基于 2024 年 5 月 10 日福布斯下降事件的地面中子计数的相关性研究

秦雅倩[1,2]　郭孝城[1,2]　王赤[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心太阳活动与空间天气全国重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院大学地球和行星科学学院 北京 101408)

摘　要　2024 年 5 月 10 日，地球磁层爆发近二十年以来最强磁暴，同时发生显著的宇宙线福布斯下降事件。本研究通过收集全球地面中子监测器网络 2024 年 5 月经气压与探测效率双重修正、间隔时间为 10 分钟的中子计数变化数据，采用有理函数模型对数据进行拟合分析，得到宇宙线福布斯下降的时间结构，并与地面中子监测站地理信息参数进行相关性分析。结果表明此次福布斯下降的下降时间与中子监测站所处海拔、截止刚度之间，恢复时间与中子监测站所处海拔、地理经度、地理纬度绝对值之间均呈正相关关系；下降幅度与中子监测站所处地理纬度绝对值呈很强的正相关，而与地磁截止刚度具有很强的负相关性；下降结束时间与中子监测站所处海拔、地磁截止刚度呈较强的正相关。

关键词　福布斯下降，太阳活动，银河宇宙线，相关性分析

中图分类号

最新录用

Correlation Study on Ground-Based Neutron Counts Based on the Forbush Decrease Event of May 10, 2024

QIN Yaqian[1,2]　GUO Xiaocheng[1,2]　WANG Chi[1,2]

1 (State Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

* 基金项目：国家自然科学基金（42150105，42188101），科技部重点研发计划（2021YFA0718600，2025YFF0510700），中国科学院国家空间科学中心攀登计划及大学生科创计划。

投稿日期：

E-mail: xcguo@swl.ac.cn

2(College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408)

Abstract On May 10, 2024, the Earth's magnetosphere experienced the most intense geomagnetic storm in nearly two decades, accompanied by a pronounced cosmic-ray Forbush decrease (FD) event. In this study, 10-minute neutron count data from the global ground-based neutron monitor network during May 2024 were collected and corrected for both atmospheric pressure and detector efficiency. A rational function model was then employed to fit the neutron count variations and to characterize the temporal structure of the FD event. Based on the fitted results, correlation analyses were subsequently conducted between the derived FD parameters and the geographic and geomagnetic characteristics of the neutron monitor stations, including altitude, geomagnetic cutoff rigidity, geographic longitude, and geographic latitude.

The results show that the FD decrease time is positively associated with station altitude and geomagnetic cutoff rigidity, whereas the recovery time is positively related to altitude, geographic longitude, and the absolute value of geographic latitude. The decrease amplitude exhibits a strong dependence on latitude, increasing with the absolute value of geographic latitude but decreasing with geomagnetic cutoff rigidity. In addition, the end time of the decrease phase is positively correlated with both altitude and geomagnetic cutoff rigidity.

These findings suggest that the temporal and amplitude characteristics of the FD event are modulated by local geomagnetic and geographic conditions. At high-latitude stations, where geomagnetic shielding is weaker and the cutoff rigidity is generally lower, a larger fraction of low-rigidity cosmic rays can contribute to the count rates recorded by neutron monitors; consequently, FD-related variations in cosmic-ray intensity tend to be more pronounced. In regions with low geomagnetic cutoff rigidity, low-energy cosmic-ray particles are more susceptible to solar activity, further intensifying the observed decrease. Additionally, neutron monitors located at higher altitudes are generally more sensitive to variations in cosmic-ray flux because of the reduced atmospheric overburden, which can result in larger observed absolute decreases during FD events. Variations in recovery time across stations may be associated with longitudinal differences in geomagnetic transmission conditions, including cutoff rigidity and the asymptotic directions of incoming cosmic-ray particles, which could influence the recovery phase of the FD event.

Key words Forbush Decrease, solar activity, galactic cosmic-ray, correlation analysis

最新录用

0 引言

太阳活动爆发事件主要包括太阳耀斑和日冕物质抛射（Coronal Mass Ejection, CME）其对近地银河宇宙线的强度变化具有重要的影响，如福布斯下降（Forbush Decrease, FD)事件[1]，其时宇宙线粒子的强度会在十几个小时左右快速下降，又在一两周左右逐渐恢复到正常水平。基于地面中子监测器的观测数据研究两者之间的变化关系对人们理解宇宙线在近地空间的时空变化物理机制具有重要的意义。

中子监测器的计数率由仪器自身的特定设计及其所在地理位置的环境属性共同决定，其中地理位置的关键参数包括地磁纬度、海拔高度和经纬度，另外大气压力和温度与环境条件也会影响站点计数率[2][4]。地磁截止刚度是决定宇宙线粒子能否穿透地球磁场并到达地球大气层顶端的关键因素，具有较低截止刚度的监测器观测到的粒子通量更多，从而对受太阳活动调制最为剧烈的中低能宇宙线部分具有更高的灵敏度。研究表明 FD 的幅度与中子监测站的地磁截止刚度成反比，在极地中子监测站观测到了最强的抑制[5]，因此 FD 下降幅度随着纬度的增加而增大[6][7]。由于大气层的作用，海拔越高的站点的监测器具有更低的大气截止能量，因此海拔高度对宇宙线调制的响应幅度也具有重要影响[8]。此外，由于地磁场的不均匀性，处于同一地理纬度但不同经度的台站，其垂直截止刚度可能存在显著差异[4]。而大气压力是直接影响地面宇宙射线计数率的最重要气象参数，压力增加会增大大气质量，导致宇宙射线次级粒子被更多吸收，从而降低计数率。站点周围温度和环境条件有时会影响中子监测站的材料，从而对计数率产生影响[4]Error: Reference source not found。

Fenton、Lee 等[9][11]Error: Reference source not found 通过研究中纬度中子监测站观测到的 FD 事件的同时性，得到 FD 的起始时间更多地取决于经度，而不是纬度。Lockwood 等[12][11]通过对 FD 事件进行案例研究，得出 FD 下降幅度与中子监测站截止刚度具有较强的相关性，且对于同一 FD 事件，恢复时间大致相同，但是与粒子能量也有一定的关系。Nwuzor 和 Belov 等人指出 FD 下降幅度取决于中子监测站的纬度，而 Tezari 指出 FD 下降幅度还具有经度依赖性[13][15]。Lingri 等[16]通过研究 2008 年 1 月至 2013 年 12 月最重要的三个宇宙线 FD 事件，发现监测站点的截止刚度、地理纬度会影响 FD 的下降幅度。金述平等[17]人研究了 2017 年 9 月 FD 的下降幅度和时间结构与中子监测站点所在位置的截止刚度、地理经纬度、海拔等因素的关系，得出 FD 下降开始时间与中子监测站所处海拔、地理纬度绝对值呈负相关，与截止刚度呈正相关；FD 下降结束时间与中子监测站所处地理经度正相关；FD 下降时间与中子监测站所处截止刚度负相关，与地理纬度绝对值正相关；FD 恢复时间与中子监测站所处地理纬度绝对值负相关；FD 下降幅度的绝对值与中子监测站所处海拔、地理纬度绝对值正相关，与截止刚度负相关。Uga 等[18]通过研究不同站点宇宙线强度的变化，得出处于低截止刚度、高海拔且最靠近地磁极的监测站点，对低能次级粒子的灵敏度最高且接收到的初级宇宙射线数量最多。Wang 等[19]通过 AMS-02 在 2011 年 5 月到 2019 年 10 月期间测量的每日质子通量，得到行星际日冕物质抛射（Interplanetary Coronal Mass Ejection, ICME）

引起的 FD 下降幅度与最小地磁 Dst 指数具有中等相关性。Uga 等[20]利用四个中子监测站点研究了 FD，表明了高纬度观察到的 FD 下降幅度最大，也就是说 FD 下降幅度与中子监测站纬度绝对值正相关。Nwuzor 等[21]研究了 FD 对地磁截止刚度的依赖性，得出 FD 下降幅度与地磁截止刚度成反比。Iyida 等[22]研究了小幅度 FD 事件，小幅度 FD 事件与太阳-地磁指数的相关性因海拔和中子监测站点而异，表明其是位置相关的宇宙线现象。

2024 年 5 月 10 日，太阳活动区 AR13664 爆发了一系列 CMEs[23]；这些高能物质以极高的速度冲向了地球，在抵达地球磁层之后，引发了近二十年来最强的地磁暴 [24],[25]，全球地面中子监测器所观测到的粒子强度也随之改变。本文旨在探究该强磁暴背景下 FD 的时间结构、下降幅度与中子监测站所处地理位置参数的关联机制，揭示其背后的物理意义。我们首先通过中子监测器数据库（NMDB）收集了 2024 年 5 月地面中子监测器所监测到的关于宇宙线随时间变化的详细数据，采用有理函数模型对数据进行拟合分析，并研究此次福布斯下降的相关特征值与站点地理位置之间的相关性，将拟合得到的结果与已有结果进行对比分析和讨论，得出相应的结论，并尝试给出物理机制的解释。

1 数据处理

本文我们将中子监测站观测到的数据分为两部分，第一部分使用函数

$$C_1(t) = C$$

进行拟合，其中 C 为常数，表征中子监测站观测到的粒子数目的背景值，由选取数据的第 3 个小时至 T_1 前数据点的平均值得到。第二部分使用

$$C_2(t) = C_0 + H\frac{(1+\frac{t-t_c}{q\omega})^2}{1+(\frac{t-t_c}{\omega})^2}$$

进行拟合。这两部分的拟合函数 $C_1(t)$ 和 $C_2(t)$ 均为中子监测站 t 时刻观测到某一时间内的粒子数目；其中 C_0 为第二部分拟合出的粒子数目的背景值，H 为宇宙线强度变化系数参数，t_c 为粒子数目变化的中心基准点，ω 为宽度参数，q 用以描述最低点两侧的不对称性，两者共同决定了最低点两侧变化的不均性。

接下来，我们引入 3 个时间节点的定义[17]，并根据 2024 年 5 月银河宇宙线强度变化特征进行调整。

T_1：下降阶段的开始时间, T_1 即为 C 与 $C_2(t)$ 的交点对应的时刻。

T_2：下降阶段的结束时间和恢复阶段的开始时间，可由 $C_2(t)$ 的最小值对应的时刻给

最新录用

出。

T_3：恢复阶段的结束时间，即 $C_2(t)$ 恢复到其最大下降幅度的 70%时所在的时刻，也就是 $C_2(t)=C-0.3(C-C_2(T_2))$ 时 t 的取值。

由此，我们可以得到福布斯下降的三个主要特征：下降时间 $D=T_2-T_1$，恢复时间 $R=T_3-T_2$，下降幅度为 $A=\frac{C-C_2(T_2)}{C}\times 100\%$。

在数据处理阶段，我们选取了中子监测器全球网络中 31 个站点从 2024 年 5 月 3 日 00:00 到 2024 年 6 月 9 日 23:59、经过气压和探测效率双重修正、时间间隔为 10min 的数据（数据来源于 https://www.nmdb.eu/nest/，获取时间为 2024 年 11 月），将 2024 年 5 月 3 日 00:00 当作起始时刻 0 时刻，把宇宙线强度变化的数据对应时间转化为以小时为单位。我们对地面中子监测器观测的数据进行拟合，得到 2024 年 5 月宇宙线福布斯下降的主要特征：下降时间、恢复时间和下降幅度。

。中列出了站点的海拔 AL、地磁截止刚度 RI、地理纬度 N、地理经度 E 等。接下来利用。中 31 个站点的数据进行本研究，对各监测站 2024 年 5 月福布斯下降的观测数据进行拟合，给出了各个站点的 T_1, T_2, D, R, A, 见。。

表 1　有理函数模型下中子监测站的地理位置参数和观测拟合结果

Table 1 Geographical location parameters of neutron monitoring stations and observation fitting results under the rational function model

Station	AL/m	RI/GV	N /°	E /°	T_1 /h	T_2 /h	D /h	R /h	A /%
AATB	3340	6.69	43.14	76.6	175.81	222.17	46.36	153.40	6.95
APTY	181	0.65	67.57	33.4	176.15	206.17	30.02	213.81	9.76
DOMB	3233	0.01	-75.10	123.33	174.24	213.00	38.76	363.25	13.34
BKSN	1700	5.6	43.28	42.69	178.98	208.00	29.03	246.30	7.80
DOMC	3233	0.01	-75.10	123.33	178.01	210.17	32.16	472.87	12.22
DRBS	225	3.18	50.10	4.6	176.90	207.50	30.60	133.86	9.23
FSMT	180	0.3	60.02	-111.93	174.20	207.50	33.30	155.13	10.14
JBGO	30	0.3	-74.60	164.2	173.94	211.00	37.06	209.22	10.29

最新录用

IRK3	3000	3.64	51.29	100.55	175.88	210.50	34.62	182.61	9.67
INVK	21	0.3	68.36	-133.72	171.85	209.67	37.82	137.86	9.53
JUNG	3570	4.5	46.55	7.98	180.46	212.17	31.70	254.78	8.18
KERG	33	1.14	-49.35	70.25	172.21	209.50	37.29	191.94	10.43
KIEL2	54	2.36	54.34	10.12	174.17	209.00	34.83	138.52	9.79
LMKS	2634	3.84	49.20	20.22	175.12	210.67	35.55	212.29	9.68
NANM	2000	7.1	40.37	44.25	169.01	210.17	41.16	158.35	6.31
NAIN	46	0.3	56.55	-61.68	175.27	207.17	31.90	106.86	10.12
MXCO	2274	8.2	19.33	-99.18	171.41	213.00	41.59	128.12	6.49
MWSN	30	0.22	-67.60	62.88	177.11	209.50	32.39	169.26	10.52
NEWK	50	2.4	39.68	-75.75	174.84	208.33	33.49	179.34	9.01
OULU	15	0.8	65.05	25.47	172.98	208.67	35.69	185.57	9.58
ROME	0	6.27	41.86	12.47	171.10	214.33	43.23	166.78	5.78
PWNK	53	0.3	54.98	-85.44	175.52	208.83	33.31	124.41	9.92
SOPB	2820	0.1	-90.00	0	171.45	213.67	42.22	241.70	12.84
SOPO	2820	0.1	-90.00	0	172.40	212.33	39.93	212.07	12.19
TERA	32	0	-66.65	140	173.14	210.50	37.36	220.01	10.30
THUL	26	0.3	76.50	-68.7	171.03	208.33	37.30	114.01	9.95
YKTK	105	1.65	62.01	129.43	176.74	208.00	31.26	207.40	9.40
TXBY	0	0.48	71.36	128.54	176.21	207.33	31.13	238.53	8.31
MWSB	30	0.22	-67.60	62.88	177.63	208.33	30.70	170.62	10.57
JUNG1	3475	4.49	46.55	7.98	161.20	214.50	53.30	92.26	8.15
CALG	1123	1.2	51.08	-114.13	175.80	209.67	33.87	155.08	10.84

可以看到，D的分布范围从 BKSN 的 29.03 小时到 JUNG1 的 53.30 小时；R的分布范围从 JUNG1 的 92.26 小时到 DOMB 的 472.87 小时；A的分布范围从 ROME 的 5.78%到

最新录用

DOMB 的 13.34%。

Error: Reference source not found是部分可视化结果，其中绿色的点分别为下降开始时间 T_1 、下降结束时间 T_2 、恢复结束时间 T_3 ，绿色虚线为粒子数目背景值 C ，蓝色的点为原数据点，红色的线为拟合曲线。

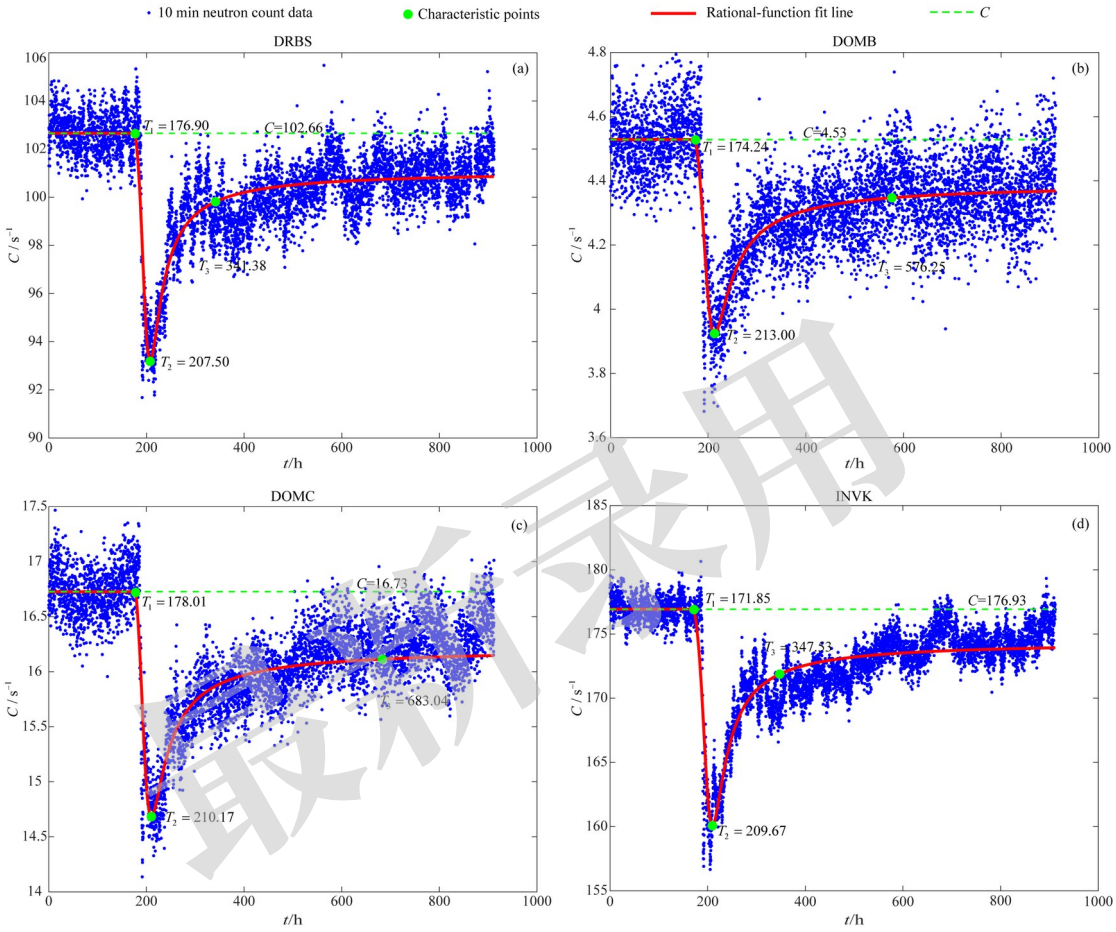


图 1　地面中子监测站点可视化结果(a)DRBS, (b)DOMB, (c)DOMC, (d)INVK

Fig. 1　Visualization results of ground-based neutron monitoring stations(a)DRBS, (b)DOMB, (c)DOMC, (d)INVK

2　分析与讨论

2.1 相关性分析

为了进一步探究福布斯下降以及中子监测站地理信息参数之间的关系，这里我们对拟合得到的数据与中子监测站地理位置参数进行皮尔逊相关性分析，可得：

表 2　福布斯下降与中子监测站各因素之间的皮尔逊相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients between the Forbush Decrease and various factors of neutron monitoring stations

	AL/m	RI/GV	$\lvert N\rvert$/°	E/°
D/h	0.443*	0.396*	-0.141	-0.051
R/h	0.395*	-0.244	0.391*	0.552**
A/%	0.049	-0.831**	0.779**	0.131
T_1/h	-0.110	-0.182	0.067	0.199
T_2/h	0.639**	0.476**	-0.168	0.138

注：数据上标*和**分别对应表示在 0.05 和 0.01 级别（均为双尾），相关性显著；两者即均通过双尾检验，当相关性结果的 p 值分别为≤0.05 和 0.01 时，变量间的相关性并非由随机误差导致，存在真实关联。

中展示了中子监测站海拔与此次福布斯下降的下降结束时间、地磁截止刚度与下降幅度、地理纬度绝对值与下降幅度、地理纬度绝对值与恢复时间、地磁截止刚度与下降结束时间、海拔与下降时间、地理经度与恢复时间、海拔与恢复时间、地磁截止刚度与下降时间之间的关联图，其中红色数据点为上述拟合结果，蓝色直线为线性相关性拟合结果，左上角分别为相关系数 r，线性拟合斜率 k 及其误差以及线性拟合截距 b 及其误差。其它线性拟合结果见附录表 A.6 线性回归参数及其不确定范围。

最新录用

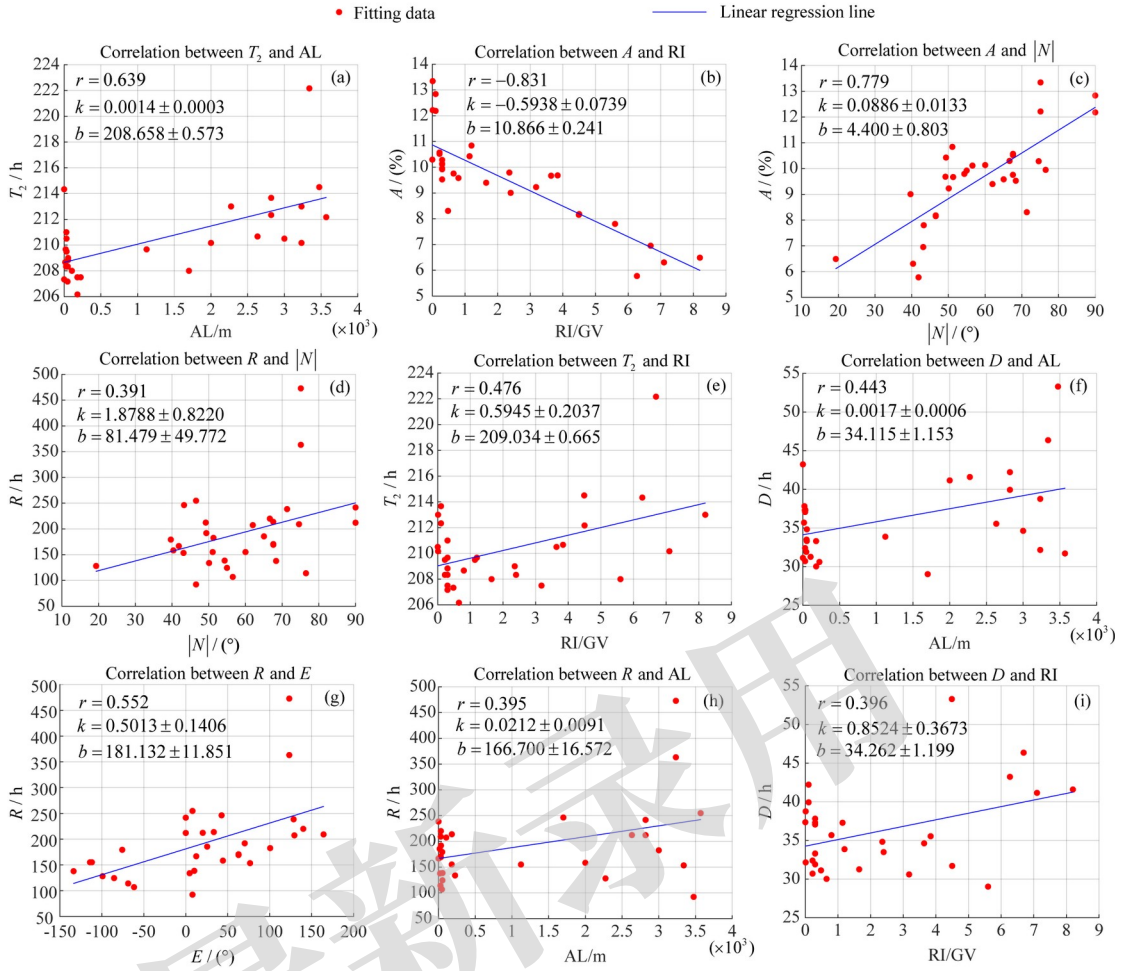


图 2　有理函数模型下福布斯下降与站点地理位置间皮尔逊相关系数及线性拟合结果：(a)海拔与下降结束时间 T_2、(b)地磁截止刚度与下降幅度 A、(c)地理纬度绝对值与下降幅度 A、(d)地理纬度绝对值与恢复时间 R、(e)地磁截止刚度与下降结束时间 T_2、(f)海拔与下降时间 D、(g)地理经度与恢复时间 R、(h)海拔与恢复时间 R、(i)地磁截止刚度与下降时间 D

Fig. 2　Pearson correlation coefficients and linear regression results between the Forbush Decrease and station geographical locations under the rational function model: (a) altitude and the end time of the decrease phase T_2, (b) geomagnetic cutoff rigidity and decrease magnitude A, (c) absolute value of geographic latitude and decrease magnitude A, (d) absolute value of geographic latitude and recovery time R, (e) geomagnetic cutoff rigidity and the end time of the decrease phase T_2, (f) altitude and decrease time D, (g) geographic longitude and recovery time R, (h) altitude and recovery time R, (i) geomagnetic cutoff rigidity and decrase time D

由图 2 和表 2，我们可以得到：

此次福布斯下降的下降时间与中子监测器所在地的海拔、地磁截止刚度呈一定正相关，而与地理纬度和经度没有相关性；

恢复时间与中子监测器的海拔、地理纬度绝对值呈一定正相关，与地理经度具有明显相关性，而与地磁截止刚度则呈现较弱的相关性；

下降幅度与中子监测器所处地理纬度绝对值呈较强的正相关，与地磁截止刚度具有很强的负相关性，而与地理经度和海拔没有明显相关性；

下降开始时间与其他信息没有明显相关性，而下降结束时间与海拔、地磁截止刚度呈正相关，尤其与前者相关性显著。

2.2 偏相关分析

大部分变量都会受到其他多个变量的影响，因此，有时候分析两个变量之间关系需要控制其他变量的影响，这种相关性分析也叫作偏相关分析，取值范围在-1 到 1 之间。一般来说，偏相关系数的绝对值越大，其偏相关程度越大。

定义[26]：将 X 和 Y 关于控制变量 Z 的偏相关系数 ρ_{XYZ} 定义为 X 和 Y 分别与控制变量 Z 建立的多元回归的残差 $\hat{\varepsilon}$ 和 $\hat{\zeta}$ 的皮尔逊相关系数，即

$$\rho_{XYZ}=cor(\hat{\varepsilon},\hat{\zeta})=\frac{\mathrm{cov}(\hat{\varepsilon},\hat{\zeta})}{\sqrt{\mathrm{var}(\hat{\varepsilon})\,\mathrm{var}(\hat{\zeta})}},$$

其中 $\mathrm{cov}(\hat{\varepsilon},\hat{\zeta})$ 是 $\hat{\varepsilon}$ 和 $\hat{\zeta}$ 的协方差，$\mathrm{var}(\hat{\varepsilon})$ 和 $\mathrm{var}(\hat{\zeta})$ 分别是 $\hat{\varepsilon}$ 和 $\hat{\zeta}$ 的方差。

我们可以看到地理纬度绝对值和海拔对此次福布斯下降的影响较大，由于地理纬度绝对值与地磁截止刚度是两个相关联的变量，因此我们先考虑地理纬度绝对值、海拔、地理经度这三个因素来进行偏相关分析，以消除这三个因素间的共线性影响。即在分析其中一个因素与此次福布斯下降的相关性时，将其它两个因素作为控制变量予以剔除，从而提取该因素对观测结果的净贡献。

表 3　海拔、地理纬度绝对值、地理经度与福布斯下降的偏相关系数

Table 3 Partial correlation coefficients between altitude, absolute value of geographic latitude, geographic longitude and the Forbush Decrease

	AL/m	$\lvert N\rvert$/°	E/°
D/h	0.446	-0.081	-0.103

最新录用

R /h	0.444	0.381	0.481
A /%	0.217	0.791	-0.178
T_1 /h	-0.144	-0.006	0.212
T_2 /h	0.622	-0.171	0.105

由表 3，我们得到：

下降时间与海拔呈正相关；恢复时间与海拔、地理经度呈正相关，与地理纬度绝对值也呈正相关；下降幅度与地理纬度绝对值呈较强的正相关；下降开始时间与海拔、地理经度和纬度没有明显的相关性；下降结束时间与海拔具有较强的正相关。

与皮尔逊相关系数进行对比，我们发现地理经度 E 与下降幅度 A 之间的偏相关系数是负的，而皮尔逊相关系数是正的，说明在排除其他因素影响时，地理经度 E 与下降幅度 A 之间应该是负相关关系，但是都比较小，可以忽略不计。

接下来，我们讨论海拔和地磁截止刚度两个因素的影响。

表 4　海拔、地磁截止刚度与福布斯下降的偏相关系数

Table 4 Partial correlation coefficients between altitude, geomagnetic cutoff rigidity and the Forbush Decrease

	AL/m	RI/GV
D /h	0.336	0.264
R /h	0.557	-0.481
A /%	0.756	-0.931
T_1 /h	-0.041	-0.151
T_2 /h	0.555	0.310

由表 4，我们可以看到：

下降时间、下降结束时间与海拔、截止刚度呈正相关，且与海拔相关性较强；恢复时间与海拔呈正相关，与截止刚度呈负相关，且相关性较为显著；下降幅度与海拔呈高度正相关，与截止刚度高度负相关，说明在取定截止刚度的情况下，随着海拔的升高，下降幅度越大。

最新录用

2.3 讨论

表 5 参考文献[17]以及本文数据对比

Table 5 Comparison between the data in Reference[17] and the data in this paper

	AL/m	RI/GV	$\lvert N\rvert$/°	E/°
有理函数模型 D/h	0.443*	0.396*	-0.141	-0.051
参考文献 D/h	0.343	-0.443*	0.701**	0.403
有理函数模型 R/h	0.395*	-0.244	0.391*	0.552**
参考文献 R/h	-0.303	0.380	-0.519*	-0.058
有理函数模型 A/%	0.049	-0.831**	0.779**	0.131
参考文献 A/%	-0.260	0.720**	-0.804**	-0.197
有理函数模型 T_1/h	-0.110	-0.182	0.067	0.199
参考文献 T_1/h	-0.302	0.494*	-0.710**	-0.302
有理函数模型 T_2/h	0.639**	0.476**	-0.168	0.138
参考文献 T_2/h	0.364	0.017	0.260	0.588**

通过对比分析本次拟合结果与参考文献中的结果，由表 5 我们可以得到：

（1）关于两次福布斯下降事件的下降幅度，参考文献在相关性分析时下降幅度使用的负值，最终得到的结论为：FD 下降幅度的绝对值与海拔、地理纬度绝对值呈正相关关系，与截止刚度呈负相关关系。而本文进行分析时下降幅度使用的正值，因此本文与参考文献对于 FD 下降幅度分析结果相一致：处于高海拔、高地理纬度的中子监测器，观测到的 FD 下降幅度相对较大，而中子监测器所处截止刚度越大，观测到的 FD 下降幅度越小。

（2）两次福布斯下降的下降时间与海拔都呈正相关关系，下降开始时间与海拔都呈负相关关系但本文结果显示相关性更小。下降结束时间与海拔、地磁截止刚度、地理经度都呈正相关关系，但本文结果显示与前两个因素的相关系数要大一些，而最后一个因素的相关性则小得多。

（3）其他因素的相关性都不太相同。造成不同的原因可能有以下几种原因：一是由于两次太阳活动强度不同，对应的太阳风事件在近地区域对宇宙线的磁屏障效应不同，可能造成宇宙线粒子进入磁层直至大气层的方向并不一样；二是由于两次所选取数据的不同，参考文献基于 2017 年 9 月宇宙线变化数据，且选取站点数量的不同也可能会造成最终结果

最新录用

的差异；三是由于具体的数据分析过程可能不同，相关节点的定义也存在一些差异。具体原因需要进一步探究，将在后续工作进行。

（4）截止刚度对宇宙线变化幅度的影响显著。地磁截止刚度较高时，几乎只有能量较高的粒子才能到达地面中子监测器，而太阳活动主要调制低能宇宙射线，因此，截止刚度越高，宇宙线福布斯下降的下降幅度反而越小。位于高纬度的中子监测站，由于对应的地磁截止刚度较低，更多的粒子可以到达站点，宇宙线变化相对剧烈；而低纬度地区的地磁截止刚度高，宇宙线变化相对来讲并不剧烈。此外，由于高海拔站点所在位置的大气深度较浅，其有效探测能量窗口向更低的初级宇宙线能量延伸，从而对受太阳活动调制最为剧烈的中低能宇宙线部分具有更高的灵敏度，宇宙线变化也更为剧烈。

（5）FD 恢复时间与经度存在一定的相关性，这可能与不同经度地区的地磁场的不均匀性和宇宙线粒子渐进方向差异存在一定关系。

3 结论

本文通过拟合分析中子监测站自 2024 年 5 月 10 日开始监测到的近地银河宇宙线强度变化的数据，采用有理函数模型分析了此次宇宙线福布斯下降的时间结构、下降幅度与中子监测站所处地理位置之间的关系。

结果表明：此次福布斯下降的下降时间与中子监测站所处海拔、截止刚度呈正相关；恢复时间与中子监测站所处海拔、地理经度、地理纬度绝对值呈正相关；下降幅度与中子监测站所处地理纬度绝对值呈很强的正相关，与地磁截止刚度具有很强的负相关性；下降结束时间与中子监测站所处海拔、地磁截止刚度呈较强的正相关。此次福布斯下降的下降时间与中子监测站所处地理经度、纬度之间，恢复时间与中子监测站的地磁截止刚度之间，下降幅度与中子监测站的海拔、地理经度之间，下降开始时间与中子监测站的所有信息之间，下降结束时间与中子监测站的地理经度、纬度之间线性相关性较弱，可忽略不计。

高纬度地区的地磁场屏蔽作用较弱，更多的宇宙线粒子能够到达探测器，在低截止刚度地区，更多的低能宇宙线粒子受到影响，高海拔地区的中子监测器更容易受到太阳活动的影响，因此在太阳活动事件中，宇宙线强度的下降幅度绝对值更大。而不同经度站点对应的地磁存在不均匀性从而导致截止刚度出现差异，且宇宙线粒子渐进方向存在不同，这可能是导致恢复时间存在差异的重要原因。

致谢 本文采用全球中子监测网络数据平台（NMDB）的台站数据，具体获取路径为（https://www.nmdb.eu/nest/）。

参考文献(第 13, 20 条文献在正文中引用顺序错误，请核对)

[1] FORBUSH S E. On the effects in cosmic-ray intensity observed during the recent magnetic storm[J]. *Physical Review*, 1937, **51**(12): 1108-1109

录用稿

[2] SIMPSON J A, FONGER W, TREIMAN S B. Cosmic radiation intensity-time variations and their origin. I. Neutron intensity variation method and meteorological factors[J]. *Physical Review*, 1953, **90**(5): 934-950

[3] OKIKE O, NWUZOR O C. Investigation of the rigidity and sensitivity dependence of neutron monitors for cosmic ray modulation using algorithm-selected Forbush decreases[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2020, **493**(2): 1948-1959

[4] GÜDEN M. Fundamentals and data analysis of neutron monitor systems[J]. *Journal of Anatolian Physics and Astronomy*, 2025, **4**(1): 13-23

[5] MISHEV A, LARSEN N, ASVESTARI E, *et al*. Anisotropic Forbush decrease of 24 March 2024: first look[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **74**(8): 4160-4172

[6] LEE S, OH S, YI Y, *et al*. Long-term statistical analysis of the simultaneity of Forbush decrease events at middle latitudes[J]. *Journal of Astronomy and Space Sciences*, 2015, **32**(1): 33-38

[7] AHMED O, BADRUDDIN B, DEROUICH M. Forbush decreases during strong geomagnetic storms: time delays, rigidity effects, and ICME-driven modulation[J]. *Astrophysics and Space Science*, 2025, **370**(8): 86

[8] POLUIANOV S, BATALLA O. Cosmic-ray atmospheric cutoff energies of polar neutron monitors[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(9): 2610-2617

[9] JEONG J, OH S. Seasonal trends of the cosmic ray intensity observed by 16 neutron monitors for 1964-2020[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(9): 2625-2635

[10] FENTON A G, MCCRACKEN K G, ROSE D C, *et al*. The onset times of Forbush-type cosmic ray intensity decreases[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1959, **37**(9): 970-982

[11] LEE S, OH S, YI Y. Simultaneity of Forbush decrease events observed at middle-latitude neutron monitors[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(2): 608-614

[12] LOCKWOOD J A, WEBBER W R, JOKIPII J R. Characteristic recovery times of Forbush-type decreases in the cosmic radiation: 1. Observations at Earth at different energies[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1986, **91**(A3): 2851-2857

[13] NWUZOR O C, OJOBEAGU A, CHIKWENDU A, *et al*. Implications of solar wind disturbances on Forbush decrease[J]. *Physics Access*, 2024, **4**(2): 49-58

[14] BELOV A V, EROSHENKO E A, OLENEVA V A, *et al*. What determines the magnitude of Forbush decreases?[J]. *Advances in Space Research*, 2001, **27**(3): 625-630

[15] TEZARI A, MAVROMICHALAKI H. Diurnal anisotropy of cosmic rays during intensive solar activity for the period 2001-2014[J]. *New Astronomy*, 2016, **46**: 78-84

最新录用

[16] LINGRI D, MAVROMICHALAKI H, BELOV A, *et al*. Solar activity parameters and associated Forbush decreases during the minimum between cycles 23 and 24 and the ascending phase of cycle 24[J]. *Solar Physics*, 2016, **291**(3): 1025-1041

[17] JIN Shuping, ZHANG Sipei, FENG Yuchuan, *et al*. Research on factors affecting Forbush decrease in September 2017[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2020, **61**(1): 5 (金述平, 张思培, 冯育川, 等. 2017 年 9 月宇宙线福布希型下降影响因素研究[J]. 天文学报, 2020, **61**(1): 5)

[18] UGA C I, ADHIKARI B. Study of cosmic ray intensity (CRI) along with solar wind parameters and geomagnetic indices from different stations[J]. *Cosmic Research*, 2023, **61**(5): 364-379

[19] WANG S Q, BINDI V, CONSOLANDI C, *et al*. Properties of Forbush decreases with AMS-02 daily proton flux data[J]. *The Astrophysical Journal*, 2023, **950**(1): 23

[20] UGA C I, GAUTAM S P, SEBA E B. Cross-correlation analysis of cosmic ray intensity with interplanetary and geomagnetic parameters during disturbed and quiet periods[J]. *Cosmic Research*, 2024, **62**(1): 34-41

[21] NWUZOR O C, OKIKE O, UMAHI A E, *et al*. Investigating the dependence of Forbush decrease on geomagnetic cutoff rigidity[J]. *Global Journal of Pure and Applied Sciences*, 2024, **30**(1): 101-113

[22] IYIDA E U, OKIKE O, EYA I O, *et al*. Comprehensive analysis of solar-terrestrial impacts of small-amplitude program-processed Forbush decreases[J]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2025, **25**(6): 065006

[23] JASWAL P, SINHA S, NANDY D. Deconstructing the properties of solar super active region 13664 in the context of the historic geomagnetic storm of 2024 May 10-11[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **979**(1): 31

[24] HUANG F Q, LEI J H, YUE X A, *et al*. Interplay of gravity waves and disturbance electric fields to the abnormal ionospheric variations during the 11 May 2024 superstorm[J]. *AGU Advances*, 2025, **6**(1): e2024AV001379

[25] HAYAKAWA H, EBIHARA Y, MISHEV A, *et al*. The solar and geomagnetic storms in 2024 May: a flash data report[J]. *The Astrophysical Journal*, 2025, **979**(1): 49

[26] BAI Guishu. Estimation for High-Dimensional Partial Correlation Coefficient[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2021 (白贵书. 高维偏相关系数的估计[D]. 成都: 电子科技大学, 2021)

最新录用



秦雅倩 女，2004 年 1 月出生于河北省邢台市，现为中国科学院国家空间科学中心研究生，主要研究方向为近地银河宇宙线的传输和调制研究。



郭孝城 男，1978 年 10 月出生于福建省大田县，现为中国科学院国家空间科学中心研究员，博士生导师，主要方向为外日球层大尺度结构数值模拟，银河宇宙线的调制和传输，及地球磁层空间天气学的数值建模。

最新录用

附录 A

表 A.6 线性回归参数及其不确定范围

Table A.1 Linear regression parameters and their uncertainties

X Variable	Y Variable	k	b	r
AL/m	A /%	0.0001 ± 0.0002	9.516 ± 0.426	0.049
AL/m	T_1 /h	-0.0003 ± 0.0005	174.543 ± 0.842	-0.110
AL/m	T_2 /h	0.0014 ± 0.0003	208.658 ± 0.573	0.639
AL/m	D /h	0.0017 ± 0.0006	34.115 ± 1.153	0.443
AL/m	R /h	0.0212 ± 0.0091	166.700 ± 16.572	0.395
RI/GV	T_1 /h	-0.2579 ± 0.2591	174.772 ± 0.846	-0.182
RI/GV	R /h	-7.3851 ± 5.4394	207.368 ± 17.756	-0.244
RI/GV	T_2 /h	0.5945 ± 0.2037	209.034 ± 0.665	0.476
RI/GV	D /h	0.8524 ± 0.3673	34.262 ± 1.199	0.396
RI/GV	A /%	-0.5938 ± 0.0739	10.866 ± 0.241	-0.831
$\lvert N \rvert$ /°	T_1 /h	0.0151 ± 0.0418	173.332 ± 2.534	0.067
$\lvert N \rvert$ /°	R /h	1.8788 ± 0.8220	81.479 ± 49.772	0.391

$\lvert N \rvert$/°	T_2 /h	-0.0333 ± 0.0364	212.261 ± 2.202	-0.168
$\lvert N \rvert$/°	D /h	-0.0484 ± 0.0630	38.930 ± 3.816	-0.141
$\lvert N \rvert$/°	A /%	0.0886 ± 0.0133	4.400 ± 0.803	0.779
E/°	T_1 /h	0.0085 ± 0.0078	174.042 ± 0.654	0.199
E/°	R /h	0.5013 ± 0.1406	181.132 ± 11.851	0.552
E/°	T_2 /h	0.0052 ± 0.0069	210.205 ± 0.581	0.138
E/°	D /h	-0.0033 ± 0.0120	36.162 ± 1.012	-0.051
E/°	A /%	0.0028 ± 0.0040	9.531 ± 0.333	0.131

最新录用