

## II型射电暴分类及其与太阳高能粒子事件的关系

朱聪 丁留贯 周坤论 钱天麒

### Statistical analysis of characteristics of classified type II radio bursts and their associated solar energetic particle events

Zhu Cong Ding Liu-Guan Zhou Kun-Lun Qian Tian-Qi

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 099601 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20201800

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201800>

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

#### 基于射电观测的日冕物质抛射驱动激波的统计特征研究

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

物理学报. 2019, 68(13): 139601 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190223>

#### II型射电暴射电增强与太阳高能粒子事件关系的统计

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

物理学报. 2020, 69(16): 169601 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200041>

#### 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>

#### 激波冲击作用下液膜破碎的气液两相流

Gas-liquid two-phase flow of liquid film breaking process under shock wave

物理学报. 2020, 69(24): 244702 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201051>

#### 纵向磁场抑制Richtmyer-Meshkov不稳定性机理

Mechanism of longitudinal magnetic field suppressed Richtmyer-Meshkov instability

物理学报. 2020, 69(18): 184701 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200363>

#### 点缺陷调控: 宽禁带II族氧化物半导体的机遇与挑战

Point defects: key issues for II-oxides wide-bandgap semiconductors development

物理学报. 2019, 68(16): 167802 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191043>

## II 型射电暴分类及其与太阳高能粒子事件的关系\*

朱聪<sup>1)</sup> 丁留贯<sup>1)2)3)†</sup> 周坤论<sup>4)</sup> 钱天麒<sup>1)</sup>

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) (广西区气象技术装备中心, 南宁 530022)

(2020 年 10 月 29 日收到; 2020 年 12 月 17 日收到修改稿)

基于 Wind, STEREO 等卫星联合观测资料, 选取第 24 太阳活动周 2010 年 1 月至 2018 年 3 月共计 273 个 II 型射电暴事件, 按起始-结束频率对事件进行分类, 统计分析各类 II 型射电暴观测特性差异及其伴随的日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 与太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP) 事件之间的关联. 研究结果显示: 1) 每一类 II 型射电暴事件中, SEP 事件对应的 CME 角宽、速度、质量、动能及耀斑等级均普遍大于不产生 SEP 的事件, 表明 SEP 事件的产生需要快速大角宽且高能的 CME; 2) 相比从 DH 波段开始的 II 型射电暴, 从米波段开始的 II 型射电暴伴随大 SEP 事件的比例更高, 多频段 II 型射电暴事件比单频段事件更容易产生 SEP 事件, 其中 M-DH-KM II 型射电暴伴随 SEP 事件比例最高 (73%), DH IIs only 类最低 (19%); 3) 同一类 II 型射电暴中, 有 SEP 事件产生的 II 型射电暴比无 SEP 的事件具有更高的起始频率 (更低的激波形成高度)、更低的结束频率 (更高的结束高度)、以及更长的持续时间, 容易产生 SEP 事件 (尤其是大型 SEP 事件) 的日冕激波普遍在较低高度开始形成 (如小于  $3R_s$ ,  $R_s$  为太阳半径), 且能维持到很高的高度 (如大于  $30R_s$ ); 4) II 型射电暴持续时间和结束频率呈很强的负相关 ( $cc = -0.93$ ), 产生 SEP 事件的比例随 II 型射电暴持续时间增加而明显增大, 随结束频率增加而明显降低, 且很大程度上取决于 CME 的速度等参数. 本文结果进一步表明, SEP 事件产生与否与 II 型射电暴种类及特性明显相关, II 型射电暴起始频率越高、结束频率越低, 如 M-DH-KM II 型射电暴, 其 CME 在很低高度驱动形成激波并传播至很高高度, 激波持续时间越长, 加速粒子时间越长, 产生 SEP 事件 (尤其是大 SEP 事件) 的概率也就越大.

关键词: II 型射电暴, 太阳高能粒子, 日冕物质抛射, 激波

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

DOI: 10.7498/aps.70.20201800

## 1 引言

太阳耀斑和日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 是剧烈的太阳活动现象. 耀斑是太阳大气局部突然变亮的活动现象, 并伴随着粒子发射. CME 是太阳大气中出现的大规模的物质快速

抛射现象. 在太阳爆发过程中, 常伴随射电辐射, 因此射电观测通常作为研究太阳爆发及相关物理过程的重要观测手段. 太阳射电爆发可以提供日冕激波、磁场、密度分布和高能粒子加速等信息. 根据爆发的频率, 太阳射电爆发分为微波爆发 (简称微波暴) 和射电爆发 (简称射电暴), 大体上, 频率高于 1 GHz 的为微波暴, 低于 1 GHz 的为射电暴.

\* 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)、中国科学院暗物质与空间天文重点实验室开放课题和南京信息工程大学滨江学院院级科研课题 (2020 年) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: [dlg@nuist.edu.cn](mailto:dlg@nuist.edu.cn)

根据射电暴动态频谱形态特征可以分为 I, II, III, IV 和 V 型射电暴<sup>[1,2]</sup>.

Payne-Scott 等<sup>[3]</sup>在 200, 100 和 60 MHz 频率上发现一种具有慢速频率漂移特征的太阳射电暴, Wild 和 McCready<sup>[4]</sup>把这类特征的太阳射电暴称为 II 型射电暴. 目前通常认为 II 型射电暴是由于激波向外传播时引起等离子体振荡产生朗缪尔波, 并以本征等离子体频率或二倍频向外辐射的电磁波<sup>[5]</sup>. II 型射电暴按起始频率是否大于 14 MHz 分为米波 II 型射电暴和十米-百米波 (deca-hectometric, DH) II 型射电暴, 以及小于 1 MHz 的千米波 II 型射电暴<sup>[6]</sup>. 通常米波 II 型射电暴作为日冕激波出现的标志<sup>[4,7]</sup>, DH 波、千米波 II 型射电暴作为行星际激波出现的标志<sup>[8]</sup>.

Prakash 等<sup>[9,10]</sup>的研究表明米波 II 型射电暴与耀斑释放的能量有关, 而 DH 波 II 型射电暴往往与 CME 有关. 有 DH 波 II 型射电暴伴随的 CME 比无 II 型射电暴伴随的 CME 速度更快, 角宽更大<sup>[11]</sup>. 此外, 相比米波 II 型射电暴, 与 DH 波 II 型射电暴相关的 CME 质量更大, 动能更高<sup>[12]</sup>.

耀斑和 CME 都能产生太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP), SEP 辐射会对地球周围太空的航空航天和生产活动造成很大的危害. 一般来说, SEP 事件按照加速源不同分为两类: 脉冲型 SEP 事件和缓变型 SEP 事件, 其中脉冲型 SEP 事件中的粒子是由耀斑加速的, 缓变型 SEP 事件是由 CME 驱动的激波产生的. 与脉冲型 SEP 事件相比, 缓变型 SEP 事件通常具有更显著的观测特征, 如峰值通量高、粒子能量高、持续时间长等<sup>[13-16]</sup>. 有研究表明, 缓变型 SEP 事件的强度和 CME 速度呈正比, 但是, 数据点较分散, 即同一个 CME 速度对应的粒子强度可以变化几个数量级<sup>[15,16]</sup>. 这表明, 除 CME 激波速度外, 激波强度和激波扫过区域的种子粒子数量可能是决定 SEP 事件强度和谱的另一个因素<sup>[17,18]</sup>. 一般而言, 大 SEP 事件 (如  $I_p \geq 10$  pfu,  $1 \text{ pfu} = 1 \text{ proton}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{sr})$ ) 通常与快而宽的 CME 爆发事件相关, 但不是所有快而宽的 CME 都能产生 SEP 事件. 于是, 决定 CME 产生 SEP 事件的多种因素被提出, 如日冕激波的强度、激波与 CME 的相互作用、twin-CMEs 等<sup>[19,20]</sup>. 此外, 也有研究认为更高能量的 SEP ( $> 30 \text{ MeV}$ ) 主要是由太阳耀斑加速产生的, 而 CME 激波加速通常只对较低能量的 SEP 有贡献<sup>[21-24]</sup>.

2003 年, Gopalswamy 等<sup>[25]</sup>指出, 伴随 II 型射电爆发的大多数 CME 通常也同时伴随大 SEP 事件, 即大 SEP 事件通常与 CME 驱动的激波相关<sup>[26]</sup>. Gopalswamy 等<sup>[27]</sup>将一个跨越米波、DH 波和千米波频段的 II 型射电暴称为 M-DH-KM II 型射电暴, 并且无 II 型射电暴、米波 II 型射电暴、DH II 型射电暴和 M-DH-KM II 型射电暴伴随 CME 的动能呈现依次增大的趋势, 而 78% 的 M-DH-KM II 型射电暴与 SEP 事件有关, 未产生 SEP 的部分 M-DH-KM II 型射电暴其太阳源区似乎呈现较差的 SEP 磁连接条件. 磁连接条件是指 SEP 的源区 (日面源区、II 型射电暴源或激波) 与观测点 (卫星) 之间磁力线联接的好差, 常用于分析 SEP 的传播与观测, 若观测点所在行星际磁力线的日面足点与源区较远, 不利于高能粒子从源区传播到观测位置, 则称 SEP 磁连接条件较差, 反之称 SEP 磁连接条件较好. Winter 和 Ledbetter<sup>[28]</sup>的研究也表明, 所有峰值大于 15 pfu 的大 SEP 事件全部伴随 DH 波 II 型射电暴. 陈玉林等<sup>[29]</sup>认为有米波和 DH 波 II 型射电暴伴随的 CME 有更高的概率产生 SEP 事件. 此外, 还有研究表明, 存在少数较小的 SEP 事件观测不到明显的 II 型射电暴, 这类事件称为 RQ (radio quiet) 事件<sup>[30]</sup>.

目前对 II 型射电暴与 SEP 之间关系的研究已经比较深入, 但是按 II 型射电暴不同类型进行分类比较的研究较少. 同时, 由于太阳爆发源区与观测卫星相对位置及磁连接条件对此研究的影响, 多卫星多经度联合观测可在一定程度上降低由于磁连接较差导致的事件遗漏情况. 本文主要研究不同类型 II 型射电暴的观测特征及其与 SEP 事件的关系, 探讨不同类型 II 型射电暴对应的 CME 激波对 SEP 加速效果的差异及可能原因分析. 以上问题的解决有助于进一步理解 II 型射电暴与 SEP 事件之间的关联以及激波加速产生 SEP 的物理机理.

## 2 数据来源及处理

综合多个卫星 (Wind/WAVES, STEREO/WAVES) 及地面台站 (Learmonth, Culgoora, SS RT, YNAO 等) 射电观测资料, 本文筛选出 2010 年 1 月至 2018 年 3 月间 273 个 (0.02—450 MHz) 可以清晰地识别射电频谱结构的 II 型射电暴. 在确定 II 型射电暴与 CME 一一对应方面, 采用文

献 [31, 32] 方法进行处理; 并结合 SOHO/LASCO, SDO/AIA 和 STEREO A (B)/SECCHI, EUVI 仪器视频、耀斑相关信息以及卫星位置对 CME 进行核对. 事件对应 CME 的速度 ( $v$ )、质量 ( $m$ )、动能 ( $E_k$ )、加速度 ( $a$ )、中心角 (CPA) 和角宽 (WD) 等参数均取自 CDAW 数据库 ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list)). 耀斑等级、活动区位置信息取自 CDAW, LMSAL ([https://www.lmsal.com/solarsoft/latest\\_events\\_archive.html](https://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html)) 以及 Solar Monitor (<https://solarmonitor.org>).

本文的 SEP 数据来源于 STEREO-A(B)/HET (23.8—60 MeV) 和 SOHO/COSTEP EPHIN (25—53 MeV), 并采取文献 [33, 34] 的方法处理 SEP 事件强度. 在 HET 观测的峰值通量和修正后的 EPHIN 峰值通量中选择最大值作为 SEP 事件的峰值强度 ( $I_p$ ), 并以  $0.0114 \text{ (cm}^2\cdot\text{s}\cdot\text{src}\cdot\text{MeV)}^{-1}$  作为大 SEP 事件 (large SEP) 的判断阈值.

SEP 在近太阳附近释放时刻 (solar particle release time, SPR) 的估算采用速度离散分析方法 [35—37], SEP 起始释放高度 ( $H_{\text{SPR}}$ ) 对应于高能粒子 SPR 时刻的 CME 前沿高度. 对于大多数 II 型射电暴而言, 射电辐射源主要分布在 CME 激波前沿鼻区, 即 II 型射电暴的产生高度与 CME 激波前沿高度接近 [38]. 本文通过对 CME 的高度-时间观测数据进行线性拟合, 并假设 II 型射电暴相应时刻对应的 CME 前沿高度近似为此时的激波前沿高度. 由于日冕激波和 CME 前沿之间存在等离子体鞘层, 两者之间的距离称为脱体距离 (standoff distance), 所以激波前沿的实际高度应略高于 CME 前沿高度 [39].

### 3 统计结果

SEP 事件与 II 型射电暴呈强相关性, 预处理的候选样本中大约有 97% 的 SEP 事件伴随明显的 II 型射电暴, 约 3% 的 SEP 事件未观测到 II 型射电暴. 为了研究 SEP 事件的观测特征与 II 型射电暴的关联, 探讨不同类型 II 型射电暴及对应的 CME 和耀斑对 SEP 事件的影响, 将所有 II 型射电暴事件按起始-结束频率波段分为五类: 1) G1, 米波 II 型射电暴 (M IIs only, 14—450 MHz); 2) G2, DH 波 II 型射电暴 (DH IIs only, 1—14 MHz); 3) G3, M-DH 波 II 型射电暴 (M-DH IIs, 1—450 MHz);

4) G4, DH-KM 波 II 型射电暴 (DH-KM IIs, 0.02—14 MHz); 5) G5, M-DH-KM 波 II 型射电暴 (M-DH-KM IIs, 0.02—450 MHz). 本文分别对五类 II 型射电暴及其对应的 CME, 耀斑参数进行分析, 探讨不同类型事件产生的 SEP 事件及其对应 CME, 耀斑和 II 型射电暴的统计特征差异.

#### 3.1 II 型射电暴伴随 SEP 事件的分类统计

表 1 为五类 II 型射电暴伴随 SEP 事件的统计表. 本文所有 II 型射电暴事件 (All) 样本数共 273 个, 其中 M IIs only (G1) 107 个、DH IIs only (G2) 32 个、M-DH IIs (G3) 36 个、DH-KM IIs (G4) 38 个和 M-DH-KM IIs (G5) 60 个; 所有统计样本中, 伴随 SEP 事件发生的有 109 个, 无 SEP 事件伴随的有 164 个. 整体上看, 除 G5 (SEP 事件 44 个, 无 SEP 事件 16 个) 外, 其余四类 II 型射电暴伴随 SEP 事件数明显少于无 SEP 事件数; 五类事件中大 SEP 事件/SEP 事件/无 SEP 事件数分别为 G1 (13/27/80), G2 (3/6/26), G3 (12/16/20), G4 (13/16/22) 和 G5 (40/44/16). 伴随 SEP 事件和大 SEP 的比例分别为 G1 (25% 和 12%), G2 (19% 和 9%), G3 (44% 和 33%), G4 (42% 和 34%) 和 G5 (73% 和 67%), 特别地, G5 中产生大 SEP 事件的比例超过了 2/3, 且产生 SEP 事件的比例达到了 73%, 远远大于其他四类事件, 这和 Gopalswamy 等 [27] 得到的 78% 的 M-DH-KM IIs (0.02—180 MHz) 与 SEP 事件相关的结果基本一致. 多频段 II 型射电暴产生 SEP 事件的比例明显高于单频段 II 型射电暴事件, 如三频段事件 (G5)

表 1 II 型射电暴伴随 SEP 事件的统计表  
Table 1. SEP events associated with different group of type II radio bursts.

事件类型	G1	G2	G3	G4	G5	All
IIs事件数	107	32	36	38	60	273
无SEP事件数	80	26	20	22	16	164
SEP事件数	27	6	16	16	44	109
SEP事件占比/%	25	19	44	42	73	40
大SEP事件数	13	3	12	13	40	81
大SEP事件占比/%	12	9	33	34	67	30
SEP事件强度均值	0.53	0.02	0.49	4.89	38.74	16.41
SEP事件强度中值	0.01	0.01	0.2	0.24	0.53	0.09
大SEP事件强度均值	1.09	0.04	0.65	6.02	42.62	22.28
大SEP事件强度中值	0.13	0.02	0.33	0.25	0.6	0.34

高于两频段事件 (G3, G4)、两频段事件高于单频段事件 (G1, G2). 由表 1 可以看出, 除 M-DH-KM IIs 外, 其他各类事件中的 SEP 事件比例低于 50%, SEP 事件样本数较少 (尤其 G2 中只有 6 个 SEP 事件), 故在统计分析时未分析 SEP 事件和无 SEP 事件的分布规律差异, 本文只对均值和中值进行统计对比分析.

此外, 对比 G1, G3, G5 三种类型产生 SEP 事件和大 SEP 事件的比例及对应事件强度可知, 从米波段开始的 II 型射电暴, 其结束频段越低, 产生 (大) SEP 事件的可能性就越大, 产生的 (大) SEP 事件的强度也越大; 对比 G2, G4 两类可知, 从 DH 波段开始的 II 型射电暴, 其结束频段越低, 产生 (大) SEP 事件的可能性同样越大, 产生的 (大) SEP 事件强度也越大. 比较 G2, G3 和 G4, G5, 同样的

结束频段, 则起始频段越高, 产生 SEP 事件的比例就越高, SEP 事件强度越大. 由表 1 可以看出, CME 爆发伴随的 II 型射电暴起始频段越高且结束频率能持续到较低频段, 如 M-DH-KM IIs, 产生 SEP 事件 (尤其是大 SEP 事件) 的概率就越高. 这可以理解为从米波段开始的 II 型射电暴预示着激波在更低的高度形成, 且一直维持到很高高度, 一方面激波面可以扫过更多的种子粒子, 另一方面激波加速粒子的时间更长, 这样的条件有利于 SEP 事件的产生, 尤其是大 SEP 事件.

### 3.2 CME 和耀斑属性

#### 3.2.1 CME 速度、角宽、质量和动能

图 1 为 II 型射电暴对应 CME 的速度、角宽、质量和动能统计直方图, 红色为有 SEP 事件, 蓝色

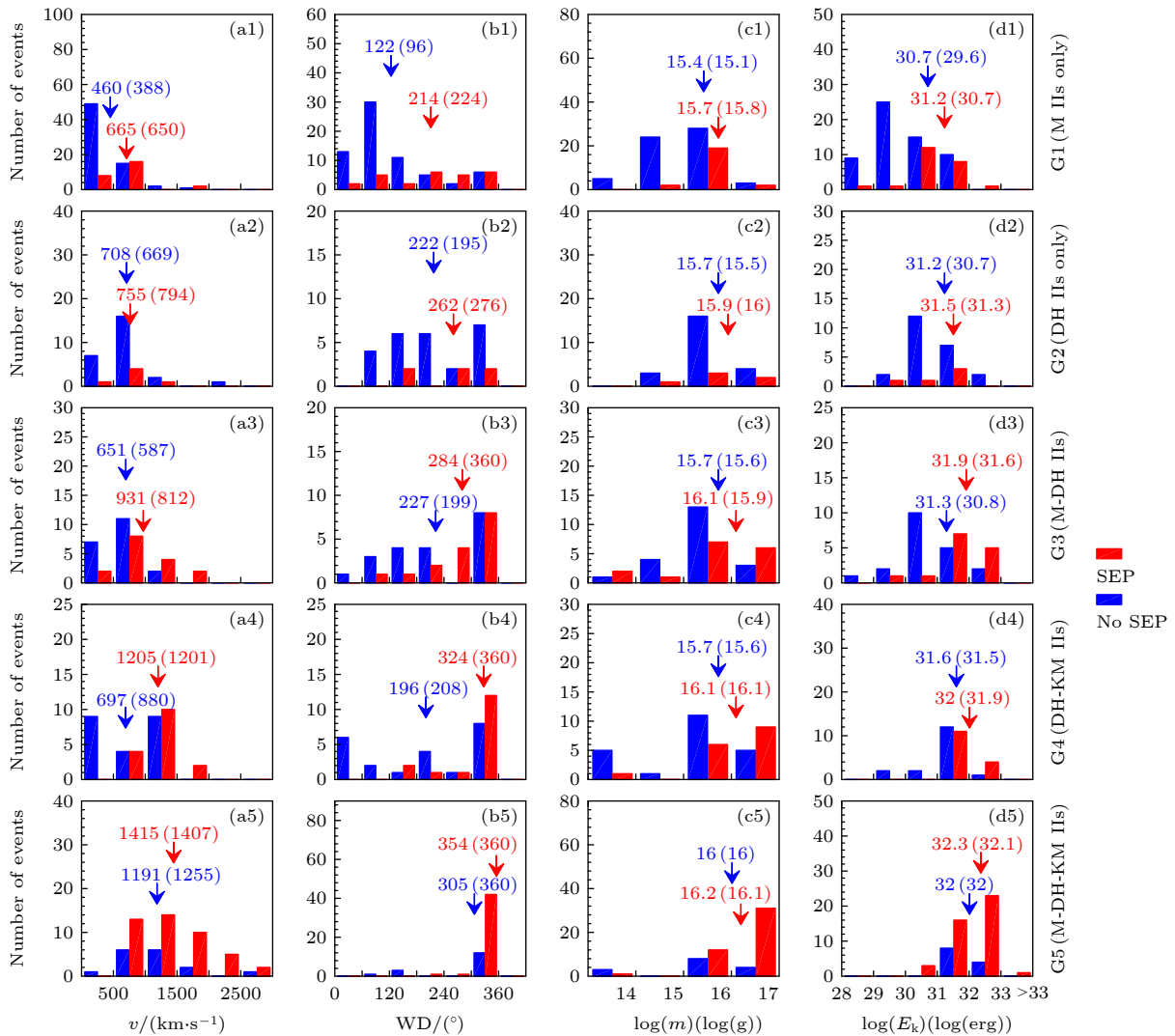


图 1 CME 速度、角宽、质量和动能统计直方图

Fig. 1. Histogram of CME speed ( $v$ ), angular width (WD), mass ( $m$ ) and kinetic energy ( $E_k$ ).

为无 SEP 事件, 数字代表对应参数的均值 (中值). 图 1 中直方柱高度代表当前区间内两类事件数的多少, 这与区间内的总样本数有关, 并不代表当前区间内产生 SEP 事件的占比 (下同). 由图 1 可知, 从整体上看, 五种类型 II 型射电暴对应的 CME 参数, 产生 SEP 事件的 CME 速度、角宽、质量、动能等明显高于无 SEP 产生的事件. 特别地, 有 SEP 产生的事件中, 除了 M-DH IIs (G3) 和 DH-KM IIs (G4) CME 质量相当外, CME 的 (均值) 速度、角宽、质量和动能从小到大依次均为 G1, G2, G3, G4, G5. 尤其是达到 KM 波段的 II 型射电暴 (G4 和 G5) 对应的 CME 各参量明显高于达到 DH 波段的 II 型射电暴 (G2 和 G3), 即能够到达 KM 波段的 II 型射电暴对应的 CME 更高能.

对比五种不同类型的 II 型射电暴可知, 有 SEP 事件产生的 CME 比无 SEP 事件的具有更大的角宽、更高的速度、更大的质量和动能. 显然, 若 CME 具有更大的角宽、速度、质量和动能, 则容易在更大的高度范围内驱动激波加速粒子, 更易产生 SEP 事件, 同时伴随从高频向更低频漂移的 II 型射电暴.

### 3.2.2 耀斑等级和特征时间

活动区爆发时耀斑和 CME 几乎是同时出现的, 一般耀斑等级越高表示太阳源区爆发和能量释放越剧烈, 伴随发生的 CME 的速度也更高, 更易驱动日冕激波, 而且激波也更强. 图 2 为耀斑等级统计直方图, 红色为有 SEP 事件, 蓝色为无 SEP 事件. 从整体上看, 产生 SEP 事件的耀斑等级普遍高于无 SEP 事件的. 对比图 2(b)、图 2(d)、图 2(f) (G1, G3, G5), 从米波段开始的 II 型射电暴事件, 伴随耀斑等级随着 II 型射电暴结束频段的降低而增加 ( $G1 < G3 < G5$ ), 而从 DH 波段开始的 II 型射电暴 (G2 和 G4) 则相反 (图 2(c)、图 2(e)). 在结束频段相同的情况下, 起始频段越高, 耀斑等级越大 (如  $G2 < G3, G4 < G5$ ). 另外, 无论有/无 SEP 发生, M-DH-KM IIs (G5) 类事件对应耀斑等级 (M7.1/M6.9) 均明显高于另外四类事件; 而 M IIs only (G1) 对应耀斑等级 (M1.1/C6.5) 最小. 从耀斑等级可以看出, M-DH-KM IIs 对应的太阳爆发在五种 II 型射电暴事件中最强烈, CME 驱动激波最强, 传播空间范围也应最广, 这与其产生 SEP 事件的概率最高相符合.

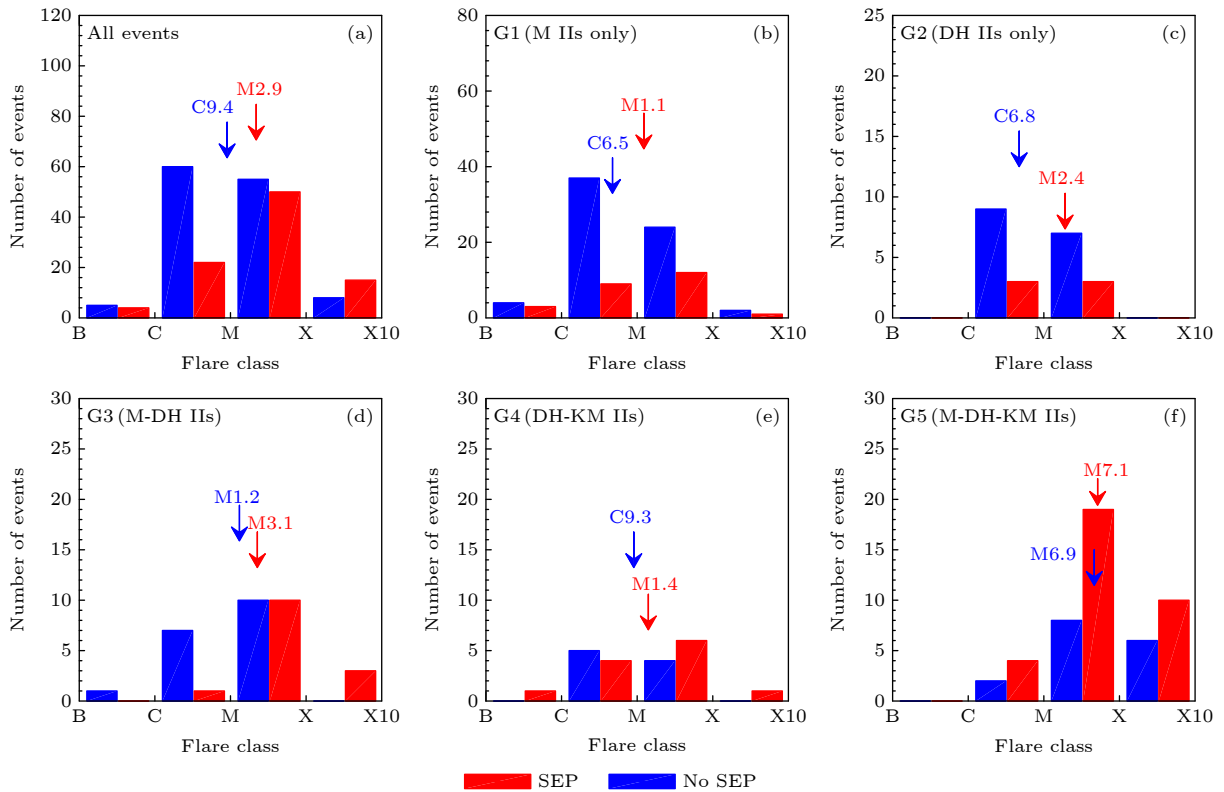


图 2 耀斑等级统计直方图

Fig. 2. Histogram of solar flare classes.

表 2 为耀斑特征时间统计表, 其中  $T_1$  为耀斑起始与峰值之间的时间间隔 (上升相时间),  $T_2$  为耀斑起始与结束之间的时间间隔 (持续时间). 更长的上升相时间和持续时间通常代表耀斑具有更长的能量持续释放过程, 形成的激波可加速粒子到更快的速度 [40]. 结果显示, 起始于米波段的 II 型射电暴 M IIs only, M-DH IIs 和 M-DH-KM IIs,  $T_1$  均值 (中值) 分别为 G1 (14 (10)) < G3 (19 (16)) < G5 (46 (22)),  $T_2$  均值 (中值) 分别为 G1 (26 (19)) < G3 (32 (27)) < G5 (73 (49)). 而起始于 DH 波段的 II 型射电暴 DH IIs only 和 DH-KM IIs,  $T_1$  中值为 G2 (18) < G4 (23),  $T_2$  均值 (中值) 为 G2 (66 (33)) < G4 (70 (52)). 由表 2 可以看出, 无论是起始于米波段还是 DH 波段的 II 型射电暴, 结束频段越低, 对应耀斑爆发持续时间越长 (即耀斑起始时间到耀斑峰值或耀斑结束时间较长). 结合图 1 中 CME 属性, 综合分析表明, 当太阳耀斑爆发持续时间 ( $T_1$  或  $T_2$ ) 较长时, 通常会伴随速度更快、能量更高的 CME, 其驱动的激波可传播至更远的范围, 更容易产生 (大) SEP 事件, 同时伴随从高频持续到更低频段的 II 型射电暴.

表 2 耀斑特征时间统计表  
Table 2. Characteristic times of associated solar flares.

类型	$T_1/\text{min}$		$T_2/\text{min}$	
	均值	中值	均值	中值
G1: M IIs only	14	10	26	19
G2: DH IIs only	38	18	66	33
G3: M-DH IIs	19	16	32	27
G4: DH-KM IIs	35	23	70	52
G5: M-DH-KM IIs	46	22	73	49

### 3.3 II 型射电暴特征

#### 3.3.1 起始/结束频率

图 3(a) 为五类 II 型射电暴起始频率分布, 黑色空心圈为每个 II 型射电暴事件的起始频率; 图 3(b)—(f) 为 II 型射电暴起始频率统计直方图, 红色为 SEP 事件, 蓝色为无 SEP 事件. 从图 3(a) 可以看出, 在五类 II 型射电暴中, 开始于米波段的射电暴起始频率呈现 M IIs only > M-DH-KM IIs > M-DH IIs, 开始于 DH 波段的事件起始频率基本呈现 DH IIs only > DH-KM IIs. 对比图 3(b)—(f) 可以看出, 对于伴随 SEP 事件或无 SEP 事件的

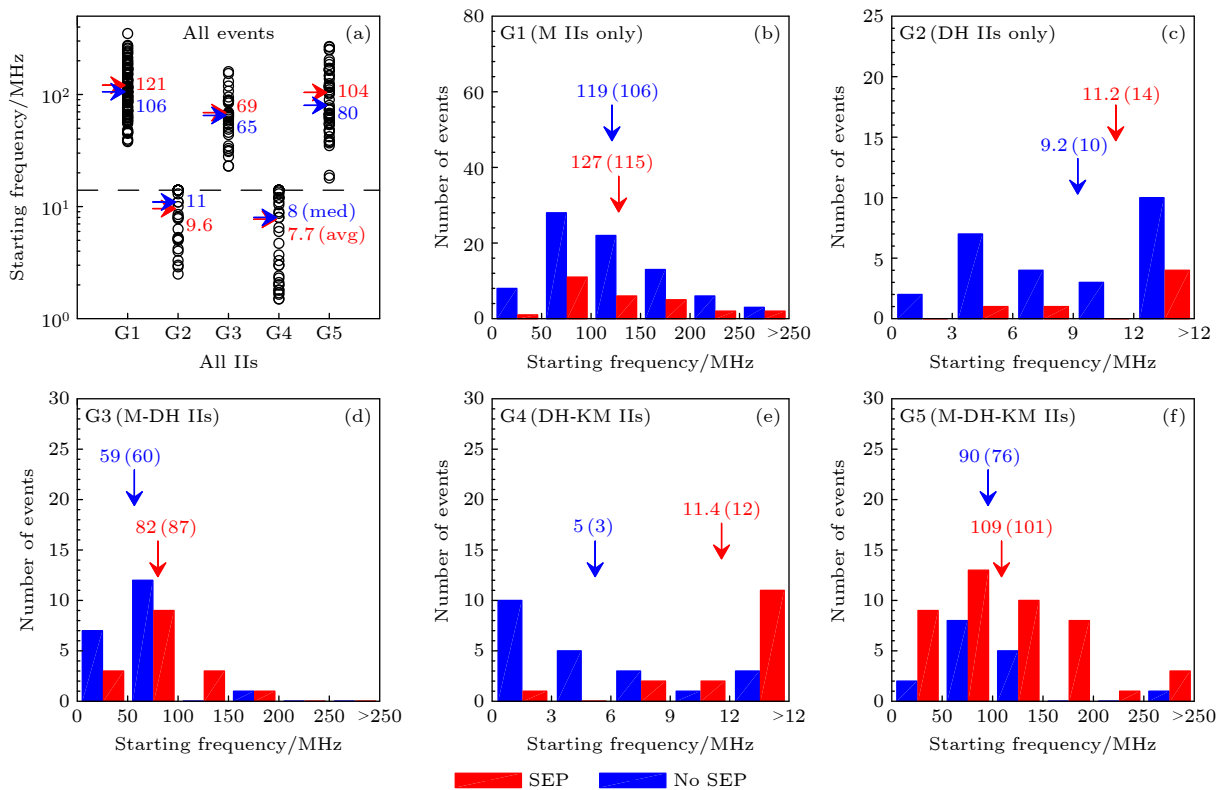


图 3 (a) II 型射电暴起始频率分布; (b)—(f) 五类 II 型射电暴起始频率统计直方图 (G1—G5)

Fig. 3. (a) Starting frequency distribution of type II radio bursts; (b)—(f) histogram of the starting frequencies of type II radio bursts for five groups (G1—G5).

II 型射电暴, 除呈现类似图 3(a) 中总体规律外, 还显示有 SEP 事件的射电暴起始频率均明显高于无 SEP 事件的, 表明同类 II 型射电暴中有 SEP 产生的事件具有更高的起始频率, 即起始频率高的 II 型射电暴更容易产生 SEP 事件.

图 4(a) 为五类 II 型射电暴的结束频率分布, 黑色空心圈为每个 II 型射电暴事件的结束频率; 图 4(b)–(f) 为 II 型射电暴结束频率统计直方图, 红色为 SEP 事件, 蓝色为无 SEP 事件. 由图 4(a) 中的结束频率可清晰辨别各类 II 型射电暴的结束频段, 与本文的分类一致, M IIs only 结束频率最高 (均值 57 (中值 52)), 其次是 M-DH IIs 和 DH IIs only, DH IIs 略低, 最后是 DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs, M-DH-KM IIs 最低 (0.25 (0.2)). 图 4(b)–(f) 显示, 总体上有 SEP 事件伴随的 II 型射电暴结束频率比无 SEP 事件的略低, 但同一类型 II 型射电暴差距不大.

综合图 3 和图 4 可知, 伴随 SEP 事件的 II 型射电暴通常具有更高的起始频率和更低的结束频率; 在同一类 II 型射电暴中, 能否产生 SEP 事件似乎很大程度上与射电暴起始频率相关, 即更高

起始频率的射电暴对应的太阳爆发更容易产生 SEP 事件.

### 3.3.2 持续时间

图 5(a) 为五类 II 型射电暴的持续时间分布, 黑色空心圈为每个 II 型射电暴事件的持续时间; 图 5(b)–(f) 为 II 型射电暴持续时间的统计直方图, 红色为有 SEP 事件, 蓝色为无 SEP 事件. 从图 5(a) 可以清晰地看出, 五类 II 型射电暴中, 持续时间最短的为 M IIs only, 最长的是 M-DH-KM IIs, G1–G5 依次增加, M IIs only (均值 8.9/中值 8) < DH IIs only (29/21) < M-DH IIs (46/39) < DH-KM IIs (402/239) < M-DH-KM IIs (663/507). 图 5(b)–(f) 显示, 比较有无 SEP 两类事件, 可以发现每种 II 型射电暴中有 SEP 事件伴随发生的 II 型射电暴持续时间均普遍大于无 SEP 事件的, 即伴随 SEP 事件的 II 型射电暴具有更长的持续时间. 特别地, G1, G2 和 G3 三类 II 型射电暴持续时间基本都在 1 h 以内, 而 G4 和 G5 两类事件的持续时间普遍长达数小时, 甚至十几个小时 (如 M-DH-KM IIs 中伴随 SEP 事件的).

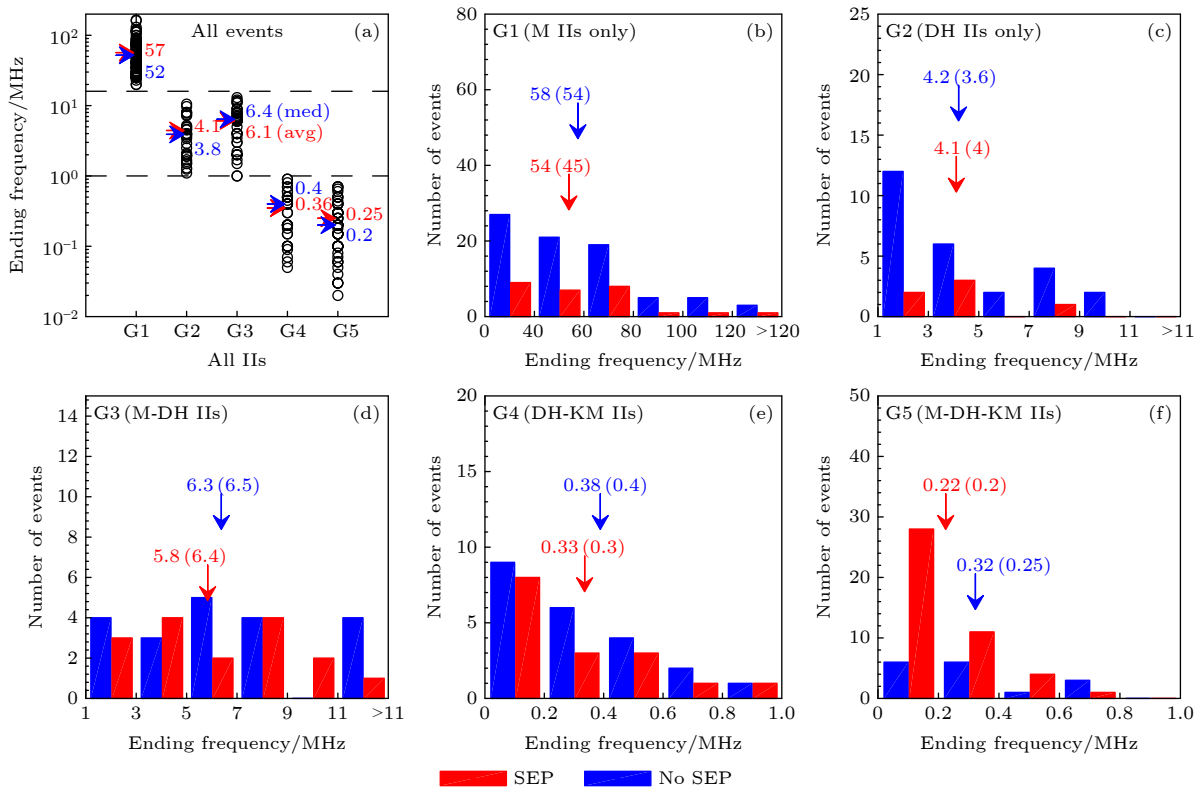


图 4 (a) II 型射电暴结束频率分布; (b)–(f) 五类 II 型射电暴结束频率统计直方图 (G1–G5)

Fig. 4. (a) Ending frequency distribution of type II radio bursts; (b)–(f) histogram of the ending frequencies of type II radio bursts for five groups (G1–G5).

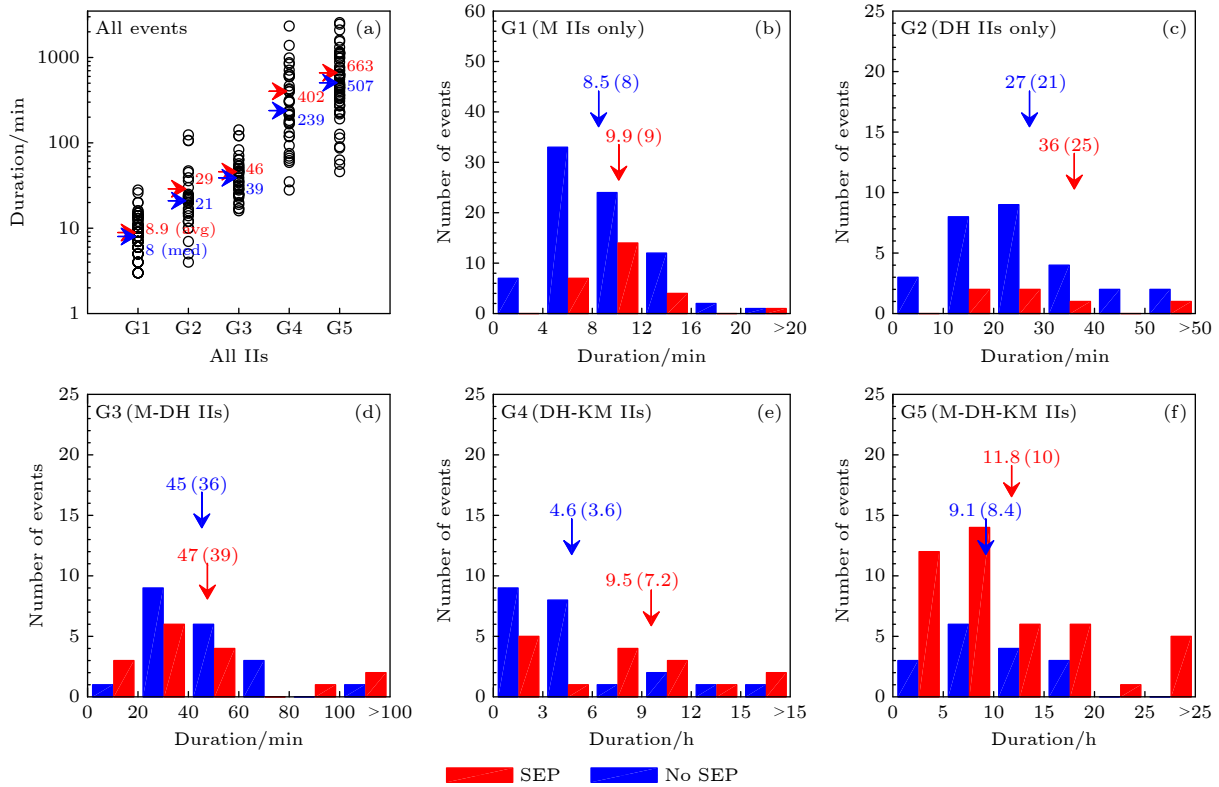


图 5 (a) II 型射电暴持续时间分布; (b)—(f) 五类 II 型射电暴持续时间统计直方图 (G1—G5)

Fig. 5. (a) Duration distribution of type II radio bursts; (b)–(f) histogram of the durations of type II radio burst for five groups (G1–G5).

图 6(a)—(e) 显示了 II 型射电暴持续时间与结束频率的关系, 空心圆为有 SEP 事件, 实心圆为无 SEP 事件, 图中的黑色虚线为 II 型射电暴持续时间与结束频率的拟合直线. 由图 6 可以看出, II 型射电暴持续时间与结束频率间具有很强的负相关, 相关系数达  $-0.93$ , 即 II 型射电暴结束频率越低, 持续时间越长, 反之越短, 其中有 SEP 事件伴随的事件相关系数达  $-0.96$ , 而无 SEP 伴随的事件相关系数略低, 为  $-0.89$ . 比较 II 型射电暴对应的 CME 参数分布可明显看出, 射电暴结束频率较高、持续时间较短的事件通常具有较小的 CME 速度、角宽、质量和动能, 而结束频率低、持续时间长的事件的这些参数通常较大. CME 的加速度对射电暴的持续时间和结束频率无明显影响. 图 6 中分布表明, 如果 II 型射电暴的持续时间足够长并一直持续很低的频率, 其对应的 CME 必须要有足够的能量才能驱动激波并维持很长时间.

图 6(f) 和图 6(g) 为 II 型射电暴持续时间和结束频率各区间产生 SEP 事件的百分比. 从图 6(f) 和图 6(g) 可以清晰地看到, 产生 SEP 事件的比例随 II 型射电暴持续时间增加而增大, 随结束频率

的增加而显著减小. 有 SEP 事件伴随的 II 型射电暴持续时间在几十分钟到几个小时的范围内都有分布, 但大部分集中在持续时间较长的范围内 (尤其是大 SEP 事件), 且具有较大的速度、质量和动能, 绝大部分为 halo CME (角宽  $360^\circ$ ). 结果还显示, 不产生 SEP 的事件大多对应的 II 型射电暴持续时间较短, 且对应的 CME 速度、角宽、质量、动能通常较低, 对速度的影响尤为突出. 在加速度的分布中, 产生 SEP 事件的 CME 加速度既有较大的也有较小的, 但对应的 CME 速度等都比较大, 且射电暴持续时间比较长. 也就是说, 要产生 SEP 事件, 尤其是大 SEP 事件, CME 需要具有较大的速度、角宽、质量和能量, 且伴随持续时间较长的射电暴, 而对 CME 加速度无明显要求.

### 3.3.3 II 型射电暴起始/结束高度

本文假定 II 型射电暴产生高度近似等于 CME 的前沿高度<sup>[38]</sup>. 图 7 为五类 II 型射电暴起始高度统计直方图, 红色为 SEP 事件, 蓝色为无 SEP 事件, 红色和蓝色数字代表 SEP 和无 SEP 事件起始高度的均值 (中值). 由图 7(a) 可知, II 型射电暴的

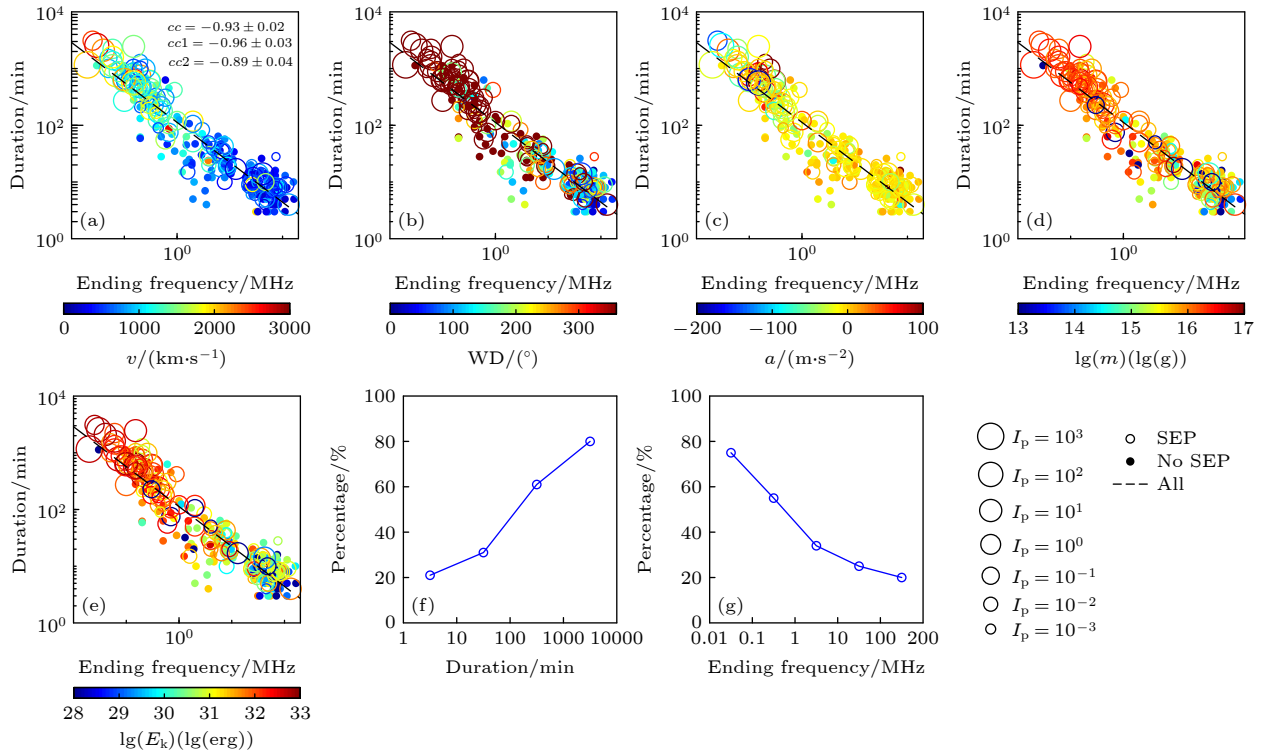


图 6 (a)–(e) II 型射电暴持续时间与结束频率关系; (f), (g) 持续时间和结束频率各区间 SEP 事件百分比  
 Fig. 6. (a)–(e) Relationship between duration and ending frequency of type II radio bursts; (f), (g) percentage of SEP events in each interval of duration and ending frequency.

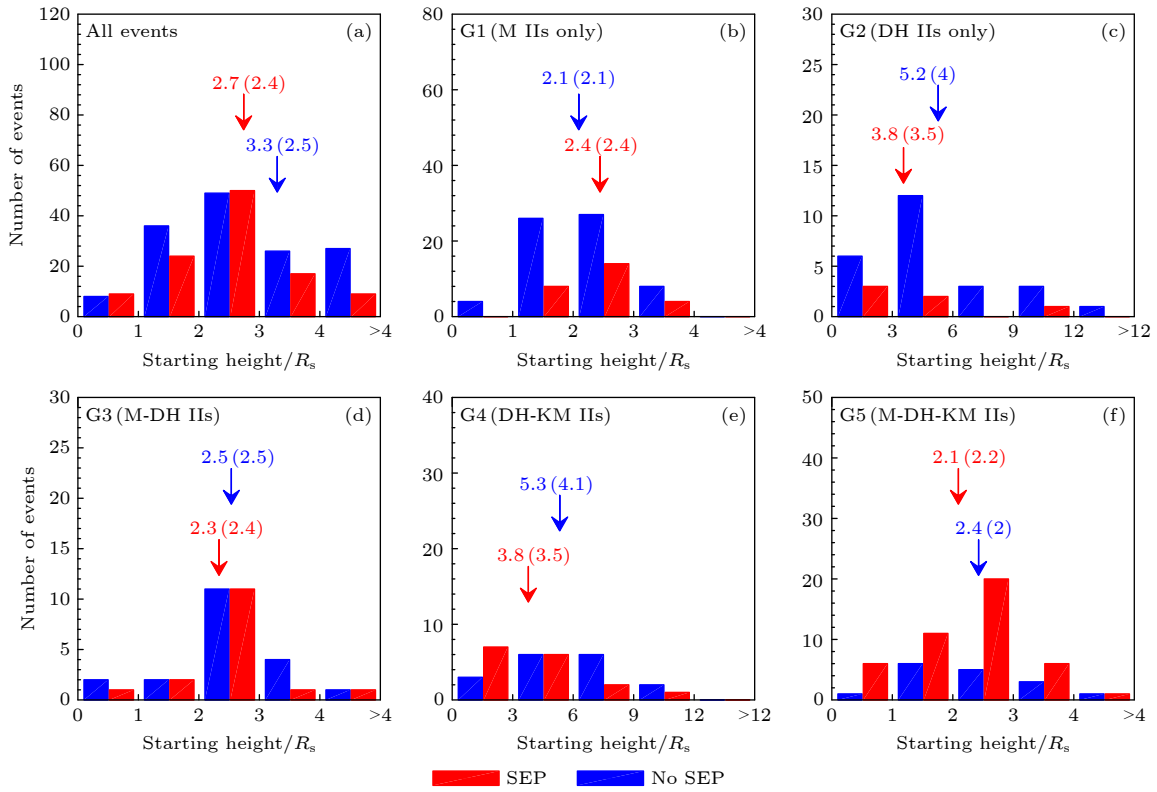


图 7 II 型射电暴起始高度的统计直方图  
 Fig. 7. Histogram of the starting heights of the different group of type II radio bursts.

起始高度主要分布在  $4R_s$  ( $R_s$  表示太阳半径) 以下, 伴随 SEP 事件的起始高度小于不产生 SEP 的事件 ( $2.7R_s < 3.3R_s$ ). 若考虑 II 型射电暴起始时刻激波与 CME 前沿的脱体距离 (约  $0.4R_s$ )<sup>[39,41]</sup>, 这一结果与 II 型射电暴起始时刻激波高度在  $3R_s$ — $4.5R_s$  的结果基本一致. 但有无 SEP 事件的分布基本无明显差别, 也就是说, 能否产生 SEP 事件不仅仅取决于激波产生的高度 (II 型射电暴起始高度), 还受其他因素影响, 如可被加速的粒子数量、粒子向外传播的磁场条件等. 除 M IIs only 外, 有 SEP 事件伴随的 II 型射电暴起始高度均值明显低于不产生 SEP 事件的. 此外, 起始于米波段的 II 型射电暴起始高度主要分布在  $3R_s$  以下, 而起始于 DH 波段的 II 型射电暴起始高度普遍介于  $3R_s$ — $12R_s$ .

图 8 为 II 型射电暴结束高度的统计直方图, 红色代表有 SEP 事件, 蓝色代表无 SEP 事件. 从图 8(a) 可以看出, 所有事件中伴随 SEP 事件的 II 型射电暴结束高度显著大于无 SEP 事件 (均值  $49 > 13$ ) 的, 且射电结束高度越高, 其伴随 SEP 事件产生的比例越高. 从图 8(b)—(f) 可以看出, 除 DH IIs only 以外, 其余四类伴随 SEP 事件的 II 型射电暴结束高度普遍大于不产生 SEP 事件的.

G1, G2 和 G3 中的 II 型射电暴结束高度普遍在  $10R_s$  以下, 而 G4 和 G5 中的 II 型射电暴结束高度绝大部分都超过  $10R_s$ , 特别地, M-DH-KM IIs 中伴随 SEP 事件的结束高度均值达  $94R_s$ .

综合图 7 和图 8 可得, 相比于不产生 SEP 的事件, 有 SEP 事件产生的 II 型射电暴起始高度较低而结束高度较高, 也就是说, 这些事件中激波在较低的高度上形成, 并一直持续传播到很高的高度. 一方面说明这些事件中的激波很强, 另一方面也说明激波扫过的区域更大, 被激波加速的粒子更多, 从而产生更强的 SEP 事件.

### 3.3.4 射电暴 (激波) 维持高度分布

为了更好地分析 II 型射电暴 (激波) 的高度与 SEP 事件产生概率之间的关系, 把 II 型射电暴从开始到结束时间段内 CME 前沿传播到达的每一个高度定义为维持高度, 即 CME 前沿在射电暴持续时间内经过的任意高度都是维持高度. 直方图分析中, 任意一个事件会在其 CME 传播经过的每一个高度区间内被统计一次, 结果如图 9 所示, 红色代表有 SEP 事件, 蓝色代表无 SEP 事件, 折线显示了每个区间产生 SEP 事件的百分比. 图 9(a)

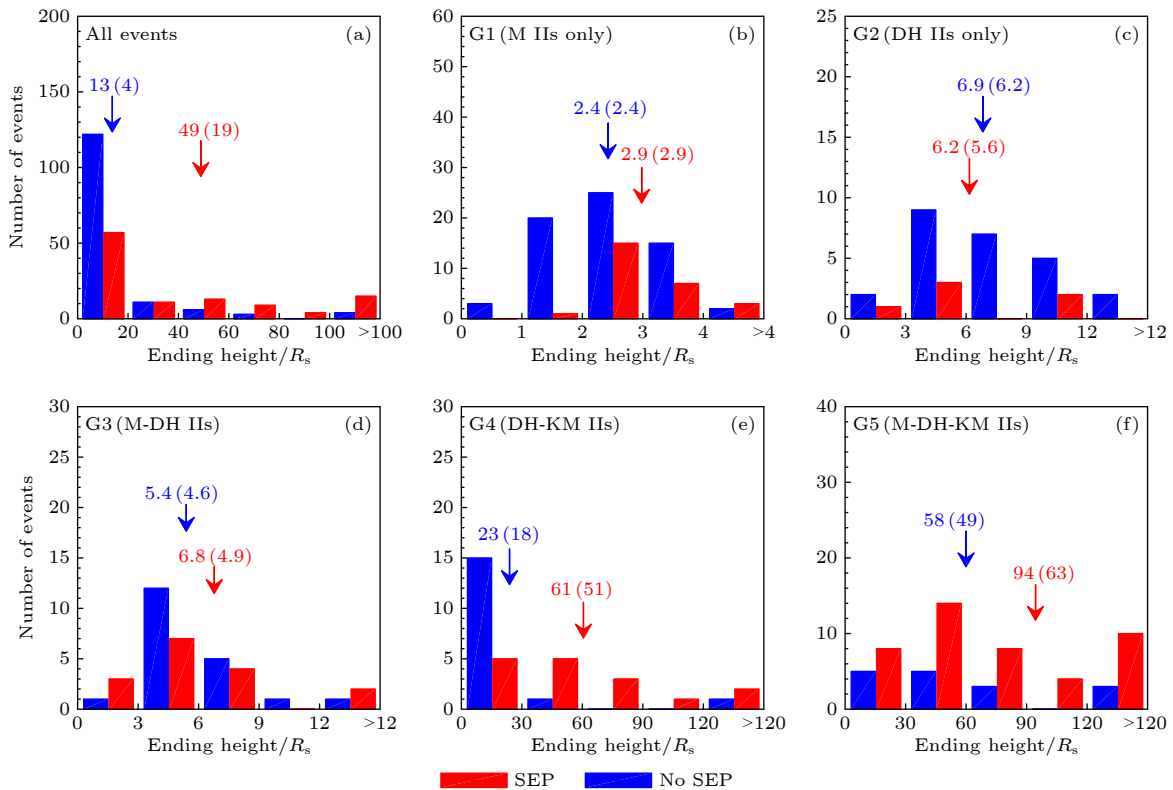


图 8 II 型射电暴结束高度的统计直方图

Fig. 8. Histogram of the ending heights of the different group of type II radio bursts.

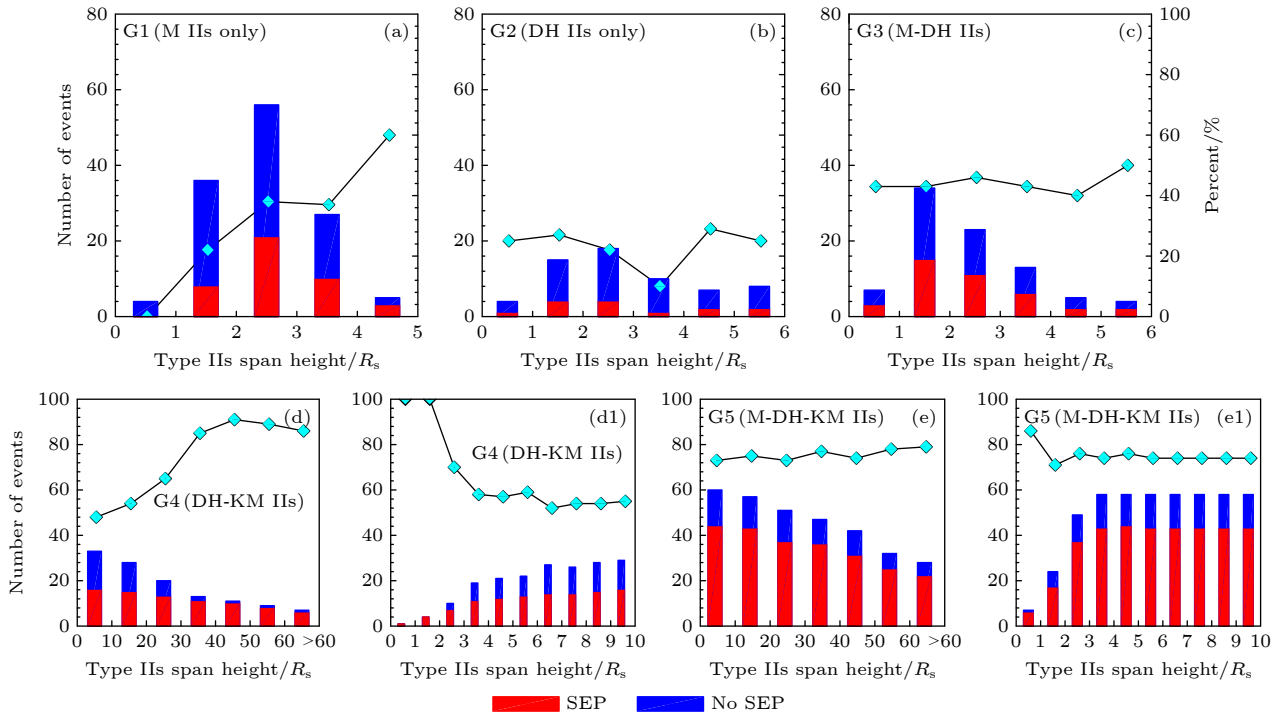


图 9 II 型射电暴维持高度统计直方图

Fig. 9. Histogram of the sustained heights of the type II radio bursts.

显示, M IIs only 中伴随 SEP 事件的比例随着维持高度的增加而增加, 其中只有很少的 SEP 事件能维持到  $4R_s$  以上 (3/27), 大部分 SEP 事件的 II 型射电暴能在  $2R_s$ — $4R_s$  维持. DH IIs only 事件中产生 SEP 事件的比例在各维持高度上都很低, 约为 20% (图 9(b)). M-DH IIs, DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 中 II 型射电暴伴随 SEP 事件的概率总体上随维持高度呈增加趋势 (图 9(c)—(e), 其中图 9(d) 和图 9(e) 为大区间间隔分析); 两类事件 (有 SEP 事件、无 SEP 事件) 总数大致随维持高度增加而减少, 即能维持到较高高度上的射电暴较少, 如 G3 在  $R_s$ — $6R_s$  从最高 34 减少到 4 个事件, G4 中能维持到  $30R_s$  以上的事件占 34% (13/38), G5 中能维持到  $30R_s$  以上的事件占 78% (47/60). 从图 9(d) 和图 9(e) 可以看出, 在射电暴维持高度超过  $30R_s$  后其产生 SEP 事件的比例接近 80%. 通过对比可以看出, M-DH-KM IIs 维持到较高高度 (如  $30R_s$  以上) 的比例最高, 产生 SEP 事件的比例也最大 (表 1). 若对  $10R_s$  内的事件进行再分析 (如图 9(d1) 和图 9(e1), 小区间间隔分析) 会发现, 在 DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 中维持高度从小于  $3R_s$  开始的事件伴随 SEP 事件的比例明显高于其他几类事件. 显然, 越低维持高度区间内被统计的

事件表明其激波形成高度越低, 并一直传播到很高高度 (G4 和 G5 两类事件最低频率达到千米波段, 表示激波传播到了行星际), 这类事件属于很少数的超强事件, 其产生 SEP 的概率自然也更高. 图 9(a)—(e) 呈现的总体趋势体现了产生 SEP 事件要求激波传播到尽可能高的高度, 而图 9(d1) 和图 9(e1) 的结果体现了产生 SEP 事件要求激波具有较低的起始形成高度, 从而拥有足够长的粒子加速时间且能扫过更大空间范围内更多的种子粒子 (待加速粒子), 更有效地加速粒子至高能量, 更有利于 SEP 事件的形成. 因此, 这一结论进一步表明, 若 II 型射电暴 (激波) 能在较低高度 (如小于  $3R_s$ ) 形成后并一直维持到较高高度 (如大于  $30R_s$ ), 则其对应爆发产生 SEP 事件的概率会明显高于其他事件, 而这类爆发事件中的 CME 往往具有较高的速度、质量和动能等 (图 1 和图 6).

#### 4 结果及讨论

本文结合多卫星联合观测资料, 对第 24 太阳活动周 273 个 II 型射电暴事件进行统计, 并对比分析 M IIs only, DH IIs only, M-DH IIs, DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 五类 II 型射电暴与 SEP 事

件之间的关联. 通过分析各类 II 型射电暴特征参数、CME 参数及其与 SEP 事件之间的关系, 探讨伴随不同类型 II 型射电暴的 CME 产生 SEP 事件的观测特性差异及其可能的物理机理.

主要得到以下结论:

1) 五类 II 型射电暴中, 从米波段开始的 II 型射电暴更容易产生大 SEP 事件, 尤其是 M-DH-KM IIs 射电暴, 伴随 SEP 事件的比例达 73%, 明显高于其他几类事件, 其中 DH IIs only 伴随 SEP 事件的比例最低, 只有 19%.

2) M IIs only, DH IIs only, M-DH IIs, DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 五类 II 型射电暴对应 CME 的速度、角宽、质量和能量依次逐渐增大, 且每一类事件中产生 SEP 事件的 CME 参数均普遍大于不产生 SEP 的事件. 这表明, 不管伴随哪一类 II 型射电暴, SEP 事件的产生都需要快而宽的高能 CME. 五类事件中无论是起始于米波段还是 DH 波段的 II 型射电暴, 结束频率持续到越低的频段, 耀斑持续时间也就越长, 耀斑爆发等级越高. 这与耀斑和 CME 伴生关系一致, 即太阳耀斑越强, 持续时间越长, 与之伴随的 CME 通常也具有更快的速度、更高的能量, 且伴随各类 II 型射电暴, 尤其是延续到低频段的射电暴, 更容易产生 SEP 事件, 产生的 SEP 事件强度也越大.

3) 相比无 SEP 事件, 伴随 SEP 产生的 II 型射电暴通常具有较高的起始频率和较低的结束频率, 以及更长的持续时间, 其中 DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 两类事件中有 SEP 的事件持续时间可达数小时甚至十小时以上 (均值为 9.1 和 11.8 h). II 型射电暴的持续时间与结束频率呈现出很好的线性关系, 相关系数为  $-0.93$ , 且产生 SEP 事件的比例随着射电暴持续时间的增加而明显增加, 随着结束频率的增加而降低. 不产生 SEP 的事件主要对应结束频率高、持续时间短的射电暴, 同时对应 CME 的速度、质量以及动能等都较低. 结果显示, CME 的加速度对射电暴持续时间、是否产生 SEP 事件等无明显影响, 即是否产生 SEP 事件更多地取决于 CME 速度、质量、动能以及伴随 II 型射电暴的持续时间、频段跨度等.

4) II 型射电暴的起始高度主要分布在  $4R_s$  以下, 其中起始于米波段的 II 型射电暴起始高度主要在  $3R_s$  以下, 起始于 DH 波段的 II 型射电暴起始高度主要分布于  $3R_s$ — $12R_s$ . 各类事件中有 SEP

产生事件的起始高度低于无 SEP 产生事件的, 但有无 SEP 事件的分布之间无显著差异, 表明是否产生 SEP 事件不仅仅取决于是否有激波产生 (有无射电暴) 及激波开始形成的高度, 还受其他因素影响, 如种子粒子环境等.

5) M IIs only, DH IIs only 和 M-DH IIs 三类射电暴的结束高度基本不超过  $10R_s$ , 而 DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 的结束高度绝大部分超过  $10R_s$ , 甚至 M-DH-KM IIs 结束高度能达到  $100R_s$  以上, 其中能维持到  $30R_s$  上的事件约占 80%. 各类事件中, 产生 SEP 的 II 型射电暴结束高度均明显高于不产生 SEP 事件的, 且产生 SEP 事件的比例基本随着维持高度的增加而增加, 其中 DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 中能从  $3R_s$  以下一直维持到较高高度的事件产生 SEP 的比例明显高于其他类型的 II 射电暴.

通过以上研究, 可以进一步明晰 II 型射电暴与 SEP 事件发生之间的关联及物理机制. 在各类 II 型射电暴事件中, M-DH IIs, DH-KM IIs 和 M-DH-KM IIs 伴随产生 SEP 事件的比例明显高于其他两类 II 型射电暴, 其中 M-DH-KM IIs 事件比例又远高于其他四类事件, 其对应 CME 的速度、动能、射电暴持续时间、维持高度等也明显更高. 本文研究表明, 若太阳爆发活动中的 CME 具有较高的能量 (strong and energetic, 速度、角宽、质量、动能等参数体现), 伴随比较剧烈的长时间耀斑爆发 (long duration), 同时伴随有跨越多个波段的 II 型射电暴 (Multi-band IIs, 如 M-DH-KM IIs), 则此爆发事件具有更高的 SEP 事件发生概率. 这一系列的观测特征实际上反映出 CME 激波在较低高度 (如小于  $3R_s$ ) 形成后一直维持到较高高度 (如大于  $30R_s$ ), 其激波扫过的区域更大, 可被加速的粒子数量更多, 同时激波加速粒子的时间更长, 显然其具有更加优越的条件产生 (大) SEP 事件, 且产生 SEP 事件的概率也会大大高于其他类型的射电暴事件. 这一结果有助于更好地理解激波加速产生 SEP 事件的物理过程和观测特征及判断依据, 也有助于 SEP 事件的空间天气预报.

感谢以下数据网站提供本文观测数据: CME 列表及参数 ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/); <http://space-weather.gmu.edu/seeds/lasco.php>); 耀斑相关数据 (LMSAL, [http://www.lmsal.com/solarsoft/latest\\_events\\_arc](http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_arc)

hive.html; <https://solarmonitor.org/>); DH 波 II 型射电暴列表 ([https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/radio/waves\\_type2.html](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/waves_type2.html)); 米波射电观测数据 (Radio Monitoring: Learmonth, CULG, YNAO, [http://www.sws.bom.gov.au/World\\_Data\\_Centre/1/9](http://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre/1/9), <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/space-weather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-spectral/learmonth/>, <http://secchirh.obspm.fr/index.php>; BIRS, <https://www.astro.umd.edu/~white/gb/Data/Images/>); DH 波和 KM 波射电观测数据 (<https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/waves/>); STEREO/SWAVES, [https://solar-radio.gsfc.nasa.gov/data/stereo/new\\_summary/](https://solar-radio.gsfc.nasa.gov/data/stereo/new_summary/)); 高能粒子数据 (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] Mclean D J, Labrum N R 1985 *Astron. Nachr.* **308** 182
- [2] Benz A O 1986 *Sol. Phys.* **104** 99
- [3] Payne-Scott R, Yabsley D E, Bolton J G 1947 *Nature* **160** 256
- [4] Wild J P, McCready L L 1950 *Aust. J. Chem.* **3** 387
- [5] Nelson G J, Melrose D B 1985 *Type II Bursts* (Cambridge and New York: Cambridge University Press) pp333–359
- [6] Cane H V 1983 *Solar Physics* (Pasadena: JPL Solar Wind Five) pp703–709
- [7] Gopalswamy N, Thompson B J 2000 *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* **62** 1457
- [8] Cane H V, Stone R G, Fainberg J, Stewart R T, Steinberg J L, Hoang S 1981 *Geophys. Res. Lett.* **8** 1285
- [9] Prakash O, Umapathy S, Shanmugaraju A, Vršnak B 2009 *Sol. Phys.* **258** 105
- [10] Prakash O, Umapathy S, Shanmugaraju A, Pappa Kalaivani P, Vršnak B 2010 *Sol. Phys.* **266** 135
- [11] Gopalswamy N, Yashiro S, Kaiser M L, Howard R A, Bougeret J L 2001 *J. Geophys. Res. Atmos.* **106** 29219
- [12] Lara A, Gopalswamy N, Nunes S, Muñoz G, Yashiro S 2003 *J. Geophys. Res.* **30** 8016
- [13] Reams D V 1995 *Rev. Geophys.* **33** 585
- [14] Reams D V 1999 *Space. Sci. Rev.* **90** 413
- [15] Kahler S W 1996 *Amer. Inst. Phys.* **374** 61
- [16] Kahler S W, Vourlidas A 2005 *J. Geophys. Res.* **110** A12S01
- [17] Kahler S W 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 20947
- [18] Kahler S W, Vourlidas A 2014 *Astrophys. J.* **784** 47
- [19] Desai M, Giacalone J 2016 *Rev. Sol. Phys.* **13** 3
- [20] Lugaz N, Temmer M, Wang Y M, Farrugia C J 2017 *Sol. Phys.* **292** 64
- [21] Le G M, Li C, Zhang X F 2017 *Res. Astron. Astrophys.* **17** 073
- [22] Le G M, Zhang X F 2017 *Res. Astron. Astrophys.* **17** 123
- [23] Zhao M X, Le G M, Chi Y T 2018 *Res. Astron. Astrophys.* **18** 074
- [24] Zhao M X, Le G M 2020 *Res. Astron. Astrophys.* **20** 037
- [25] Gopalswamy N, Yashiro S, Lara A, Kaiser M L, Thompson B J, Gallagher P T, Howard R A 2003 *Geophys. Res. Lett.* **30** 12
- [26] Cliver E W, Kahler S W 2004 *Astrophys. J.* **605** 902
- [27] Gopalswamy N, Aguilar-Rodriguez E, Yashiro S, Nunes S, Kaiser M L, Howard R A 2005 *J. Geophys. Res.* **110** A12S07
- [28] Winter L M, Ledbetter K, 2015 *Astrophys. J.* **809** 105
- [29] Chen Y L, Ji J J, Dong L H, Ding L G, Li P 2015 *Trans. Atmos. Sci.* **38** 259 (in Chinese) [陈玉林, 季晶晶, 董丽花, 丁留贯, 李鹏 2015 *大气科学学报* **38** 259]
- [30] Marqué C, Posner A, Klein K L 2006 *Astrophys. J.* **642** 1222
- [31] Kahler S W 2005 *Astrophys. J.* **628** 1014
- [32] Su W, Cheng X, Ding M D, Sun J Q 2015 *Astrophys. J.* **804** 88
- [33] 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]
- [34] Ding L G, Wang Z W, Feng L, Li G, Jiang Y 2019 *Res. Astron. Astrophys.* **19** 001
- [35] 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 *Proceeding of the 28th International Cosmic Ray Conference Tsukuba, Japan, July 31–August 7, 2003* p3305
- [36] Kim R S, Cho K S, Lee J, Bong S C, Park Y D 2014 *J. Geophys. Res. A: Space Phys.* **119** 9419
- [37] Ding L G, Cao X X, Wang Z W, Le G M 2016 *Res. Astron. Astrophys.* **16** 8
- [38] Bemporad A, Mancuso S 2013 *J. Adv. Res.* **4** 287
- [39] Zhou K L, Ding L G, Wang Z W, Feng L 2019 *Acta Phys. Sin.* **68** 139601 (in Chinese) [周坤论, 丁留贯, 王智伟, 封莉 2019 *物理学报* **68** 139601]
- [40] Shanmugaraju A, Moon Y J, Dryer M, Umapathy S 2003 *Sol. Phys.* **217** 301
- [41] Zhou K L, Ding L G, Qian T Q, Zhu C, Wang Z W, Feng L 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 169601 (in Chinese) [周坤论, 丁留贯, 钱天麒, 朱聪, 王智伟, 封莉 2020 *物理学报* **69** 169601]

# Statistical analysis of characteristics of classified type II radio bursts and their associated solar energetic particle events\*

Zhu Cong<sup>1)</sup> Ding Liu-Guan<sup>1)2)3)†</sup> Zhou Kun-Lun<sup>4)</sup> Qian Tian-Qi<sup>1)</sup>

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, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*)

4) (*Guangxi Meteorological Center of Technology and Equipment, Nanning 530022, China*)

( Received 29 October 2020; revised manuscript received 17 December 2020 )

## Abstract

In this paper, we investigate 273 type II radio burst events detected by Wind, STEREO spacecraft from January 2010 to March 2018 during the 24th solar cycle. We classify all events as five groups or sub-types according to their starting and ending frequencies, and then analyze the observed characteristics of each group of type II radio bursts and the correlation between the occurrence of solar energetic particle (SEP) events and the associated coronal mass ejection (CME) or type II radio bursts. What we find is as follows. 1) In each group of type II radio burst events, the CME speed ( $v$ ), width (WD), mass ( $m$ ), and kinetic energy ( $E_k$ ) associated with SEP events are generally greater than those with no SEP events, indicating that the generation of SEP events requires a fast and wide energetic CME eruption. 2) Compared with type II radio bursts starting from the DH band, type II radio bursts starting from the metric band have a higher proportion of large SEP events. Multi-band type II radio bursts are more likely to produce SEP events than single-band events, where M-DH-KM type II bursts have the highest proportion of SEP events (73%), and the DH IIs only have the lowest one (19%). 3) In each kind of type II radio bursts, the type IIs with SEP events usually have higher starting frequencies (lower shock forming heights), lower ending frequencies (higher ending heights) and longer durations than those with no SEP events; coronal shock waves that are easy to produce SEP events (especially large SEP events) generally begin to form at a lower height (such as  $< 3R_s$ ,  $R_s$ : solar radius), and are sustained to a much larger height (such as  $> 30R_s$ ). 4) There exists a strong negative correlation between the duration and the ending frequency of type II radio burst ( $cc = -0.93$ ). The proportion of SEP events increases with the increase of the duration of type II radio burst, and decreases with the increase of the ending frequency, which largely depends on the CME speed and other properties. The results of this paper further show that the generation of SEP events is greatly related to the sub-types and characteristics of type II radio bursts. The higher the starting frequencies and the lower the ending frequencies of type II radio bursts, such as M-DH-KM type II bursts, of which the CME drives to forming shock waves at a very low height and propagates to a very large height, the longer the duration of the shock, the longer the time it takes to accelerate the particles, and the greater the probability of SEP events (especially large SEP events) is.

**Keywords:** type II radio burst, solar energetic particles, coronal mass ejection, coronal shock

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

**DOI:** 10.7498/aps.70.20201800

\* 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, China (Grant No. BK20171456), the Specialized Research Fund for Key Laboratory of Dark Matter and Space Astronomy, Chinese Academy of Sciences, and the Science Research Project of Binjiang College, Nanjing University of Information Science and Technology, China (2020).

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