

太阳高能粒子强度与日冕物质抛射 及其 II 型射电暴的关系*

严豪¹⁾ 丁留贯^{1)2)†} 封莉³⁾ 顾斌⁴⁾

1) (南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044)

2) (无锡学院大气与遥感学院, 无锡 214105)

3) (中国科学院紫金山天文台, 南京 210008)

4) (南京信息工程大学物理与光电工程学院, 南京 210044)

(2023 年 11 月 26 日收到; 2024 年 1 月 19 日收到修改稿)

本文选取了第 24 太阳活动周 2010 年 1 月至 2014 年 9 月期间的快速、大角宽日冕物质抛射 (CME) 事件, 结合不同约束条件下 Richardson (2014) 太阳高能粒子 (SEP) 强度经验模型输出结果, 分析了 CME 属性、先行 CME (pre-CME)、II 型射电暴等观测特征对 SEP 强度的影响, 探讨了 SEP 事件的产生及其强度与这些特征的关系. 主要结论如下: 1) 快速 CME 前 13 h 内是否存在 pre-CME 对模型预测效果和快速 CME 是否产生 SEP 事件有明显影响, 但 pre-CME 的数量对模型输出结果没有明显改善. 2) 相比于无 II 型射电暴伴随的快速 CME 而言, 伴随 II 型射电暴的 CME 爆发产生 SEP 事件的误报占比明显更低 (42%), 以此为约束条件, 可更加突显大 SEP 事件 (如峰值 ≥ 0.01 pfu/MeV) 的模型预测值与观测值的关联; 如果考虑射电增强, 则 SEP 事件的误报占比可进一步下降至 29.4%, 模型预测效果显著提升. 3) II 型射电暴的起始频率和结束频率对误报占比的影响不大, 以此作为条件约束对模型预测效果提升不明显. 4) 如考虑 II 型射电暴的细分类型作为模型约束条件, 伴随多波段 II 型射电暴的 CME 比单一波段事件具有更好的模型预测效果, 如 m-DH-km II 型射电暴事件, 具有较低的误报占比 (35.4%), 准确率较高. 研究结果显示, 除了 CME 的速度和角宽参数外, pre-CME、II 型射电暴及其增强、多波段类型等特征作为 CME 产生 SEP 事件的约束条件, SEP 预测强度与观测强度具有较好的一致性, 可以获得较优的模型预测效果. 这也进一步表明了伴随有 pre-CME、多波段 II 型射电暴及其增强的快速大角宽 CME 更容易产生 SEP 事件, 这些特征可作为 SEP-rich 类 CME 的辨别信号.

关键词: 太阳高能粒子, 日冕物质抛射, II 型射电暴

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

DOI: 10.7498/aps.73.20231855

1 引言

太阳高能粒子 (solar energetic particle, SEP) 是由太阳爆发过程中的耀斑或日冕物质抛射 (coronal mass ejection, CME) 驱动激波加速环境粒子产生的, 不仅是太阳爆发剧烈程度的一种体现, 还是影响空间环境的重要因素. SEP 传输到地

球附近时, 会与地球大气相互作用, 产生例如极光、地面水平增强事件 (ground level enhancement, GLE) 等强烈的地球物理效应, 对地球空间产生强烈的粒子辐射, 威胁人类活动安全^[1]. 对 SEP 事件进行有效预警预报并减少由此带来的损失有极其重要的实际意义.

依据产生机制和观测特征的不同, 通常可将 SEP 事件分为脉冲型 (impulsive) SEP 和缓变型

* 国家自然科学基金 (批准号: 42274215)、江苏省高校“青蓝工程”和江苏省“333”高层次人才培养工程资助的课题.

† 通信作者. E-mail: dlg@nuist.edu.cn

(gradual) SEP 两类事件. 脉冲型 SEP 事件持续时间较短, 主要由太阳耀斑加速形成^[2]; 缓变型 SEP 事件通常持续时间较长且强度较大, 危害大, 通常伴随爆发型耀斑和快速 CME, 通常认为 CME 驱动的激波是主要的粒子加速源^[3,4]. 研究显示, 缓变型 SEP 事件一般都与快速且大角宽的 CME 相关^[5], 其峰值通量正相关于 CME 速度^[2], 且地球附近的 SEP 事件源区多位于太阳西半球^[6]. 对于缓变型 SEP 事件, 所有大事件总是有相关的快速 CME 与之对应, 但不是所有的快速 CME 都能产生 SEP 事件^[3,6,7]. 此外, 太阳耀斑在缓变型 SEP 事件中的作用仍存在争议. Cane 等^[8,9]提出在太阳高能粒子事件的早期, 太阳高能粒子主要是耀斑加速的, 相应的 Fe/O 较高, 随后的高能粒子才是激波加速的. Le 和 Zhang^[10,11]通过对耀斑软 X 射线 (SXR) 积分通量与 SEP 相关性的分析以及 CME 速度与太阳高能粒子强度的相关性分析, 发现 CME 仅对较低能量范围内 (< 30 MeV) 的高能粒子有贡献, 而耀斑是各个能量高能粒子的有效加速源, 提出较高能量 (如 > 30 MeV) 的粒子主要由耀斑加速产生. Wang 等^[12]认为缓变型 SEP 事件中高能粒子主要来自耀斑、日冕激波和行星际激波, 且大部分 > 10 MeV 的高能粒子主要是在太阳附近加速产生的. 本文主要关注缓变型 SEP 事件与快速 CME 的关系.

CME 要能产生 SEP 事件与多种因素有关, 其中一个基本条件就是 CME 要能有效形成激波, 进而加速粒子. 当太阳爆发过程中产生的扰动速度超过背景快磁声波速度时, 就会在扰动区前沿产生激波 (快模激波)^[13–16]. 因此, 能加速太阳高能粒子的 CME 通常速度都较快. II 型射电暴主要是由于激波加速的电子在扫过局地等离子体时产生的辐射, 是用来判断是否形成激波的重要依据^[17,18]. 日冕激波和行星际激波可看作是米波 (metric) 和 DH (Deca-Hectometric)、千米 (km) 波段 II 型射电暴的源^[19,20]. Prakash 等^[21]统计研究显示, CME 参数与米波 II 型射电暴之间的相关性非常弱, 与 DH 波 II 型暴之间的相关性较好. Kahler^[22]对 II 型射电暴拟合激波速度的研究表明, SEP 事件强度通常与激波的速度正相关. Gopalswamy 等^[23]发现 m-DH-km II 型射电暴与 SEP 事件高度相关, 少部分没有关联的事件也主要与地球磁联接较差有关. Winter 等^[24]对 II/III 型射电暴与 SEP 事件相关

性的研究表明, 所有能量大于 10 MeV、质子峰值通量大于 15 pfu (pfu = particles/cm²·s·sr) 的 SEP 事件都与 II 型射电暴有关. Kahler 等^[25]通过第 23 太阳活动周的 SEP 事件统计表明, 缓变型 SEP 事件和 m-DH-km II 型射电暴通常与快 (速度大于 900 km/s) 而宽 (角宽大于 60°) 的 CME 驱动的激波相关. 朱聪等^[26]对 II 型射电暴分类研究显示, 当 II 型射电暴呈现高起始频率、低结束频率时 (如 m-DH-km II 型射电暴), CME 产生 SEP 事件的概率更高 (尤其是大 SEP 事件), 并且跨越多波段的 II 型射电暴事件比单一频段事件更容易产生 SEP 事件. 但也存在少数 SEP 事件由于源区位置、射电辐射强度弱等原因, 未能观测到明显的 II 型射电暴伴随^[27], 当然也不是所有伴随 II 型射电暴的 CME 爆发都能有效加速粒子、产生明显的 SEP 事件^[28], 如受观测位置-源区之间磁联接较差、缺少足够的种子粒子等因素影响.

决定 CME 产生 SEP 事件的另一个关键因素是激波加速区域的种子粒子强度^[29], 这些粒子可能来自太阳耀斑或先行 CME (pre-CME)^[6,7,30]. Gopalswamy 等^[6]研究表明, SEP 的产生和强度与多 CME 间相互作用有很强的关联, pre-CME 的存在大大增加了主 CME 产生 SEP 的可能. 2014 年, Ding 等^[31]对第 23 太阳活动周的统计分析进一步表明, 由于 pre-CME 能为主 CME 提供更多的种子粒子, 多 CMEs (twin-CMEs) 呈现比单个 CME 更高的 SEP 事件产生概率.

在多个 CME 爆发和传播过程中, 快速 CME 追上更早爆发的慢速 CME 发生相互作用时, 会出现 II 型射电暴增强现象^[32]. Ding 等^[33]和 Zhou 等^[34]对射电增强和 SEP 事件的关系进行研究后发现, 有射电增强的 II 型射电暴产生大 SEP 事件的比例远高于无射电增强的 II 型射电暴, 再次表明了 II 型射电暴增强可以作为 CME 大概率产生大 SEP 事件的信号.

目前, SEP 事件的预报模型主要有两类: 基于统计的经验预报模型和基于物理解析的数值预报模型. 经验模型是基于历史数据以经验公式的形式呈现 SEP 事件与其他可观测参数之间的关系. 这些模型通常根据形成 SEP 事件的已知物理过程的相关关系得出^[35,36]. 经验模型可以输出 SEP 事件的产生概率^[37,38]、粒子强度^[39]、是否发生^[40,41]等. 由于不需要大量计算, 经验模型通常可以快速做出

预报预警. 当前 SEP 预报模型的很大一部分是基于经验方法.

在早期的经验预报模型中, 耀斑和软 X 射线流量常被用于 SEP 事件预报, 如文献 [40, 42, 43] 中的预报模型. 由于 SEP 事件峰值通量强度严重依赖于观测位置的磁联接情况, 所以部分预报模型把 SEP 事件分为 well-connected 和 poor-connected 两类, 采用不同的方法预报 [44–46]. 若假设激波加速的高能粒子中相对论电子和高能质子同时释放且电子快于质子, 则更早发现的相对论电子可用来预报 SEP 事件 [47]. 由于缓变型 SEP 事件 (对空间天气影响较大的事件) 的源区位置、加速环境、与耀斑的因果关联等因素, 并非所有事件都具有较好的磁联接、能观测到有效的软 X 射线流量 (如日面边缘事件和背面事件等)、质子电子同时释放等. 因此, 利用 CME 属性对 SEP 事件进行预报建模也在逐步开展 [36,48], 但由于绝大多数 CME 爆发不产生 SEP 事件, 这也对基于 CME 属性的预报建模带来了挑战. 在基于 CME 属性的经验模型研究中, Richardson 等 [36] 对 CME 速度和角宽进行了讨论, 结果显示选择快速、大角宽 CME (速度大于 1000 km/s、角宽大于 60°) 时可以得到较好的预报效果, 他们同时还研究了 II、III 型射电暴对模型预报效果的影响, 但该研究中并未考虑射电增强及射电细分类型. 此后 Bruno 与 Richardson [41] 基于 CME 属性采用二维高斯拟合方程对 10–130 MeV SEP 能谱进行建模预报. Torres 等 [49] 基于 CME 属性及 pre-CME, 利用神经网络算法进行 SEP 事件发生率的预报建模, 显示 CME 速度相关的属性是最重要的特征条件, 但此方法的误报率较高 (88.2%).

综上所述, 本文将基于 Richardson (2014) 经验模型公式 [48] 对快而宽的 CME 爆发产生 SEP 事件的峰值强度进行计算, 通过控制经验模型的约束条件, 分析模型输出与实际观测之间的一致性, 研究 pre-CME, II 型射电暴及其细分类型、射电增强等参数对 SEP 事件强度的影响, 从而探寻影响 SEP 事件发生与否的关键因素.

2 数据来源及处理

大量研究表明, SEP 事件 (尤其是大 SEP 事件) 主要是由快速 (≥ 900 km/s)、大角宽 ($\geq 60^\circ$) 的 CME 产生的 [2,6,7], 且 Richardson 等 [36] 已经对影

响 SEP 事件强度的 CME 速度和角宽条件进行了研究, 故本文在此研究基础上只选取了 2010 年 1 月至 2014 年 9 月期间的速度 ≥ 900 km/s 且角宽 $\geq 60^\circ$ 的 170 个快速 CME 开展进一步的研究. 结合 SOHO/LASCO, SDO/AIA 以及 STEREO-A(B)/SECCHI, EUVI 仪器观测、耀斑信息以及卫星位置, 确定 CME 源区及其与 SEP 事件的对应关系. 选择 2010 年 1 月至 2014 年 9 月时间段的主要原因: 1) 该时间段内 SOHO, STEREO-A(B) 三颗卫星的相对经度位置比较好, 可以对太阳爆发形成较好的三视角观测, 且三颗卫星在这段时间内有比较完整的 CME 和 SEP 观测; 2) NOAA 发布的第 24 太阳活动周的 SEP 事件大部分发生在该时间内; 3) STEREO-B 卫星在 2014 年 9 月以后停止工作, 仅依靠 SOHO 和 STEREO-A 两颗卫星观测将会增加 CME 源区和 SEP 事件判别的不确定性.

根据 Ding 等 [12,31] 的研究结果, 本文选取不超过 13 h 作为 pre-CME 先于主快速 CME 的时间阈值, pre-CME 的选择标准为速度大于 300 km/s. II 型射电暴观测来源于多颗卫星 (Wind/WAVES, STEREO-A(B)/WAVES) 及地面台站 (Learmonth, Culgoora, SRT, YNAO 等).

太阳高能粒子数据使用 SOHO/COSTEP EPHIN (25–53 MeV) 以及 STEREO-A(B)/HET (23.8–60 MeV) 仪器的质子微分通量. 同一个 SEP 事件可能同时被多颗卫星观测到, 且针对不同相对经度, Richardson (2014) 经验模型会得到不同的 SEP 强度计算值, 因此可以将不同经度位置卫星的粒子观测当作不同的事件个体看待, 以扩充事件样本数. 除去少数高能粒子观测数据缺失的事件外, 三颗卫星共计 505 个有效事件样本. 通过选择一个合适的 SEP 通量阈值, 可将事件样本分为 SEP 事件和非 SEP 事件, 即通量增强的峰值强度大于该阈值就定义为一个 SEP 事件, 而小于阈值或无明显增强的事件均为非 SEP 事件. 如选择 0.01 pfu/MeV 作为 SEP 事件的强度阈值 [33,50], 则 505 个样本事件中有 128 个 SEP 事件. 此外, 把未观测到粒子通量明显增强的事件的强度观测值设为一个低于卫星观测阈值的任意数 (本文取 10^{-5}).

3 SEP 强度经验模型

根据 Richardson (2014) SEP 强度经验模型 [48], 由 CME 速度 (v) 和源区-卫星磁足点间的相

对经度 (ϕ_r) 作为输入, 可以计算出由该 CME 产生的 SEP 事件的峰值通量强度 (简称模型输出强度或预测值 I_p):

$$I_p = 0.013 \exp \left(0.0036v - \frac{\phi_r^2}{2\sigma^2} \right), \quad (1)$$

其中, $\phi_r = \phi_{\text{flare}} - \phi_{\text{foot}}$, ϕ_{foot} 为卫星磁足点经度, 由太阳风速度与卫星位置计算得到, ϕ_{flare} 为 CME 源区经度, $\sigma = 43^\circ$. ϕ_r 为正, 表示源区相对于磁足点偏西, 为负表示偏东.

图 1 显示了由 (1) 式得到的 SEP 强度模型预测值 (I_p) 随实际观测值 (I_o) 的变化关系. 根据模型输出强度与实测强度的一致性, 可将事件分为四类.

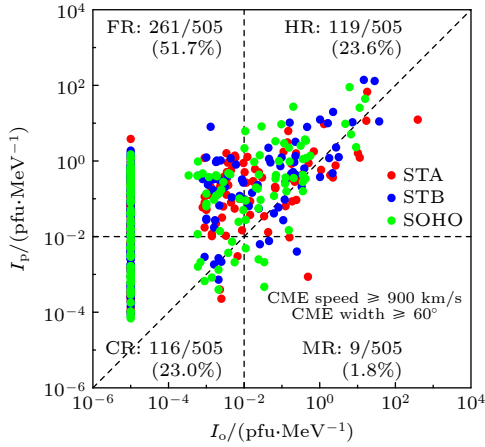


图 1 SEP 强度预测值 (I_p) 与观测值 (I_o) 对比, SEP 事件阈值准线将事件样本分为四类

Fig. 1. Predicted versus observed SEP peak intensities at SOHO or STEREO-A/B (STA/STB) spacecraft for the fast and wide CMEs with speed greater than 900 km/s and width greater than 60° in the study period. The quadrants defined by crosshairs set at equal predicted and observed intensity thresholds divide the events into hits, false alarms, correct rejections, and misses.

1) 击中 (Hits, 真正例, 实际观测到的 SEP 事件被模型准确预测, 模型预测值和观测值都大于 SEP 事件阈值), 其占总事件数的比例定义为击中占比 (HR);

2) 误报 (false alarms, 假正例, 实际未观测到 SEP 而被模型预测为一个 SEP 事件, 预测值大于阈值, 观测值小于阈值), 其占总事件的比例定义为误报占比 (FR);

3) 正确拒绝 (correct rejections, 真反例, 实际未观测到 SEP 的事件也没有被模型预测为一个 SEP 事件, 预测值和观测值都小于阈值), 其占总

事件的比例定义为正确拒绝占比 (CR);

4) 漏报 (misses, 假反例, 实测 SEP 事件没有被模型预测为一个 SEP 事件, 预测值小于阈值而观测值大于阈值), 其占总事件的比例定义为漏报占比 (MR).

同一条件下, 不同 SEP 阈值的选择会得到不同的占比. 从 Richardson 等^[48] (2014) 经验模型实际计算得到的结果看, 被漏报的 SEP 事件很少, 大部分为误报, 所以本文主要选择“误报”这个指标来讨论模型输出结果的好坏, 并研究哪些参量可以有效地减少误报, 降低误报率. 本文旨在通过不同条件约束下的经验模型输出结果与实际观测的比较分析, 进一步探明提高模型预测效果的关键因素, 从而研究 SEP 强度或 SEP 事件是否发生与 CME, pre-CME, II 型射电暴等伴随信号之间的关联.

4 参数选择及结果分析

4.1 pre-CME

先行爆发的 CME 可为后续爆发的快速 CME 提供丰富的种子粒子和增强的背景扰动, 大大提高快速 CME 驱动激波加速粒子的效率, 从而增加产生 SEP 事件的可能. 图 2(a) 和图 2(b) 显示了快速 CME 前 13 h 内有无 pre-CME 情况下的模型预测结果. 由图 2(a) 和图 2(b) 可以看到, 有 pre-CME 时的误报占比为 47.7%, 远低于无 pre-CME 的情况 (70%), 而击中占比明显高于无 pre-CME 的情况 (27.2% vs. 6.7%). 该结果说明, 快速 CME 前 13 h 内若有 pre-CME 爆发, 则产生 SEP 事件的概率增大. 若将有 pre-CME 存在作为模型输出的约束条件, 则可以明显降低模型输出结果的误报比例, 提高击中, 降低漏报. 因此, 有 pre-CME 存在可以作为 SEP-rich 类快速 CME 的识别信号之一.

pre-CME 的数量是否影响模型预测效果? 图 2(c) 显示了模型的四个指标随快速 CME 前 13 h 内 pre-CME 数量变化的关系. 由图 2(c) 可以看到, 随着 pre-CME 数量的增加, SEP 事件误报占比、击中占比等随 pre-CME 数量下限阈值的选择并无明显变化, 表明 pre-CME 事件的数量并没有对模型预测效果产生明显变好的影响. 同时, 随着 pre-CME 数量的增加, 事件总数 (图 2(c) 中黑

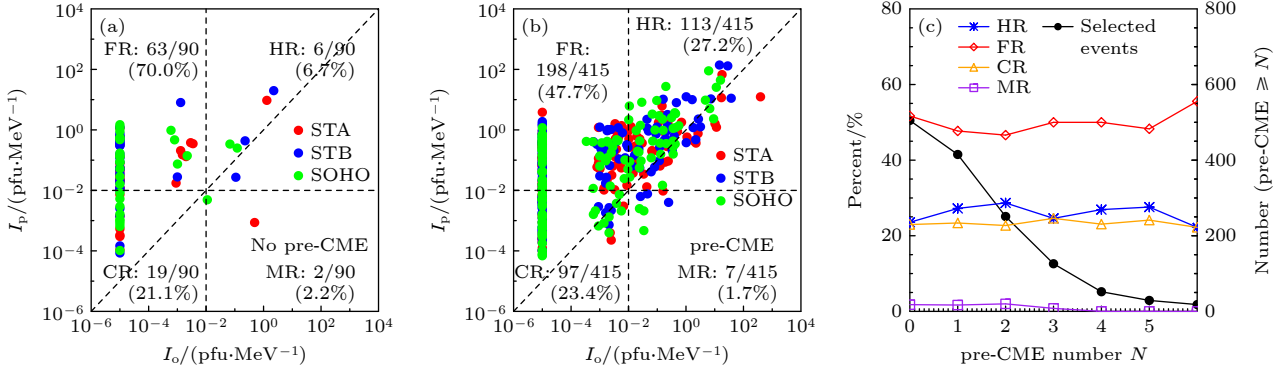


图 2 (a) 不存在 pre-CME 时, SEP 强度预测值与观测值关系; (b) 存在 pre-CME 时, SEP 强度预测值与观测值关系; (c) 样本事件数量随 pre-CME 事件数量的变化 (黑), HR, FR, CR 和 MR 随 pre-CME 事件数量的变化 (蓝、红、橙、紫)

Fig. 2. Predicted versus observed SEP intensities for the fast and wide CMEs without (a) or with (b) pre-CMEs, and (c) the number of selected events (black) and percentages of HR (blue), FR (red), CR (yellow), and MR (purple) versus the number of pre-CMEs.

色实线) 越来越多地被此限制条件过滤掉了, 从而降低了模型输出结果的可行性. 所以, pre-CME 的数量对于 SEP 事件是否产生并未呈现明显的关联.

4.2 II 型射电暴

4.2.1 有/无 II 型射电暴

以是否伴随 II 型射电暴作为模型约束条件, 将所有 SEP 事件分为两组, 分别对比模型预测强度与实际观测强度 (图 3); 其中, 188 个事件没有观测到 II 型射电暴 (图 3(a)), 317 个事件观测到有 II 型射电暴伴随 (图 3(b)). 相比无 II 型射电暴的事件, 有 II 型射电暴伴随的事件误报占比更低 (42% vs. 68%), 且更多的 SEP 实测事件被击中. 不同 SEP 事件强度阈值情况下, 有无 II 型射电

暴伴随均具有类似的模型预测效果 (见表 1), 即有 II 型射电暴伴随的事件误报占比明显更低 (< 45%). II 型射电暴这一条件的约束, 将一定程度上过滤掉了更多的无 II 型射电暴伴随的小 SEP 事件, 进而也提高了大 SEP 事件 (如强度 ≥ 0.01 pfu/MeV) 的模型预测命中率.

表 1 不同 SEP 事件强度阈值情况下有/无 II 型射电暴伴随的 SEP 事件误报对比

Table 1. False alarms fraction of SEP predictions for CMEs with/without type II radio bursts at different SEP intensity thresholds.

强度阈值/ (pfu·MeV ⁻¹)	无 II 型射电暴 (188)	有 II 型射电暴 (317)
10^{-2}	68.1%	42.0%
10^{-3}	71.8%	32.8%
10^{-4}	80.9%	36.6%

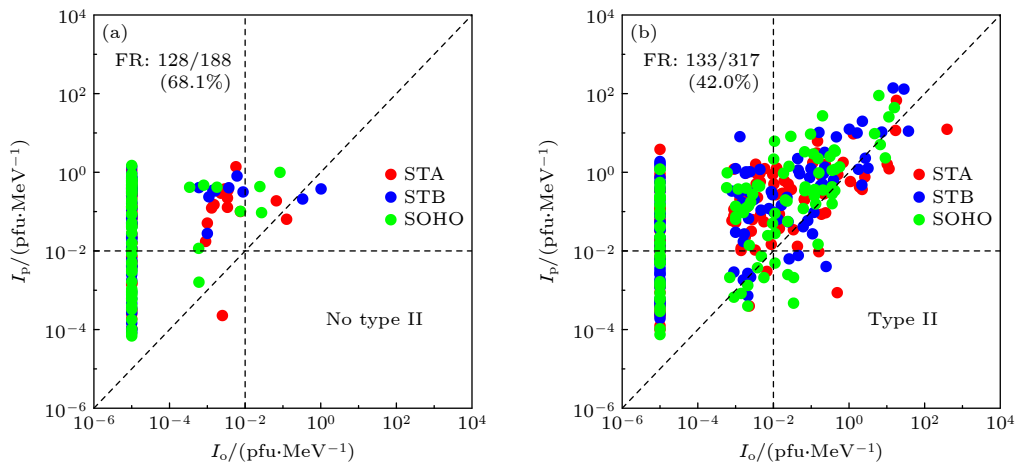


图 3 不伴随 II 型射电暴 (a) 和伴随 II 型射电暴 (b) 时, SEP 强度预测值与观测值关系

Fig. 3. Predicted versus observed proton intensities for the fast and wide CMEs without (a) and with (b) type II radio bursts, respectively.

4.2.2 II 型射电暴增强

II 型射电暴射电增强是 CME 激波与其他 CME 相互作用的射电辐射体现, 增强的激波可能会增强粒子加速过程而更易产生大的 SEP 事件 [33]. 按照有无射电增强将伴随 II 型射电暴的 CME 事件分为两部分, 其模型输出结果显示如图 4, 无射电增强的情况下预测结果的误报占比为 51.4%, 而有射电增强伴随的情况下预测结果的误报占比仅为 29.4%, 明显低于无射电增强事件, 也低于 4.2.1 节仅考虑 II 型射电暴伴随的情况; 并且有射电增强的事件中预测击中占比 (48.5%) 明显高于无射电增强事件 (25.4%). 若将伴随 II 型射电暴增强信号作为模型的约束条件, 则模型输出效果可以得到

显著提升. 这也表明, 伴随 II 型射电暴增强的快速 CME 更易产生 SEP 事件, 其可以作为 SEP-rich 事件的特征之一.

4.2.3 II 型射电暴起始/结束频率

文献 [23, 26] 等研究结果显示, II 型射电暴的起始频率越高、结束频率越低, CME 越容易产生 SEP 事件. 下面我们讨论 II 型射电暴起始、结束频率对 SEP 强度的影响. 针对 II 型射电暴的起始频率, 分别比较在大于等于、小于某频率阈值 (f_{st}) 的两个相反条件下模型预测结果的差异和随阈值设定值的变化. 图 5(a) 显示, 当选择起始频率小于某个频率阈值 (上限阈值) 为约束条件时, 随着频率阈值设定值的增大, 预测结果的四个占比基本无

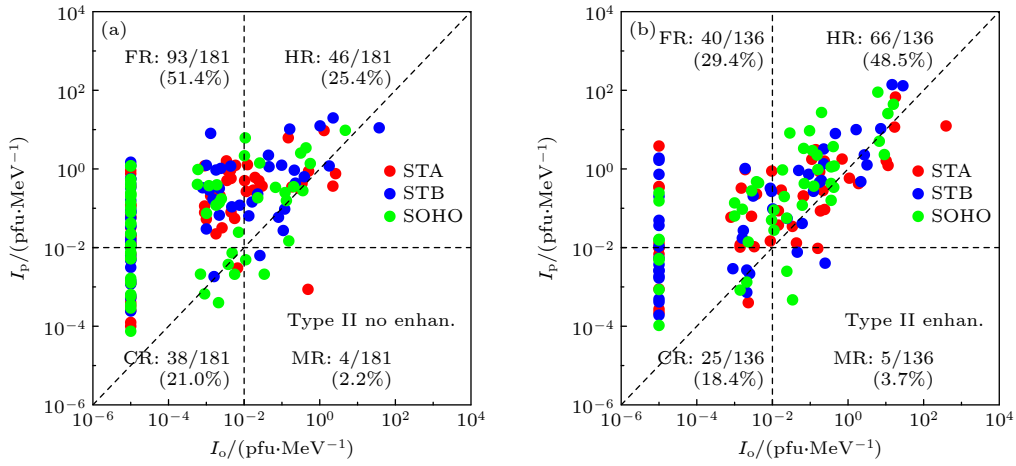


图 4 II 型射电暴无射电增强 (a) 和 II 型射电暴有射电增强 (b) 时, SEP 强度预测值与观测值关系

Fig. 4. Predicted versus observed proton intensities for the fast and wide CMEs without (a) and with (b) radio enhancements during the period of type II radio bursts.

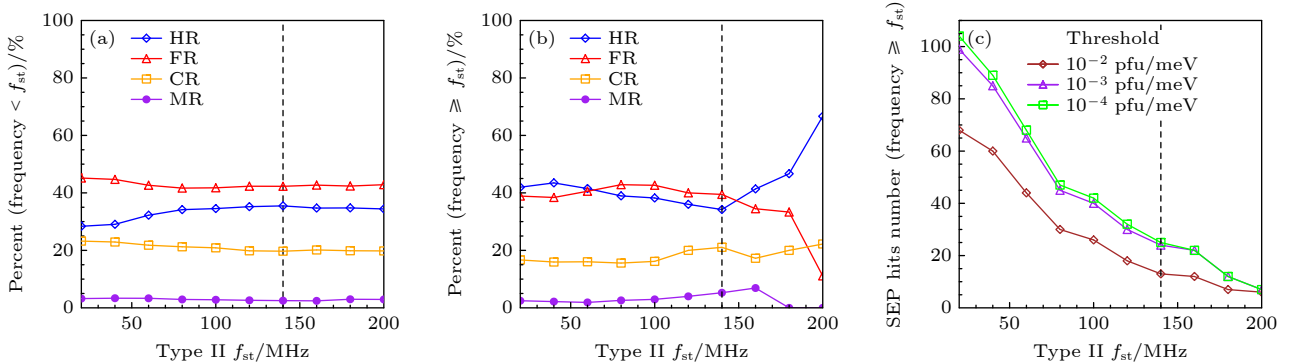


图 5 (a) 击中、误报、正确拒绝和漏报占比随 II 型射电暴起始频率上限阈值 (f_{st}) 的变化; (b) HR, FR, CR, MR 随起始频率下限阈值 (f_{st}) 的变化; (c) 不同 SEP 事件强度阈值情况下, 击中事件数量随 II 型射电暴起始频率阈值条件的变化

Fig. 5. (a) Fraction of hits, false alarms, correct rejections, and misses in all predictions versus the upper limit threshold (f_{st}) of the starting frequency of type II radio bursts; (b) similar to panel (a) but for the lower limit threshold (f_{st}); (c) number of hit events among all the predictions in different thresholds of SEP intensity using the lower limit starting frequency threshold for type II radio bursts.

明显变化. 而从图 5(b) 的变化曲线看, 当选择起始频率大于等于某个阈值 (下限阈值) 为约束条件时, 随着阈值的增大, 在小于 140 MHz 范围内无明显变化, 在大于 140 MHz 的范围内误报占比 (FR) 随着起始频率阈值下限的增大而明显下降, 击中占比 (HR) 明显上升. 这一对比分析可以看出, 在模型预测时设置伴随 II 型射电暴的起始频率大于某一阈值 (如 140 MHz) 为条件, 模型可以获得较好的预测结果. 此外, 我们也注意到当起始频率条件阈值选择越大, 实际符合这一条件的事件样本也就越少, 会有更多的实测 SEP 事件被条件限制而漏掉 (图 5(c)). 如设置 II 型射电暴起始频率 ≥ 140 MHz 为模型约束条件, 则大多数 (约 88%) 的实测 SEP 事件样本不会被预测而失去实际应用价值.

对于 II 型射电暴的结束频率, 做类似的分析. 对于某一特定结束频率阈值条件, 分别比较小于该阈值 (图 6(a))、大于等于该阈值 (图 6(b)) 条件下模型预测结果中各占比随阈值选择的变化趋势. 从图 6(a) 可以看出, 当阈值设为上限阈值时 (即结束频率小于该值), 随着阈值减小, 击中占比逐渐增加, 误报占比逐渐下降, 在结束频率小于 0.1 MHz 以下时, 误报占比 (FR) 明显下降, 击中占比 (HR) 明显上升. 而图 6(b) 中将阈值设为下限阈值时 (即结束频率大于等于该值), 随着阈值增加, 误报占比增加、击中占比降低, 但整体变化幅度不大. 对比分析可以看出, 结束频率可用上限阈值, 当结束频率低于该阈值为约束条件时可获得较好的模型预测指标. 与起始频率限制条件对事件样本的影响一

样, 若结束频率上限阈值设置为一个较低的频率 (如 0.1 MHz) 为约束条件, 则会有约 81% 的实测 SEP 事件样本被该条件限制而漏掉.

结合 II 型射电暴起始频率和结束频率对模型预测结果的影响, 若要选择作为模型限制条件, 需谨慎选择合适的阈值, 以免过多的 SEP 事件被该条件限制而排除在外. 也就是说, 仅依靠伴随 II 型射电暴的起始频率或结束频率并不能可靠地判断一个快速 CME 是否可以产生 SEP 事件.

4.2.4 II 型射电暴细分类型

按 CME 伴随的 II 型射电暴跨越波段特征将事件分为 6 类, 各类细分 II 型射电暴条件下 SEP 事件模型输出结果见图 7 和表 2. 在 6 种类型的 II 型射电暴中, DH-km 和 m-DH-km 波段 II 型射电暴占大多数, 占比分别为 33.8% 和 40.1%, 且模型预测结果较好, 有较低的误报占比和较高的击中占比. 由伴随 m-DH-km II 型射电暴的 CME 得到的 SEP 事件中误报占比最低 (35.4%), 击中占比最高 (48.0%). 从图 7 也可以看到, 大多数大 SEP 事件都伴随 m-DH-km II 型射电暴. 而单一波段 II 型射电暴 (metric, DH, km 波) 作为约束条件, 模型预测结果中误报占比相对较高, 事件样本数偏少, 也就是说伴随单一波段 II 型射电暴的 CME 实际能够产生 SEP 事件 (尤其是大 SEP 事件) 的情况比较少. 以上分析表明, 多波段 II 型射电暴与 SEP 事件的发生有较强的关联, 亦可作为 SEP-rich 和 SEP-poor 类 CME 的辨别信号.

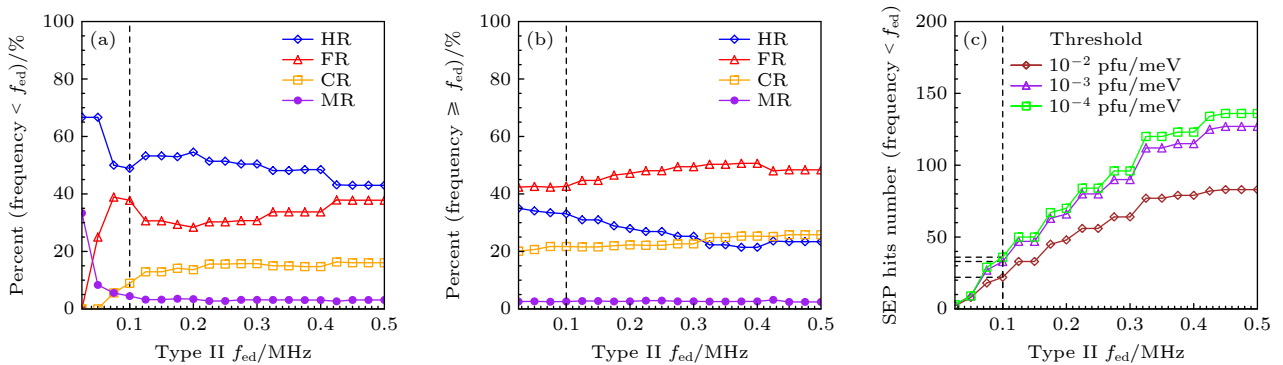


图 6 (a) 击中、误报、正确拒绝和漏报占比随 II 型射电暴结束频率上限阈值 (f_{ed}) 的变化; (b) HR, FR, CR, MR 随下限阈值 (f_{ed}) 的变化; (c) 不同 SEP 事件强度阈值情况下, 击中事件数量随 II 型射电暴结束频率阈值条件的变化

Fig. 6. (a) Fraction of hits, false alarms, correct rejections, and misses in all predictions versus the upper limit threshold (f_{ed}) of the ending frequency of type II radio bursts; (b) similar to panel (a) but for the lower limit threshold (f_{ed}); (c) number of hit events among all the predictions in different thresholds of SEP intensity using the lower limit ending frequency threshold for type II radio bursts.

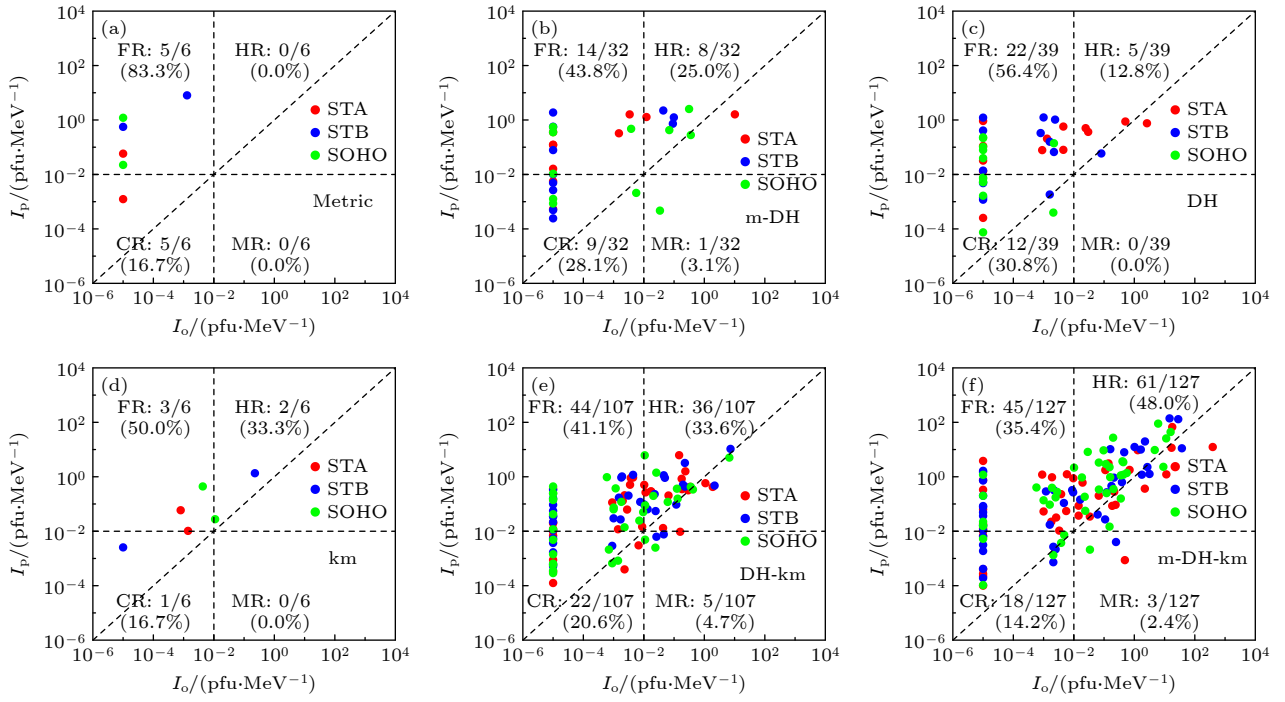


图 7 不同类型的 II 型射电暴对模型输出结果的影响 (a) metric; (b) m-DH; (c) DH; (d) km; (e) DH-km; (f) m-DH-km

Fig. 7. Predictions versus observations of SEP intensities for different classes of type II radio bursts: (a) metric; (b) m-DH; (c) DH; (d) km; (e) DH-km; (f) m-DH-km.

表 2 不同类型 II 型射电暴条件下的模型输出结果
Table 2. Predicted results of SEPs associated with different classes of type II radio bursts.

II 型射电暴类型	事件数量	数量占比/%	误报占比/%	击中占比/%
metric	6	1.9	83.3	0
DH	39	12.3	56.4	12.8
km	6	1.9	50	33.3
m-DH	32	10.1	43.8	25.0
DH-km	107	33.8	41.1	33.6
m-DH-km	127	40.1	35.4	48.0

5 预测性能评估

基于模型输出结果的 Hits, FA, Cr 和 Misses, 定义 6 个模型预测结果评价指标, 用来评估不同限制条件下的模型预测性能; 并结合 SEP 事件不同阈值设置, 分析各指标随阈值变化情况, 从而综合评判各约束条件在不同阈值下 SEP 事件的模型预测效果, 同时由此检验这些约束条件与 SEP 事件是否产生之间的关联在不同阈值下的普遍性.

1) 误报率 FAR (false alarm ratio)

$FAR = FA / (FA + Hits)$, 表示模型预测为 SEP 的事件中误报比例. FAR 取值范围为 $[0, 1]$, 越小表示模型输出结果中误报事件越少, 预测性能越

好, 完美得分为 0.

2) 准确率 ACC (accuracy)

$ACC = (Hits + Cr) / (Hits + FA + Cr + Misses)$, 表征模型对 SEP 事件和非 SEP 事件的预测正确率, 取值范围为 $[0, 1]$, 数值越大表示预测结果中击中和正确拒绝的事件越多, 预测性能越好, 完美得分为 1.

3) 偏差 BIAS (frequency bias)

$BIAS = (Hits + FA) / (Hits + Misses)$, 表示模型预测为 SEP 的事件数与实际观测到的 SEP 事件数之比, 完美得分为 1. 该值大于或小于 1 分别表示结果偏向预测过度或预测不足.

4) 命中率 POD (probability of detection, hit rate)

$POD = Hits / (Hits + Misses)$, 表示实际观测事件中被模型预测击中的比例. 分数越大预测性能越好, 完美得分为 1.

5) 报空率 POFD (probability of false detection)

$POFD = FA / (Cr + FA)$, 表示 SEP 观测强度低于峰值阈值的事件中被误报为 SEP 事件的比例, 分数越低预测性能越好, 完美得分为 0.

6) HK 评分 (Hanssen and Kuipers discriminant)

HK = POD-POFD, 表示模型将真 SEP 事件和假 SEP 事件分开的能力, 完美得分为 1^[51]. 最高值适用于命中率 POD 相当高且报空率 POFD 较低的最大事件.

图 8(a) 显示了不同 SEP 事件峰值强度阈值下模型预测结果的误报率 FAR 情况. 正如第 4 部分的分析, 在快速 CME(速度 ≥ 900 km/s, 角宽 $\geq 60^\circ$) 基础上设置有 pre-CME, II 型射电暴伴随、射电增强等约束条件, 不管 SEP 事件的峰值通量阈值设为多少, 模型预测结果的误报率均不同程度地降低. 在 SEP 事件强度阈值设置较小 (如 < 1 pfu/MeV) 时, 有 pre-CME、II 型射电暴伴随、行星际 (IP, DH-km & m-DH-km) II 型射电暴、m-DH-km II 型射电暴、射电增强五个条件下误报率 FAR 呈现明显的逐渐降低趋势, 射电增强条件下具有最低的误报率; 而在 SEP 事件阈值设置较大 (如 > 1 pfu/MeV) 时, 不同条件之间的 FAR 差别不大且整体略下降, 也反映了这五个条件容易集中在大型 SEP 事件上.

图 8(b) 显示了不同 SEP 峰值强度阈值下模型预测的准确率 ACC 变化. 对于事件阈值较小 (如 ≤ 0.1 pfu/MeV) 时, 有 pre-CME、II 型射电暴

伴随、IP II 型射电暴、m-DH-km II 型射电暴、射电增强五个条件下模型预测的准确率呈现明显的逐渐提高趋势, 射电增强条件下具有最高的准确率. 在高 SEP 峰值阈值下, 各个条件下准确率都比较高且接近 1, 进一步反映了这些条件在大型 SEP 事件上均有伴随.

图 9(a) 给出了不同 SEP 峰值强度阈值下模型预测的频率偏差 BIAS. 在 CME 速度和角宽最低条件基础上, 增加 pre-CME, II 型射电暴、射电增强、II 型射电暴细分类型等条件后, 模型预测结果的频率偏差均有降低且更接近于 1, 其中 II 型射电暴射电增强和 m-DH-km II 型射电暴条件下效果最好. 图 9(b) 给出了不同 SEP 峰值强度阈值下模型预测结果的命中率 POD. 各条件下, 随着 SEP 峰值强度阈值的提高, 预测结果的命中率呈逐渐下降趋势, 但不同条件之间没有表现出明显的差异, 这可能是由于不同条件下模型预测中漏报事件都很少导致的. 这反映出 Richardson (2014) 经验模型输出的 SEP 强度预测值通常被高估^[48], 也是本文为什么选择误报占比和误报率为主要指标来评价模型结果的原因之一.

图 10(a) 给出了不同 SEP 峰值强度阈值下模

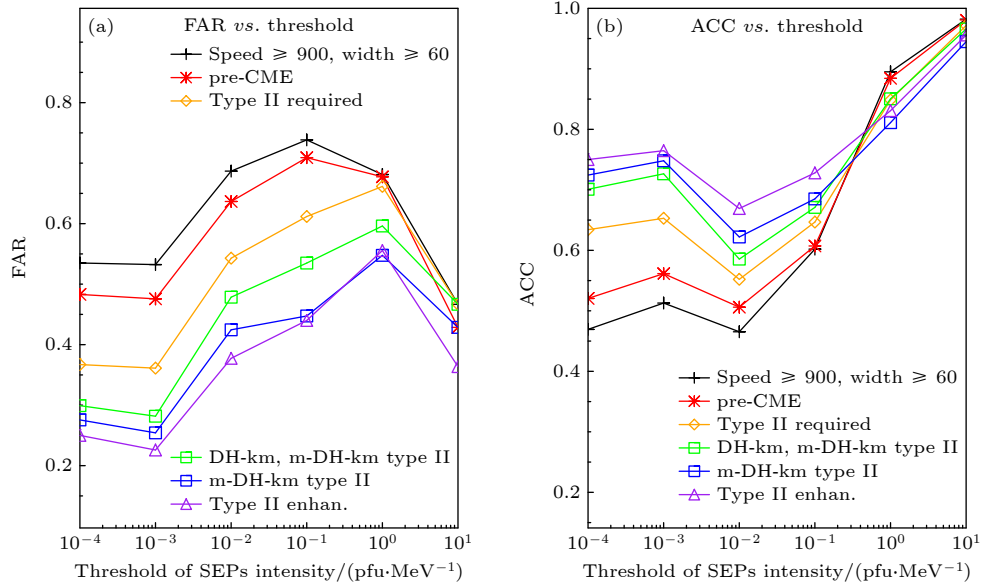


图 8 (a) 误报率 FAR 和 (b) 准确率 ACC 随 SEP 事件峰值强度阈值设定值的变化. 黑色“+”表示 CME 速度 ≥ 900 km/s 且角宽 $\geq 60^\circ$; 红色“*”表示存在 pre-CME; 橙色菱形表示存在 II 型射电暴; 绿色正方形表示伴随 DH-km 或 m-DH-km 波段的 II 型射电暴, 即 IP II 型射电暴; 蓝色正方形表示伴随 m-DH-km 波段的 II 型射电暴; 紫色三角形表示伴随的 II 型射电暴存在射电增强

Fig. 8. (a) False alarm ratio versus threshold of SEP peak intensity (0 is a perfect score), for different CME selections based on their associations. The curves are for CME with speed ≥ 900 km/s and angular width $\geq 60^\circ$ (black crosses), pre-CME required (red asterisks), type II radio bursts required (orange diamonds), IP type II radio bursts (DH-km or m-DH-km) required (green squares), m-DH-km type II radio bursts required (blue squares); radio enhancement in type II radio bursts (purple triangles). (b) The accuracy (fraction of correct predictions) versus threshold (perfect score = 1).

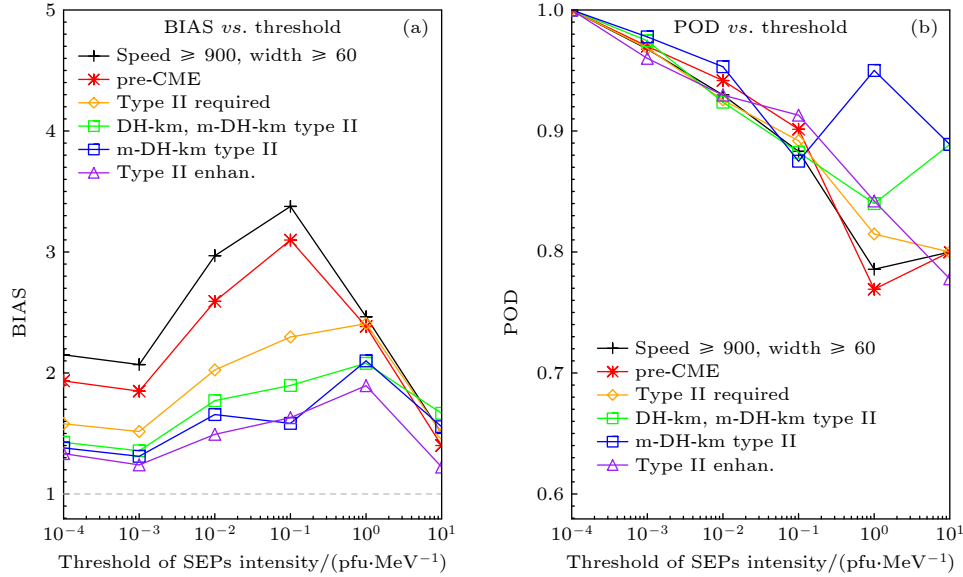


图 9 (a) 偏差 BIAS 和 (b) 命中率 POD 随 SEP 强度阈值变化

Fig. 9. (a) Frequency bias (BIAS) and (b) probability of detection (POD) versus threshold of solar energetic particle peak intensity (Bias: perfect score = 1, POD: perfect score = 1).

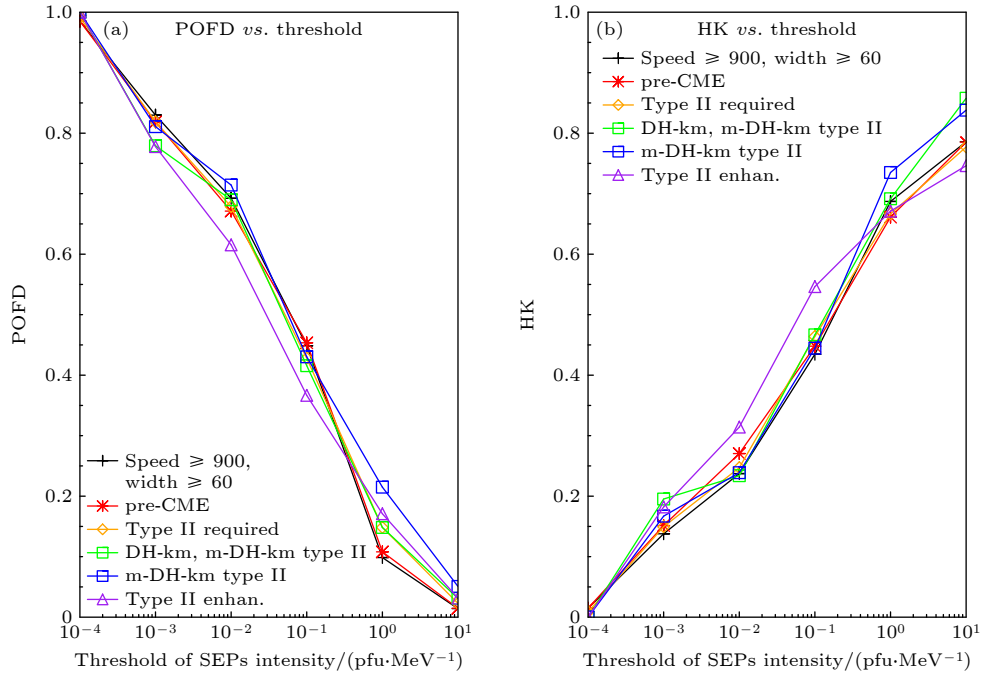


图 10 (a) 报空率 POFD 和 (b) HK 评分随 SEP 峰值强度阈值变化

Fig. 10. (a) Probability of false detection (POFD) and (b) Hanssen-Kuipers Discriminant (HK) versus threshold of solar energetic particle peak intensity (POFD: perfect score = 0, HK: perfect score = 1).

型预测结果的报空率 POFD. 随着 SEP 强度阈值的增加, 报空率逐渐下降. 对比不同条件, 在较低的 SEP 强度阈值下 (如 < 0.1 pfu/MeV), II 型射电暴射电增强条件下模型预测结果具有最低的报空率, 也就是说射电增强这一条件可以比较有效地降低小/弱 SEP 事件的误报率; 而在较高的阈值下, CME 速度角宽条件和 pre-CME 具有相对低

的报空率. 但整体而言, 各类条件下报空率的差别不大. 图 10(b) 显示了不同 SEP 峰值强度阈值下的模型预测 HK 评分, 可以看到, 各类条件下预测结果的 HK 评分均随着 SEP 强度阈值的增加而增加. 在低 SEP 强度阈值时, II 型射电暴增强条件下的 HK 评分明显高于其他条件, 而在高阈值条件下, m-DH-km II 型射电暴伴随条件下 HK 评分明

表 3 当 SEP 阈值强度选为 0.01 pfu/MeV 时的模型输出结果和评价指标
Table 3. Example of skill scores for SEP intensity threshold = 0.01 pfu/MeV.

条件	total	Hits	FA	Cr	Misses	FAR	POD	BIAS	POFD	HK	ACC
完美得分						0	1	1	0	1	1
CME速度 ≥ 900 km/s, 角宽 $\geq 60^\circ$ (对照组)	505	119	261	116	9	0.69	0.93	2.97	0.69	0.24	0.47
无pre-CME	90	6	63	19	2	0.91	0.75	8.63	0.77	-0.02	0.28
有pre-CME	415	113	198	97	7	0.64	0.94	2.59	0.67	0.27	0.51
无II型射电暴	188	7	128	53	0	0.95	1.00	19.29	0.71	0.29	0.32
有II型射电暴	317	112	133	63	9	0.54	0.93	2.02	0.68	0.25	0.55
无射电增强	181	46	93	38	4	0.67	0.92	2.78	0.71	0.21	0.46
有射电增强	136	66	40	25	5	0.38	0.93	1.49	0.62	0.31	0.67
$f_{st} < 140$ MHz	279	99	118	55	7	0.54	0.93	2.05	0.68	0.25	0.55
$f_{st} \geq 140$ MHz	38	13	15	8	2	0.54	0.87	1.87	0.65	0.21	0.55
$f_{ed} < 0.1$ MHz	45	22	17	4	2	0.44	0.92	1.63	0.81	0.11	0.58
$f_{ed} \geq 0.1$ MHz	272	90	116	59	7	0.56	0.93	2.08	0.66	0.27	0.55
m-DH-km II型射电暴	127	61	45	18	3	0.42	0.95	1.66	0.71	0.24	0.62
DH-km II型射电暴	107	36	44	22	5	0.55	0.88	1.95	0.66	0.22	0.54
m-DH-km + DH-km (行星际II型射电暴)	234	97	89	40	8	0.48	0.92	1.77	0.69	0.23	0.59

显高于其他情况. 综合而言, 对于普通 SEP 事件 (如 <1 pfu/MeV), II 型射电暴射电增强约束条件可以获得较好的模型输出效果; 而对于极端大事件 (如 ≥ 1 pfu/MeV), 是否伴随有 m-DH-km II 型射电暴则显得更为重要.

表 3 列出了 SEP 事件峰值通量阈值选为 0.01 pfu/MeV 时, 25—60 MeV 能量范围的 SEP 事件在各参量控制下的模型预测结果和评价指标. 与单纯用 CME 速度和角宽作为约束条件相比, 有 pre-CME 条件下结果好于无 pre-CME 条件, 有 II 型射电暴伴随好于无射电伴随, 在 II 型射电暴条件下有射电增强的好于无射电增强情况, 不同 II 型射电暴细分类型中 m-DH-km 类好于其他类型, 这几种约束条件下模型预测准确度均有提升. 而 II 型射电暴起始频率和结束频率条件的设置对于模型输出结果的准确度无明显影响. 总体而言, 判别一个 CME 是否能产生 SEP 事件, 首要条件是 CME 速度和角宽, 其次就是看是否伴随有 pre-CME, II 型射电暴、射电增强、多波段射电等特征信号, 这些伴随信号都体现了快速 CME 的 SEP-rich 特性, 即更容易产生 SEP 事件.

6 结果及讨论

本文结合多颗卫星联合观测资料, 选取了 2010

年 1 月至 2014 年 9 月期间的快速 (≥ 900 km/s)、大角宽 ($\geq 60^\circ$) CME 爆发事件, 基于 Richardson (2014) 经验模型^[48], 分析了 CME 属性、pre-CME、II 型射电暴及其射电增强、频率特征和细分类型等观测特征对 25—60 MeV 能量范围内 SEP 强度的影响, 并通过分析不同条件约束下模型预测评价指标, 进一步明晰了 SEP 事件与 CME 及其伴随现象之间的关系. 主要得到以下结论:

1) 快而宽的 CME 前 13 h 内是否存在 pre-CME 对 SEP 事件的产生有明显影响, 有 pre-CME 存在时模型具有更低的误报占比 (47.7%), 远低于没有 pre-CME 的情况 (70%), 但 pre-CME 的数量对模型预测效果没有明显影响. pre-CME 对模型结果的影响也反映了多 CME (twin-CMEs) 产生 SEP 事件的潜在优势, pre-CME 可为快速 CME 驱动激波提供更多的种子粒子.

2) 相比于无 II 型射电暴伴随的快速 CME 而言, 有 II 型射电暴伴随的快速 CME 产生 SEP 事件的概率更高, 模型预测结果的击中占比更高, 误报占比更低 (42% *vs.* 68%). 没有 II 型射电暴伴随条件下, 误报率高达 95%, 准确率只有 32%, 显然选择 II 型射电暴作为模型约束条件, 可以把没有 II 型射电暴伴随的大量误报事件排除掉, 从而提高模型的准确率, 降低误报率. 事实上, 实测 SEP 事件中没有 II 型射电暴伴随的通常只是一些小/弱

事件,且总量较少.

3) 在 II 型射电暴约束条件基础上,若考虑射电增强,则可以获得更好的模型输出效果. 相比没有射电增强的快速 CME,有射电增强的事件误报占比明显低于无射电增强事件 (29.4% *vs.* 51.4%),而击中占比明显提高 (48.5%),模型的各项评价指标均明显变好,在所有约束条件中指标也是最好的. 这也体现了伴随有 II 型射电暴增强的快速 CME 更容易产生 SEP 事件.

4) 将 II 型射电暴按跨越波段不同进而细分为六种类型,通过比较不同类型条件下的模型预测结果,伴随多波段 II 型射电暴的事件总体好于单一波段事件,且多波段事件数量占大多数,其中 m-DH-km 类多波段事件的模型预测效果最好,其次是 DH-km 类. 这与伴随 m-DH-km 类 II 型射电暴的快速 CME 更易产生 SEP 事件尤其是大事件的研究结论和文献 [23, 26] 一致. 此外,单纯的 II 型射电暴起始频率或结束频率参数值对 SEP 强度的影响似乎并不明显.

综合以上结果,基于 SEP 强度与 CME 的经验模型在不同约束条件下的输出结果分析,伴随 pre-CME, II 型射电暴及其增强、多波段 II 型射电暴等爆发信号的快速 CME 与 SEP 事件具有较好的相关性,经验模型预测效果呈现不同程度的提升,尤其是伴随 II 型射电暴射电增强和跨越多波段的情况,SEP 强度模型输出结果与实际观测之间具有较好的一致性. 这也进一步表明伴随有 pre-CME、多波段 II 型射电暴及其增强的快速 CME 更容易产生 SEP 事件,这些伴随特征可作为区别 SEP-rich 和 SEP-poor 类 CME 的重要信号.

感谢以下数据网站提供本文观测数据: CME 数据 (CDAW, https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list); 耀斑相关数据 (LMSAL, http://www.lmsal.com/solarsoft/latest_events_archive.html; <https://solarmonitor.org>); DH 波 II 型射电暴列表 (https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/radio/wa-ves_type2.html); 米波射电观测数据 (Learnmonth, CULG, YNAO, http://www.sws.bom.gov.au/World_Data_Centre, <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/STP/spaceweather/solar-data/solar-features/solar-radio/rstn-spectral/learnmonth>, <http://secchirh.obspm.fr/index.php>; BIRS, <https://www.astro.umd.edu/~white/gb/Data/Images>); DH 波和千米波射电观测数据 (Wind/WAVES, <https://cdaweb.gsfc.nasa.gov/pub/data/wind/waves/>; STEREO/SWAVES, https://solarradio.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>); STEREO 卫星位置 (<https://stereosscc.nascom.nasa.gov/where.shtml>).

参考文献

- [1] Wang J S, Lü J Y 2010 *Space Weather Science* (1st Ed.) (Beijing: Meteorological Press) pp16–31 (in Chinese) [王劲松, 吕建永 2010 空间天气学 第 1 版 (北京: 气象出版社) 第 16—31 页]
- [2] Kahler S W 2001 *J. Geophys. Res.* **106** 20947
- [3] Reams D V 1999 *Space. Sci. Rev.* **90** 413
- [4] Cliver E W, Kahler S W 2004 *Astrophys. J.* **605** 902
- [5] Kahler S W 1992 *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **30** 113
- [6] Gopalswamy N, Yashiro S, Krucker S, Stenborg G, Howard R A 2004 *J. Geophys. Res.* **109** 12
- [7] Ding L G, Jiang Y, Zhao L, Li G 2013 *Astrophys. J.* **763** 30
- [8] Cane H V, Von Rosenvinge T T, Cohen C M S, Mewaldt R A 2003 *Geophys. Res. Lett.* **30** 12
- [9] Cane H V, Mewaldt R A, Cohen C M S, Von Rosenvinge T T 2006 *J. Geophys. Res.* **111** 90
- [10] Le G M, Zhang X F 2017 *Rev. Astron. Astrophys.* **17** 123
- [11] Le G M, Li C, Zhang X F 2017 *Rev. Astron. Astrophys.* **17** 73
- [12] Wang Y, Lyu D, Wu X H, Qin G 2022 *Astrophys. J.* **940** 67
- [13] Stewart R T, McCabe M K, Koomen M J, Hansen R T, Dulk G A 1974 *Sol. Phys.* **36** 203
- [14] Hundhausen A J, Holzer T E, Low B C 1987 *J. Geophys. Res.* **92** 0148
- [15] Vršnak B, Lulić S 2000 *Sol. Phys.* **196** 181
- [16] Vršnak B, Cliver E 2008 *Sol. Phys.* **253** 215
- [17] Kahler S W 1982 *J. Geophys. Res.* **87** 2439
- [18] Cane H V, Erickson W C, Prestage N P 2002 *J. Geophys. Res.* **107** 1315
- [19] Wild J, McCready L 1950 *Aust. J. Sci. Res. Ser. A: Phys. Sci.* **3** 387
- [20] Cane H V, Stone R G, Fainberg J, Stewart R T, Steinberg J L, Hoang S 1981 *Geophys. Res. Lett.* **8** 1285
- [21] Prakash O, Umaphathy S, Shanmugaraju A, Vršnak B 2009 *Sol. Phys.* **258** 105
- [22] Kahler S W 1996 *Amer. Inst. Phys.* **374** 61
- [23] Gopalswamy N, Aguilar-Rodriguez E, Yashiro S, Nunes S, Kaiser M L, Howard R A 2005 *J. Geophys. Res.* **110** 07
- [24] Winter L M, Ledbetter K 2015 *Astrophys. J.* **809** 105
- [25] Kahler S W, Ling A G, Gopalswamy N 2019 *Sol. Phys.* **294** 13
- [26] Zhu C, Ding L G, Zhou K L, Qian T Q 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 099601 (in Chinese) [朱聪, 丁留贯, 周坤论, 钱天麒 2021 物理学报 **70** 099601]
- [27] Marqué C, Posner A, Klein K L 2006 *Astrophys. J.* **642** 1222
- [28] Gopalswamy N, Yashiro S, Akiyama S, Mäkelä P, Xie H, Kaiser M, Howard R, Bougeret J 2008 *Ann. Geophys.* **26** 3033
- [29] Kahler S W, Reames D V, Burkepile J T 2000 *High Energy Solar Physics- Anticipating Hessi* **206** 468
- [30] Shen C, Li G, Kong X, Hu J, Sun X D, Ding L, Chen Y, Wang Y M, Xia L 2013 *Astrophys. J.* **763** 2

- [31] Ding L G, Li G, Dong L H, Jiang Y, Jian Y, Gu B 2014 *J. Geophys. Res.* **119** 1463
- [32] Gopalswamy N, Yashiro S, Kaiser M L, Howard R A, Bougeret J L 2001 *Astrophys. J.* **548** L91
- [33] Ding L G, Wang Z W, Feng L, Li G, Jiang Y 2019 *Res. Astron. Astrophys.* **19** 001
- [34] 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]
- [35] Posner A 2007 *Space Weather* **5** 05001
- [36] Richardson I G, Mays M L, Thompson B J 2018 *Space Weather* **16** 1862
- [37] Falconer D, Barghouty A F, Khazanov I, Moore R 2011 *Space Weather* **9** 04003
- [38] Papaioannou A, Anastasiadis A, Koulounvakos A, Paassilta M, Vainio R, Valtonen E, Belov A V, Eroshenko E, Abunina M, Abunin A 2018 *Sol. Phys.* **293** 1
- [39] Laurenza M, Cliver E W, Hewitt J, Storini M, Ling A G, Balch C C, Kaiser M L 2009 *Space Weather* **7** 4
- [40] Balch C C 1999 *Radiat. Meas.* **30** 231
- [41] Bruno A, Richardson I G 2021 *Sol. Phys.* **296** 36
- [42] Garcia H A 2004 *Space Weather* **2** 02002
- [43] Huang X, Wang H N, Li L P 2012 *Res. Astron. Astrophys.* **12** 313
- [44] Núñez M 2011 *Space Weather* **9** 07003
- [45] Núñez M 2015 *Space Weather* **13** 727
- [46] Núñez M, Santiago P, Malandraki O 2017 *Space Weather* **15** 861
- [47] Núñez M 2018 *J. Space Weather Space Clim.* **8** A36
- [48] Richardson I G, von Rosenvinge T T, Cane H V, Christian E R, Cohen C M S, Labrador A W, Leske R A, Mewaldt R A, Wiedenbeck M E, Stone E C 2014 *Sol. Phys.* **289** 3059
- [49] Torres J, Zhao L, Chan P K, Zhang M 2022 *Space Weather* **20** 002797
- [50] 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]
- [51] Hanssen A W, Kuipers W J A 1965 *Koninklijk Ned. Meteor. Instit.* **81** 2

Relationship between solar energetic particle intensity and coronal mass ejections and its associated type II radio bursts*

Yan Hao¹⁾ Ding Liu-Guan^{1)2)†} Feng Li³⁾ Gu Bin⁴⁾

1) (School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

2) (College of Atmosphere and Remote Sensing, Wuxi University, Wuxi 214105, China)

3) (Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

4) (School of Physics and Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

(Received 26 November 2023; revised manuscript received 19 January 2024)

Abstract

Based on the multiple-vantage observations of STEREO, SOHO, wind and other spacecraft, the fast and wide coronal mass ejections (CME) during the 24th solar cycle from January 2010 to September 2014 are selected in this paper. Using the outputs of Richardson's (2014) empirical model of solar energetic particle (SEP) intensity under different conditions, the effects of its associations such as CME, pre-CME, and type II radio bursts, on SEP intensity are analyzed, and the relationship between SEP event and these characteristics is also discussed. The main conclusions are as follows. 1) The presence or absence of pre-CME within 13 h before fast CME significantly improves the model prediction effect and has a significant influence on whether fast CME produces SEP event. Compared with the events without pre-CMEs, the events with pre-CMEs have a low proportion of false alarms (FR: 47.7% *vs.* 70%). However, the number of pre-CMEs does not improve the model output. 2) CMEs with type-II radio bursts have significantly lower FR to generate SEP events than fast CMEs without type-II radio bursts (42% *vs.* 68%). And selecting type-II radio bursts as a constraint will filter out some small/weak SEP events, the relationship between model predictions and observations especially for large SEP events (e.g. $I_p \geq 0.01$ pfu/MeV) will stand out. Moreover, if the type-II radio enhancement is taken into account, FR can be further reduced to 29.4%, and the proportion of hits can be further increased (HR: 48.5%), and the model prediction is significantly improved. 3) The larger the start frequency of type II radio bursts, the smaller the end frequency is, and FR decreases slightly, but at the same time, a large number of SEP events are excluded by this condition, and the results show that the constraints on the start/end frequency of type-II radio bursts do not improve the model predictions distinctly. 4) If the sub-classification of type-II radio bursts is considered as the model constraint, the CMEs associated with multi-band type-II radio bursts have better model predictions than those with single-band events. For example, m-DH-km type-II radio bursts have lower FR (35.4%) and higher HR (48%), and the accuracy of empirical model is higher. In summary, we find that in addition to the velocity and angular width of CME, the associations of pre-CME, type II radio bursts and their enhancement, and multi-band sub-classification are the favorable conditions for CME to generate SEP events. The SEP intensities obtained by the empirical model have better consistency with the observations, and better predictions can be obtained. This investigation indicates that SEP events are more likely generated by fast and wide CMEs accompanied by pre-CMEs, multi-band type II radio bursts and their enhancements, which seem to serve as discriminative signal for SEP-rich and SEP-poor CMEs.

Keywords: solar energetic particle, coronal mass ejection, type II radio burst

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

DOI: 10.7498/aps.73.20231855

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 42274215), the "Qing Lan" Program of Jiangsu Province, China, and the "333" High-Level Talent Cultivation Project of Jiangsu Province, China.

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



太阳高能粒子强度与日冕物质抛射及其II型射电暴的关系

严豪 丁留贯 封莉 顾斌

Relationship between solar energetic particle intensity and coronal mass ejections and its associated type II radio bursts

Yan Hao Ding Liu-Guan Feng Li Gu Bin

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 73, 079601 (2024) DOI: 10.7498/aps.73.20231855

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231855>

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

II型射电暴分类及其与太阳高能粒子事件的关系

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

物理学报. 2021, 70(9): 099601 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201800>

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>

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>

太阳极紫外He II 30.4 nm谱线层析成像及其光谱数据反演

Tomographic imaging for solar extreme ultraviolet He II 30.4 nm and spectral data inversion

物理学报. 2022, 71(15): 159501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220084>

宇宙线高能粒子对测试质量充电机制

Mechanism of cosmic ray high-energy particles charging test mass

物理学报. 2021, 70(22): 229501 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210747>

高能带电粒子束对陡峭密度梯度区照相的散射效应解析模型

Analytical model for scattering effect of energetic charged-particle beam in radiography of steep density gradient region

物理学报. 2022, 71(11): 115201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20212269>