Check for updates

Space Weather®

研究论文
10.1029/2022SW003334

# 高能太阳粒子事件及其与相关耀斑、CME 和 GLE 参数的关系

C. O. G. Waterfall[1], S. Dalla[1], O. Raukunen[2,3], D. Heynderickx[4], P. Jiggens[5], 和 R. Vainio[3]

[1]杰里迈亚·霍罗克斯研究所，中央兰开夏大学，英国普雷斯顿，[2]Aboa 空间研究有限公司，芬兰图尔库，[3]图尔库大学物理与天文学系，芬兰图尔库，[4]DH 咨询公司，比利时鲁汶，[5]欧洲空间研究与技术中心 (ESTEC)，空间环境与效应科，荷兰诺德韦克

**要点：**

- 分析多个太阳活动周的高能太阳高能粒子 (SEP) 数据，并将其与相关耀斑、日冕物质抛射 (CME) 和地面增强的特征进行比较
- 兆电子伏特 SEP 观测与中子监测器数据之间存在很强的相关性>300
- 太阳高能粒子、日冕物质抛射和耀斑参数之间的相关性弱于低能分析中的相关性

**通信请联系：** C. O. G. Waterfall, cwaterfall@uclan.ac.uk

**引用：**
Waterfall, C. O. G., Dalla, S., Raukunen, O., Heynderickx, D., Jiggens, P., & Vainio, R.（2023年）。高能太阳粒子事件及其与相关耀斑、日冕物质抛射和地面增强事件参数的关系。空间天气，*21*，e2022SW003334。
https://doi.org/10.1029/2022SW003334

收稿日期：2022年10月27日
接受日期：2023年2月22日

**摘要** 大型太阳爆发事件，包括太阳耀斑和日冕物质抛射（CME），可能引发太阳高能粒子（SEP）事件。在这些事件中，质子可被加速至数吉电子伏特，并带来多种空间天气风险。这些风险包括但不限于对宇航员造成辐射危害，以及对卫星和电子设备造成干扰。能量最高的SEP可在数分钟内抵达地球，并可通过地面增强事件（GLE）探测到。理解和分析这些事件对于未来预报模型至关重要。然而，高能太阳高能粒子数据集的可用性有限，尤其是覆盖多个太阳活动周的数据集。大多数SEP事件分析采用能量为<100 兆电子伏特的数据。本研究使用了一个新近校准的数据集，该数据集采用了1984年至2017年地球静止环境业务卫星高能质子和α粒子探测器的数据。我们分析了这一时期三个高能通道中的太阳高能粒子事件，并将SEP特性与耀斑和日冕物质抛射参数进行比较。此外，我们还考察了相关地面增强事件的中子监测器（NM）观测结果。我们发现，SEP峰值强度与日冕物质抛射速度之间的相关性远弱于较低SEP能量下的相关性。与耀斑强度的相关性大体相似或更弱。兆电子伏特数据与中子监测器数据中的地面增强事件特性之间存在很强的相关性。我们的研究结果可用于未来针对高能SEP和地面增强事件的预报模型。

**通俗摘要** 太阳上的大型爆发事件会产生能量范围各异的粒子。能量最高的粒子最具危害性，能够迅速扩散到太空中，并在几分钟内抵达地球。这些粒子会干扰卫星电子设备，并增加宇航员、飞行员和航班乘客所受到的辐射剂量。由于能够观测低能粒子的航天器数量增加，关于低能粒子的研究已有很多。然而，较为罕见的高能粒子带来的风险最大，因此有必要进一步了解它们。本研究利用来自一艘航天器的新数据集，该数据集覆盖了这些危害最大的能量范围。研究将这组高能粒子数据与太阳爆发的特征进行比较，例如相关太阳耀斑的大小。研究发现，太空中观测到的高能粒子与随后在地面探测到的粒子之间存在显著关联。本研究有助于改进对此类事件的预报，并加深我们对这些危险事件的认识，推动其缓解措施的完善。

## 1. 引言

近几十年来，科学与技术稳步发展，人类对卫星及相关技术的全球依赖不断加深，太空探索也日益增多。随着这些进步，人们需要更深入地了解相关领域所面临的危害与风险。其中一种可能扰乱并损害现代生活诸多方面的危害，是太阳高能粒子（SEP）事件的发生。SEP事件与大型太阳爆发事件相关，例如耀斑和日冕物质抛射（CME）。在这些剧烈而突发的现象中，粒子可被加速至数吉电子伏特。这些SEP穿行于行星际空间，并可在太阳爆发后短短数分钟内抵达地球。这些事件可能造成卫星电子设备受扰甚至损毁，并增加机组人员和宇航员的辐射风险。SEP还会影响极区的高频无线电通信（Fiori et al., 2022）。事实上，空间天气的影响并不限于地球；无论是评估任何行星的宜居性，还是考虑发射到地球保护性磁层之外的航天器，都需要将其纳入考量。要推动空间天气研究，预报和监测太阳高能粒子事件的能力至关重要，尤其是对危害最大的高能粒子。

© 2023年。作者。本文为开放获取文章，依据知识共享署名许可协议发布，允许以任何媒介使用、传播和复制，但须适当注明原始作品。

许多研究分析了太阳高能粒子事件的性质如何与太阳事件的特征（例如，峰值X射线耀斑强度、日冕物质抛射速度）相关，以助于完善空间天气预报模型。其中最早的研究可追溯至20世纪70年代（Kahler等，1978；Van Hollebeke等，1975）。此后，随着可用数据不断增多，开展了大量分析。Gopalswamy 等人（2012）研究了第23太阳活动周的地面增强事件及其相关太阳爆发特性，随后又研究了相对平静的第24太阳活动周中的太阳高能粒子事件（Gopalswamy 等人，2014；Xie 等人，2019）。这两项关于第24太阳活动周的研究均聚焦于日冕物质抛射在高能太阳高能粒子事件产生中的作用。Gopalswamy 等人（2012）针对第23太阳活动周开展的研究，详细考察了与太阳高能粒子事件相关的日冕物质抛射参数（例如高度、速度、尺寸）及其观测到的射电和X射线特征。他们认为，对于地面增强事件而言，来自连通性较差区域的相关日冕物质抛射，在粒子释放时间所达到的高度比来自连通性良好（W20-W90）经度区域的日冕物质抛射高66%。其他分析还包括Dierckxsens 等（2015年）开展的一项深入研究。他们考察了第23太阳活动周的事件，并发现太阳高能粒子、耀斑和日冕物质抛射性质之间存在众多相关性。这些相关性是针对质子能量为>10 和>60 兆电子伏特推导得出的。Papaioannou 等（2016年）对1984年至2013年间由地球静止环境业务卫星（GOES）观测到的太阳高能粒子事件进行了更全面的研究，也发现不同事件性质之间存在一致的关系。Papaioannou 等（2016年）的研究针对质子能量为>10、 >30、 >60和>100 兆电子伏特的情况开展。这些结果体现了空间天气领域一些长期以来的认识，例如，更多太阳高能粒子事件倾向于起源于西经区域。总体而言，这些研究发现，大型太阳高能粒子事件（以峰值通量和积分通量衡量）与强烈耀斑和快速日冕物质抛射相关。Papaioannou 等（2016年）发现，最强的相关性存在于日冕物质抛射速度与太阳高能粒子峰值通量及积分通量之间。

对太阳高能粒子与耀斑/日冕物质抛射参数之间相关性的分析，可用于改进并指导空间天气预报模型。例如，Marsh等（2015年）利用峰值耀斑X射线强度与 Dierckxsens 等（2015年）报告的 >10 和 >60 兆电子伏特处 SEP 峰值通量之间的相关性，对其预报模型——太阳粒子辐射SWx（SPARX）预测的物理通量值进行了缩放。太阳粒子事件和耀斑预报工具通过对以往太阳高能粒子事件进行统计分析，计算太阳高能粒子事件的特征，例如峰值通量出现的时间、事件持续时间等（Anastasiadis等，2017）。马拉加大学太阳粒子事件预测器也利用耀斑与粒子通量之间的相关性，预测峰值软X射线强度达到 >C1.0 后耀斑引发的太阳高能粒子事件的起始时间（Núñez，2022）。

尽管空间天气预报领域取得了显著进展，但许多模型和研究都聚焦于SEP质子能量范围的低能端，通常研究能量从≈1 兆电子伏特到数十兆电子伏特的质子。按照美国国家海洋和大气管理局的传统定义，当能量为≥10 兆电子伏特的质子通量超过10个质子通量单位（p.f.u）时，便发生一次SEP事件，其中1 p.f.u = 1 粒子 $cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$。然而，造成最大空间天气风险的是能够将质子加速至>100 兆电子伏特的事件。美国国家海洋和大气管理局还会针对达到1 p.f.u阈值的≥100 兆电子伏特质子发布警报。尽管在>100 兆电子伏特能量下探测到的事件较为罕见，但此类事件一旦发生，造成的风险最大。高能（>100 兆电子伏特）数据集数量有限，限制了对高能事件特征的分析，从而影响了我们对相对论性事件的认识。Papaioannou等（2016）利用GOES观测中的>100 兆电子伏特微分质子通量，在其研究的314个SEP事件中，有123个是在这一能量范围内探测到的。然而，缺乏跨多个太阳活动周、涵盖能量延伸至吉电子伏特范围的综合分析。Bruno等人（2018）研究了一组由反物质、物质与轻核天体物理探测载荷（PAMELA）观测到的极端太阳高能粒子事件，其SEP强度最高达数吉电子伏特，但观测时间仅为2006年至2016年。Kühl等人（2017）研究了太阳和日球层天文台—电子质子氦仪器在1995年至2005年间观测到的42个SEP事件，能量范围为>500 兆电子伏特，但没有像以往研究那样重点比较耀斑或日冕物质抛射参数。相反，他们考察了中子监测器（NM）计数率。中子监测器数据是研究这些最高能量SEP事件的重要工具，因为其中许多事件会在地球上引发地面增强事件（Oh等人，2010）。Oh等人（2010）考察了自1986年以来85个SEP事件的GOES数据。他们发现，在各GOES能道中，中子监测器最大增幅与峰值强度（以及积分通量）之间具有良好的相关性，并且存在一个明显的阈值，低于该阈值便不会有与地面增强事件相关的SEP事件。例如，对于350–420兆电子伏特的GOES通道，峰值通量阈值为$4.16 \times 10^{-3}\ cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}\ MeV^{-1}$；有43个事件低于此阈值，且没有一个是地面增强事件。各能道的完整阈值列表见Oh等人（2010）的表7。探究为何某些SEP事件会引发地面增强事件而另一些不会，也是理解这些潜在危险事件的重要方面。一个因素是是否存在被加速至>500 兆电子伏特的粒子；它们是产生次级粒子的必要条件，而地面增强事件期间中子监测器探测到的正是这些次级粒子。

一种能够进行高能观测的探测器是搭载于GOES上的高能质子和α粒子探测器（HEPAD）仪器（Onsager等人，1996）。GOES仍是运行时间最长的航天器系列之一，并被广泛用于研究大型太阳和空间天气事件（例如，Lario 等（2008））。Lario 等（2008）研究了第22和23太阳活动周期间重大SEP事件的GOES数据，以探讨SEP事件即时成分是否存在“流 streaming极限”，即峰值强度上限这一观点。在P5（39–82）和P7（110–500兆电子伏特）GOES通道中，均发现了超出该极限的情况。Reames和Ng（1998）最初提出，太阳高能粒子事件早期阶段可能会出现流极限，这是由于波粒相互作用阻碍了粒子从太阳向外流动。他们将GOES/EPS（高能粒子传感器）观测中较高能道的峰值强度上限确定为$1.2 \times 10^{1}$ 和$6.5 \times 10^{-1}$ 质子 $cm^{-2}\ s^{-1}\ sr^{-1}$ 兆电子伏特$^{-1}$，分别对应P5和P7。该极限被认为适用于即时成分中的粒子，而不适用于在更靠近观测者处加速的粒子，例如增强太阳质子（ESP）事件中的粒子；在这类事件中，日冕物质抛射驱动的行星际激波经过时，粒子强度可能会升高。

近期，作为 ESA HIERRAS 项目（Heynderickx等人，2022）的一部分，研究人员对 GOES数据开展了大量工作，生成了一套新的经过校准并扣除背景的数据集，涵盖 1984–2017 年期间，其中包括 HEPAD 仪器的数据。本文利用这套覆盖 4 个太阳活动周的重新校准 GOES 数据集，研究 >350 兆电子伏特太阳高能粒子事件与相关耀斑和日冕物质抛射特性之间的相关性。研究使用了能量范围在 300 至 750 兆电子伏特之间的三个微分通道，这些通道是根据重新校准的 GOES 中能和高能仪器通道插值得到的。此外，还将中子监测器数据与地面增强事件进行比较，以直观展示这两类观测结果之间的差异与相似性。

数据集和事件筛选的说明分别在第 2 节和第 3 节中概述。高能数据与耀斑和日冕物质抛射参数的比较分别在第 4 节和第 5 节中进行。由于地面增强事件是重大空间天气事件的重要后果之一，本文还在第 6 节分析了太阳高能粒子事件列表中地面增强事件的中子监测器数据。日球磁场的作用在第 7 节进行探讨。最后，在第 8 节讨论太阳高能粒子数据分析的结论，以及与太阳高能粒子事件相关的其他可用数据的比较结果。

## 2. 数据集

如第 1 节所述，目前缺乏描述近地环境中相对论性粒子的数据集，这是一个令人遗憾的问题。在本研究的初步阶段，我们考察了可用的数据集，发现许多数据集存在较大的数据缺口，或仅涵盖较短且较近的时间段。例如，PAMELA 的数据延伸至高质子能量，但仅涵盖 2006 年至 2016 年间的事件。行星际监测平台-8/戈达德中能 (IMP-8/GME) 数据可追溯至20世纪70年代，但在许多我们关注的大型太阳高能粒子事件期间存在较大的数据缺口。本研究采用 GOES 数据，因为它涵盖的时间跨度最长、数据缺口最少，同时也覆盖了质子能量 >300 兆电子伏特。

本研究使用的数据集是在 ESA HIERRAS 项目中构建的。该数据集以 SEPEM 参考数据集（版本 2，RDS v2）为基础（P. Jiggens 等，2018；P. T. A. Jiggens 等，2012），并通过重新校准的 HEPAD 数据扩展了能量范围（Raukunen 等，2020）。RDS v2 基于同步气象卫星和 GOES 卫星观测到的质子数据，这些数据经过清理，并使用 IMP-8/GME 数据进行了交叉校准（Rodriguez 等，2017；Sandberg 等，2014）。由于交叉校准通道的有效能量因 GOES 卫星而异，数据已重新分箱为 11 个对数等间隔能量，范围为 5 至 289.2 兆电子伏特。

HEPAD 数据已通过对通道响应函数进行“蝴蝶结”分析重新校准（该方法最初由 Van Allen 等人（1974）阐述）。蝴蝶结分析为能量响应范围较宽的仪器通道确定一组最佳的有效几何因子 $G\Delta E$ 和有效能量 $E_{\mathrm{eff}}$，使结果适用于范围广泛的入射谱。该方法通过设定

$$R = \int_0^{\infty} j(E)G(E)\mathrm{d}E = j(E_{\mathrm{eff}})G\Delta E, \tag{1}$$

其中，$R$为观测计数率，$j(E)$为真实谱（假设为各向同性），而$G(E)$为经校准的通道几何因子，是能量的函数。对于一系列谱（在 HEPAD 分析中，幂律指数从 −8.9 到 −1.9），求解$G\Delta E$，可得到一组$G\Delta E$随$E_{\mathrm{eff}}$变化的曲线

**表 1**重新校准的静止环境业务卫星数据集的质子微分能道（$cm^{-2}$ $s^{-1}$ $sr^{-1}$ 兆电子伏特$^{-1}$）

| 能道 | 中心能量 | 能量范围 |
|---|---|---|
| Ch12 | 347.8 | 289.2–418.3 |
| Ch13 | 503.0 | 418.3–604.9 |
| Ch14 | 727.4 | 604.9–874.7 |

形似蝴蝶结。最优的一对数值位于蝴蝶结的“结点”处。更多详情以及所有 HEPAD通道的结果，请参见 Raukunen 等人（2020）。

RDS v2通道增加了三个高能通道，范围为 289.2 至 874.7 兆电子伏特（通道 12–14；详情见表 1）。新增通道的重新分箱使用了 GOES通道 P7、P9 和 P10；通量通过对相邻通道之间的幂律进行对数-对数插值计算。为妥善处理 HEPAD通道的高背景，在能量重新分箱之前，对所有通道进行了背景扣除。然而，由于对数插值，

每当相邻两个经过背景扣除的 GOES通道通量中有一个为零时，所有重新分箱后的通量都设为零；在小事件的情况下，这可能导致通量和积分通量被低估。原始 GOES P7、P9 和 P10 通道的能量因 GOES航天器而异。P7 的能量通道范围分别为 110–500（GOES 5–7）、165–500（GOES 8–12）和 110–900 兆电子伏特（GOES 13–15）。对于 P9 和 P10，能量通道分别为 435–555 和 555–760 兆电子伏特（GOES 6），以及 420–510 和 510–700 兆电子伏特（GOES 8–13）。

## 3. 事件筛选

如上一节所述，我们的数据集涵盖1984—2017年。这包括发生在第22、23和24太阳活动周以及第21太阳活动周部分时段的太阳高能粒子事件。Papaioannou 等（2016年）对1984年至2013年间能量最高达100兆电子伏特的太阳高能粒子事件进行了分析。此前尚未有人针对相近的时间跨度，对>300 兆电子伏特事件以及耀斑和日冕物质抛射特征进行全面分析。此前，我们受到每个太阳活动周高能事件数量较少的限制，这是因为此类事件十分罕见，而且缺少完整的高能数据集。

我们首先查阅现有的太阳高能粒子目录，整理出一份太阳高能粒子事件列表，以便与高能数据进行比对，例如 Papaioannou 等（2016年）、Paassilta 等（2017）、https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/。最后一个目录详细列出了 NOAA太阳高能粒子列表。NOAA事件的定义可能导致多个事件被归为一个事件。如果通量升至≥10 兆电子伏特10 p.f.u阈值以上，随后又降至阈值以下，则定义为一个事件。如果短时间内通量多次上升，但始终未降至阈值以下，则只记录为一个事件。太阳高能粒子目录有很多，但其中一些（例如 SOHO/ERNE）涵盖的时间范围远短于本研究所需的范围。部分事件在高能数据中的特征非常明确，而另一些事件的特征则很不明显（例如，轮廓短且平坦，没有明显的上升或衰减），甚至完全没有轮廓。此外，部分事件发生在静稳背景通量较高的时段（即1998年太阳活动极小期前后），因此其轮廓并不明显。在本研究中，要将其归类为事件，通量必须在>3 小时内连续保持非零。事件结束时间定义为非零通量时段的终点。

通过这一筛选，我们在高能数据中确定了49个独立的太阳高能粒子事件。排除耀斑位于太阳边缘背面后的事件后，数量进一步减少至42个。这样做是因为GOES观测无法提供足够的耀斑位置和强度信息，而这些信息对于我们在第4节中比较耀斑与SEP事件特性至关重要。纳入本研究的42个SEP事件（29个地面增强事件和13个非地面增强事件）的完整列表见表2。非地面增强事件中包括2个次级地面增强事件：2012年1月27日和2012年3月7日。亚地面增强事件定义为由高海拔极地中子监测器探测到、但海平面监测站计数率没有显著增加的SEP事件（Poluianov 等，2017）。太阳活动周21至24分别包含1、17、19和5个事件。符合事件标准的背面耀斑列表见表3。

有些太阳高能粒子事件未纳入本研究，原因是其通量仅在短时间内非零（<2 小时），或因背景扣除而被完全剔除。这些事件包括1989年11月30日、2001年11月23日和2012年1月23日，它们都能在原始的 HEPAD 数据中看到。图1展示了1989年10月一系列地面增强事件中，背景扣除导致通量降低的示例。

表2中计算的事件参数如下：

- 峰值通量
- 事件起始时间
- 事件持续时间

**表 2**符合第 *3* 节所述标准并产生高能太阳高能粒子增强的太阳事件列表

| 地面增强事件编号 | 耀斑日期 | 耀斑等级 | 耀斑位置 | 日冕物质抛射速度 (km s⁻¹) |
|---|---|---|---|---|
| | 1984年3月14日 | M2.0 | S12W42 | |
| 40 | 1989年7月25日 | X2.6 | N25W84 | |
| | 1989年8月12日 | X2.6 | S16W37 | |
| 41 | 1989年8月16日 | X20 | S18W84 | |
| 42 | 1989年9月29日 | X9.0 | S26W90 | 1,828 |
| 43 | 1989年10月19日 | X13.0 | 南纬27度、东经10度 | |
| 44 | 1989年10月22日 | X2.9 | 南纬27度、西经31度 | |
| 45 | 1989年10月24日 | X5.7 | 南纬30度、西经57度 | |
| 46 | 1989年11月15日 | X3.2 | 北纬11度、西经26度 | |
| 47 | 1990年5月21日 | X5.0 | 北纬35度、西经36度 | |
| 48 | 1990年5月24日 | X9.3 | N33W78 | |
| | 1991年3月23日 | X9.4 | S26E28 | |
| | 1991年5月13日 | M8.2 | S09W90 | |
| 51 | 1991年6月11日 | X12 | 北纬31度西经17度 | |
| 52 | 1991年6月15日 | X12 | 北纬33度西经69度 | |
| | 1991年10月30日 | X2.5 | 南纬08度西经25度 | |
| 53 | 1992年6月25日 | X3.9 | N09W67 | |
| | 1992年10月30日 | X1.7 | S22W61 | |
| 55 | 1997年11月6日 | X9.4 | S18W63 | 1,556 |
| 56 | 1998年5月2日 | X1.1 | S15W15 | 938 |
| 57 | 1998年5月6日 | X2.7 | S11W65 | 792 |
| 58 | 1998年8月24日 | X1.0 | S35E09 | |
| 59 | 2000年7月14日 | X5.7 | N22W07 | 1,674 |
| | 2000年11月8日 | M7.4 | N10W77 | 1,738 |
| 60 | 2001年4月15日 | X14.4 | S20W85 | 1,199 |
| | 2001年9月24日 | X2.6 | S16E23 | 2,402 |
| 62 | 2001年11月4日 | X1.0 | N06W18 | 1,810 |
| 63 | 2001年12月26日 | M7.1 | N08W54 | 1,446 |
| | 2002年4月21日 | X1.5 | S14W84 | 2,393 |
| 64 | 2002年8月24日 | X3.1 | S02W81 | 1,913 |
| 65 | 2003年10月28日 | X17 | S16E08 | 2,459 |
| 66 | 2003年10月29日 | X10 | S15W02 | 2,029 |
| 67 | 2003年11月2日 | X8.3 | S14W56 | 2,598 |
| 68 | 2005年1月17日 | X3.8 | N15W25 | 2,094 |
| 69 | 2005年1月20日 | X7.1 | N14W61 | 3,256 |
| | 2006年12月6日 | X6.5 | S05E64 | |
| 70 | 2006年12月13日 | X3.4 | S05W23 | 1,774 |
| sub | 2012年1月27日 | X1.7 | N27W71 | 2,508 |
| sub | 2012年3月7日 | X5.4 | N17E27 | 2,864 |
| 71 | 2012年5月17日 | M5.1 | N11W76 | 1,582 |

- 事件积分通量（计算为从事件开始到结束期间的时间积分通量）
- 事件达到峰值所需时间（定义为从开始到峰值通量之间的时间）

这些参数均用于分析本文详细介绍的高能事件。首先单独研究这些特性，随后在后续章节中，将 SEP事件特性与相关耀斑、日冕物质抛射和中子监测器数据进行比较。

### 3.1. 高能太阳高能粒子事件的特性

比较地面增强事件与非地面增强事件群体的不同特征很有意思。我们列表中的42个事件中，29个为地面增强事件，13个为非地面增强事件，这表明在这些能量下发生的事件很可能与地面增强事件相关，但并非必然如此。29个地面增强事件中有20个达到最- 大值的时间（计算为首次出现非零通量与峰值之间的时间）少于2小时（13个非地面增强事件中有3个）。地面增强事件达到最大值的中位时间为85分钟，非地面增强事件为410分钟。图2中绘制了事件的峰值通量与积分通量的关系，显示这些对数值之间存在很强的相关性，皮尔逊系数分别为0.89、0.85和0.89。然而，对于给定的峰值通量，相关的积分通量可相差一个数量级。即使对于事件较少的Ch14，这种关系仍然很强。在Ch14中的事件里，仅剩两个非地面增强事件：1989年8月12日和1991年3月23日。此前也曾发现SEP事件（Kahler与Ling，2018）的峰值强度与事件积分通量之间存在类似的密切关系。然而，Kahler与Ling（2018）的研究聚焦于较低能量（>10 MeV质子）。因- 此，观察图2所示的这些参数在较高能量下的关系是有意义的。

图中进一步考察了峰值通量 3。直方图显示了所有事件在三个能段中的峰值通量分布。Lario 等（2008）研究了太阳高能粒子峰值通量是否存在可能的上限，即所谓的“流 streaming极限”。虽然他们发现少数事件的峰值强度高于流 streaming极限，但大多数事件都低于该极限。这可能是由于缺少足够的事件和数据来证实该极限，或者是由流 streaming极限本身造成的。Lario 等（2008）给出的流 streaming极限适用于 GOES P5（39–82）和 P7（110–500 兆电子伏特）通道，而不是本文研究的任何高能通道。图中事件的分布 3并未显示存在上限的证据；然而，事件数量较少，因此仍需开展包含更多太阳高能粒子事件的研究。我们所有的峰值通量均取自太阳高能粒子事件的即时成分，而不是任何与增强太阳质子相关的峰值（见第 4.1.1节）。这些结果中观测到的最大通量属于 GLE 69，这是一个在 GOES 和中子监测器数据中均表现出极强即时性的地面增强事件。这是 Lario 等（2008）研究的太阳高能粒子事件之一，其在 P7 通道中超过了所提出的流 streaming极限。Lario 等（2008）认为，该事件超过给定流 streaming极限，可能是由于先前的行星际日冕物质抛射造成了“磁瓶颈”，或者是由于波强度不足以将流 streaming限制在给定极限以内。Ch12 中最小的峰值通量属于 2013年5月22日发生的太阳高能粒子事件。GLE 57（1998年5月6日）在我们的样本中具有最小的积分通量。相比之下，积分通量最大的事件是 GLE 43（1989年10月19日）。图中事件的分布 3在三个高能通道中有所不同。高峰值通量事件较为罕见，在三个通道中，随着峰值通量增加，观测到的事件数量都随之减少。较低峰值通量的事件在 Ch12 中更多。

表 2（续）

| 地面增强事件编号 | 耀斑日期 | 耀斑等级 | 耀斑位置 | 日冕物质抛射速度（千米/秒⁻¹） |
|---|---|---|---|---|
| | 2013年5月22日 | M5.0 | N15W70 | 1,466 |
| 72 | 2017年9月10日 | X8.2 | S08W88 | 3,163 |

注。“sub”表示子地面增强事件。

然而，这些较小的事件在更高能量下会消失，导致 Ch14 中的分布峰值偏向更高通量。为了进一步理解这些事件，下面将把相关太阳事件的特征与这些太阳高能粒子特性进行比较。

## 4. 太阳耀斑参数

本节考察表 2 中所列事件相关太阳耀斑的参数。相关参数包括耀斑位置、耀斑强度以及时间特征（达到最大值的时间、持续时间等）。耀斑参数数值主要取自美国国家海洋和大气管理局 GOES 太阳质子事件（SEP）列表（https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/seps.html），并与其他列表进行交叉核对（例如 Cane 等人（2010）和 Papaioannou 等（2016年））。我们还比较了高能量下 SEP 事件的特性与相关太阳耀斑的特性。

图 4 展示了事件列表中与地面增强事件（红色）及其他 SEP 事件（蓝色）相关的耀斑强度（左）和经度（右）的直方图。明显可见，强度更高的耀斑往往与地面增强事件相关。总体而言，列表中的高能太阳高能粒子事件均与强耀斑相关。只有八个事件的耀斑低于 X1.0（4 个地面增强事件和 4 个 SEP 事件）。对于耀斑强度直方图，$t$检验表明，地面增强事件群体与 SEP 群体之间存在统计学显著差异（$p$值 $< 0.05$）。

图 4中的第二个直方图显示，正如文献中已充分确立的那样，由于太阳—地球磁连接，地面增强事件（以及一般的高能太阳高能粒子事件）往往与西经耀斑相关。然而，东向地面增强事件也并非闻所未闻。GLE 43（1989年10月19日）和 GLE 65（2003年10月28日）发生在东经，并且 GOES 和中子监测器数据均出现显著增长。不过，尽管有大型耀斑和高速日冕物质抛射，尚无极端东向事件（E90–E20）引发地面增强事件。并非所有西经事件都会引发地面增强事件，即使它们伴有大型耀斑和高速日冕物质抛射。这表明，尽管这些事件发生在东侧还是西侧是一个重要指标，但仅凭其位于西半球这一点，无法判断某个事件是否会引发地面增强事件。虽然本文仅考察了耀斑经度，但这一结论同样适用于日冕物质抛射：即使日冕物质抛射速度很快且磁连接良好，也未必会引发太阳高能粒子事件（第23太阳活动周的一些事件便是如此（Gopalswamy 等人，2012））。对于耀斑经度直方图，$t$检验表明，地面增强事件群体与太阳高能粒子群体之间不存在统计学上的显著差异（$p$值 $> 0.05$）。下一小节将进一步分析这些耀斑数据，并将其与高能数据进行比较，同时探讨这些事件中其他可能的可观测变量。

### 4.1. 与高能数据的比较

对太阳高能粒子事件的分析通常在 <100 兆电子伏特的能量下进行。Dierckxsens 等（2015年）进行的一项分析研究了不同能量下耀斑强度与峰值通量之间的关系。该分析以及 Dierckxsens 等（2015年）和 Papaioannou 等（2016年）研究得出的相关系数列于表 4中。关于这些太阳高能粒子研究，需要注意的一点是，它们给出的都是参数对数值之间的相关性，例如，太阳高能粒子峰值通量与峰值软 X 射线耀斑强度的对数之间的相关性。这往往会高估参数之间关系的强度。对于较小的系数，比较实际值时，任何相关性都可能完全消失。不过，为与先前研究保持一致，我们在此报告对数关系的相关系数。

表 3出现在高能通道中但发生在日面背面的太阳高能粒子事件

| 地面增强事件编号 | 耀斑日期 | 耀斑等级 | 日冕物质抛射速度 | 耀斑位置 |
|---|---|---|---|---|
| 39 | 1984年2月16日 | | | >W90 |
| 49 | 1990年5月26日 | X1.4 | | N33W104 |
| 50 | 1990年5月28日 | C9.7 | | N33W120 |
| 54 | 1992年11月2日 | X9.0 | | S25W100 |
| 61 | 2001年4月18日 | C2.2 | 2,465 | >SW90 |
| | 2001年8月16日 | | 1,575 | >SW90 |
| | 2014年1月6日 | C2.1 | 1,402 | >W90 |

Dierckxsens 等 (2015年) 使用积分质子通量，而 Papaioannou 等 (2016年) 和本研究均使用微分质子通量。我们将本分析扩展到了高能通道，结果如图 5 所示。三个子图展示了表 2 中所有事件的 Ch12、13 和 14 峰值通量与峰值 X射线耀斑强度的比较结果。由于高能事件较为罕见，数据点少于 Dierckxsens 等 (2015年) 的分析。正如预期的那样，由于盘面上缺少伴有 <M2 耀斑的高能事件，低能分析涵盖的耀斑强度范围也更广。Ch12 的相关系数为

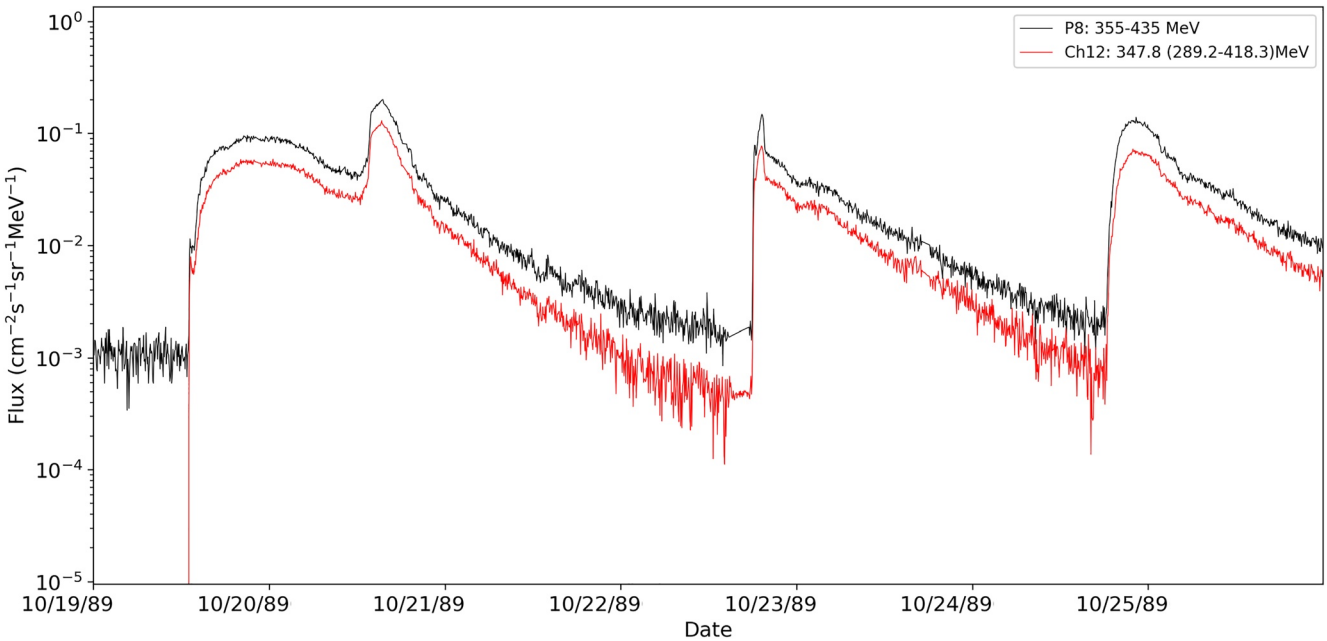



**图 1.** 地面增强 43、44 及 45 的初期阶段（1989年10月）的原始、未经校准的高能质子和α粒子探测器数据（P8通道：355–435 兆电子伏特，以黑色显示）以及经校准的 Ch12数据（以红色显示）。

13 和 14 在图 5 中的相关系数分别为 0.55、0.39 和 0.28，如表 4 所列。这些系数随能量增加而降低，与 Dierckxsens 等 (2015年) 的结果相反，且通常小于低能分析所得的系数。相比之下，Papaioannou 等 (2016年) 中的相关性不会随能量显著增大或减小，>10 和 >100 兆电子伏特的相关系数均为 0.49。表 4 中所有新系数的误差都很大，这是由于高能事件数量较少。

图 5的上方各面板绘出了积分通量与耀斑强度的关系。积分通量的相关性都更强，其中 Ch12 的相关系数最大，为 0.62。这些系数值与 Papaioannou 等（ 2016 年）通过低能分析得到的结果更为接近。一般而言，较大的耀斑与积分通量较大的太阳高能粒子事件相关。Papaioannou 等（2016年）在其低能研究中也发现了这一点。

此处的分析表明，即使在高达 500 兆电子伏特的高能范围内，耀斑与事件参数之间仍存在中等程度的关系（当针对对数值计算相关系数时）。然而，在高于这一能量的情况下，峰值通量和积分通量的这种相关性会明显减弱。此前的研究（例如 Dierckxsens 等（2015年））仅考察了第23太阳活动周的事件，而我们的数据集涵盖了第22至第24太阳活动周的所有事件

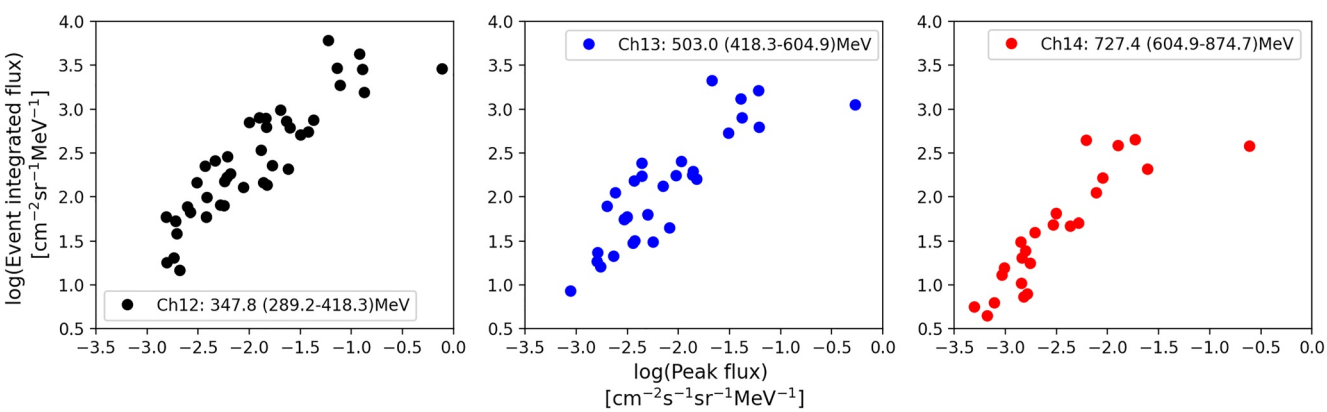



**图 2.** 所有观测到的高能太阳高能粒子事件的积分通量对数与峰值通量的关系图。从左到右：Ch12、13 和 14，能量列于表 1。

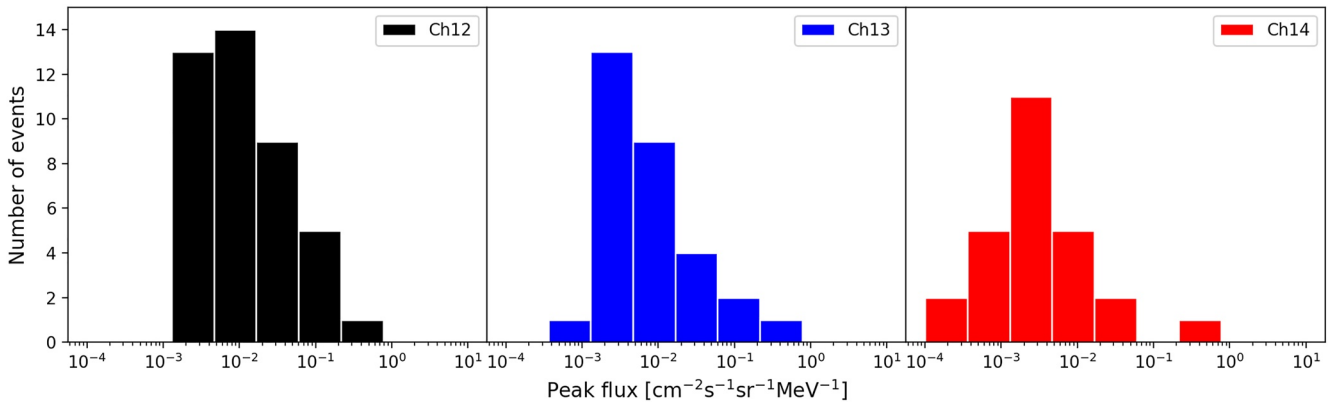



**图 3.** 直方图展示了从左至右三个能量通道（12、13 和 14）中所有太阳高能粒子事件的峰值通量分布。

。然而，仅使用一个太阳活动周会大幅缩减本已较小的数据集。事实上，在我们的样本中，第24太阳活动周仅有五个事件。我们还将高能太阳高能粒子数据的其他参数与耀斑参数进行了比较，例如事件持续时间和衰减时间，但未获得显著相关性。

#### 4.1.1. 高能风暴粒子事件

表2中的部分事件与行星际空间中的高能风暴粒子事件有关。这些高能风暴粒子事件在数据中表现为次级峰。一个显著的次级峰实例是1989年10月19日的 GLE 43，其在一天后出现了大幅上升，峰值高于初始峰值。在全部三个高能通道中都能清楚地看到这一现象（例如，图1中的通道12）。如第3节所述，该事件在我们的样本中具有最大的积分通量，主要是由于这次次级上升。这一特征是 GLE 43 独有的，先前的文献中也曾讨论过，例如 Lario 和 Decker（2002）。有人推测，这次高能风暴粒子事件究竟是由局地激波加速引起，还是源于先前活动造成的复杂等离子体和磁场环境（Cane 和 Richardson，1995）。本文不进一步探究该峰可能具有的高能风暴粒子特征，而是将其视为该事件的一般次级特征，并以初始最大值作为峰值。对于其他出现高能风暴粒子峰的事件，其峰值始终低于初始值。

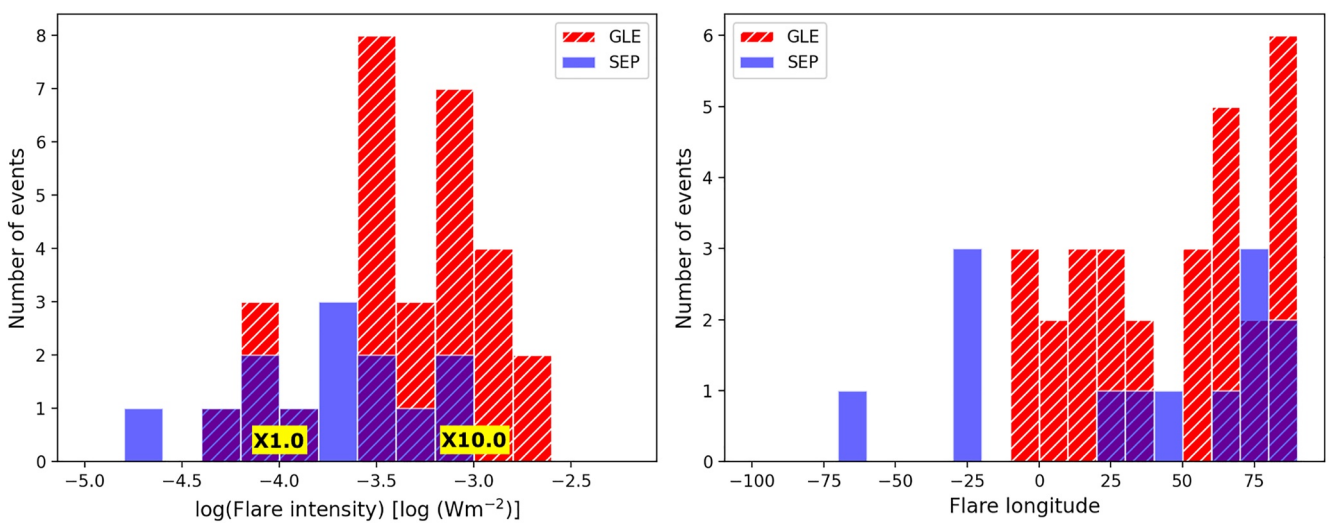



**图 4.** 表 2 中各事件的耀斑强度（左）和经度（右）直方图。红色虚线柱和蓝色实线柱分别表示地面增强事件（GLE）和非地面增强事件。深蓝色区域表示与地面增强事件重叠的太阳高能粒子事件。

**表 4**以往低能太阳高能粒子分析（*Dierckxsens* 等（*2015年*）和 *Papaioannou* 等（*2016年*）所得相关系数与我们基于地球静止环境业务卫星的分析结果进行比较

| 能量 | $\log_{10}$(峰值软X射线耀斑强度) 与 | | 日冕物质抛射速度与 | |
|---|---|---|---|---|
| | $\log_{10}$(太阳高能粒子峰值通量) | $\log_{10}$(SEP 通量) | $\log_{10}$(太阳高能粒子峰值通量) | $\log_{10}$(太阳高能粒子 SEP 通量) |
| >10 兆电子伏特 | 0.49[a], 0.55[b] | 0.48[a] | 0.57[a], 0.56[b] | 0.60[a] |
| >30 兆电子伏特 | 0.47[a] | 0.42[a] | 0.51[a] | 0.53[a] |
| >60 兆电子伏特 | 0.48[a], 0.63[b] | 0.41[a] | 0.44[a], 0.40[b] | 0.45[a] |
| >100 兆电子伏特 | 0.49[a] | 0.42[a] | 0.40[a] | 0.46[a] |
| Ch12 | 0.55 ± 0.13 | 0.62 ± 0.12 | 0.26 ± 0.21 | 0.41 ± 0.20 |
| Ch13 | 0.39 ± 0.17 | 0.46 ± 0.17 | 0.14 ± 0.26 | 0.16 ± 0.25 |
| Ch14 | 0.28 ± 0.20 | 0.44 ± 0.18 | 0.28 ± 0.29 | 0.22 ± 0.29 |

注。顶部部分显示本研究采用的 Papaioannou 等（[a]2016年）、[b]Dierckxsens 等（2015年）以及 Ch12、13 和 14 所研究能量下，SEP峰值通量（及积分通量）的对数与软X射线耀斑峰值强度之间的系数。底部部分显示相同能量下日冕物质抛射速度与 SEP峰值通量（及积分通量）之间的系数

## 5. 日冕物质抛射参数

与 Dierckxsens 等（2015年）进行的低能分析类似，我们也考察了与太阳高能粒子事件相关的日冕物质抛射的性质。不过，我们同样受限于数据不足。我们的许多事件起源于活动频繁的第22太阳活动周，而该周期的日冕物质抛射数据缺失（或极为有限）。后续太阳活动周虽有数据可用，但这些时期的高能太阳高能粒子事件数量较少（<25 20年内）。本研究采用日冕物质抛射天空平面速度与高能数据进行比较；高能数据取自 Papaioannou 等（2016年）以及 SOHO/LASCO 日冕物质抛射目录（Gopalswamy 等人，2009）。GLE 42 的日冕物质抛射速度取自 Moraal 和 Caballero-Lopez（2014）。日冕物质抛射宽度的信息也可获得，

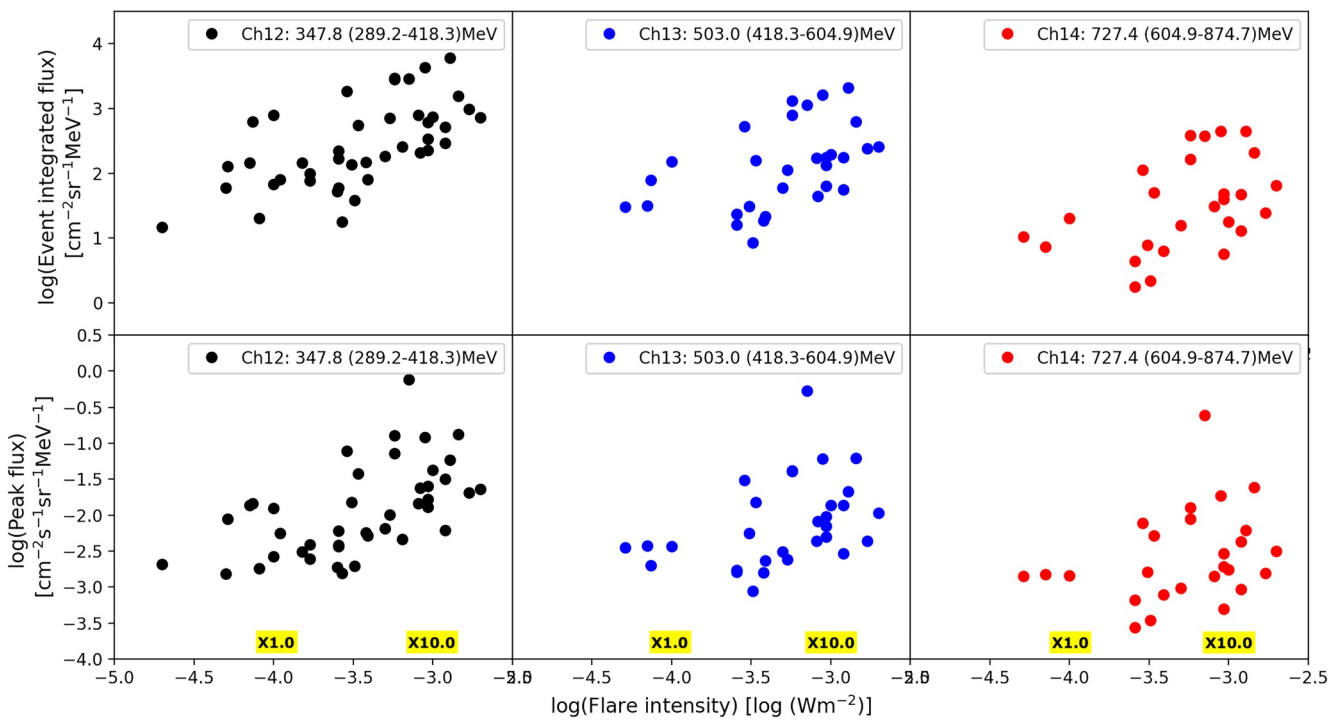



**图 5**。三个高能通道中，质子峰值通量（底部面板）和积分通量（顶部面板）的对数相对于X射线耀斑峰值强度对数的图。每行中y轴所覆盖的数量级相同。

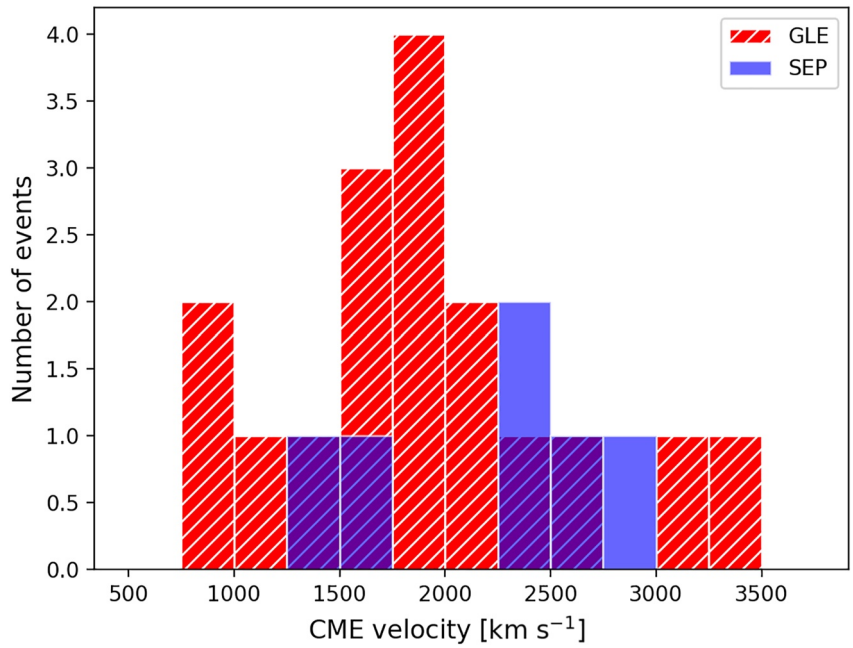



**图6**。 日冕物质抛射速度（km s⁻¹）的直方图，显示表格中太阳高能粒子（蓝色）和地面增强（红色）事件2。

但在本例中，它们几乎全都是晕状日冕物质抛射（例外情况为：1998年5月6日、2000年11月8日、2001年4月15日和2001年12月26日）。需要注意的是，由于投影效应，晕状日冕物质抛射报告的速度往往具有更大的不确定性。其他关于日冕物质抛射与太阳高能粒子关系的分析也存在这种不确定性，包括 Dierckxsens 等（2015年）和 Papaioannou 等（2016年）的研究，其中

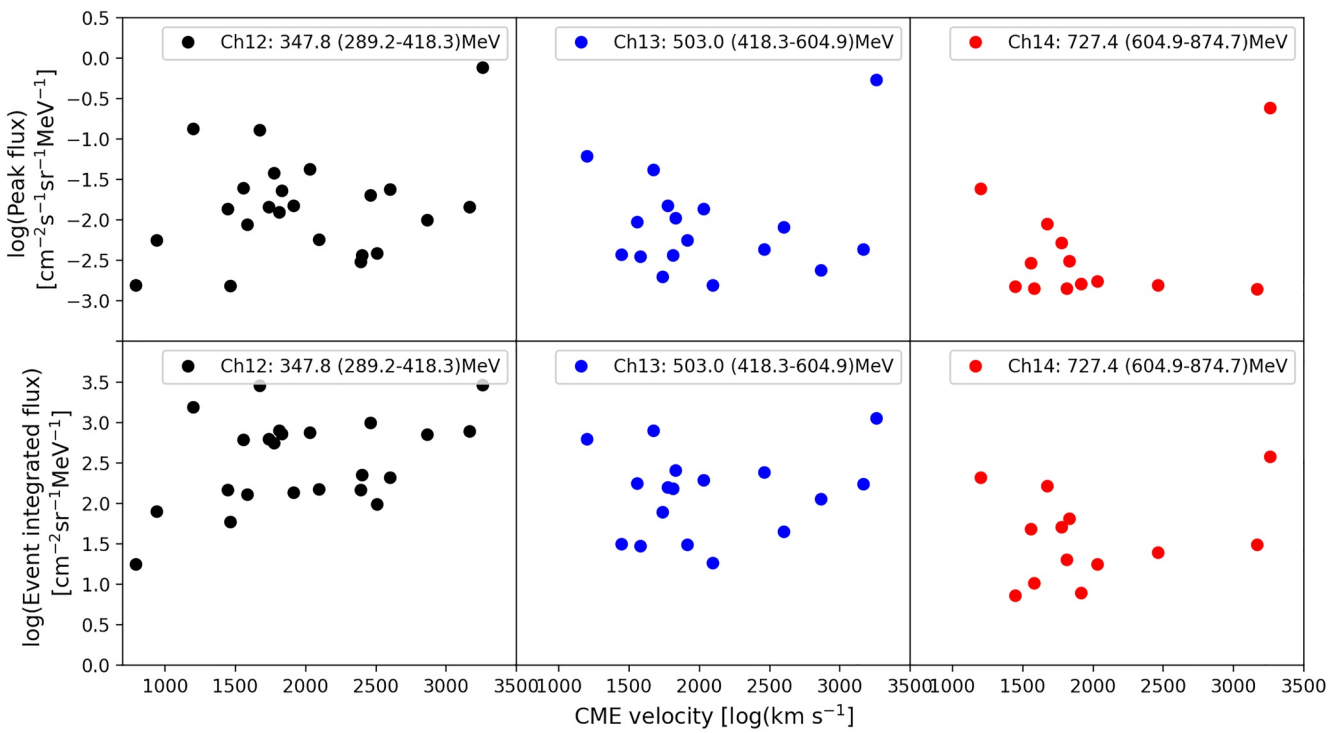



**图7**。 三个高能通道中，峰值质子通量（上图）和事件积分通量（下图）的对数与日冕物质抛射速度（km s⁻¹）的关系图。

主要 大多数太阳高能粒子事件与晕状日冕物质抛射有关。例如，158 个太阳高能粒子事件中有 106 个与 h 晕 CM Papaioannou 等研究中的 Es（2016年）。

图 6展示了我们观测到的 17 个地面增强事件和 6 个非地面增强事件的日冕物质抛射速度分布。所有事件都伴有高速日冕物质抛射，报告的最低速度为 GLE 57 的 792 km $s^{-1}$。在具有日冕物质抛射数据的地面增强事件中，53% 的日冕物质抛射速度介于 1,500 至 2,500 km $s^{-1}$。非地面增强事件的数据点过少，无法明确判断这些群体之间是否存在差异。实际上，对日冕物质抛射速度直方图进行的 $t$ 检验表明，地面增强事件与太阳高能粒子群体之间不存在统计学上的显著差异（$p$ 值 > 0.05）。

图 7绘出了三个通道中日冕物质抛射速度与峰值通量和积分通量的关系。Dierckxsens 等（2015年）对低能部分的分析报告称，>10 和 >60 兆电子伏特下的相关系数分别为 0.56 和 0.40。对于通道12–14，我们得到的相关系数分别为 0.26、0.14 和 0.28。这些数值表明相关性弱得多。日冕物质抛射速度较快，并不会使任何通道的峰值通量增大。这可能由多种原因造成，包括但不限于：实验误差、计算日冕物质抛射速度所用方法不同（本研究采用天空平面速度）、由于缺少较早事件的数据而导致统计样本有限，以及输运效应在较高能量下的作用更大（例如，梯度漂移、曲率漂移和日球电流片（HCS）漂移可能对高能粒子的影响更大，使其在日球层中的分布更加广泛）。已有许多研究报告了较低能量下日冕物质抛射速度与粒子峰值通量之间的相关性，例如 Kahler（2001年）以及 Bruno 和 Richardson（2021年）。Bruno 和 Richardson（2021年）研究了 STEREO 和 PAMELA 观测到的 10–130 兆电子伏特太阳高能粒子事件，并据此开发用于预测太阳高能粒子峰值通量和积分通量的经验模型。与 Dierckxsens 等（2015年）一样，他们也发现相关系数随能量增加而降低。

图7的下方面板也呈现了类似结果，其中绘制了日冕物质抛射速度与高能量下积分通量的关系。皮尔逊相关系数仍然较弱：Ch12、13 和 14 分别为 0.41、0.16 和 0.22。将积分通量与耀斑和日冕物质抛射特性进行比较，所得相关性与使用峰值通量时相似或更强。Papaioannou 等（2016年）也观察到了这一点：对于给定能量，与峰值通量相比，将事件参数与积分通量进行比较时，皮尔逊相关系数通常更高。不过，Papaioannou 等（2016年）报告的相关性比本文中的更显著。例如，他们发现积分通量与日冕物质抛射速度之间存在较为合理的相关性（>10 和 >100 兆电子伏特下分别为 0.60 和 0.46），并指出较快的日冕物质抛射（>1,000 千米/秒$^{-1}$）与较大的积分通量相关。我们在所有能量范围内得到的相关性都较弱，因此无法得出类似结论。

## 6. 中子监测器参数

如表2所示，许多 GOES 高能事件都与地面增强事件有关。本节将中子监测器数据的部分属性与我们的数据集进行比较，以探究这两种观测之间是否存在关联。图8展示了 Ch12 和 Ch14 的峰值通量（上图）及积分通量（下图）与去趋势后的中子监测器最大百分比增幅和中子监测器积分通量之间的关系。为获得最大增幅，我们检查了来自中子监测器网络的数据，数据取自https://gle.oulu.fi。去趋势数据指的是来自该国际地面增强事件数据库、经过修正以消除银河宇宙线背景波动影响的数据（Usoskin et al., 2020）。虽然大多数峰值增幅都出现在南极中子监测器（图8中的实心圆）上，但如果最大值出现在其他中子监测器，则采用该值。每次事件的最大增幅往往出现在南极中子监测器上，这是意料之中的，因为这些监测器位于高海拔地区，且截止刚度较低。在非极地纬度、靠近海平面的站点，增幅通常较小，因为这些站点还受到地磁屏蔽和大气屏蔽的影响。截止刚度的变化会影响地面增强事件的探测及其强度，其他因素（如福布斯下降）也会产生影响（例如，地面增强事件72发生在一次福布斯下降末期，当时计数率仍受到抑制（Hubert et al., 2019）；地面增强事件67则发生在地面增强事件66之后的一次福布斯下降期间（Mishev et al., 2021）。

图中的峰值通量和中子监测器峰值增幅8在所有高能通道中都呈现出极强的相关性。Ch12 和 Ch14 的相关系数分别为 0.879 和 0.925。在对 GOES 数据中的太阳高能粒子事件进行类似分析时，Oh 等（2010）发现，P8 和 P10 的相应相关系数分别为 0.874 和 0.867。两组分析均独立表明，高能通道与中子监测器的最大增幅之间存在很强的相关性。本分析中，这种相关性从 Ch12 到 Ch14 略有增强；而 Oh 等（2010）的分析中，相关性在 P8 和 P10（与我们的通道最为相似）之间略有减弱。这种

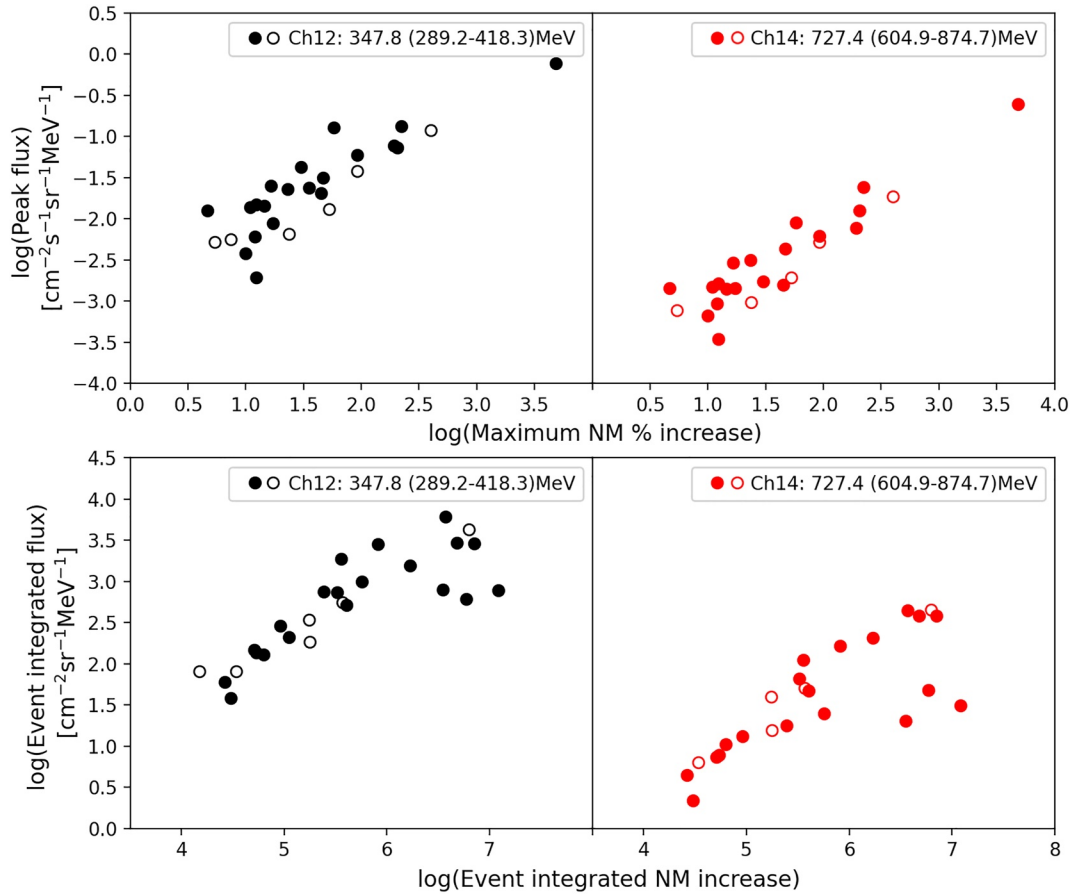



**图8**。 地球静止环境业务卫星（GOES）峰值通量与我们事件列表中地面增强对应的中子监测器（NM）最大百分比增幅之间的关系图（上图），以及通道12和14中GOES事件积分通量与中子监测器事件积分强度之间的关系图（下图）。空心圆表示中子监测器数据并非来自南极中子监测器的事件。

关系甚至适用于最强烈的地面增强事件 GLE 69。该事件位于两幅图的右上方，其峰值通量和中子监测器增幅均显著高于其他事件。图8中未纳入 Ch13 面板，因为其结果与 Ch12 非常相似。

同样，在图 8（底部面板）中，GOES 事件和中子监测器事件的积分通量之间存在良好的相关性。对于 Ch12 和 14，相关系数分别为 0.853 和 0.793。图 8 下方面板中使用去趋势数据的地面增强事件较少。Oh 等（2010）的分析没有研究中子监测器数据中的地面增强事件积分通量。相反，他们将 GOES 事件的积分通量与中子监测器数据中的最大增幅进行了比较。其中，他们将积分通量计算为峰值之后半天时间间隔内的强度时间积分。对于 P8 和 P10 通道，他们发现相关系数分别为 0.821 和 0.871。对我们的数据集进行等效计算后，Ch 12 和 14 的相关系数分别为 0.742 和 0.813。

GLE 69 是我们样本中最极端的地面增强事件，其中子监测器的增幅至少比其他地面增强事件高一个数量级。其极端特性及相关性质已得到充分记录和研究。例如，GLE 69 与一次伽马射线耀斑相关联，且观测发现，该事件在脉冲峰值期间上升极快、各向异性很强（Grechnev 等，2008；Klein 等，2014）。在我们的许多结果中，GLE 69 都显得格外突出，与样本中的其他事件似乎不太吻合。GLE 69 的中子监测器增幅和峰值通量都很大，因此在图 8中与主要地面增强事件簇区分开来。有人认为，这次“超级地面水平增强”的极端特性，部分归因于其位于西半球、地球足点位置有利，以及事件发生时源位置靠近日球电流片（Waterfall 等，2022）。

10.1029/2022SW003334

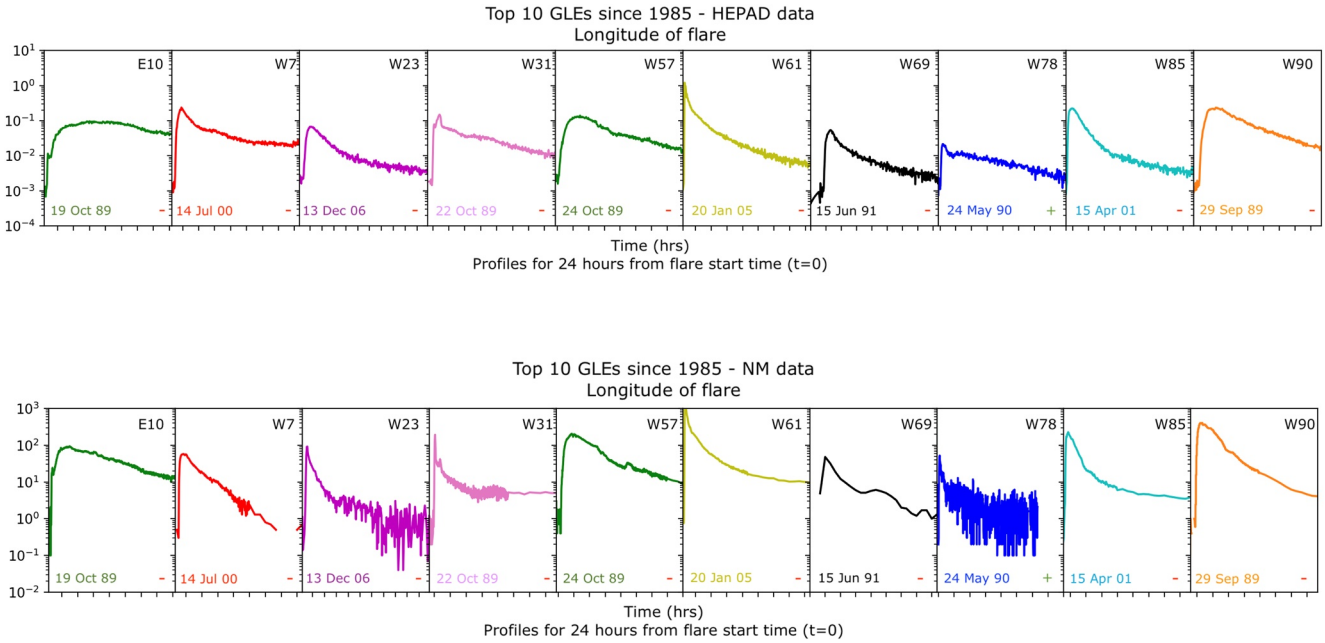



**图 9**。 自 1985 年以来按相关耀斑经度排序的前 10 个地面增强事件（GLE）。上图：太阳高能粒子通量曲线；下图：中子监测器记录的增幅最大的地面增强事件曲线。事件曲线显示相关耀斑开始后 24 小时内的情况。

我们还考察了 GOES 事件的起始时间与中子监测器剖面的对比。每个案例中，中子监测器数据的起始时间都早于 GOES 起始时间，或仅晚于其不到 10 分钟，这与较高能量的粒子导致地面增强事件的情况一致。Ch14 中耀斑开始至起始的时间间隔，与中子监测器数据中耀斑开始至起始的时间间隔（起始时间可确定时）具有良好相关性（0.75）。

除了这些事件各自的特性外，还可以对总体剖面进行比较。图9显示了自1985年以来通量最大的10次地面增强事件的GOES（上）和中子监测器（下）剖面。这些剖面按经度排列，最左侧是位于东经的GLE 43，最右侧则是位于最西端的GLE 42。从这一排列可以清楚看出，在通量最大的地面增强事件中，剖面类型与经度之间并无明显规律。在这组事件中，通量“较低”的事件之一是1991年6月15日发生的GLE，当时其位置较为有利，位于西经69度。图9显示，中子监测器和GOES高能粒子剖面具有高度相似性。许多事件的上升和衰减剖面形状一致。同样，GLE 69（2005年1月20日）也很突出，其脉冲分量异常尖锐，剖面形状也十分鲜明。

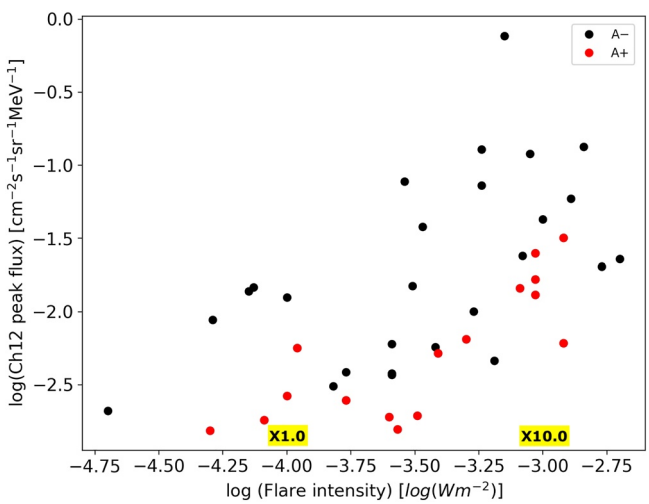



**图 10**。 42 个太阳高能粒子事件中的软X射线耀斑峰值强度和 Ch12通量（同图 5）。发生在 A+构型期间的事件以红色突出显示。A+和 A−两类事件的相关系数分别为 0.80 和 0.56（较图 5中的 0.55 有所提高）。

## 7. 高能事件与日球电流片

考察事件期间日球磁场的极性后，我们发现这 10 次最强地面增强事件中，有 9 次发生在 A− 构型期间（即太阳磁场在北半球指向内）。WATERFALL 等人（2022）也观察到了类似模式，他们只考察了百分比增幅超过 15% 的地面增强事件。在其事件样本中的 17 次地面增强事件里，有 14 次发生在 A− 构型期间。研究发现，这些地面增强事件大多受到日球电流片与源位置之间距离的影响。Dalla 等人（2020）对高能太阳质子输运进行的三维建模也发现，A+ 时期的通量较低。他们认为，这是由于磁场极性会影响日球电流片附近的漂移运动；在 A+ 构型下，粒子沿日球电流片向外日球层输运的路径更直接、速度也更快。在考察极性时

10.1029/2022SW003334

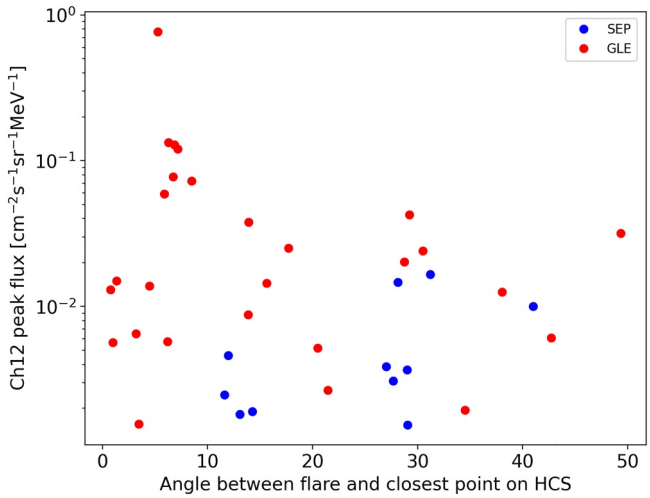



**图11**。 Ch12测得的太阳高能粒子（SEP）峰值通量与耀斑位置到日球电流片最近点之间角距离的关系图。地面增强事件以红色表示，非地面增强太阳高能粒子事件以蓝色表示。

对于样本中未纳入图 9 的其他事件，第24太阳活动周的事件主要处于 A+ 构型。图 9 中没有第24太阳活动周的地面增强事件，这些事件的中子监测器增幅也非常小。图 10 显示，发生在 A+ 构型期间的太阳高能粒子事件，其峰值通量较低。耀斑强度和 Ch12 峰值通量与图 5 相同。对于给定的耀斑强度，较小的 Ch12 事件通常是 A+ 事件。

Waterfall 等人（2022）此前研究了 1976 年至 2020 年间与地面增强事件相关及无关的大型耀斑的位置，以及它们与日球电流片的距离。他们发现，44% 的地面增强事件相关源区位于距日球电流片不到 10° 的位置。图 11考察了本研究事件中，峰值通量随耀斑位置与日球电流片之间角距离的变化情况。该角度根据源表面地图数据计算得出，数据由 Wilcox太阳观测站（WSO）提供，网址为 http://wso.stanford.edu。这些地图包含事件发生时日球电流片的信息，并基于光球磁图数据，采用势场建模构建。所有事件的角度与峰值通量之间呈弱负相关（Ch12 的相关系数为 −0.23）。为进一步探究地面增强事件与非地面增强事件群体之间的潜在差异，图中将事件标为红色（地面增强事件）和蓝色（非地面增强事件）。我们发现，所有角度小于 10° 的事件都是地面增强事件，占地面增强事件总数的 52%。此外，Ch12 中所有峰值通量 $>2\times10^{-2}$ cm$^{-2}$ s$^{-1}$ sr$^{-1}$ 兆电子伏特$^{-1}$ 的事件也都是地面增强事件。

## 8. 讨论与结论

我们分析了1984—2017年期间观测到的42次高能太阳高能粒子事件，涵盖三个完整的太阳活动周。我们将相关耀斑、日冕物质抛射和地面增强事件的若干特征与高能GOES数据进行了比较，并发现了若干相关关系。我们将这些关系与现有的低能太阳高能粒子事件分析和中子监测器研究进行了比较。主要结论如下:

- 大多数在能量为>300 兆电子伏特时可观测到的太阳高能粒子事件都与地面增强事件有关（29/42）。
- 在所有三个高能通道中，耀斑强度与峰值通量之间的相关性通常弱于低能分析中所见的相关性。相比之下，积分通量的相关性则相当。表4中对这些系数进行了比较。根据事件发生时的行星际磁场极性计算系数后，峰值通量的相关性有所提高。

- 所有通道中，日冕物质抛射速度与峰值通量（及积分通量）之间的相关性都较弱，这与低能分析中观察到的中等相关性形成对比。此结论基于我们有日冕物质抛射数据的事件子集。

- 在地面增强事件中，太阳高能粒子事件的特性与中子监测器数据之间存在很强的相关性和相似性。所有高能通道中，峰值通量与中子监测器最大增幅之间的相关性最强（>0.9）。

- 对于规模最大的事件，GOES和中子监测器剖面也具有相似特征，尽管地面增强事件粒子会受到地球磁场和中子监测器位置的影响
- 较大的地面增强事件强度曲线并未因相关耀斑的位置而呈现明显的排序，这与低能太阳高能粒子的常见情况不同。这可能是因为在这些能量下，日球电流片漂移（Waterfall 等，2022）以及梯度漂移和曲率漂移（Dalla 等人，2013、2020）等效应更为重要。

我们计算了高能数据集的许多特征，包括三个高能通道中的峰值通量、事件积分通量、起始时间、持续时间等。这些特征均与相关耀斑的经度、软X射线峰值通量、软X射线起始时间和持续时间、日冕物质抛射速度、日冕物质抛射宽度等进行了比较。我们在此报告了其中最显著的关系，以及那些偏离低能分析结果的关系。在考察耀斑参数时，耀斑强度与Ch12积分通量之间的相关性最强，为0.62。Papaioannou 等在相近时间段内对低能GOES数据进行分析，获得了0.48和0.42的系数，分别对应 >10 和 >100 兆电子伏特。相反，我们将日冕物质抛射速度与峰值通量进行比较所得的结果，并未产生与低能分析相当的结果。Papaioannou 等（2016年）得到的相关性

系数从>10 到>100 兆电子伏特时由0.57降至0.40。我们在各通道中观察到的相关性要弱得多（Ch13最低，仅为0.14）。在日冕物质抛射分析中，由于20世纪80年代缺乏日冕物质抛射数据，我们原本就很小的事件列表进一步缩减，从而限制了分析。尽管如此，结果表明，对于高能量而言，更快的日冕物质抛射并不会导致更高能量粒子数量增加。此前已有研究利用日冕物质抛射数据建立经验模型，用于预测10–130兆电子伏特范围内的太阳高能粒子能谱（Bruno 和 Richardson，2021年）。太阳高能粒子能谱是一项重要特征，可能有助于理解本研究中在更高能量下观察到的相关性。然而，深入研究太阳高能粒子能谱目前超出了本文的范围，但值得在未来的研究中进一步开展。

我们的分析受到以下因素限制：与低能量对应事件相比，>300 兆电子伏特 SEP 事件数量相对较少，且可用于观测多个高能事件的航天器数量有限。此前曾对 PAMELA 观测到的极端 SEP 事件进行分析（Bruno等人，2018年），但可用数据仅涵盖 2006 年至 2016 年间发生的 SEP 事件。这段时期的太阳活动相对平静，仅发生了两次地面增强事件。该研究使用了 30 个 SEP 事件，其中 6 个事件的源区位于日面边缘后方（这是本分析中被排除事件的一个特征），其余 24 个事件中仅有 6 个也纳入了这项高能研究。虽然来自航天器的高能数据集有限，但我们也可以利用中子监测器的地面数据。本分析使用了中子监测器探测到的多个地面增强事件期间的峰值增幅和事件持续时间信息。GOES 数据集中最大的地面增强事件均具有明确且强烈的中子监测器剖面。我们将这些中子监测器剖面与相应的 GOES 剖面进行比较，发现剖面形状存在若干相似之处。中子监测器最大增幅与 Ch12 和 Ch14 峰值通量之间存在很强的相关性。此前的分析（Oh 等，2010）也报告了中子监测器峰值与 GOES 峰值之间的相关性。在数个数量级范围内，中子监测器事件与 GOES 事件的积分通量之间存在很强的相关性。GOES 观测到的并非每个高能 SEP 事件（>300 兆电子伏特）都与地面增强事件相关（后者被认为与能量为 >500 兆电子伏特的质子有关）。对于存在这种关联的事件，强相关性表明：在 >300 和 >500 兆电子伏特下的加速和传播过程相似；地磁场的影响能够保留峰值强度和整体形态，至少对于观测到最高通量的中子监测器而言如此（通常位于极区）。

我们数据集中一个值得注意的 GLE 是 GLE 69（2005年1月20日）。由于其极具脉冲性的剖面，以及远高于其他太阳高能粒子事件几个数量级的峰值通量（和中子监测器增幅），这一 GLE 在文献中得到了广泛研究。尽管它符合本文中观察到的许多相关性和趋势，但在我们的许多图中，GLE 69 的巨大通量仍常被视为异常值。因此，我们称其为“超级地面增强事件”；不过需要指出的是，其相关耀斑强度很大（X7.1级），但与其他事件仍相当。其相关日冕物质抛射速度极快，据报告为 3,256 km $s^{-1}$ (Papaioannou 等，2016年）。Lario 等（2008）此前的研究探讨了太阳高能粒子事件是否存在流 streaming极限。然而，GLE 69 的存在及其极端的峰值通量对流 streaming极限这一概念构成了挑战。许多因素都会影响太阳爆发事件在特定日球层位置产生的效应（例如源经度、日冕物质抛射速度、峰值 X 射线耀斑强度），而且可以认为，在此次事件发生时，这些因素中的许多都恰好达到了最佳组合。虽然 1956 年 GLE 5 没有 GOES数据，但其造成的中子监测器增幅（大于 GLE 69）以及本文中观察到的峰值通量与中子监测器增幅之间的强相关性，进一步支持了流 streaming极限并不存在、且可能出现更大峰值通量这一观点。

样本中的事件涵盖了范围广泛的耀斑和日冕物质抛射速度（M2.0–X20 和 792–3,256 km $s^{-1}$，分别）。也曾观测到规模相近、却未引发太阳高能粒子事件的耀斑和日冕物质抛射。太阳高能粒子事件未发生的一个常见解释是，粒子源位置处于东侧位置，因此与地球的磁连接较弱。然而，在表 2中的 13 个非地面增强太阳高能粒子事件里，只有 4 个位于东经。关于某些事件为何比其他事件规模更大，也有其他解释，例如帕克螺旋引起的曲率漂移和梯度漂移，或源区靠近日球电流片（Dalla 等人，2015年；Waterfall 等，2022）。不过，还需要更多数据来进一步探究这一问题。随着时间推移，我们将获得更多高能太阳高能粒子事件，但还需要探测器对其进行分析。理解为何某些大型太阳爆发事件会引发太阳高能粒子事件（甚至地面增强事件），而另一些却不会，这对空间天气研究和改进预报至关重要。太阳高能粒子事件的统计研究常用于预报模型。例如，目前太阳耀斑参数与太阳高能粒子峰值通量之间的相关性已用于太阳高能粒子预报模型 SPARX（Marsh等，2015年）。该模型未采用日冕物质抛射速度等其他参数，因为这些参数无法实时获取。不过，未来的观测以及纳入此类特征，将有助于改进这些预报模型。

总体而言，目前缺乏涵盖 >300 兆电子伏特能量范围的综合数据集。可以说，这些能量范围内的事件对空间天气相关危害最为重要；深入了解这些事件至关重要。GOES-HEPAD 仍是唯一能够提供长达数十年、能量高达数百兆电子伏特观测数据的探测器。类似的高能探测器（如 GME–IMP8）存在许多数据缺口，因此无法用于本研究。随着太空探索不断发展，我们需要更多关于这些高能事件的信息。这些信息以及对高能数据的分析，可用于航空业的预报模型，也有助于保护宇航员和太空基础设施。

## 数据可用性声明

本文使用了 SEPEM 参考数据集第 3 版（Jiggens 等，2022），并利用重新校准的 HEPAD 数据将其扩展至高能范围（Raukunen 等，2020）。原始数据来自 GOES 观测，经过了清理、背景扣除和交叉校准（Rodriguez 等，2017；Sandberg 等，2014）。原始数据可从以下地址获取：https://satdat.ngdc.noaa.gov/sem/goes/data/avg/。中子监测器数据来自 GLE数据库 https://gle.oulu.fi，该数据库由芬兰奥卢大学的奥卢宇宙射线站管理并托管（Usoskin 等，2020）。日球电流片信息来自 Wilcox太阳观测站（WSO），该站目前由斯坦福大学运营，资金由美国国家科学基金会提供。WSO 数据可通过 http://wso.stanford.edu访问。现有太阳高能粒子事件的信息来自美国国家海洋和大气管理局空间环境服务中心的列表：https://umbra.nascom.nasa.gov/SEP/。图表使用 Matplotlib 3.3.2 版制作（Hunter，2007），可从以下地址获取：https://matplotlib.org。

**致谢**
C.O.Waterfall 和 S. Dalla 感谢英国自然环境研究委员会通过 SWARM项目提供的支持；该项目是 S WIMMR计划的一部分（资助项目 NE/V002864/1）。SD 感谢英国科学技术设施委员会通过资助项目 ST/R000425/1和ST/V000934/1提供的支持，并感谢国际空间科学研究所通过资助“太阳极端事件：建立一种范式”国际团队提供的支持。我们感谢本研究使用了 Wilcox太阳观测站的数据。

## 参考文献

Anastasiadis, A., Papaioannou, A., Sandberg, I., Georgoulis, M., Tziotziou, K., Kouloumvakos, A., & Jiggens, P. (2017). 耀斑和太阳高能粒子事件预测：FORSPEF工具. 《太阳物理学》, 292(9), 1–21. https://doi.org/10.1007/s11207-017-1163-7 Bruno, A., Bazilevskaya, G., Boezio, M., Christian, E. R., de Nolfo, G., Martucci, M., et al. (2018). PAMELA任务观测到的太阳高能粒子事件. 《天体物理学杂志》, 862(2), 97. https://doi.org/10.3847/1538-4357/aacc26 Bruno, A., & Richardson, I. G. (2021). 基于日冕物质抛射速度和方向的1 AU处10–130 MeV太阳高能粒子能谱经验模型. 《太阳物理学》, 296(2), 1–27. https://doi.org/10.1007/s11207-021-01779-4 Cane, H., & Richardson, I. (1995). 1989年10月下旬的宇宙射线强度下降和太阳风扰动. 地球物理研究杂志, 100(A2), 1755–1762. https://doi.org/10.1029/94ja03073 Cane, H., Richardson, I., & Von Rosenvinge, T. (2010). 1997–2006年太阳高能粒子事件研究：其组成与关联. 地球物理研究杂志, 115(A8), A08101. https://doi.org/10.1029/2009ja014848 Dalla, S., De Nolfo, G., Bruno, A., Giacalone, J., Laitinen, T., Thomas, S., et al. (2020). 相对论性太阳质子在行星际空间中的三维传播. 天文学与天体物理学, 639, A105. https://doi.org/10.1051/0004-6361/201937338 Dalla, S., Marsh, M., Kelly, J., & Laitinen, T. (2013). 帕克螺旋中的太阳高能粒子漂移. 地球物理研究杂志：空间物理, 118(10), 5979–5985. https://doi.org/10.1002/jgra.50589 Dierckxsens, M., Tziotziou, K., Dalla, S., Patsou, I., Marsh, M., Crosby, N., et al. (2015). 太阳高能粒子与耀斑和日冕物质抛射特性的关系：第23太阳活动周事件的统计分析. 《太阳物理学》, 290(3), 841–874. https://doi.org/10.1007/ s11207-014-0641-4 Fiori, R. A., Kumar, V. V., Boteler, D. H., & Terkildsen, M. B. (2022). 航空所用高频无线电通信受到空间天气影响的发生率和持续时间. Journal of Space Weather and Space Climate, 12, 21., https://doi.org/10.1051/swsc/2022017 Gopalswamy, N., Xie, H., Akiyama, S., Mäkelä, P. A., & Yashiro, S. (2014). 第24太阳活动周的重大太阳爆发和高能粒子事件. Earth Planets and Space, 66(1), 1–15. https://doi.org/10.1186/1880-5981-66-104 Gopalswamy, N., Xie, H., Yashiro, S., Akiyama, S., Mäkelä, P., & Usoskin, I. (2012). 第23太阳活动周地面增强事件的特性及相关太阳爆发. Space Science Reviews, 171(1), 23–60. https://doi.org/10.1007/s11214-012-9890-4 Gopalswamy, N., Yashiro, S., Michalek, G., Stenborg, G., Vourlidas, A., Freeland, S., & Howard, R. (2009). SOHO/LASCO 日冕物质抛射目录. 地球、月球与行星, 104(1), 295–313. https://doi.org/10.1007/s11038-008-9282-7 Grechnev, V., Kurt, V., Chertok, I., Uralov, A., Nakajima, H., Altyntsev, A., et al. (2008). 2005年1月20日的极端太阳事件：耀斑特性及高能粒子的起源. 《太阳物理学》, 252(1), 149–177. https://doi.org/10.1007/s11207-008-9245-1 Heynderic, D., Berger, T., Jiggens, P., Vainio, R., Matthiä, D., Lei, F., et al. (2022). 欧洲空间局人类行星际探索辐射风险评估系统（HIERRAS）. 收录于第44届国际空间研究委员会科学大会（第2708页）。Hubert, G., Pazianotto, M. T., Federico, C. A., & Ricaud, P. (2019). 利用南极和中纬度站运行的中子能谱仪分析2017年9月的福布斯下降和地面增强事件. Journal of Geophysical Research: Space Physics, 124(1), 661–673. https://doi.org/10.1029/2018ja025834 Hunter, J. D. (2007). Matplotlib：二维图形环境. Computing in Science & Engineering, 9(03), 90–95. https://doi.org/10.1109/mcse.2007.55 Jiggens, P., Heynderickx, D., Sandberg, I., Truscott, P., Raukunen, O., & Vainio, R. (2018). 更新的空间太阳高能质子环境模型. Journal of Space Weather and Space Climate, 8, A31. https://doi.org/10.1051/swsc/2018010 Jiggens, P., Raukunen, O., Sandberg, I., Mutch, S., Aminalragia-Giamini, S., Vainio, R., et al. (2022). SEPEM 参考数据集—版本3 [数据集]. 取自 https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2022cosp...44.1163J/abstract Jiggens, P. T. A., Gabriel, S. B., Heynderickx, D., Crosby, N., Glover, A., & Hilgers, A. (2012). 欧洲空间局 SEPEM 项目：峰值通量和积分通量模型. 《IEEE核科学汇刊》, 59(4), 1066–1077. https://doi.org/10.1109/TNS.2012.2198242

Kahler, S.（2001）。太阳高能粒子峰值强度与日冕物质抛射速度之间的相关性：环境粒子强度和能谱的影响。《地球物理研究杂志》，106(A10)，20947–20955。https://doi.org/10.1029/2000ja002231 Kahler, S.、Hildner, E. 和 Van Hollebeke, M.（1978）。太阳质子事件和日冕物质抛射。《太阳物理学》，57(2)，429–443。https://doi.org/10.1007/bf00160116 Kahler, S. 和 Ling, A.（2018）。太阳高能粒子事件积分通量与峰值强度的关系。《太阳物理学》，293(2)，1–16。https://doi.org/10.1007/s11207-018-1249-x Klein, K.-L.、Masson, S.、Bouratzis, C.、Grechnev, V.、Hillaris, A. 和 Preka-Papadema, P.（2014）。2005年1月20日的相对论性太阳粒子事件：延迟粒子加速的起源。《天文学与天体物理学》，572，A4。https://doi.org/10.1051/0004-6361/201423783 Kühl, P.、Dresing, N.、Heber, B. 和 Klassen, A.（2017）。利用 SOHO/EPHIN 测量的1995年至2015年间质子能量高于500兆电子伏特的太阳高能粒子事件。《太阳物理学》，292(1)，1–13。https://doi.org/10.1007/s11207-016-1033-8 Lario, D.、Aran, A. 和 Decker, R.（2008）。第22和23太阳活动周的重大太阳高能粒子事件：超过流 streaming极限的强度。《空间天气》，6(12)，S12001。https://doi.org/10.1029/2008sw000403 Lario, D. 和 Decker, R.（2002）。1989年10月20日的高能风暴粒子事件。《地球物理研究快报》，29(10)，31–1。https://doi.org/10.1029/2001gl014017 Marsh, M.、Dalla, S.、Dierckxsens, M.、Laitinen, T. 和 Crosby, N.（2015）。SPARX：用于太阳高能粒子辐射空间天气预报的建模系统。《空间天气》，13(6)，386–394。https://doi.org/10.1002/2014sw001120 Mishev, A. L.、Koldobskiy, S. A.、Kocharov, L. G. 和 Usoskin, I. G.（2021）。2003年11月2日的 GLE# 67事件：利用经验证的产额函数和去趋势中子监测器数据分析其能谱和各向异性特征。《太阳物理学》，296(5)，1–18。https://doi.org/10.1007/s11207-021-01832-2 Moraal, H. 和 Caballero-Lopez, R.（2014）。1989年9月29日的宇宙线地面增强。《天体物理学杂志》，790(2)，154。https://doi.org/10.1088/0004-637x/790/2/154 Núñez, M.（2022）。评估 UMASEP-10第2版工具对第22、23和24太阳活动周所有>10 兆电子伏特太阳高能粒子事件的预测能力。《Universe》，8(1)，35。https://doi.org/10.3390/universe8010035 Oh, S.、Yi, Y.、Bieber, J.、Evenson, P. 和 Kim, Y.（2010）。与地面增强相关的太阳质子事件特征。《地球物理研究杂志》，115(A10)，A10107。https://doi.org/10.1029/2009ja015171 Onsager, T.、Grubb, R.、Kunches, J.、Matheson, L.、Speich, D.、Zwickl, R. W. 和 Sauer, H.（1996）。GOES高能粒子探测器的业务应用。载于《GOES-8及后续型号》，（第2812卷，第281–290页）。Paassilta, M.、Raukunen, O.、Vainio, R.、Valtonen, E.、Papaioannou, A.、Siipola, R. 等（2017）。涵盖第23和24太阳活动周的55–80兆电子伏特太阳质子事件目录。《空间天气与空间气候杂志》，7，A14。https://doi.org/10.1051/swsc/2017013 Papaioannou, A.、Sandberg, I.、Anastasiadis, A.、Kouloumvakos, A.、Georgoulis, M. K.、Tziotziou, K. 等（2016）。太阳耀斑、日冕物质抛射和太阳高能粒子事件特征。《空间天气与空间气候杂志》，6，A42。https://doi.org/10.1051/swsc/2016035 Poluianov, S.、Usoskin, I.、Mishev, A.、Shea, M. 和 Smart, D.（2017）。高海拔极地中子监测器背景下的 GLE 和亚地面增强重新定义。《太阳物理学》，292(11)，176。https://doi.org/10.1007/s11207-017-1202-4 Raukunen, O.、Paassilta, M.、Vainio, R.、Rodriguez, J. V.、Eronen, T.、Crosby, N. 等（2020）。超高能质子峰值通量模型。《空间天气与空间气候杂志》，10，24。https://doi.org/10.1051/swsc/2020024 Reames, D. 和 Ng, C.（1998）。太阳高能粒子的流限制强度。《天体物理学杂志》，504(2)，1002–1005。https://doi.org/10.1086/306124 Rodriguez, J. V.、Sandberg, I.、Mewaldt, R. A.、Daglis, I. A. 和 Jiggens, P.（2017）。通过与STEREO观测结果比较，验证交叉校准的 GOES太阳质子有效能量对所得积分通量的影响。《空间天气》，15(2)，290–309。https://doi.org/10.1002/2016SW001533 Sandberg, I.、Jiggens, P.、Heynderickx, D. 和 Daglis, I. A.（2014）。利用校正后的 NASA IMP-8/GME数据对 NOAA GOES太阳质子探测器进行交叉校准。《地球物理研究快报》，41(13)，4435–4441。https://doi.org/10.1002/2014GL060469 Usoskin, I.、Koldobskiy, S.、Kovaltsov, G.、Gil, A.、Usoskina, I.、Willamo, T. 和 Ibragimov, A.（2020）。修订版 GLE数据库：自1956年以来由中子监测器网络测量的太阳高能粒子积分通量。《天文学与天体物理学》，640，A17。https://doi.org/10.1051/0004-6361/202038272 Van Allen, J. A.、Baker, D. N.、Randall, B. A. 和 Sentman, D. D.（1974）。利用先驱者10号观测到的木星磁层：1. 仪器和主要发现，79(25)，3559–3577。https://doi.org/10.1029/JA079i025p03559 Van Hollebeke, M.、Ma Sung, L. 和 McDonald, F.（1975）。太阳质子能谱和尺寸分布随日心经度的变化。《太阳物理学》，41(1)，189–223。https://doi.org/10.1007/bf00152967 Waterfall, C. O.、Dalla, S.、Laitinen, T.、Hutchinson, A. 和 Marsh, M.（2022）。历史 GLE事件期间沿日球层电流片传播相对论性太阳质子的建模。《天体物理学杂志》，934(1)，82。https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac795d Xie, H.、St. Cyr, O.、Mäkelä, P. 和 Gopalswamy, N.（2019）。第24太阳活动周期间多航天器广泛太阳高能粒子事件的统计研究。《地球物理研究杂志：空间物理学》，124(8)，6384–6402。https://doi.org/10.1029/2019ja026832