8 为射电增强事件中 II 型射电暴非增强区域拟合密度模型倍数 ($N1$) 和射电增强区域拟合密度模型倍数 ($N2$) 及 $N2\text{--}N1$ 的统计直方图. 本研究中采用的日冕密度模型为一维模型及倍数, 只作为日冕密度径向分布的估算, 不能完整反映激波面周围日冕密度的三维分布, 所以本研究用来定性比较密度相对高低. 如图 8 所示, 无论是有 SEP 事件还是无 SEP 事件, 射电增强区域密度普遍高于非增强区域. 这与射电增强起因于 CME 相互作用的假

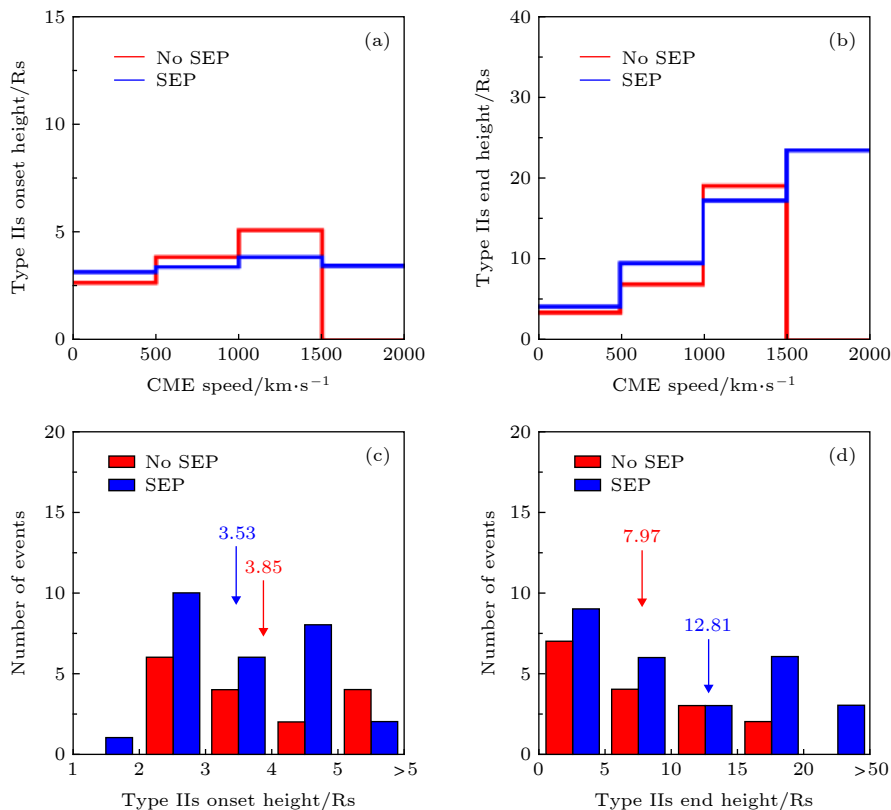


图 7 无射电增强事件 (a), (b) II 型射电暴起始、结束高度在不同速度区间内的均值分布; (c), (d) II 型射电暴起始、结束高度的统计直方图

Fig. 7. For no radio enhancement events: (a, b) The bin-average distribution of the type IIs start/stop height in different speed intervals; (c, d) the histogram of the type IIs start/stop height.

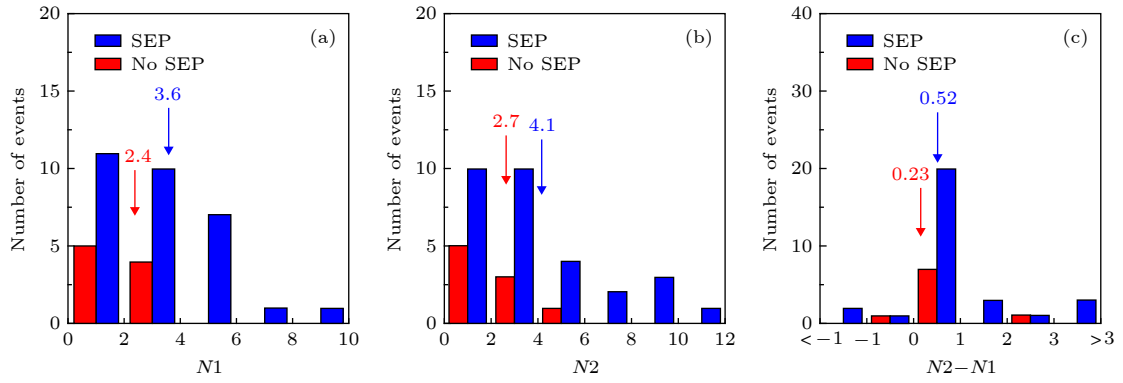


图 8 射电增强事件 (a) 非增强区域拟合密度模型倍数 N_1 ; (b) 增强区域拟合密度模型倍数 N_2 ; (c) N_2 与 N_1 差值的统计直方图
 Fig. 8. Histogram of N_1 , N_2 , N_2-N_1 . N_1 and N_2 are the multiples of coronal density model used in the fitting of type II radio burst and its enhancement episode respectively.

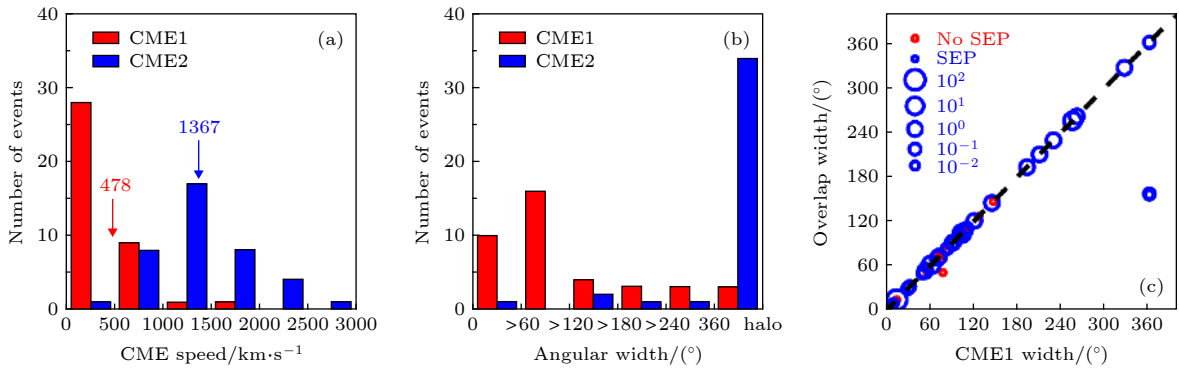


图 9 CME1 和 CME2 速度、角宽、重叠角宽的统计直方图
 Fig. 9. Histogram of CME1 and CME2 with speed, angular width and overlap width.

设一致, 即相互作用的两个 CME 中, CME2 激波前方为与其发生作用的 CME1, 其密度一般比周围日冕密度要大. 图 8(c) 显示每个事件的 N_2 和 N_1 差值统计, 除 4 个事件外, 射电增强区域拟合密度模型倍数 (N_2) 均大于或等于非增强区倍数 (N_1), 表明射电增强区域密度更大. 此外, 有 SEP 事件的密度倍数差值均值高于无 SEP 事件的. 这一结论表明, 在射电增强事件中, 能够产生 SEP 事件的 CME 激波前沿具有更高的日冕密度.

3.6 射电增强事件中 CME1 和 CME2

本文假设射电增强主要是由于 CME 相互作用引起的. 在本文研究样本中, CME2 速度全部大于 CME1 速度 (图 9(a)), 这样, CME2 传播中可以追上 CME1 并发生相互作用. 从图 9(b) 可以看出, CME2 的角宽普遍大于 CME1 的, 且大多数为 halo CME (图 9(b)).

在 CME 相互作用过程中, CME2 可以部分或者完全扫过 CME1. 为了进一步探讨射电增强事件

中重叠角宽与 SEP 事件的产生或者强度有无关联, 分析了 CME1 的角宽与重叠角宽的关系. 图 9(c) 结果显示, 射电增强事件中, 除了 3 个事件外, 其余所有事件的重叠角宽与 CME1 的角宽基本相等, 也就是 CME2 完全扫过 CME1 的传播区域. 这表明, 当一个快速 CME 完全扫过另一个 CME 而发生相互作用时更容易产生射电增强, 这一结论与文献 [25] 一致. 同时也显示, 产生 SEP 与不产生 SEP 的事件无明显差别.

4 结果及讨论

本文结合多卫星联合观测, 对第 24 太阳活动周 2007 年 1 月至 2015 年 12 月期间 82 个 II 型射电暴事件进行分析, 并对比分析了射电增强与否与 SEP 事件产生之间的关联. 基于日冕密度模型, 对射电频谱进行拟合, 分析拟合结果与 CME, SEP 参数之间的关系, 探讨 II 型射电暴、射电增强与 SEP 事件之间的关系, 主要得到以下结论:

1) 射电增强事件对应的 CME 速度、质量、动能和耀斑等级均高于无射电增强事件, 表明射电增强事件对应的 CME 具有更高的能量, 这与文献 [25] 中的结论一致. 伴随射电增强的 CME 激波加速粒子更易产生 SEP 事件 (尤其是大 SEP 事件). 无论有无射电增强, 产生 SEP 事件的 CME 速度、质量和动能均明显大于无 SEP 的事件, 这表明产生 SEP 事件需要更高能的 CME 爆发.

2) 特征时间分析表明, SEP 在近太阳附近的起始释放发生在 II 型射电暴开始之后, 而释放时间又早于射电增强开始时间. 此结果表明, 射电增强并不是直接导致 SEP 事件产生的原因, 只能作为 CME 激波增强或者 CME 更高能的观测表征, 增强的激波加剧了粒子加速过程.

3) 无论有无射电增强, 有 SEP 事件伴随的 II 型射电暴开始高度略低于无 SEP 事件的, 总体小于 6.0 Rs, 平均约为 3.5 Rs; 相比于无 SEP 事件的情况, 有 SEP 事件伴随的 II 型射电暴具有更高的结束高度, 其中有射电增强事件的 II 型射电暴结束高度 (SEP: 47.26 Rs; No SEP: 33.06 Rs) 明显高于无射电增强事件 (SEP: 12.81 Rs; No SEP: 7.97 Rs). CME 激波若能持续到足够高的空间范围, 也足以表明此 CME 具有更高的能量. 统计表明 II 型射电暴起始高度越低、结束高度越高的情况下, 产生 SEP 事件的概率更高. 也就是说, 当激波在很低的日冕形成后一直持续到很高高度 (行星际) 或持续很长时间, 则更容易产生 SEP 事件. 进一步表明, 若要产生 SEP 事件, 则要求 CME 长时间驱动激波、具有更高的能量.

4) 相比于 II 型射电暴非增强区域, 射电增强区域密度更高; 相比于无 SEP 事件, 有 SEP 事件 II 型射电暴区域密度更高. 显然, 更高密度的等离子体可提供更多待加速的种子粒子, 从而更容易产生 SEP 事件.

5) 射电增强事件中 CME2 几乎完全扫过 CME1 的传播区域, 表明在这种情况下, CME 相互作用更易产生射电增强, 而有无 SEP 事件之间则无明显差异. 这也进一步说明, 要产生 SEP 事件, 不仅要有激波或增强的激波, 还要具备其他条件, 如有足够多的种子粒子、良好的磁连接条件等.

综上所述, 伴随有 II 型射电暴射电增强的 CME 具有更高的能量, 能驱动更强的激波, 但射电增强不是引起 SEP 事件的直接原因, 只是快速

高能 CME 与其他先行 CME 相互作用而引起激波增强的观测表现. 结果还显示, 伴随有射电增强的 CME 普遍比无射电增强的 CME 具有更快的速度、更大的质量和动能, 更高能, 更容易产生 SEP 事件, 尤其是大 SEP 事件.

感谢以下数据网站提供本文观测数据: CME, DH II 型射电暴列表及参数 (CDAW, <https://cdaw.gsfc.nasa.gov>); 耀斑相关数据 (LMSAL, http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html); <https://solarmonitor.org/>); 米波射电观测数 (Radio Monitoring: Learmonth, YNAO, <http://secchirh.obspm.fr/index.php>, <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-spectral/learmonth/>); BIRS, <http://www.astro.umd.edu/~white/gb/>); DH 波射电观测数据 (Wind/WAVES, <https://cdaweb.sci.gsfc.nasa.gov/index.html>); STEREO/SWAVES, <http://www.ieap.uni-kiel.de/et/ag-heber/costep/data.php>); 高能粒子数 (STEREO/HET, <http://www.ieap.uni-kiel.de/et/ag-heber/costep/data.php>); SOHO/EPHIN, <http://www2.physik.uni-kiel.de/SOHO/phpeph/EPHIN.htm>).

参考文献

- [1] Vršnak B, Cliver E W 2008 *Sol. Phys.* **253** 215
- [2] Kahler S W 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 20947
- [3] Reames D V 1999 *Space. Sci. Rev.* **90** 413
- [4] Cliver E W, Kahler S W 2004 *Astrophys. J.* **605** 902
- [5] Gopalswamy N, Xie H, Yashiro S, Akiyama S, Mäkelä P, Usoskin I G 2012 *Space. Sci. Rev.* **171** 23
- [6] Ding L G, Jiang Y, Li G 2016 *Astrophys. J.* **818** 169
- [7] Vainio R, Agueda N, Aran A, Lario D 2007 *Space Weather. Springer Netherlands*, pp 27–37
- [8] Cane H V, von Roseninge T T, Cohen C M S, Mewaldt R A 2003 *Geophys. Res. Lett.* **30** 8017
- [9] Li C, Tang Y H, Dai Y, Fang C, Vial C 2007 *Astron. Astrophys.* **472** 283
- [10] Le G M, Zhang X F 2017 *Res. Astron. Astrophys.* **17** 123
- [11] Le G M, Li C, Zhang X F 2017 *Res. Astron. Astrophys.* **17** 73
- [12] Wu S S, Qin G 2018 *J. Geophys. Res-Space Phys.* **123** 76
- [13] Zhao M X, Le G M, Chi Y T 2018 *Res. Astron. Astrophys.* **18** 74
- [14] Zhao M X, Le G M 2020 *Res. Astron. Astrophys.* **20** 37
- [15] Mason G M, Mazur J E, Dwyer J R 1999 *Astrophys. J.* **525** 133
- [16] Mason G M, Dwyer J R, Mazur J E 2000 *Astrophys. J.* **545** 157
- [17] Gopalswamy N, Yashiro S, Michalek G, Kaiser M L, Howard R A, Reames D V, Leske R, von Roseninge T 2002 *Astrophys. J.* **572** 103
- [18] Gopalswamy N, Yashiro S, Krucker S, Stenborg G, Howard R A 2004 *J. Geophys. Res-Space.* **109** 12105

- [19] Li G, Moore R, Mewaldt R A, Zhao L, Labrador A W 2012 *Space. Sci. Rev.* **171** 141
- [20] Shen C L, Wang Y M, Ye P Z, Zhao X P, Gui B, Wang S 2007 *Astrophys. J.* **670** 849
- [21] Gopalswamy N, Aguilar-Rodriguez E, Yashiro S, Nunes S, Kaiser M L, Howard R A 2005 *J. Geophys. Res.* **110** 12
- [22] Winter L M, Ledbetter K 2015 *Astrophys. J.* **809** 105
- [23] Gopalswamy N, Yashiro S, Kaiser M L, Howard R A, Bougeret J L 2001 *Astrophys. J.* **548** 91
- [24] Ding L G, Li G, Jiang Y, Le G M, Shen C L, Wang Y M, Chen Y, Xu F, Gu B, Zhang Y N 2014 *Astrophys. J.* **793** 35
- [25] Ding L G, Wang Z W, Feng L, Li G, Jiang Y 2019 *Res. Astron. Astrophys.* **19** 1
- [26] Al-Hamadani F, Pohjolainen S, Valtonen E 2017 *Sol. Phys.* **292** 127
- [27] Brueckner G E, Howard R A, Koomen M J, Korendyke C M, Michels D J, Moses J D, Socker D G, Dere K P, Lamy P L, Llebaria A, Bout M V, Schwenn R, Sinnott G M, Bedford D K, Eyles C J 1995 *Sol. Phys.* **162** 357
- [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, del Peral L, Witte M, Marsden R, Henrion J 1995 *Sol. Phys.* **162** 483
- [29] von Rosenvinge 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, Le 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] Tylka A J, Cohen C M S, Dietrich W F, Krucker S, McGuire R E, Mewaldt R A, Ng C K, Reames D V, Share G H 2003 *The 28th International Cosmic Ray Conference* **6** 3305
- [32] Kim R S, Cho K S, Lee J, Bong S C, Park Y D 2014 *J. Geophys. Res-Space.* **119** 9419
- [33] Le G M, Tang Y H, Han Y B 2007 *Chin. Sci. Bull.* **52** 2461 (in Chinese) [乐贵明, 唐玉华, 韩延本 2007 *科学通报* **52** 2461]
- [34] Newkirk G Jr 1961 *Astrophys. J.* **133** 983
- [35] Vršnak B, Magdalenic J, Zlobec P 2004 *Astron. Astrophys.* **413** 753
- [36] Saito K, Poland A I, Munro R H 1977 *Sol. Phys.* **55** 121
- [37] Gopalswamy N, S Yashiro 2011 *Astrophys. J.* **736** 17
- [38] Mäkelä P, Gopalswamy N, Akiyama S, Xie H, Yashiro S 2015 *Astrophys. J.* **806** 13
- [39] 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
- [40] Temmer M, Vršnak B, Rollett T, Bein B, Koning D, Liu Y, Bosman E, Davies J A, Most C, Zic T, Veronig A M, Bothmer V, Harrison R, Nitta N, Bisi M, Flor O, Eastwood J, Odstrcil D, Forsyth R 2012 *Astrophys. J.* **749** 57
- [41] Ding L G, Jiang Y, Zhao L L, Li G 2013 *Astrophys. J.* **763** 30
- [42] Martínez Oliveros J C, Raftery C L, Bain H M, Liu Y, Krupar V, Bale S, Krucker S 2012 *Astrophys. J.* **748** 66
- [43] Zhou K L, Ding L G, Wang Z W, Feng L 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 13 (in Chinese) [周坤论, 丁留贯, 王智伟, 封莉 2019 *物理学报* **68** 13]
- [44] Bemporad A, Mancuso S 2013 *J. Adv. Res.* **4** 287
- [45] Sheeley Jr N R, Hakala W N, Wang Y M 2000 *J. Geophys. Res.* **105** 5081
- [46] Vourlidas A, Wu S T, Wang A H, Subramanian P, Howard R A 2003 *J. Adv. Res.* **598** 1392
- [47] Cho K S, Lee J, Moon Y J, Dryer M, Bong S C, Kim Y H, Park Y D 2007 *Astron. Astrophys.* **461** 1121
- [48] 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
- [49] Feng S W, Chen Y, Kong X L, Li G, Song H Q, Feng X S, Ying Liu 2012 *Astrophys. J.* **753** 21

Statistical analysis of the relationship between type II radio enhancement and solar energetic particle event*

Zhou Kun-Lun¹⁾ Ding Liu-Guan^{1)2)3)†} Qian Tian-Qi¹⁾ Zhu Cong¹⁾
Wang Zhi-Wei¹⁾⁴⁾ 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*)

4) (*China Polar Research Center, Shanghai 200000, China*)

(Received 7 January 2020; revised manuscript received 8 May 2020)

Abstract

In this paper, we investigated 82 type-II radio burst events detected by some ground stations Learmonth, YNAO, and BIRS and spacecraft Wind/WAVES, STEREO/WAVES from January 2007 to December 2015. And we identified 39 events associated with radio enhancement and 43 events without enhancement. We found that: 1) The CME velocity, mass, kinetic energy and flare class with respect to type II radio enhancement events were generally higher than that of no enhancement events, and these properties in the solar energetic particle (SEP) events were significantly higher than that no SEP event, regardless of whether radio enhancement or not. 2) As shown in the characteristic time analysis, the initial release time of SEPs is generally earlier than the start time of radio enhancement, so we can the radio enhancement is only as a signature of the shock enhancement rather than the direct generator of SEP events. 3) Whether radio enhancement or not, the onset height of type IIs associated with SEP event is slightly lower than that of event without SEP. For the absence height, the SEP events are significantly higher than the no-SEP events, and that the absence height of enhancement events are also distinctly higher than that non-enhancement events, which reveals that the enhanced CME shock characterized by enhanced radio burst can keep propagating to more higher or further space. 4) When one fast and wide CME fully sweeps over another slow and narrow preceding CME, CME interaction can more easily generate radio enhancement, but no distinctive difference between SEP events and non-SEP events. So the results of this paper reveal that radio enhancement can be regarded as a manifestation of CME shock becoming strong during interacting with other CME, and the enhanced shock can accelerate the particle to generate large SEP events more easily. However, the type II radio enhancement is not the direct producer or causer that generate large SEP event.

Keywords: type II radio burst, radio enhancement, solar energetic particle (SEP), shock enhancement

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

DOI: [10.7498/aps.69.20200041](https://doi.org/10.7498/aps.69.20200041)

* Project supported by the Program of Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. U1731105), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant No. BK20171456), the Specialized Research Fund for Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, the National Key R&D Program of China (Grant Nos. 2018YFC1407304, 2018YFF01013706), and the Foundation of National Key Laboratory of Electromagnetic Environment, China (Grant No. 201801003).

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