

数据论文

内蒙古四子王站宇宙线 μ 子计数
数据集 (2023–2025 年)*程永宏¹ 钟秋珍^{1,2} 庄淳宇¹ 师立勤^{1,2}
宋小超¹ 王晶¹ 沈华¹ 未历航³

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(中国科学院大学天文与空间科学学院 北京 101408)

3(中国人民解放军 96941 部队 北京 100085)

摘要 内蒙古四子王站 μ 子望远镜的探测对象是到达地面的次级宇宙线 μ 子。该 μ 子望远镜的 48 个探测单元产生的 μ 子信号, 经过放大、甄别、整形处理后, 被传送至 FPGA 逻辑电路进行方向符合计算, 产出原始 μ 子计数, 再经过气压修正计算, 形成 15 个方向的 μ 子计数校正值数据集, 时间分辨率为 1 h。 μ 子望远镜探测数据可灵敏反映宇宙线的日变化、长期变化, 以及日冕物质抛射引发的福布斯下降短时扰动现象。本数据集时间从 2023 年 5 月至 2025 年 4 月, 处于第 25 太阳活动周高年期间, 可为太阳爆发及其在行星际的扰动传播、地磁响应过程研究提供宝贵的数据资源, 同时可为空间天气预警提供数据支撑。

关键词 宇宙线, 四子王站, μ 子望远镜, μ 子计数, 福布斯下降

中图分类号 P353.5

数据集基本信息

数据集名称	内蒙古四子王站宇宙线 μ 子计数数据集 (2023–2025 年)
数据通信作者	钟秋珍 (zhongqz@nssc.ac.cn)
数据作者	程永宏, 钟秋珍, 庄淳宇, 师立勤, 宋小超, 王晶, 沈华, 未历航
数据时间范围	2023–2025 年
数据空间范围	内蒙古四子王站 (111.9°E, 41.8°N, 1444 m)
数据分辨率	1 h
数据量	2.5 MByte
数据格式	*.txt
数据集访问网址	https://doi.org/10.57760/sciencedb.28632
基金项目	中国科学院前瞻战略科技先导专项 (XDB0560203, XDA15060110)
数据集组成	本数据集由 1 个数据文件组成, 时间覆盖 2023 年 5 月至 2025 年 4 月。数据文件由文件头和数据记录区组成。文件头记录了台站、设备、数据级别、数据开始和结束时间、采样率等信息; 数据记录区按行列存储, 时间分辨率为 1 h, 各列分别为年、月、日、时以及 15 个方向的 μ 子计数数据

* 中国科学院前瞻战略科技先导专项资助 (XDB0560203, XDA15060110)

2025-07-31 收到原稿, 2025-12-10 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Cosmic Ray Muon Count Dataset from Siziwang Station in Inner Mongolia (2023—2025)

CHENG Yonghong¹ ZHONG Qiuzhen^{1,2} ZHUANG Chunbo¹ SHI Liqin^{1,2}
SONG Xiaochao¹ WANG Jing¹ SHEN Hua¹ WEI Lihang³

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

2(School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408)

3(Unit 96941 of the Chinese People's Liberation Army, Beijing 100085)

Abstract The Muon Telescope at Siziwang Station in Inner Mongolia is used to detect the secondary cosmic ray muons reaching the ground. The Muon Telescope began construction in November 2019, was completed in April 2023, and produced scientific data. The muon telescope consists of a scintillator observation stack, an electronics recorder, a monitoring platform, and a power supply. The scintillator observation stack is composed of 48 detector units, divided into upper and lower layers with 24 units in each layer, arranged in a 6×4 array. In each detector unit, the plastic scintillator has dimensions of $50 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$. The distance between the upper and lower layers is 89 cm. A 5cm-thick layer of lead bricks is laid between the upper and lower layers to filter out low-energy cosmic rays and low-energy particles in the surrounding environment. The detectors have a total area of 6 m^2 . Muon signals generated by the 48 detector units of the Muon Telescope are processed through front-end circuits for amplification, discrimination, and shaping, then sent to the FPGA logic circuit for directional coincidence calculation. This produces raw muon counts in 15 directions. After undergoing barometric correction calculation, a dataset of corrected muon counts in 15 directions is formed, with a temporal resolution of 1 hour. The count rate in the vertical direction is the highest, with the 1-hour count rate being around 600000 counts and the relative statistical error approximately 0.13%. The muon data can sensitively reflect diurnal variations, long-term variations of cosmic rays, and short-term Forbush decrease perturbations induced by coronal mass ejections. Spanning from May 2023 to April 2025, this dataset covers the high-activity phase of the 25th solar activity cycle. It provides valuable data resources for research on solar eruptions, their interplanetary disturbance propagation, and geomagnetic response processes, while also supporting space weather early warning efforts.

Key words Cosmic rays, Siziwang Station, Muon Telescope, Muon counts, Forbush decrease

Dataset Profile

Title	Cosmic Ray Muon Count Dataset from Siziwang Station in Inner Mongolia (2023—2025)
Data Corresponding Author	ZHONG Qiuzhen (zhongqz@nssc.ac.cn)
Data Author (s)	CHENG Yonghong, ZHONG Qiuzhen, ZHUANG Chunbo, SHI Liqin, SONG Xiaochao, WANG Jing, SHEN Hua, WEI Lihang
Time Range	2023—2025
Spatial Range	Siziwang Station in Inner Mongolia (111.9°E, 41.8°N, 1444 m)
Data Resolution	Time resolution of 1 hour
Data Volume	2.5 MByte
Data Format	*.txt
Database/Dataset URL	https://doi.org/10.57760/sciencedb.28632
Source (s) of Funding	Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB0560203, XDA15060110)
Dataset Composition	This dataset consists of one data file, with a time coverage from May 2023 to April 2025. The data file is composed of a file header and a data record section. The file header records information such as the station, equipment, data level, start and end times of the data, and sampling rate; the data record section is stored in rows and columns, with a temporal resolution of 1 hour. Each column corresponds to the year, month, day, hour, and muon count data in 15 directions, respectively

0 引言

太阳爆发活动、宇宙线、行星际太阳风及地球磁层间的相互作用研究,对空间天气监测与预报至关重要.宇宙线受太阳活动与行星际太阳风的调制,太阳风的变化与日冕物质抛射(CME)的传播会引发地球磁层响应,进而影响到达地面的宇宙线粒子数量.福布斯下降是宇宙线强度受CME调制的典型特征,表现为地面观测的宇宙线强度的短时快速下降^[1].强CME引发的宇宙线福布斯下降通常与大地磁暴相伴发生^[2].宇宙线携带有太阳爆发活动、行星际太阳风及地磁扰动的相关信息,开展地面宇宙线监测研究,对空间天气预报具有重要意义.

宇宙线到达地球空间后,受地球磁场调制并表现为几种地磁效应^[3],即宇宙线的纬度效应、经度效应与东西方向效应.这类地磁效应要求宇宙线探测需进行全球区域的多站点、多方向布局.宇宙线进入地球大气层后,与大气分子相互作用产生次级宇宙线粒子,并进一步形成粒子簇射,粒子通量的峰值高度约为20 km^[3].在峰值高度以下,大气吸收效应起主导作用.地面海拔越高,大气吸收效应越弱,宇宙线则越强.因此,高海拔区域更利于进行宇宙线观测.

2000年Munakata等^[4]利用地面宇宙线 μ 子数据对宇宙线强度的各向异性特征进行分析,探索利用 μ 子望远镜多方向先兆特征进行地磁暴预报方法,同时提出在全球进行 μ 子望远镜布站的设想.目前,国际上多台设备已实现宇宙线 μ 子联网观测,主要包括日本(Nagoya 台站)、巴西(SaoMartinho 台站)、澳大利亚(Hobart 台站)、科威特(Kuwait 台站)等国的 μ 子望远镜,形成了全球宇宙线 μ 子监测网GMDN*.Gololobov等^[5]利用GMDN数据研究宇宙线的各向异性参数特征,Rockenbach等^[6]研究利用行星际激波引发的宇宙线损失锥先兆性特征及宇宙线异常扰动,提前数小时到十几个小时为CME引发的大地磁暴提供预警信息.此外,国际上新型的 μ 子望远镜也在建设之中^[7].

中国现有宇宙线 μ 子观测点主要分布在广州、西藏羊八井^[8]、海南儋州和内蒙古四子王旗,基于多方向 μ 子数据开展的地面宇宙线增强、福布斯下降、

CME等典型空间天气事件的研究表明^[9-12],宇宙线是诊断行星际扰动结构的有力工具.

在子午工程二期项目支持下,中国科学院国家空间科学中心在内蒙古四子王旗建设了一台 μ 子望远镜,该设备作为子午工程二期太阳-行星际全链条监测中近地面环境监测的重要环节,用于探测宇宙线与大气相互作用产生的次级 μ 子成分,以此分析太阳活动特征及太阳爆发的对地有效性. μ 子望远镜于2019年底开始研制,2023年4月底完成建设.内蒙古四子王站 μ 子望远镜设备采用新材料与新工艺技术,探测精度较高,将为第25太阳活动周高年的空间天气预警研究提供连续、稳定的宇宙线数据.

本文介绍了内蒙古四子王站 μ 子望远镜的数据采集与处理方法、数据质量控制与评估方式以及数据使用方法和相关建议.

1 数据采集与处理方法

1.1 设备概况

四子王站属于野外台站,位于内蒙古四子王旗,111.9°E, 41.8°N,海拔高度1444 m,垂直地磁截止刚度7.68 GV.四子王站 μ 子望远镜主要由闪烁体观测堆、电子学记录仪、监控平台及电源系统组成,其闪烁体探测面积达6 m²,数据时间分辨率为10 s,可实现垂直、东、西、南、北等共15个方向的 μ 子计数的探测. μ 子望远镜观测室与闪烁体探测单元阵列如图1所示.

1.2 数据采集

1.2.1 探测方向设计原理

μ 子望远镜的探测方向通过闪烁体观测堆的阵列设计实现.该闪烁体观测堆采用光导箱构造,包含48个探测器单元,分为上下两层,每层按6×4的方式排列;其长边为地理南北方向,短边为东西方向.闪烁体探测单元的阵列分布如图2所示.

μ 子从上层探测器单元入射,穿越5 cm厚的铅砖后进入下层探测器单元,通过识别 μ 子在上下两层探测器单元产生的电信号的符合特征,可测定宇宙线的入射方向.根据不同方向的 μ 子计数分析,入射角>52°时,该方向的 μ 子计数对福布斯下降事件无明显响应,因此 μ 子望远镜共设计了15个角度较小的人

* <https://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php>

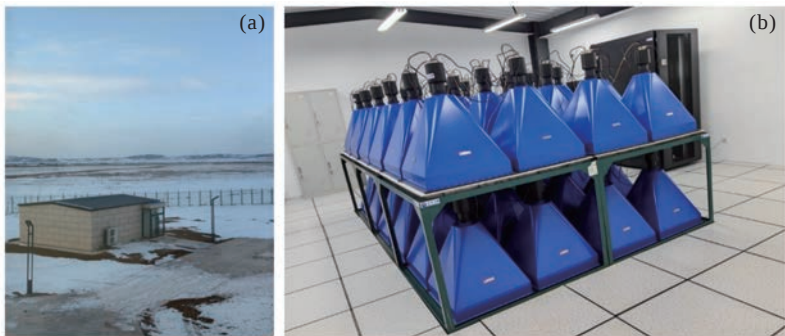


图 1 μ 子望远镜观测室 (a) 与闪烁体观测堆阵列 (b)

Fig. 1 Muon Telescope observation room (a) and scintillator observation stack (b)

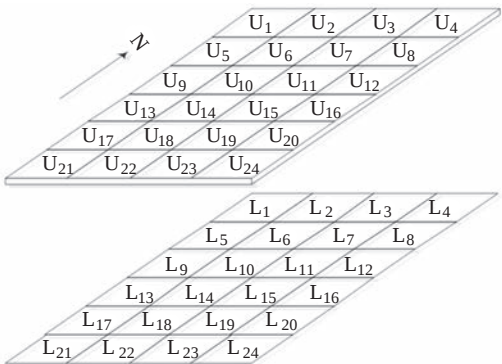


图 2 μ 子望远镜探测器单元阵列分布

Fig. 2 Detector unit array distribution for the Muon Telescope

射方向. 入射角定义为上下探测器单元中心连线方向偏离垂直方向的角度, 探测方向分布如图 3 所示.

不同入射方向对应不同的探测器组合数目, 例如垂直方向由 24 组上下探测器组合构成, 北向 30° 方向由 20 组探测器组合构成. 15 个入射角度下, 上下两层探测器单元的计数符合共形成 232 种组合, 具体情况如表 1 所示.

1.2.2 数据采集流程

宇宙线 μ 子进入塑料闪烁体探测器单元, 使闪烁体中的原子发生电离或激发并产生荧光光子, 光导箱将大部分光子收集至光电倍增管 (CR135) 中; 光电倍增管加载 -900 V 高压, 可将收集到的光信号转换为电信号, 输出至前端调理电路; 前端电路再对电信号进行放大、甄别及整形处理后, 生成规整有效的计数信号, 送入 FPGA 符合电路主导的数据记录仪. FPGA 依据设定好的组合算法, 对 48 路信号进行上下层符合计算. 当上层某一单元记录到入射信号时, 即

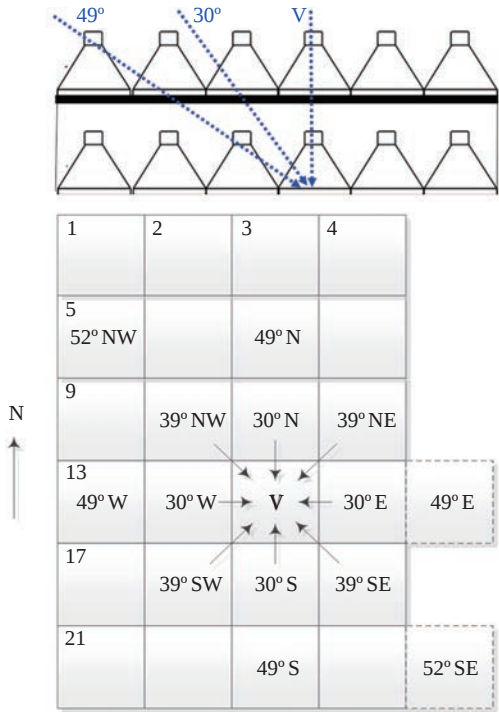


图 3 μ 子望远镜探测方向

Fig. 3 Muon Telescope's detection directions

刻锁定上层锁存器; 在规定的 10 ns 触发时间内, 若下层某一单元符合逻辑关系, 即打开锁存器, 判定该入射方向信号后进行数据累加计算. 各入射方向同步完成上述累加处理, 在 10 s 时间段内可获得 15 个方向的原始 μ 子计数, 数据随即传送至计算服务器. 服务器先对原始 μ 子计数进行存储与显示, 同时接收数字气压计测量的气压值, 并根据气压修正算法, 计算生成 15 个方向的 μ 子计数校正值; 再对 μ 子计数校正值进行累加处理; 最终生成 5 min 和 1 h 分辨率的科学数据. 信号处理与数据采集流程如图 4 所示.

表 1 宇宙线μ子 15 个入射方向的角度与组合数
Table 1 Angles and combinations of 15 incident directions for cosmic ray muons

序号	上下层符合的组合单元	组合数	入射角度
1	$U_1L_1, U_2L_2, U_3L_3, U_4L_4, U_5L_5, U_6L_6, U_7L_7, U_8L_8, U_9L_9, U_{10}L_{10}, U_{11}L_{11}, U_{12}L_{12}, U_{13}L_{13}, U_{14}L_{14}, U_{15}L_{15}, U_{16}L_{16}, U_{17}L_{17}, U_{18}L_{18}, U_{19}L_{19}, U_{20}L_{20}, U_{21}L_{21}, U_{22}L_{22}, U_{23}L_{23}, U_{24}L_{24}$	24	V
2	$U_1L_5, U_2L_6, U_3L_7, U_4L_8, U_5L_9, U_6L_{10}, U_7L_{11}, U_8L_{12}, U_9L_{13}, U_{10}L_{14}, U_{11}L_{15}, U_{12}L_{16}, U_{13}L_{17}, U_{14}L_{18}, U_{15}L_{19}, U_{16}L_{20}, U_{17}L_{21}, U_{18}L_{22}, U_{19}L_{23}, U_{20}L_{24}$	20	30°N
3	$U_5L_1, U_6L_2, U_7L_3, U_8L_4, U_9L_5, U_{10}L_6, U_{11}L_7, U_{12}L_8, U_{13}L_9, U_{14}L_{10}, U_{15}L_{11}, U_{16}L_{12}, U_{17}L_{13}, U_{18}L_{14}, U_{19}L_{15}, U_{20}L_{16}, U_{21}L_{17}, U_{22}L_{18}, U_{23}L_{19}, U_{24}L_{20}$	20	30°S
4	$U_2L_1, U_3L_2, U_4L_3, U_6L_5, U_7L_6, U_8L_7, U_{10}L_9, U_{11}L_{10}, U_{12}L_{11}, U_{14}L_{13}, U_{15}L_{14}, U_{16}L_{15}, U_{18}L_{17}, U_{19}L_{18}, U_{20}L_{19}, U_{22}L_{21}, U_{23}L_{22}, U_{24}L_{23}$	18	30°E
5	$U_1L_2, U_2L_3, U_3L_4, U_5L_6, U_6L_7, U_7L_8, U_9L_{10}, U_{10}L_{11}, U_{11}L_{12}, U_{13}L_{14}, U_{14}L_{15}, U_{15}L_{16}, U_{17}L_{18}, U_{18}L_{19}, U_{19}L_{20}, U_{21}L_{22}, U_{22}L_{23}, U_{23}L_{24}$	18	30°W
6	$U_2L_5, U_3L_6, U_4L_7, U_6L_9, U_7L_{10}, U_8L_{11}, U_{10}L_{13}, U_{11}L_{14}, U_{12}L_{15}, U_{14}L_{17}, U_{15}L_{18}, U_{16}L_{19}, U_{18}L_{21}, U_{19}L_{22}, U_{20}L_{23}$	15	39°NE
7	$U_6L_1, U_7L_2, U_8L_3, U_{10}L_5, U_{11}L_6, U_{12}L_7, U_{14}L_9, U_{15}L_{10}, U_{16}L_{11}, U_{18}L_{13}, U_{19}L_{14}, U_{20}L_{15}, U_{22}L_{17}, U_{23}L_{18}, U_{24}L_{19}$	15	39°SE
8	$U_1L_6, U_2L_7, U_3L_8, U_5L_{10}, U_6L_{11}, U_7L_{12}, U_9L_{14}, U_{10}L_{15}, U_{11}L_{16}, U_{13}L_{18}, U_{14}L_{19}, U_{15}L_{20}, U_{17}L_{22}, U_{18}L_{23}, U_{19}L_{24}$	15	39°NW
9	$U_5L_2, U_6L_3, U_7L_4, U_9L_6, U_{10}L_7, U_{11}L_8, U_{13}L_{10}, U_{14}L_{11}, U_{15}L_{12}, U_{17}L_{14}, U_{18}L_{15}, U_{19}L_{16}, U_{21}L_{18}, U_{22}L_{19}, U_{23}L_{20}$	15	39°SW
10	$U_1L_9, U_2L_{10}, U_3L_{11}, U_4L_{12}, U_5L_{13}, U_6L_{14}, U_7L_{15}, U_8L_{16}, U_9L_{17}, U_{10}L_{18}, U_{11}L_{19}, U_{12}L_{20}, U_{13}L_{21}, U_{14}L_{22}, U_{15}L_{23}, U_{16}L_{24}$	16	49°N
11	$U_9L_1, U_{10}L_2, U_{11}L_3, U_{12}L_4, U_{13}L_5, U_{14}L_6, U_{15}L_7, U_{16}L_8, U_{17}L_9, U_{18}L_{10}, U_{19}L_{11}, U_{20}L_{12}, U_{21}L_{13}, U_{22}L_{14}, U_{23}L_{15}, U_{24}L_{16}$	16	49°S
12	$U_3L_1, U_4L_2, U_7L_5, U_8L_6, U_{11}L_9, U_{12}L_{10}, U_{15}L_{13}, U_{16}L_{14}, U_{19}L_{17}, U_{20}L_{18}, U_{23}L_{21}, U_{24}L_{22}$	12	49°E
13	$U_1L_3, U_2L_4, U_5L_7, U_6L_8, U_9L_{11}, U_{10}L_{12}, U_{13}L_{15}, U_{14}L_{16}, U_{17}L_{19}, U_{18}L_{20}, U_{21}L_{23}, U_{22}L_{24}$	12	49°W
14	$U_1L_{11}, U_2L_{12}, U_5L_{15}, U_6L_{16}, U_9L_{19}, U_{10}L_{20}, U_{13}L_{23}, U_{14}L_{24}$	8	52°NW
15	$U_{11}L_1, U_{12}L_2, U_{15}L_5, U_{16}L_6, U_{19}L_9, U_{20}L_{10}, U_{23}L_{13}, U_{24}L_{14}$	8	52°SE

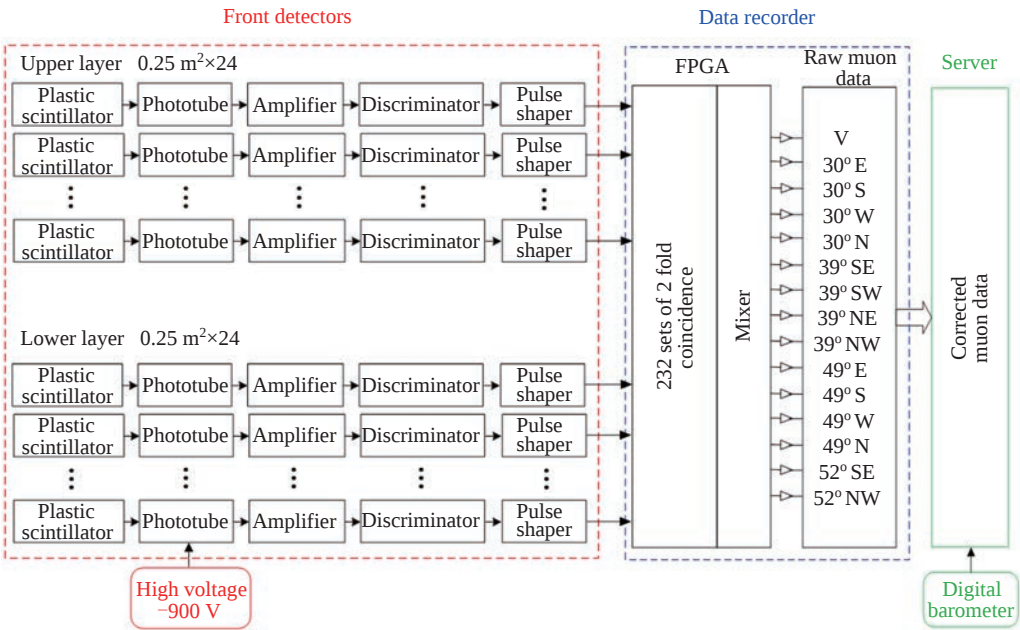


图 4 μ子望远镜信号和数据处理流程
Fig. 4 Signal and data processing pipeline for the Muon Telescope

1.3 气压校正处理方法

初级宇宙线进入大气层后, 与大气分子发生相互作用并产生次级宇宙线. 这些次级粒子进一步与周围的大气相互作用, 形成大范围的粒子簇射. 随着宇宙线簇射的发展, 次级粒子数量持续增加, 直至在某一特定高度达到峰值^[3]. 在峰值高度处, 宇宙线与大气分子相互作用引发的 μ 子增殖数量与 μ 子衰减数量达到平衡; 而在峰值高度以下, 随着高度的降低, 大气密度不断增加, 与大气密度成正相关的气压也不断增加, μ 子增殖数量小于衰减数量, 整体 μ 子计数率随之减少. 因此, 在峰值高度以下的 μ 子计数率与气压呈负相关关系. 为使 μ 子计数更精准地反映初级宇宙线的变化特征, 需消减气压变化对 μ 子计数的影响. 本研究选取 2023 年 5—7 月空间环境相对较平稳时段的观测数据, 以降低空间环境扰动对数据分析的影

响. 通过回归分析方法, 可计算得到 μ 子计数校正正值. 气压系数计算公式为^[13]

$$\ln I/I_0 = \alpha(P - P_0). \quad (1)$$

其中, I 和 P 分别为原始 μ 子计数和气压值 (单位 hPa); I_0 和 P_0 分别为该时间段内的原始 μ 子计数平均值和气压平均值; α 为气压校正系数 (单位 hPa^{-1}).

得到气压校正系数后, 利用下面的公式^[13] 计算得到 μ 子计数校正正值, 即

$$I_c = I \cdot e^{[-\alpha(P - P_0)]}. \quad (2)$$

气压校正前后 μ 子计数曲线如图 5 所示. 为了在一幅图中给出所有数据, 气压与不同方向的 μ 子计数值乘以一个系数, 如图 5 右侧标注所示.

原始 μ 子计数曲线与气压曲线的变化趋势相反. 消减气压效应影响后, μ 子计数校正值的变幅明显减小.

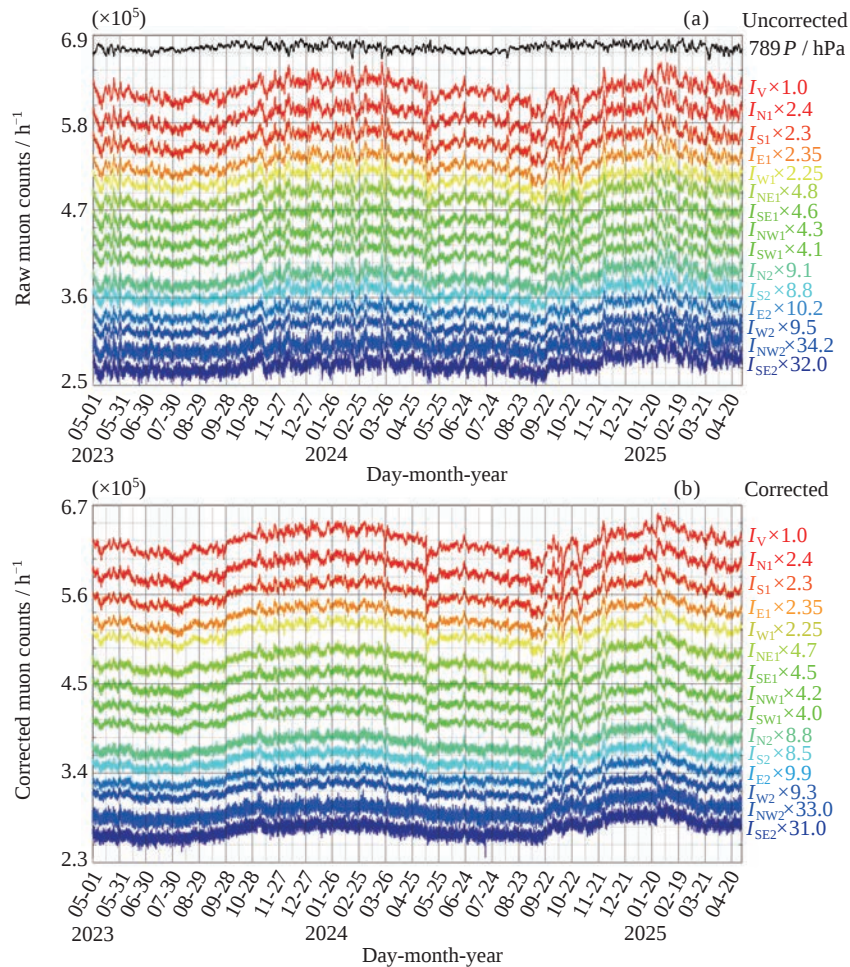


图 5 原始 μ 子计数和气压 (a) 与 μ 子计数校正正值曲线 (b)

Fig. 5 Raw muon counts and atmospheric pressure curves (a) and corrected muon count curves (b)

2 数据样本描述

数据集由 15 个方向的 μ 子计数校正值得组成, 时间分辨率 1 h, 时间长度从 2023 年 5 月 1 日至 2025 年 4 月 30 日. 数据样本如图 6 所示.

数据样本中的物理量包括垂直方向、北向 30°、南向 30°、东向 30°、西向 30°、东北 39°、东南 39°、西北 39°、西南 39°、北向 49°、南向 49°、东向 49°、西向 49°、西北 52°、东南 52°, 共 15 个方向的 μ 子计数校正值得.

数据样本的文件头说明包括台站、观测设备、数据生产方、数据级别、数据开始和结束时间、数据记录行数、采样率、观测的物理量、15 个方向 μ 子计数校正值得格式及缺省值.

数据样本的数据记录区包括标题行和以行列形式存储的数据. 标题行标识了各列参数的名称, 包括时间和 15 个方向的 μ 子计数校正值得, 每一行记录一条数据, 按时间顺序排列. 各参数值详见表 2.

3 数据质量控制与评估

3.1 数据噪声处理

μ 子望远镜的计数噪声主要来源有两类, 其一为宇宙线中的其他粒子噪声, 其二为周围环境中的低能粒子及探测器电路噪声. 通过设置铅砖过滤层, 并结合上下探测器的信号符合, 根据地面宇宙线成分研究^[3]及铅砖、钢架与探测器壳体材料的屏蔽效果估算, 第一类噪声可滤除至 1% 以下. 第二类噪声的滤除, 需先利用多道信号分析仪测定各探测器单元的沉积能谱, 再通过设置甄别电压实现. 在工作状态下, 单个探测器的沉积能谱如图 7 所示, 横坐标为道数, 表示粒子沉积能量或电压的大小, 纵坐标为粒子计数. 虚竖线的右侧为有效的 μ 子计数信号, 其分布近似服从高斯分布; 虚竖线的左侧则是低能量的第二类噪声产生的信号. 该虚竖线位于噪声与有效信号之间计数最低的位置, 对应电压即为甄别电压, 在前端调理电路的甄别器中设置此电压, 即可以滤除低于甄别电压的噪声信号.

光电倍增管在长时间工作过程中, 其本底噪声会缓慢增加, 反映在沉积能谱图中表现为甄别点向右缓

1#Station: OSIZW(111.9E, 41.8N, 1444m)																			
2#Observatory: Muon Telescope																			
3#Producer: National Space Science Center, CAS																			
4#DataLevel: L2																			
5#DataStartTime: 2023-05-01T00:00:00																			
6#DataEndTime: 2025-04-30T23:00:00																			
7#RecordNumber: 17544																			
8#SampleRate: 1hour																			
9#Quantities: Corrected Muon Count(counts)																			
10#V(counts): Zenith Direction, I6, missingdata=-99999																			
11#N1(counts): 30 Degrees off Zenith to the North, I6, missingdata=-99999																			
12#S1(counts): 30 Degrees off Zenith to the South, I6, missingdata=-99999																			
13#E1(counts): 30 Degrees off Zenith to the East, I6, missingdata=-99999																			
14#W1(counts): 30 Degrees off Zenith to the West, I6, missingdata=-99999																			
15#NE1(counts): 39 Degrees off Zenith to the North-East, I6, missingdata=-99999																			
16#SE1(counts): 39 Degrees off Zenith to the South-East, I6, missingdata=-99999																			
17#NW1(counts): 39 Degrees off Zenith to the North-West, I6, missingdata=-99999																			
18#SW1(counts): 39 Degrees off Zenith to the South-West, I6, missingdata=-99999																			
19#N2(counts): 49 Degrees off Zenith to the North, I6, missingdata=-99999																			
20#S2(counts): 49 Degrees off Zenith to the South, I6, missingdata=-99999																			
21#E2(counts): 49 Degrees off Zenith to the East, I6, missingdata=-99999																			
22#W2(counts): 49 Degrees off Zenith to the West, I6, missingdata=-99999																			
23#NW2(counts): 52 Degrees off Zenith to the North-West, I6, missingdata=-99999																			
24#SE2(counts): 52 Degrees off Zenith to the South-East, I6, missingdata=-99999																			
25#-----																			
26	Year	Mon	Day	Hour	V	N1	S1	E1	W1	NE1	SE1	NW1	SW1	N2	S2	E2	W2	NW2	SE2
27	2023	5	1	0	625694	246819	244007	227770	228169	103090	101059	102027	101505	42946	42072	33805	34172	8933	8747
28	2023	5	1	1	626040	245334	243544	226681	227083	102344	100787	102070	102089	42239	42053	33381	34115	8886	8585
29	2023	5	1	2	625253	244858	242913	225687	227782	101614	100603	101474	101162	42005	41214	33459	33923	8454	8541
30	2023	5	1	3	626197	247016	243189	226737	227643	101064	101120	102224	101334	42278	41437	33256	33890	8731	8690
31	2023	5	1	4	625512	246029	244085	225642	227260	101740	100571	102051	101625	42100	42007	33493	33549	8726	8642
32	2023	5	1	5	625206	246469	243446	225503	227305	100902	100480	102175	101250	42344	41472	33607	33744	8839	8665
33	2023	5	1	6	625102	245575	243329	225352	227455	101066	100724	101158	101809	41955	41218	33421	34053	8612	8537
34	2023	5	1	7	625087	246097	244125	226121	227177	101289	100067	101423	100825	42166	41282	33228	34177	8611	8357
35	2023	5	1	8	626560	246772	243607	226612	228574	102149	101036	102081	101376	42345	41670	33288	34085	8587	8459
36	2023	5	1	9	627465	246238	243311	226167	229046	101175	100726	101793	101181	42423	41795	33408	34350	8856	8584
37	2023	5	1	10	627187	246730	243558	227191	228501	102402	100709	101589	101217	42344	41304	33260	34035	8448	8410
38	2023	5	1	11	628078	246450	244780	226533	228705	101942	100742	102320	101711	42772	41929	33741	34355	8899	8789
39	2023	5	1	12	628788	247781	244437	227365	229055	102416	101284	102090	102027	42514	41987	33631	34373	8949	8731
40	2023	5	1	13	626888	247090	244329	226489	227537	101908	101146	101995	101487	42491	41693	33426	34137	8627	8601
41	2023	5	1	14	628195	246927	243746	227056	228398	101524	100851	102049	101839	42581	41694	33443	34202	8774	8557
42	2023	5	1	15	626310	245549	244636	226666	228127	101716	101002	101847	101969	42264	41407	33100	34131	8591	8566
43	2023	5	1	16	626631	244818	244259	226966	228061	101599	100612	101781	101935	42416	41840	33235	33766	8596	8484
44	2023	5	1	17	624733	246556	244270	226356	227177	101182	100270	101315	101490	42221	41931	33570	34169	8915	8636

图 6 μ 子望远镜数据样本
Fig. 6 Muon Telescope data sample

表 2 数据样本各列参数的格式描述
Table 2 Format description of parameters for each column in data samples

列	参数名称	描述	格式	单位	值域	无效填充
1	Year	年	I4	—	2023—2025	—
2	Mon	月	I2	—	1—12	—
3	Day	日	I2	—	1—31	—
4	Hour	时	I2	—	0—23	—
5	V	垂直方向 μ 子计数校正值	I6	counts	500000~700000	-99999
6	N1	北向30° μ 子计数校正值	I6	counts	150000~300000	-99999
7	S1	南向30° μ 子计数校正值	I6	counts	150000~300000	-99999
8	E1	东向30° μ 子计数校正值	I6	counts	150000~300000	-99999
9	W1	西向30° μ 子计数校正值	I6	counts	150000~300000	-99999
10	NE1	东北39° μ 子计数校正值	I6	counts	50000~150000	-99999
11	SE1	东南39° μ 子计数校正值	I6	counts	50000~150000	-99999
12	NW1	西北39° μ 子计数校正值	I6	counts	50000~150000	-99999
13	SW1	西南39° μ 子计数校正值	I6	counts	50000~150000	-99999
14	N2	北向49° μ 子计数校正值	I6	counts	10000~100000	-99999
15	S2	南向49° μ 子计数校正值	I6	counts	10000~100000	-99999
16	E2	东向49° μ 子计数校正值	I6	counts	10000~100000	-99999
17	W2	西向49° μ 子计数校正值	I6	counts	10000~100000	-99999
18	NW2	西北52° μ 子计数校正值	I6	counts	2000~20000	-99999
19	SE2	东南52° μ 子计数校正值	I6	counts	2000~20000	-99999

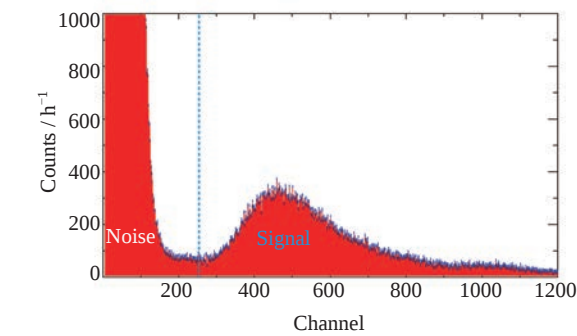


图 7 μ 子望远镜单个通道的沉积能谱
Fig. 7 Deposited energy spectrum of a single channel of the Muon Telescope

慢移动. 针对噪声累积问题, 可通过定期检测维护, 采取调整甄别电压或更换光电倍增管的方式解决.

3.2 数据统计误差

地面宇宙线计数近似服从泊松分布的统计特征, 其相对统计误差^[14]可表示为 $\sigma = 1/\sqrt{NT}$, 这里 N 为单位时间内的 μ 子计数, T 为记录时间. 统计 2023 年 5 月 1 至 2025 年 4 月 30 日有效的 1 h 分辨率 μ 子计数的平均值, 计算相对统计误差, 结果列于表 3.

表 3 15 个方向 μ 子计数的相对统计误差
Table 3 Relative statistical errors of muon counts in 15 directional angular bins

探测方向	μ 子计数/ h^{-1}	相对误差/(%)
垂直方向V	621358	0.12
北向30°N1	245266	0.20
南向30°S1	242668	0.20
东向30°E1	225757	0.21
西向30°W1	226683	0.21
东北39°NE1	101791	0.31
东南39°SE1	100539	0.31
西北39°NW1	101795	0.31
西南39°SW1	101255	0.31
北向49°N2	42541	0.48
南向49°S2	41701	0.49
东向49°E2	33800	0.54
西向49°W2	34126	0.54
西北52°NW2	8794	1.06
东南52°SE2	8633	1.07

由表 3 可见, 垂直方向的 μ 子计数率最高, 相对统计误差最小, 随着入射角度的增加, 计数率逐渐减小, 相对统计误差增大.

3.3 数据可靠性验证

3.3.1 原始 μ 子计数与气压的反相关关系验证

原始 μ 子计数与大气压强呈负相关关系, 这是 μ 子气象效应的典型特征之一. 选取 2023 年 5 月 1 日至 2023 年 7 月 31 日期间 2176 个 1 h 分辨率的原始数据点, 对其进行相关性统计分析, 所得线性相关系数计算结果列于表 4. 图 8 给出了北、南、东、西 30° 方向原始 μ 子计数与大气压强的关系.

15 个方向的原始 μ 子计数与大气压强的线性相关系数均小于 -0.93 , 表明二者呈显著负相关关系. 四

子王站 μ 子望远镜观测结果可有效反映宇宙线气压效应的典型特征.

3.3.2 μ 子计数的日变化特征

宇宙线数据呈现显著的日变化特征. 选取 2024 年的观测数据, 采用时序叠加法, 对经气压修正后的 μ 子计数校正值, 按地方时进行日内累加平均处理, 得到垂直方向的 μ 子计数的平均值, 其日平均变化幅度如图 9 所示.

μ 子计数的地方时曲线呈近似的余弦变化, 反映了 μ 子数据的日变化特征. 太阳风与地磁场发生相互作用, 引起地磁场形变, 使地球空间磁场在正午时段较强, 午夜时段较弱, 而地球空间磁场的昼夜差异是宇宙线日变化的主要原因.

表 4 15 个方向原始 μ 子计数与大气压强的线性相关系数
Table 4 Linear correlation coefficients between original muon counts in 15 directions and atmospheric pressure

方向	V	N1	S1	E1	W1	NE1	SE1	NW1	SW1	N2	S2	E2	W2	NW2	SE2
相关系数	-0.93	-0.95	-0.93	-0.94	-0.95	-0.95	-0.93	-0.96	-0.94	-0.98	-0.97	-0.97	-0.97	-0.98	-0.98

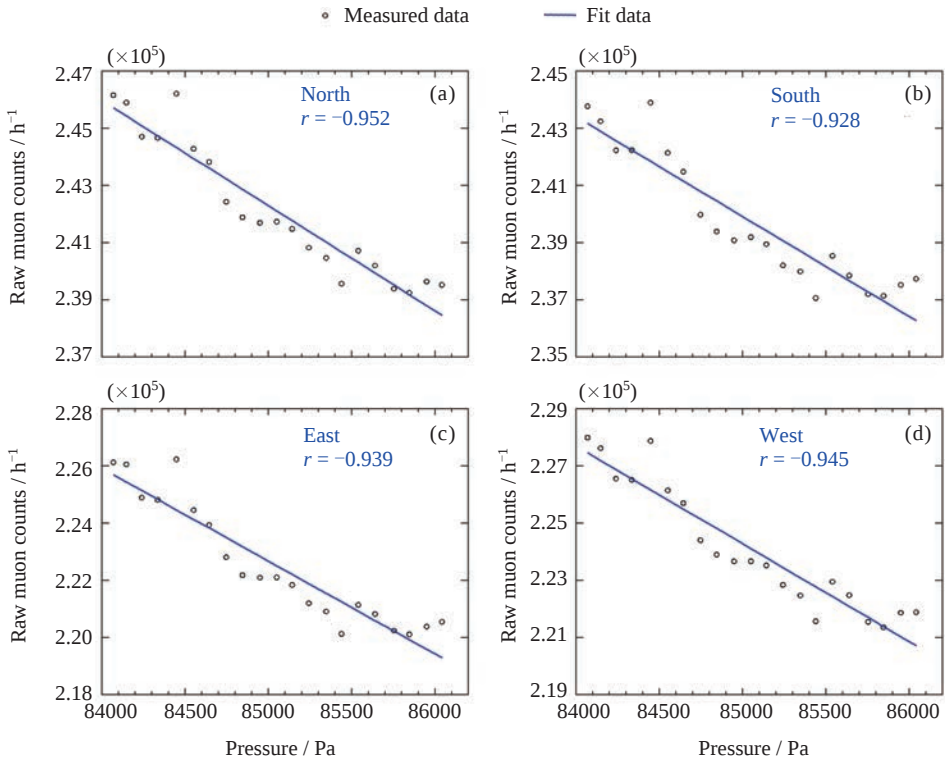


图 8 北、南、东、西 30° 方向原始 μ 子计数与大气压强的关系
Fig. 8 Relationship between original muon counts and atmospheric pressure in the 30° directions of north, south, east and west

3.3.3 μ 子计数对福布斯下降的响应验证

福布斯下降是宇宙线对太阳爆发活动产生响应的典型特征. 2024 年 5 月 10—13 日, 太阳爆发产生的多个日冕物质抛射 (CME) 先后抵达到地球, 触发了近 20 年来的最强地磁暴^[15], 进而导致宇宙线急剧下降. 四子王站 μ 子望远镜完整观测了此次大事件的全过程, 5 月 10 日 19:00 UT, 经气压校正后的 μ 子计数开始急剧下降, 至 11 日 13:00 UT, 计数降至最低值, 其中垂直方向的最大下降幅度达到-5.9%. 为了进一步验证福布斯下降事件响应的可靠性, 选取全球宇宙线 μ 子监测网*日本 Nagoya 站 (136.9°E, 35.2°N, 海拔 77 m) μ 子望远镜的同期观测数据进行了对比分

析. 5 月 10 日 19:00 UT 至 11 日 13:00 UT, Nagoya 台站垂直方向 μ 子计数的最大下降幅度达到-4.9%. 2024 年 5 月, 两台 μ 子望远镜观测得到的垂直方向 μ 子计数的变化幅度如图 10 所示.

福布斯下降事件中, 两台设备的垂直方向 μ 子计数同时达到谷值, 下降幅度均较显著, 变化趋势也高度一致. 这表明, 四子王站 μ 子望远镜对福布斯下降事件的响应及时且灵敏.

3.4 数据缺失说明

四子王站 μ 子望远镜的运行状态稳定, 有效数据时间占比达 98.6%, 数据缺失主要由每年数次的检测维护停机导致. 此外, 监控软件系统的更新升级、个别线缆接插件接触不良以及供电异常等情况, 也会造成短时的数据缺失.

4 数据使用方法与建议

本数据集的观测时段处于第 25 太阳活动周的高年, 可用于分析宇宙线 μ 子对空间天气事件的响应, 也可用于研究行星际扰动特征、宇宙线 μ 子与太阳爆发活动及地磁扰动的关系等. 宇宙线 μ 子的气象效应除气压效应外, 还包括温度效应, 因此需对 μ 子数据进行温度校正研究, 以消弱大气温度对宇宙线的影响, 进而更精准地反映初级宇宙线的变化特征.

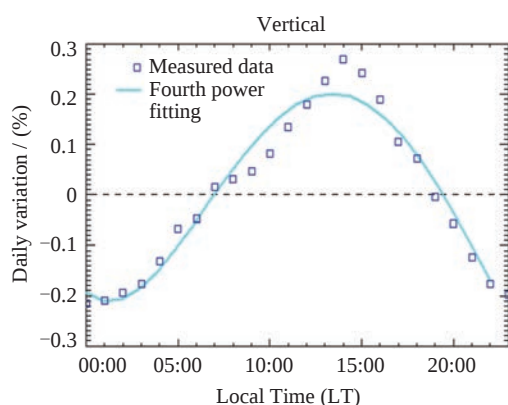


图 9 μ 子计数的日变化幅度

Fig. 9 Diurnal variation amplitude of muon counts

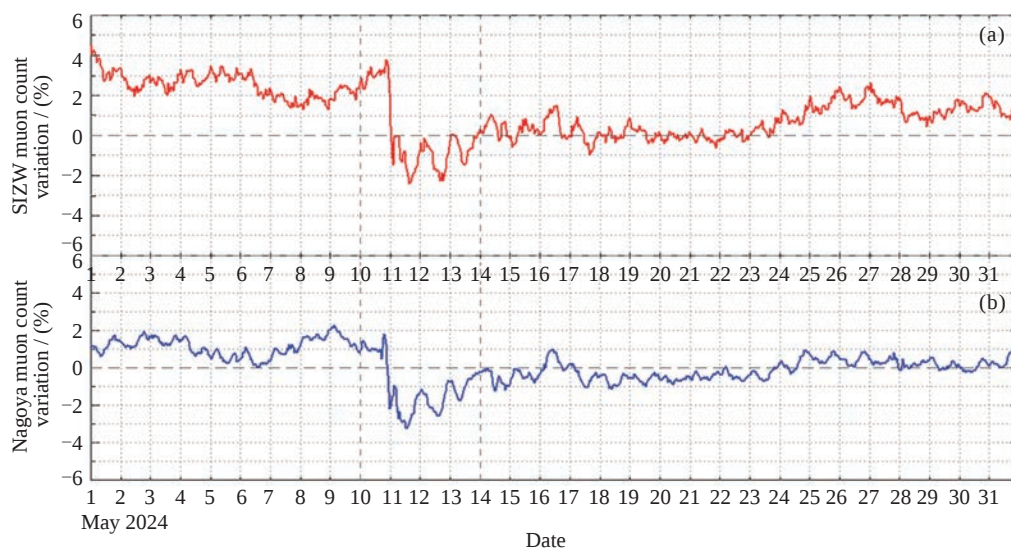


图 10 2024 年 5 月四子王站 (a) 和 Nagoya 站 (b) μ 子望远镜垂直方向计数的变化幅度

Fig. 10 Variation amplitude of vertical muon counts at Siziwang Station (a) and Nagoya Station (b) in May 2024

* <https://cosray.shinshu-u.ac.jp/crest/DB/Public/main.php>

致谢 感谢内蒙古四子王站为 μ 子望远镜的建设和维护做出的贡献。

参考文献

- [1] MELKUMYANA A A, BELOV A V, ABUNINAB M A, *et al.* Comparison between statistical properties of Forbush decreases caused by solar wind disturbances from coronal mass ejections and coronal holes[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(2): 1100-1109
- [2] KUDELA K, BRENKUS R. Cosmic ray decreases and geomagnetic activity: list of events 1982–2002[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(13/14): 1121-1126
- [3] ALCOFER O C. Introduction to Cosmic Radiation[M]. XU Chunxian, ZHU Qingqi, trans. Beijing: Science Press, 1987 (阿尔科费尔 O C. 宇宙线入门 [M]. 徐春娴, 朱清棋, 译. 北京: 科学出版社, 1987)
- [4] MUNAKATA K, BIEBER J W, YASUE S I, *et al.* Precursors of geomagnetic storms observed by the muon detector network[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A12): 27457-27468
- [5] GOLOLOBOV P Y, GRIGORYEV V G, STARODUBTSEV S A, *et al.* Method of global survey involving data of muon telescope network[J]. *Astroparticle Physics*, 2021, **131**: 102586
- [6] ROCKENBACH M, DAL LAGO A, SCHUCH N J, *et al.* Global muon detector network used for space weather applications[J]. *Space Science Reviews*, 2014, **182**(1): 1-18
- [7] MUBASHIR A, ASHOK A, BOURGEOIS A G, *et al.* Muon flux variations measured by low-cost portable cosmic ray detectors and their correlation with space weather activity[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(12): e2023JA031943
- [8] ZHANG J L, TAN Y H, WANG H, *et al.* The Yangbajing muon-neutron telescope[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2010, **623**(3): 1030-1034
- [9] YE Zonghai. The features of the ground level enhancement event of cosmic ray on 29 September 1989[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1991, **11**(4): 258-266 (叶宗海. 1989年9月29日GLE事件的特征[J]. 空间科学学报, 1991, **11**(4): 258-266)
- [10] YE Zonghai, XIAO Shaoyu, XUE Shunsheng. The characteristics of great cosmic ray storm events in March 1989[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1990, **10**(4): 280-288 (叶宗海, 肖少瑜, 薛顺生. 1989年3月大宇宙线暴事件的特征[J]. 空间科学学报, 1990, **10**(4): 280-288)
- [11] LE Guiming, YE Zonghai, GONG Juhong, *et al.* The monitor of the CME in March 1991 by cosmic rays[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, **46**(2): 152-155 (乐贵明, 叶宗海, 龚菊红, 等. 银河宇宙线对1991年3月日冕物质抛射的监测[J]. 地球物理学报, 2003, **46**(2): 152-155)
- [12] LE Guiming, YE Zonghai, YU Shaohua, *et al.* Wavelet analysis of the cosmic ray intensities at Guangzhou muon station during January 7–11, 1997[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2004, **47**(2): 190-194 (乐贵明, 叶宗海, 余绍华, 等. 1997年1月7日至11日广州站宇宙线强度变化特征的小波分析[J]. 地球物理学报, 2004, **47**(2): 190-194)
- [13] TANG Yunqiu, LU Hong, LE Guiming, *et al.* The pressure correction of the cosmic ray data in Yangbajing[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2004, **24**(3): 219-225 (唐云秋, 卢红, 乐贵明, 等. 羊八井宇宙线强度观测数据的气压修正[J]. 空间科学学报, 2004, **24**(3): 219-225)
- [14] YE Zonghai. Space Particle Radiation Detection Technology[M]. Beijing: Science Press, 1986 (叶宗海. 空间粒子辐射探测技术[M]. 北京: 科学出版社, 1986)
- [15] RIGGI F, HERTLE L, ABBRESCIA M, *et al.* High latitude observation of the Forbush decrease during the May 2024 solar storms with muon and neutron detectors on Svalbard[J]. *Advances in Space Research*, 2015, **76**(2): 1225-1239

作者简介



程永宏 男, 1977年9月出生于安徽省肥东县, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 主要研究方向为空间天气监测预报。
E-mail: chengyh@nssc.ac.cn



钟秋珍 (通信作者) 女, 1974年8月出生于河南省唐河县, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员、硕士研究生导师, 主要研究方向为空间环境预报方法与模型。
E-mail: zhongqz@nssc.ac.cn