拟提交至 JCAP

arXiv:2601.22807v1 [astro-ph.SR] 30 Jan 2026

伽马射线分量中的地面增强（GLE#77）：首次来自北极和南极台站的观测

Pranali Thakur,[a,1] **Geeta Vichare,**[a] **Selvaraj Chelliah**[b]

[a]印度地磁研究所（IIG），印度新孟买18区[b]IIG赤道地球物理研究实验室，蒂鲁内尔维利，印度

电子邮件：pranalispace@gmail.com，vicharegeeta@gmail.com，selvaegrl@gmail.com

摘要。 本文介绍了2025年11月11日发生的第25太阳活动周极强地面增强事件（GLE #77）的观测结果。研究采用部署在北极和南极台站的地基NaI(Tl)伽马射线探测器，并结合中子监测器数据及GOES-18卫星的粒子测量。该事件伴随着一次强烈的X级太阳耀斑和一次强太阳高能质子事件。本文报告了首次利用同时运行于两极地区的地基伽马射线探测器探测到地面增强事件；与此同时，中子监测器计数也出现上升。这凸显了在极端太阳质子事件期间，极地伽马射线探测器能够补充传统中子监测器观测的能力。详细分析揭示了事件演化过程中的即时响应和延迟响应各自特征。值得注意的是，GLE#77即时峰（世界时10:38）的信号在高刚度中子监测器（低纬度）上也有观测到。然而，在刚度为 > 6 GV的台站未观测到延迟峰（世界时13:08）。即时峰和延迟峰出现的时间，分别与GOES-18卫星观测到的能量为 > 150 兆电子伏和12–99兆电子伏的质子通量峰相吻合。观测发现，地面增强事件幅度与地磁截止刚度有很强的相关性，而对太阳天顶角的依赖较弱。

关键词： 地面增强事件（GLE）、伽马射线探测器、中子监测器、太阳质子事件（SPE）

[1]通讯作者。

目录

1 引言 1

2 数据 2

3 2025年11月11日地面增强事件（GLE#77）的观测 3

3.1 北极伽马射线观测5 3.2 南极洲伽马射线观测6 3.3 中子监测器（NM）观测6

4 讨论与结果 7

4.1 振幅随地磁刚度的变化：即时峰与延迟峰9 4.2 振幅随太阳天顶角的变化10

5 结论 11

1 引言

地面增强事件（GLE）是太阳质子事件（SPE）中罕见且极端的表现形式。在这类事件中，相对论粒子（主要是质子）穿透地球大气层，并产生可在地面探测到的次级辐射。这些事件通常与重大的太阳爆发有关，例如X级太阳耀斑和快速日冕物质抛射（CME），代表SPE能谱中能量最高的尾部。Forbush 1946 [1] 于1942年2月和3月首次观测到来自太阳的高能粒子：地面电离室中的强度突然升高，并将这种升高称为“地面增强事件”（GLE）。传统上，GLE通过全球中子监测器（NM）网络进行识别和研究。该网络记录SPE期间次级中子计数率突然且具有统计显著性的上升。GLE的正式定义要求多个中子监测站几乎同时出现增强，其中至少一个位于接近海平面的高度，同时空间质子通量测量也出现相应升高 [2]。GLE为研究太阳及日球层中的粒子加速和输运过程提供了独特机会。截至目前，已有77次GLE得到记录（https://gle.oulu.fi/#/；https://www.nmdb.eu/nest/），跨越多个太阳活动周，其中许多事件呈现出复杂的时间结构，例如各向异性起始、延迟极大值和多个强度峰 [3–6] 以及其中所列参考文献。研究表明，一些GLE具有复杂的时间结构，通常可用不同的粒子加速和输运过程来解释。早期、强烈各向异性的起始通常与耀斑区或低日冕附近的快速加速有关；而延迟增强通常归因于CME驱动激波中的粒子加速，以及粒子随后在日球磁场中的传播效应 [6, 7]。最近，Volkov等人（2025） [8]报告了使用莫斯科NEVOD实验综合体的中子探测器阵列观测GLE#77的结果，表明观测结果与传统中子监测器观测高度一致。此外，Chilingarian等人（2025） [9]报告了大气中子和

阿拉加茨太阳中子望远镜对与GLE#77相关的μ子进行了测量。他们的研究发现了明显的双峰结构，分别在世界时10:28出现初始硬成分，在10:45出现较软成分。他们报告了GLE期间40–600兆电子伏能区次级粒子能谱的首次同步测量，证实在第25太阳活动周期间，太阳能够将质子加速至GeV能量。尽管取得了这些进展，迄今为止，GLE地基研究主要集中于中子和μ子测量，而地面伽马射线观测仍鲜有探索。兆电子伏能区的伽马射线对高能粒子引发的大气簇射十分敏感，因此可为粒子相互作用、大气调制及局地地磁效应提供补充信息。高纬度地区尤其适合开展此类观测，因为这些地区地磁截止刚度较低，磁屏蔽较弱。本文利用部署在北极台站和南极台站的地基NaI(Tl)伽马射线探测器，结合中子监测器观测以及GOES-18卫星的X射线和质子通量测量，研究了2025年11月11日发生的极端GLE#77。我们重点关注事件期间伽马射线通量的时间演化，并考察中子监测器的响应。特别关注地磁刚度和太阳天顶角的作用，因为它们可能影响不同地点观测到的伽马射线和中子特征。本研究首次报告了在两个极地地区同时观测到的GLE地基伽马射线探测结果。

2 数据

近期，印度地磁研究所（IIG，孟买）在印度极地站安装了碘化钠（铊）闪烁探测器：北极的新奥勒松（地理坐标：76.63^{o}北纬，11.87^{o}东经；刚度：0.01，海拔：40 米）和南极洲的Maitri（地理坐标：-67.85^{o}南纬，11.43^{o}东经；刚度：0.3，海拔：117 米）。每个碘化钠（铊）探测器都是长方体，尺寸为 10.16 厘米 $\times$ 10.16 厘米 $\times$ 40.46 厘米。这些碘化钠（铊）探测器测量的伽马射线计数既包括地球放射性产生的计数，也包括由源自地外的级联过程产生的次级宇宙射线计数 [10–14]。地球放射性产生的背景放射性核素能量范围为 300 千电子伏至 3 兆电子伏，因此，能量为 > 3 兆电子伏的伽马射线可视为源自地外。

The X射线和粒子通量数据来自地球静止业务环境卫星 GOES-18航天器 (https://data.ngdc.noaa.gov/platforms/solar-space-observingsatellites/goes/goes18/l2/data/sgps-l2-avg1m/)。该航天器搭载了两个太阳与银河质子传感器 (SGPS) 单元，分别安装在 $-X$和 $+X$ 方向。SGPS$-X$ 单元朝向西方，而 SGPS$+X$ 单元朝向东方。每个 SGPS 单元由三个固态硅探测器望远镜 T1、T2 和 T3 组成，分别测量能量范围为 1–25 兆电子伏、25–80 兆电子伏和 $>$ 500兆电子伏的微分质子通量 [15]。本研究使用了时间分辨率为 1 分钟的二级数据产品，用于 X射线辐照度和质子通量测量。

本分析使用全球中子监测器（NM）网络在2025年11月11日发生的GLE#77期间记录的中子通量测量数据。我们采用来自NMDB数据库、时间分辨率为2分钟的中子监测器数据，以及来自OULU数据库、时间分辨率为1分钟的数据。我们使用以2分钟为间隔采样的大气压校正后的中子计数率，并据此计算五点移动平均值。随后，将各测站的中子和伽马射线通量相对于

其事件前基线进行归一化。参考水平 N_{mean}定义为扰动开始前测得的中子和伽马射线通量的平均值。 N_t 表示给定观测站在时间t的中子和伽马射线计数。由此计算得到的归一化百分比变化为，

$$N_{norm} = \frac{N(t) - N_{mean}}{N_{mean}} * 100 \tag{2.1}$$

3 2025年11月11日地面增强事件（GLE#77）的观测

活动区 AR 4274 于2025年11月11日产生了一次 X5.1级太阳耀斑。根据 GOES-18 X射线卫星的测量，耀斑于世界时09:49开始，世界时10:04达到峰值，并于世界时10:17结束。这次于2025年11月11日发生的强烈 X 级（X5.1）太阳耀斑，产生了地面增强事件 GLE#77。

图1展示了利用2025年11月11日的空间和地面观测数据得到的该事件时间演化。图中给出了 GOES-18卫星测得的X射线和质子通量，以及全球中子监测器网络（https://www.nmdb.eu/nest/）记录的中子通量变化。图1 的上图显示了 GOES X射线传感器测得的软X射线辐照度，清楚地显示出世界时10时的太阳耀斑脉冲（绿色虚线标记为“1”）。图1（b）至1（e）展示了 GOES-18 搭载的朝东和朝西的太阳与银河质子传感器单元记录的微分质子通量（P5–P10）。此处展示的是能量为>12 兆电子伏的质子通量，因为较低能量通量（1–12 兆电子伏）在该事件期间没有变化。图1 （f）显示了积分质子通量（P11，>500 兆电子伏）。部分中子监测站测得的中子通量见图1（g）–（h）。观测到多个能道中高于12兆电子伏的质子通量显著增强，并延伸至数百兆电子伏；这一增强始于 $\sim$10:10 UT，表明耀斑期间高能太阳质子得到高效加速，使高能太阳高能质子抵达地球附近。可以看到，朝西的 P5、P6、P7 和 P8A 通量逐渐增加，并在世界时13时左右达到峰值［图1（b）］；而朝东单元中的相同能道则较早达到峰值［图1（c）］。同样，朝西的 P8B 和 P8C 能道变化较晚达到峰值［图1（d）］，而朝东能道则较早［图1（e）］。高能质子（>150 兆电子伏）迅速增加，并在世界时10:38左右达到峰值［图1（d）至（f）］；较低能质子则逐渐增加，在世界时13:08达到峰值［图1（b）］。

质子通量的增加先于地面响应，随后全球多个台站的中子监测器计数率出现明显且显著的增强。这证实相对论性太阳质子穿透了地球大气层，并产生了可在地面探测到的次级粒子。因此，该事件已被列入奥卢大学维护的国际地面增强事件目录，编号为地面增强事件#77（http://gle.oulu.fi/#/）。卫星与地基观测数据相结合，表明该事件是第25太阳活动周期间粒子加速最强烈的事件之一。根据https://www.nmdb.eu/nest/ 和 http://gle.oulu.fi/#/提供的数据，全球中子监测器（NM）网络记录到中子通量显著增加，起始时间为2025年11月11日世界时10:10至10:20之间。不同地点的中子监测器测得的地面中子通量呈现即时峰和延迟峰（图1(g)-(h)）。即时峰持续时间较短，而延迟峰则具有

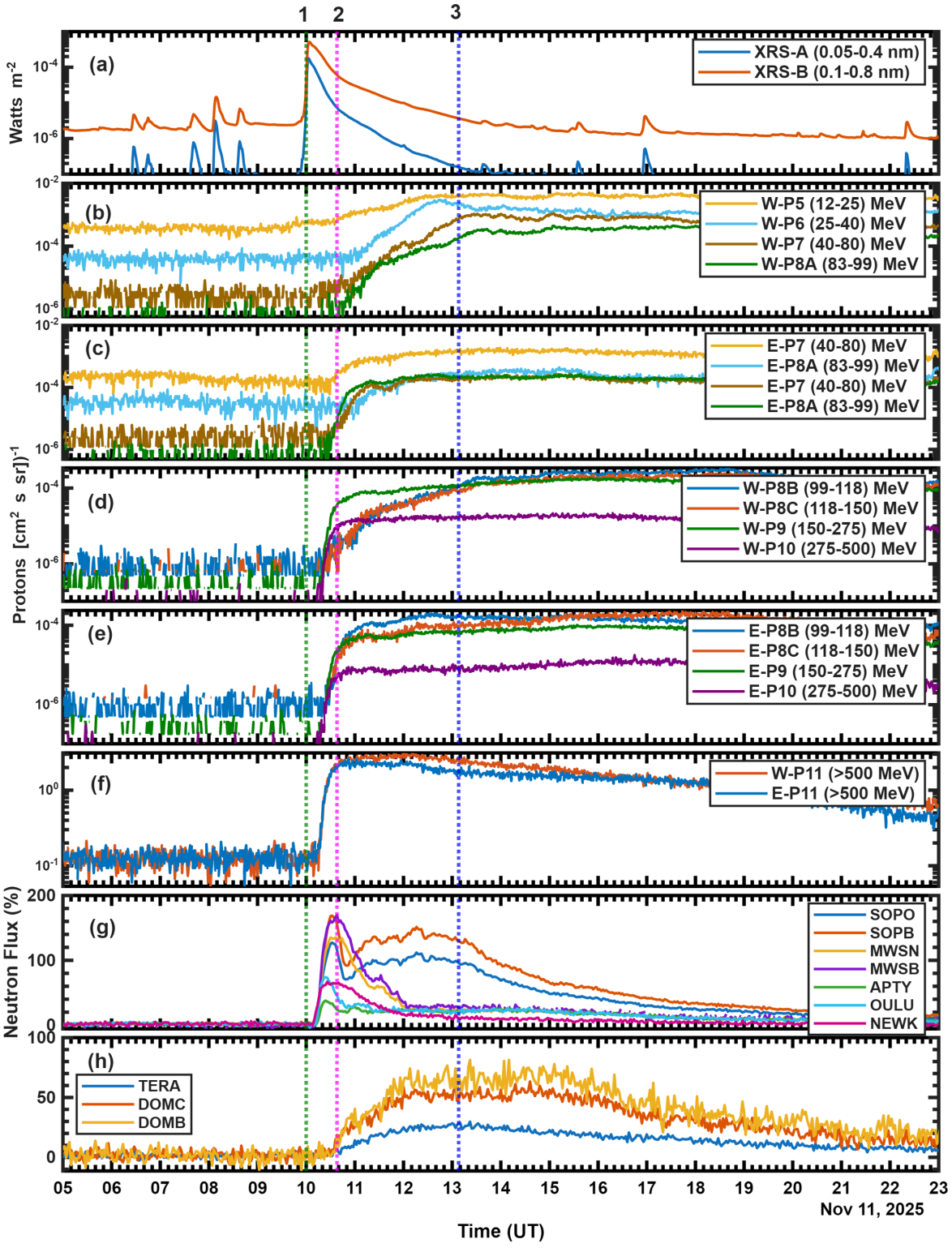

图 1。GOES-18太阳耀斑X射线通量、SGPS质子通量和地面增强事件#7期间的中子通量 7
于 2025年11月11日

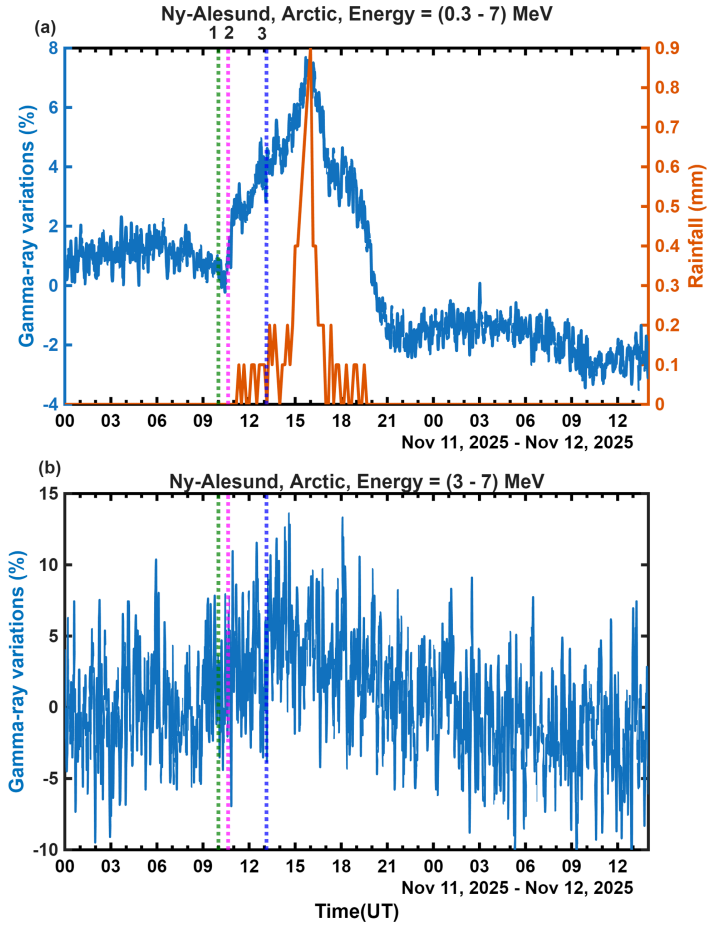

图2。2025年11月10日至12日伽马射线变化（300千电子伏至7兆电子伏；上图）；同期3-7兆电子伏能段的伽马射线变化（下图）

持续时间比即时峰更长。中子监测器观测到的即时增强与高能质子通量的突然增强相吻合，如图1 的(e)和(f)面板所示。因此，根据中子和质子通量，我们确定了2026年11月11日世界时10:38的即时峰（洋红色虚线，标记为“2”）以及世界时13:08的延迟峰（蓝色虚线，标记为“3”）。

3.1 北极的伽马射线观测

这些明显特征的存在可能表明，各个测站的粒子输运、大气级联发展和观测几何存在差异。这些变化反映了地磁截止刚度、当地时间以及日球磁场中传播条件的综合影响。然而，观察GOES-18记录的质子能谱后，似乎质子能量可能是即时峰和延迟峰的成因。

图2（a）显示了2025年11月11日在新奥勒松站采集的伽马射线数据的归一化百分比变化。垂直线与图 1中所示相同。此处，我们展示了整个0.3–7兆电子伏能区的伽马射线通量。可以观察到，世界时10:38伽马射线突然增加（标记为“2”），这

与上文讨论的中子和质子通量增强相似。第二条垂直线处的增强幅度约为1.5%。增加趋势在世界时13:08之后（标记为“3”）仍在持续，并在世界时16时左右达到峰值。这一现象颇为有趣。多项研究报告了低能伽马射线计数的降雨相关增强 [16, 17], ，并将其归因于降雨期间地球放射性核素被冲刷。这些地球伽马射线的能量低于3兆电子伏 [17]。因此，我们调查了2025年11月11日是否有降雨。有意思的是，这段时间确实记录到了降雨。新奥勒松记录的降雨/降水数据以深橙色曲线显示在图2（a）中。这些时间分辨率为10分钟的测量数据来自挪威气候服务中心（https://seklima.met.no/observations/）。2025年11月11日世界时11时之后开始降雨，并在世界时16时达到最大值，恰好与观测到的伽马射线通量增强峰值时间一致。因此，伽马射线观测地点的降水可能促成了世界时16时观测到的伽马射线计数增加，这一点在图2（a）中显而易见。由于降雨相关增强仅出现在低于3兆电子伏的能量范围内，我们考察了高于3兆电子伏能区的伽马射线变化；这些伽马射线可认为源自地外源，是大气中次级宇宙射线级联的产物。图2（b）显示了% 3-7兆电子伏能区的伽马射线变化。有意思的是，世界时16时左右的峰值消失了。尽管在3-7兆电子伏这一较窄能区内，由于计数较少而存在显著波动，但垂直线标记范围内伽马射线变化的振幅约为10%。

3.2 南极洲的伽马射线观测

如上文第3.1节所述，能量范围为3-7兆电子伏的伽马射线源自地外源，例如地面增强事件。图3 显示了在南极洲Maitri站记录的3-7兆电子伏范围伽马射线数据的归一化百分比变化。图中所示的垂直线与图1 和2中使用的垂直线相同。在南极洲记录的伽马射线观测中，可以看到与地面增强事件相关的明显增强。伽马射线强度在世界时10:38增加了约45%，这与地面增强事件#77的第一个峰值有关；随后开始下降，未出现延迟的第二个峰值。这一特征与图1（g）所示MSWN、MSWB中子监测站的中子通量变化非常吻合，这些测站也位于南极洲。为考察当地天气可能产生的影响，研究人员检查了附近自动气象站的降雨数据，结果显示11月11日没有降雨。

3.3 中子监测器（中子监测器）观测

来自 OULU GLE 数据库（https://gle.oulu.fi/#/）的 1 分钟时间分辨率中子监测器数据如图 4所示。本研究使用的中子监测站列表及其地理坐标见表1。各测站的地磁纬度采用以下网站提供的地磁坐标计算器计算：https://geomag.bgs.ac.uk/data_service/models_compass/coord_calc.html。各测站的地磁截止刚度值取自 NMDB 网站，依据 [18]的汇编结果。图 4 展示了2025年11月11日全球42个中子监测站中子通量数据的百分比变化。图 4 绘出了 1 分钟时间分辨率中子监测器数据的五点移动平均值，测站的地磁刚度从上到下递增。因此，左上方的测站刚度最低，右下方的测站刚度最高。无需赘言，竖线

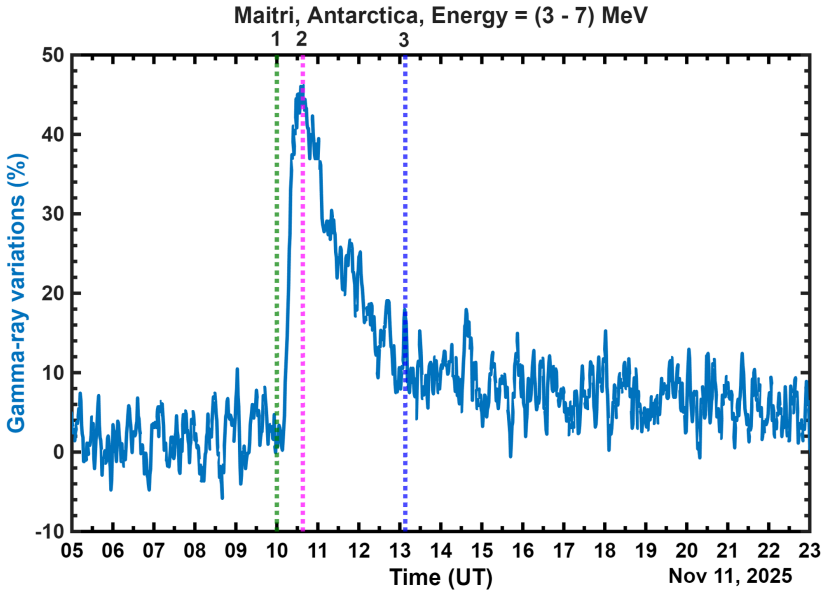

图3。2025年11月11日，南极洲Maitri测站观测到能量为3-7兆电子伏的伽马射线通量增强。

与图 1所示相同。可以观察到，不同测站的 GLE 特征各异。GLE响应有两种类型：一种是在2025年11月11日世界时10:38出现的快速增强，另一种是在世界时13:08达到峰值的渐进增强，这一点在图 1中也可以看到。一些测站显示出两个峰值，另一些则只显示一个明显的峰值。因此，不同测站的 GLE 特征十分复杂。总体而言，地面增强事件仅在较高纬度地区观测到，而在刚度较高（低纬度）的测站未见观测。不过，从图 4可以看出，GLE#77相关的增强在 AATB 或 ROME 测站仍清晰可见，其地磁刚度分别为5.9吉伏和6.27吉伏。此外，MXCO、ATHN 等中子监测站在此次事件期间也显示出增强。这种情况通常并不常见；这可能是由于此次 GLE 强度很大，因此在低纬度地区也能观测到。

4 讨论与结果

太阳高能粒子的能量通常可达吉电子伏范围，能够穿透地球大气层并产生可在地面探测到的次级粒子。2025年11月11日的GLE事件是过去19年观测到的第25太阳活动周第四次、也是最强的一次GLE。这次在中子通量中观测到的GLE，其强度与2006年12月13日发生的GLE#70相当。本文首次报告了在极地地区伽马射线中探测到的GLE。研究发现，GLE#77期间北极和南极台站观测到的伽马射线响应在振幅和响应类型方面均有所不同。尽管两个台站均记录到与GLE同时发生的显著伽马射线增强，但两个半球的响应峰值出现时间有所不同。北极台站主要表现为延迟增强，而南极台站则呈现明显的即时峰。南极和北极观测到的这些GLE伽马射线特征，分别与附近的MWSB/MWSN和THUL中子监测器台站相似。地磁截止刚度位于

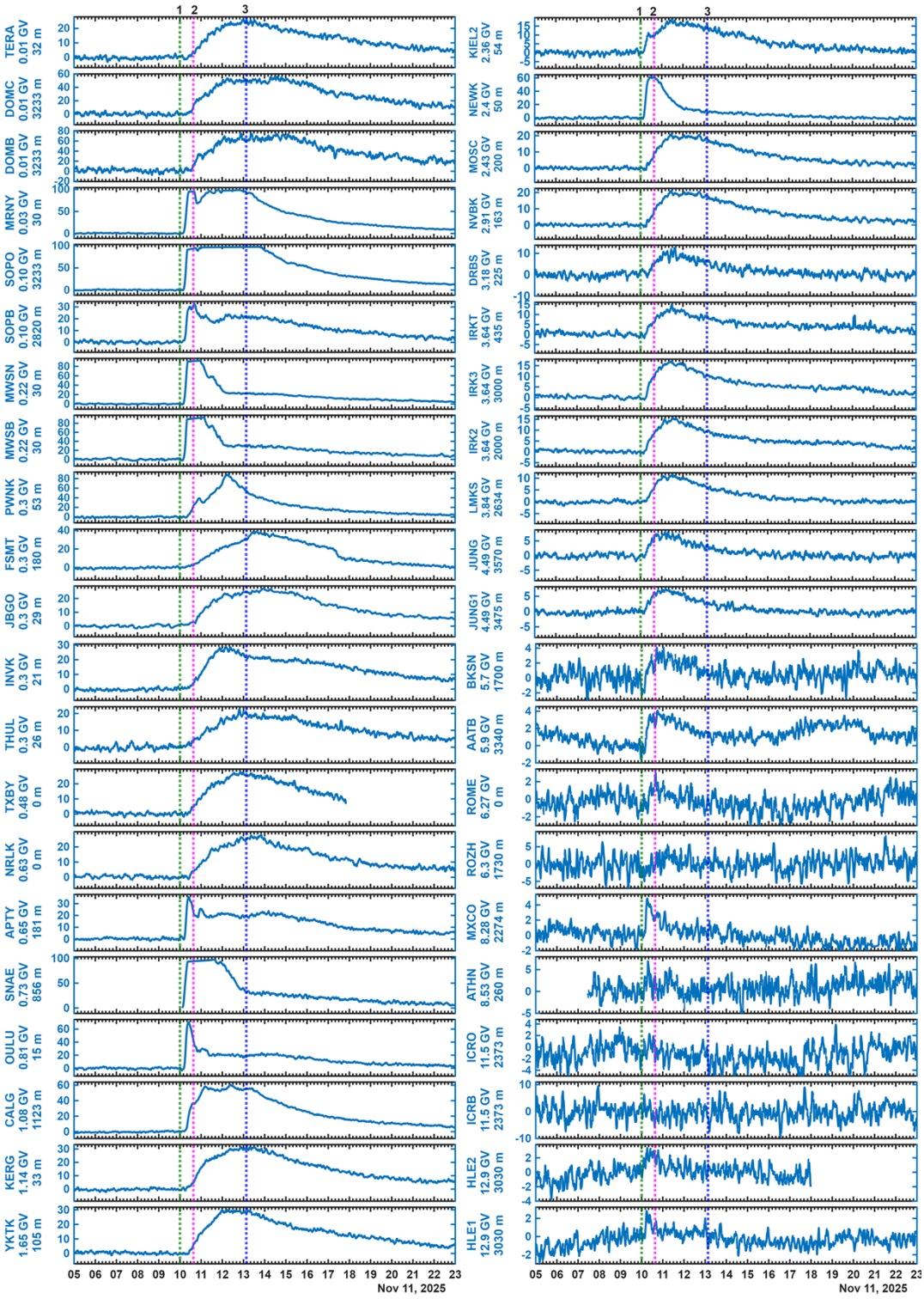

图4。2025年11月11日（GLE #77）期间，42个中子监测站记录的归一化中子通量（%）变化，按地磁刚度由高到低自上而下排列。

Maitri站的地磁截止刚度约为0.3 GV，而新奥勒松的约为0.01 GV。南极洲伽马射线中的地面增强事件特征振幅较高（45%），北极则为10%。此外，北极附近的中子监测站（THUL）的振幅小于南极洲附近（MWSB/MWSN）的振幅，分别为∼20%和$>$ 120 %。值得注意的是，南极洲所在半球处于夏季，而北极所在半球处于冬季。这促使我们考察半球差异（包括地磁刚度）是否会影响伽马射线和中子测量中观测到的即时响应和延迟响应。因此，以下小节将探讨这些依赖关系。

4.1 即时峰和延迟峰的振幅随地磁刚度的变化

如第3.3节所示，中子监测器数据显示，在这次地面增强事件期间出现了复杂响应，表现为明显的即时峰、延迟峰或两者兼有。本小节绘制即时增强和延迟增强的振幅随垂直地磁截止刚度的变化。通常，地面增强事件仅出现在高纬度台站，在低纬度（即刚度较高的台站）观测不到。然而，由于此次地面增强事件的强度很大，即使在刚度超过6 GV的低纬度地区也能观测到。这是地面增强事件#77的一个独特之处。如前几节所述，2025年11月11日世界时10:38和世界时13:08分别观测到即时峰和延迟峰。我们将世界时10:38的峰识别为即时峰，将第二条和第三条垂直线之间的峰识别为延迟峰。这意味着延迟峰不一定恰好出现在世界时13:08，也可能出现在世界时10:38之后的任何时刻。我们估算了不同台站这些峰的振幅。需要注意的是，% 增强幅度可能受到探测器型号、屏蔽、本底计数和局部条件等因素的影响，因此未必能准确代表峰值振幅。

图5显示了即时峰和延迟峰的振幅随地磁刚度的变化。可以看出，这些峰的振幅对刚度有显著依赖性。它随刚度的增加而迅速减小。从目前对太阳质子事件在地面增强事件发生中所起作用的认识来看，这一点显而易见。从图5 中值得注意的是，在较高刚度台站仅观测到即时峰，而未观测到延迟峰（图5(b)中振幅为零）。这可能表明，即时峰由高能质子引起，而延迟峰由相对较低能质子引起，这些质子没有足够的能量穿透较高刚度。从图1可以看出，即时峰与较高能量质子通量的突然增加相吻合（$>$150 兆电子伏），而较低能质子通量在延迟时刻约世界时13:08达到最大值。这可能表明，中子数据中的即时峰由高能质子驱动，这些质子获得了足够的能量以到达高刚度位置，而延迟峰可能包含较低能质子的显著贡献。

多项研究表明，一些地面增强事件呈现出复杂的时间结构，通常认为这与不同的粒子加速和输运过程有关。早期高度各向异性起始被认为与耀斑区附近或低日冕中的快速加速有关，而延迟增强通常归因于CME驱动激波处的粒子加速，以及随后在日球磁场中的传播效应 [6, 7]。然而，这些过程的相对贡献仍是一个活跃的研究领域。Moraal & McCracken等人 2012 [5]研究了第23太阳活动周的所有地面增强事件，从1997年11月6日的GLE 55到2006年12月13日的GLE 70，

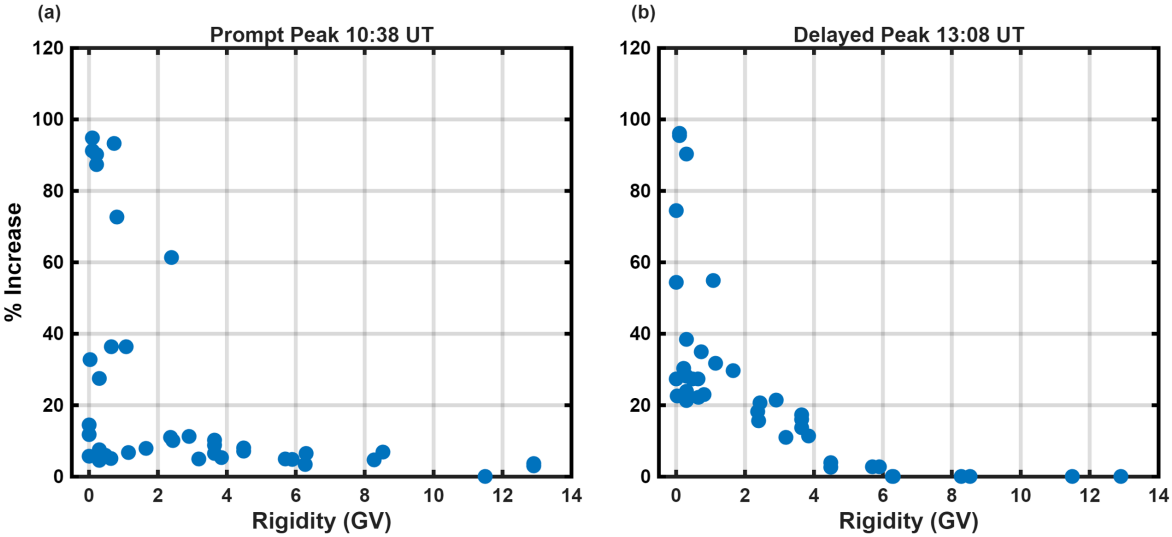

图5。2026年5月11日发生的 GLE#77 期间，(a) 世界时10:38的即时峰和 (b) 世界时13:08的延迟峰期间，增幅百分比。

以研究它们的形态和脉冲结构，并得出结论：GLE幅度与耀斑位置及CME动力学之间的关联，无法直接解释两个脉冲的起源。因此，目前提出的不同能级质子在即时峰和延迟峰中所起的作用，可能是解释GLE事件期间观测到的两个峰的潜在候选机制。

4.2 振幅随太阳天顶角的变化

从图5中还可以明显看出，在较低刚度下，数据散布非常大，这表明除了刚度之外，可能还有其他因素在控制地面增强事件增幅的大小。地面增强事件#77期间，北极和南极的伽马射线行为呈现出半球不对称性，这可能说明地面伽马射线探测器对局地大气条件敏感。地面增强事件开始时，南极台站位于受日照半球，其太阳天顶角小于北极台站的太阳天顶角。这可能表明，太阳天顶角等因素会影响地面增强事件幅度。图6 展示了即时峰和延迟峰的振幅随太阳天顶角的变化。太阳天顶角（SZA）使用https://polaris.nipr.ac.jp/~aurora/cgi-bin/wdcc2/calSZA.cgi计算。图6(a)和6(b)中的散点图展示了使用刚度分别为 < 1 GV和 > 3 GV的台站所得的即时峰数据。这些界限依据图5(a)确定，因为刚度为 > 3 GV的台站似乎受其影响较小，而 < 1GV的台站数据则散布较大。由于SZA是从垂直轴测量的，我们标出 90° 的角度（垂直虚线），以表示昼夜区域的分界。图6(c)和6(d)展示了延迟峰振幅的类似散点图。此外，台站海拔可能会影响次级宇宙线粒子的强度 [14], ，因此我们用红色和蓝色符号标示这一信息。符号标签表示相应台站的地磁刚度。从图6(a)可以看出，总体而言，SZA$> 90^o$ 的台站（即来自夜间区域的台站）即使刚度较低，其振幅也较小。图6(b)中的这种关联并不明显，但对于延迟峰

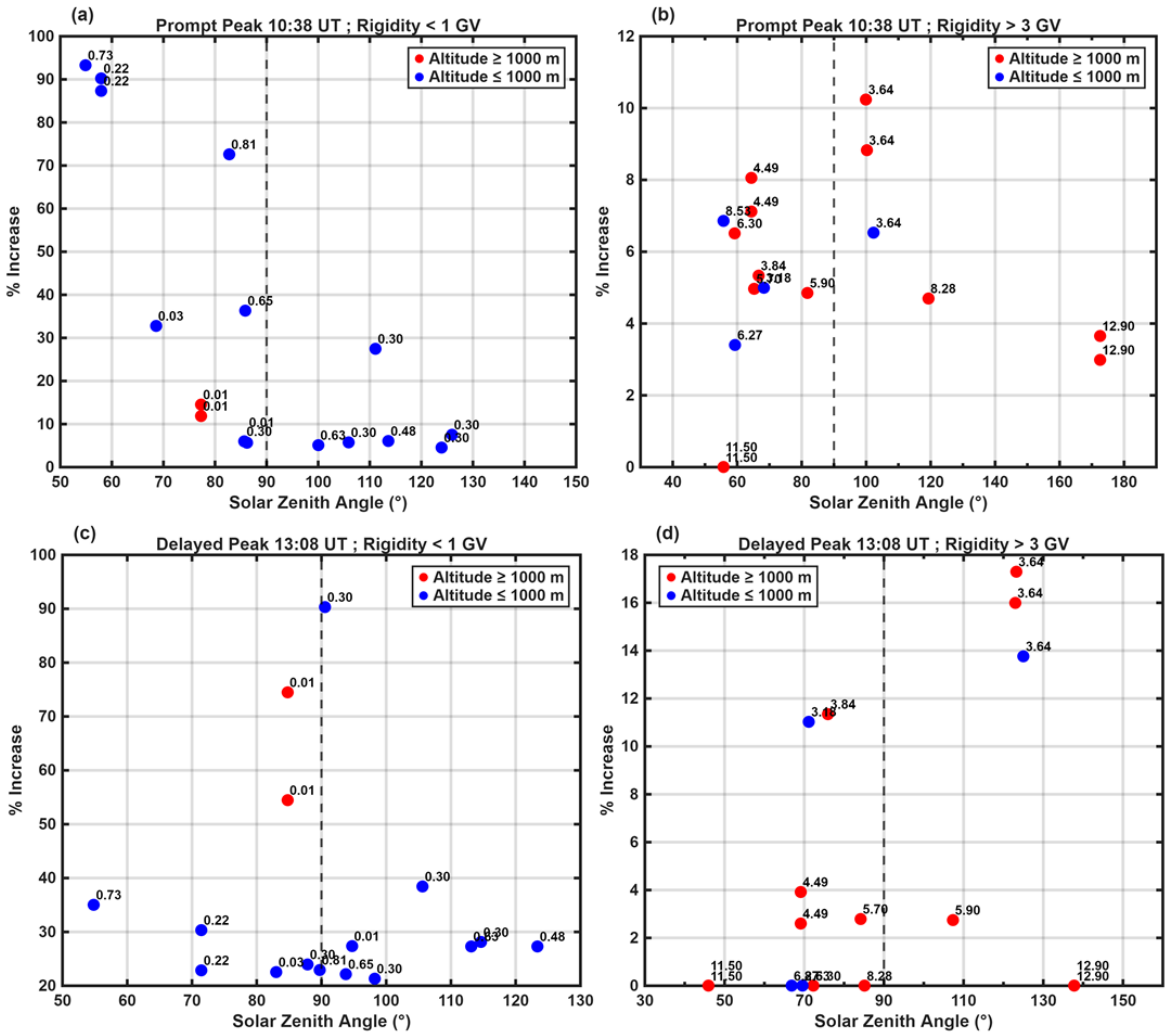

图6。中子监测站振幅随各自测站太阳天顶角的变化：（a）刚度 $<$ 3GV，（b）刚度 $>$ 3 GV，对应世界时10:38的即时峰；（c）刚度 $<$ 3GV，（d）刚度 $>$ 3 GV，对应世界时13:08的延迟峰。红色和蓝色点分别表示海拔高于和低于1000 m的测站。黑色竖直虚线表示 90°处的太阳天顶角。

则不存在这种关联（图6c和6d）。这表明，受日照半球对即时峰很重要，但对延迟峰并非如此。此外，台站海拔似乎不会明显影响地面增强事件幅度。需要说明的是，振幅对仪器配置高度敏感，包括屏蔽、电压、效率等。例如，ICRO & ICRB位于同一地点，但一个探测器有铅屏蔽，另一个则无铅。因此，解读此处呈现的结果时应谨慎。

5 结论

2025年11月11日发生的地面增强（地面增强事件第77号）与一次强烈的X5.1级太阳耀斑和强太阳质子事件（SPE）有关，是最突出的

宇宙射线数据中双峰结构的实例。此次GLE事件的主要发现总结如下：

- 在全球中子监测站网络以及位于北极和南极纬度的伽马射线探测器中，均观测到清晰的即时峰（世界时10:38）和延迟峰（世界时13:08）。
- 在低纬度（高刚度）中子监测器中，清楚地观测到了地面增强事件即时峰的特征。
- 刚度为 > 6 GV的台站未观测到延迟峰。
- 即时峰和延迟峰出现的时间，分别与GOES-18卫星观测到的能量为 > 150 兆电子伏和12-99兆电子伏的质子通量峰值相吻合。
- 研究发现，地面增强事件幅度与地磁截止刚度有很强的相关性，而与太阳天顶角的相关性较弱。
- 这是首次由伽马射线探测器同时在北极和南极记录到的地面增强事件。

致谢

我们感谢在欧盟第七框架计划（合同编号：213007）下建立的 NMDB数据库（https://www.nmdb.eu/nest/）和 OULU GLE 数据库（https://gle.oulu.fi/#/）提供中子监测器数据。我们还感谢 GOES-R计划提供 SGPS数据集的使用权限。位于北极新奥勒松和南极洲 Maitri 的 NaI(Tl)实验装置由印度地磁研究所（IIG）运行。本研究得到印度科学技术部和印度政府的资助。

参考文献

[1] Scott E Forbush。三次异常的宇宙射线增强，可能由来自太阳的带电粒子所致。《物理评论》，70(9-10):771，1946年。[2] SV Poluianov、IG Usoskin、AL Mishev、MA Shea 和 DF Smart。高海拔极地中子监测器视角下的地面增强事件与亚地面增强事件的重新定义。《太阳物理学》，292(11):176，2017年。[3] AVe Belov、EA Eroshenko、H Mavromichalaki、C Plainaki 和 VG Yanke。2005年1月20日太阳宇宙射线的地面增强。载于第*29*届国际宇宙射线大会（*ICRC29*），第*1*卷，第1卷，第189页，2005年。[4] KG McCracken、H Moraal 和 PH Stoker。对2005年1月20日宇宙射线地面增强多分量结构的研究。《地球物理研究杂志：空间物理学》，113(A12)，2008年。[5] H Moraal 和 KG McCracken。第23太阳活动周地面增强事件的时间结构。《空间科学评论》，171(1):85–95，2012年。[6] N Gopalswamy、H Xie、S Yashiro、S Akiyama、P Mäkelä 和 IG Usoskin。第23太阳活动周地面增强事件及相关太阳爆发的特性。《空间科学评论》，171(1):23–60，2012年。[7] MA Shea 和 DF Smart。空间天气与第23太阳活动周的地面太阳质子事件。《空间科学评论》，171(1):161–188，2012年。

[8] Evgenii Volkov、Kseniia Chelidze、Dmitrii Gromushkin、Semen Khokhlov、Evgenii Khomchuk、Anatoly Petrukhin 和 Ivan Shulzhenko。NEVOD实验综合体的中子探测器对地面增强事件 GLE 77 的观测。*arXiv*预印本 *arXiv:2511.23048*，2025年。[9] A Chilingarian、B Sargsyan、L Kozliner 和 T Karapetyan。2025年11月11日的太阳中子与μ子探测：首次同时恢复能谱。*arXiv*预印本 *arXiv:2512.07859*，2025年。[10] Geeta Vichare、Ankush Bhaskar、Gauri Datar、Anil Raghav、KU Nair、C Selvaraj、M Ananthi、Ashwini K Sinha、M Paranjape、T Gawade 等。用于研究空间天气与地球事件的赤道次级宇宙射线观测站。《空间研究进展》，61(10):2555–2568，2018年。[11] Gauri Datar、Geeta Vichare、C Selvaraj、Ankush Bhaskar 和 Anil Raghav。使用 NaI(Tl) 探测器观测到的伽马射线能谱日变化成因。《大气与太阳-地球物理学杂志》，207:105369，2020年。[12] Gauri Datar、Geeta Vichare 和 Selvaraj Chelliah。伽马射线观测的气压校正及其能量依赖性。《宇宙学与天体粒子物理学杂志》，2021(09):045，2021年。[13] Pranali Thakur、Gauri Datar、Geeta Vichare 和 Selvaraj Chelliah。最明亮的伽马射线暴（GRB 221009A）对海平面低能伽马射线计数的影响。《宇宙学与天体粒子物理学杂志》，2024(04):086，2024年。[14] Pranali Thakur 和 Geeta Vichare。2024年5月10日至11日极端太阳风暴期间宇宙射线变化的一些有趣观测。《天体物理学杂志》，991(1):50，2025年。[15] BT Kress、JV Rodriguez、A Boudouridis、TG Onsager、BK Dichter、GE Galica 和 S Tsui。美国国家海洋和大气管理局最新太阳质子传感器的观测结果。空间天气，19(12):e2021SW002750，2021年。[16] Susana Barbosa、Nuno Dias、Carlos Almeida、Guilherme Silva、António Ferreira、António Camilo 和 Eduardo Silva。大西洋上由降水驱动的伽马辐射增强。《地球物理研究杂志：大气》，128(10):e2022JD037570，2023年。[17] Gauri Datar、Geeta Vichare、Anil Raghav、Ankush Bhaskar、AK Sinha 和 KU Nair。奥克希气旋期间伽马射线能谱的响应。《地球科学前沿》，8:15，2020年。[18] M Gerontidou、N Katzourakis、H Mavromichalaki、V Yanke 和 E Eroshenko。过去十年的宇宙射线垂直截止刚度全球网格。《空间研究进展》，67(7):2231–2240，2021年。

表1. 中子监测站列表

Sr No.	测站 Name	海拔 asl (m)	刚度 Rc (GV)	NM Type	地理 纬度 (度)	地理 经度 (度)	地磁 纬度 (度)
1	HLE1	3030	12.9	6NM64	20.72 北纬	156.28 西经	21.49 北纬
2	HLE2	3030	12.9	6NM64	20.72 北纬	156.28 西经	21.49 北纬
3	ICRB	2373	11.5	3LND2061 裸露	28.3 北纬	-16.48 西经	33.10 北纬
4	ICRO	2373	11.5	3NM64	28.3 北纬	-16.48 西经	33.10 北纬
5	ATHN	260	8.53	6NM64	北纬 37.97	北纬 23.78	北纬 36.37
6	MXCO	2274	8.28	6NM64	北纬 19.33	西经 99.18	北纬 27.53
7	ROZH	1730	6.27	LND2043BF3	北纬 41.43	东经 24.44	北纬 39.66
8	ROME	1730	6.27	20NM64	41.86 北纬	12.47 东经	41.96 北纬
9	AATB	3340	5.90	18NM64	43.14 北纬	76.60 东经	北纬 35.08
10	BKSN	1700	5.70	6NM64	北纬 43.28	东经 42.69	北纬 38.82
11	JUNG	3570	4.49	18IGY	46.55 北纬	7.98 东经	47.25 北纬
12	JUNG1	3475	4.49	3NM64	46.55 北纬	7.98 东经	47.25 北纬
13	LMKS	2634	3.84	8S中子监测器64	49.20 北纬	20.22 东经	47.89 北纬
14	IRKT	435	3.64	18NM64	北纬52.47	东经104.03	北纬43.31
15	IRK2	2000	3.64	12NM64	北纬52.37	100.55 东经	43.25 北纬
16	IRK3	3000	3.64	6NM64	51.29 北纬	100.55 东经	42.17 北纬
17	DRBS	225	3.18	9NM64	50.1 北纬	4.6 东经	51.24 北纬
18	NVBK	163	2.91	24NM64	54.48 北纬	83 E	北纬 45.98
19	MOSC	200	2.43	24中子监测器64	北纬 55.47	东经 37.32	北纬 51.48
20	NEWK	50	2.40	9NM64	北纬 39.68	西经 75.75	北纬 48.84
21	基尔2	54	2.36	18NM64	北纬 54.34	10.12 东经	54.45 北纬
22	YKTK	105	1.65	18NM64	62.01 北纬	129.43 东经	53.39 北纬
23	KERG	33	1.14	18NM64	49.35 南纬	70.25 东经	56.3 南纬
24	CALG	1123	1.08	12NM64	51.08 北纬	114.13°西经	57.48°北纬
25	OULU	15	0.81	9NM64	65.05°北纬	25.47°东经	62.32°北纬
26	SNAE	856	0.73	6NM64	71.4°南纬	2.51°西经	66.74°南纬
27	APTY	181	0.65	18NM64	67.57°北纬	33.4°东经	63.61°北纬
28	NRLK	0	0.63	18NM64	69.26°北纬	88.05°东经	60.48°北纬
29	TXBY	0	0.48	18NM64	71.36 北纬	128.54 东经	62.66 北纬
30	THUL	26	0.30	9NM64	76.5 北纬	68.7 西经	85.55 北纬
31	INVK	21	0.30	6NM64	68.36 北纬	133.72 西经	71.22 北纬
32	JBGO	29	0.30	6NM64	74.6 南纬	164.2 东经	77.12 南纬
33	FSMT	180	0.30	3NM64	60.02 北纬	111.93 西经	66.46 北纬
34	PWNK	53	0.30	3NM64	54.98 北纬	85.44西经	46.36 北纬
35	MWSB	30	0.22	18NM64	南纬67.60度	东经62.88度	南纬72.96度
36	MWSN	30	0.22	18NM64	南纬67.60度	东经62.88度	南纬72.96度
37	MRNY	30	0.03	12NM64	南纬66.55度	东经93.02度	南纬75.24度
38	TERA	32	0.01	9NM64	南纬66.65度	东经140度	南纬73.54度
39	DOMB	3233	0.01	Mini NM bare	南纬75.06度	东经123.20度	南纬83.35度
40	DOMC	3233	0.01	Mini NM	南纬75.06度	东经123.20度	南纬83.35度
41	SOPB	2820	0.10	3HeNM64	90 S	NA	NA
42	SOPO	2820	0.10	3HeNM64	90 S	NA	NA