

风云三号A/B星空间环境监测器对空间天气事件监测能力评估及其应用研究

黄聪¹ 李嘉巍¹ 余涛¹ 薛炳森¹ 王春琴² 张贤国² 曹光伟² 刘丹丹¹ 唐伟¹

(1 国家卫星气象中心, 中国气象局, 北京 100081; 2 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190)

摘要: 中国气象卫星风云三号A/B星上的星载空间环境监测器 (SEM), 具有探测3~300兆电子伏 (MeV) 能量范围的质子通量和0.15~5.7MeV能量范围的电子通量的能力。同时该监测器可以探测重离子组成成分, 卫星表面电位, 传感器累积的辐射剂量以及单粒子事件。从监测器中得到的空间环境信息可以用来进行卫星安全设计、科学研究、辐射带模型开发研究, 以及空间天气监测和灾害预警。介绍了监测仪器的特性和在轨期间的定标算法, 以及在空间天气事件监测和载人航天飞行服务中的应用范例。

关键词: 空间技术, 辐射监测, 电子辐射效应, 质子辐射效应, 重离子

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2013.04.013

The Capabilities and Applications of FengYun-3A/B SEM on Monitoring Space Weather Events

Huang Cong¹, Li Jiawei¹, Yu Tao¹, Xue Bingsen¹, Wang Chunqin², Zhang Xianguo²,
Cao Guangwei², Liu Dandan¹, Tang Wei¹

(1 National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

2 Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

Abstract: The space environment monitor (SEM), onboard the Chinese meteorological satellites FengYun-3A/B, has the abilities to measure proton flux in 3~300 MeV energy range and electron flux in 0.15~5.7 MeV energy range. SEM can also detect the heavy ion compositions, satellite surface potential, the radiation dose in sensors, and the single events. The space environment information derived from SEM can be utilized for satellite security designs, scientific studies, development of radiation belt models, and space weather monitoring and disaster warning. In this paper, the SEM's instrument characteristics are introduced, and the postlaunch calibration algorithm is presented. The applications in monitoring space weather events and the service for manned spaceflights are also demonstrated.

Keywords: space technology, radiation monitoring, electron radiation effects, proton radiation effects, heavy ions

1 引言

空间环境监测器 (SEM), 分别搭载在两颗风云极轨气象卫星——风云三号A/B星 (FY-3A/B) 上, 于2008年5月27日和2010年11月5日 (北京时间) 进入预定轨道。FY-3A/B是中国气象业务卫星中的太阳同步极轨卫星, 它的特点是: 在以98°倾角的低地球轨道上 (830km) 运行; 两颗卫星分别为上午

星 (A星, 升轨地方时为10时) 和下午星 (B星, 升轨地方时为14时)。该监测器最重要的能力是可以测量高能带电粒子, 如质子 (3~300MeV) 和电子 (0.15~5.7MeV)。高能带电粒子可能会影响空间环境, 并且与空间灾害性天气关系密切。例如, 当粒子与卫星相撞时, 高能电子可以诱发表层或深层的介质充电, 这可能破坏卫星系统, 而且高能质子能穿透仪器^[1]。此外, 当这些粒子沉降到电离层, 会在中间层和热层下部产生电离^[2], 干扰无线电通信。此外, 高能质子可能对宇航员有害, 尤其是在南大西洋异常区 (SAA)。因此有必要监测这些粒子, 研究卫星系统异常和无线电通信衰减的原因, 这将有助于中国的载人航天飞行任务。

在20世纪70年代, 人们利用AP8/AE8模型来描述

收稿日期: 2013年4月1日; 修回日期: 2013年6月20日
第一作者: 黄聪 (1978—), Email: huangc@cma.gov.cn
通信作者: 余涛 (1975—), Email: yutao@cma.gov.cn
资助信息: 973计划项目 (2012CB957800, 2011CB811400, 2010CB951600); 863计划项目 (2010AA122205, 2012AA121000); 国家自然科学基金资助项目 (40890160, 40974093, 41004085 和 41074126)

范艾伦辐射带的动力学机制^[3,4]。然而AP8和AE8模式只能提供静态各向同性的平均粒子通量，而且地磁场每年迁移 0.3° ，内辐射带的位置也在改变。因此，AP8/AE8模型结果可能不再适合现代空间飞行任务的要求。监测各向异性且不断变化的高能粒子强度是卫星安全设计和载人航天任务中的重要环节。

国际上用于辐射带监测的卫星有很多^[5-8]。目前，美国国家海洋和大气管理局（NOAA）极轨环境卫星（POES）系列卫星和中国气象局的FY-3系列卫星提供太阳同步极轨轨道上高能带电粒子分布的业务观测。FY-3A/B上的星载空间环境监测器是中国第一个业务有效载荷。它可以监测空间环境，提供重离子组成成分，卫星表面电位，传感器辐射剂量和单粒子事件信息。这些空间环境数据可用于卫星工程和空间科学研究。

2 仪器说明

FY-3A/B在太阳同步卫星轨道上运行，升轨（降

轨）的当地时间是相同的。其轨道周期为102min，轨道的近似高度是830km。FY-3A/B卫星上载有SEM，可以测量沉降到上层大气中的离子和电子的强度，同时其可以探测卫星表面电位和辐射剂量，并记录单粒子事件。

2.1 粒子探测器

粒子探测器由两台探测器组成，分别用来探测离子和电子。这两台探测器的探测原理相似，都是通过挡光层和准直仪使得带电粒子撞击传感器。这些粒子落在传感器中，并产生电脉冲，通过这些电脉冲的幅度、符合和反符合电路筛选来确定该粒子的类型。

离子探测器的视场角度为 60° ，它可以测量6个能段的质子：3~5，5~10，10~26，26~40，40~100和100~300MeV（图1a~f）。从图上可以清楚地看出南大西洋异常区。南大西洋异常区是内辐射带的一部分，地磁场是它的成因。它的三维结构像一个漏斗，底部可以达到200~300km高空。由于高

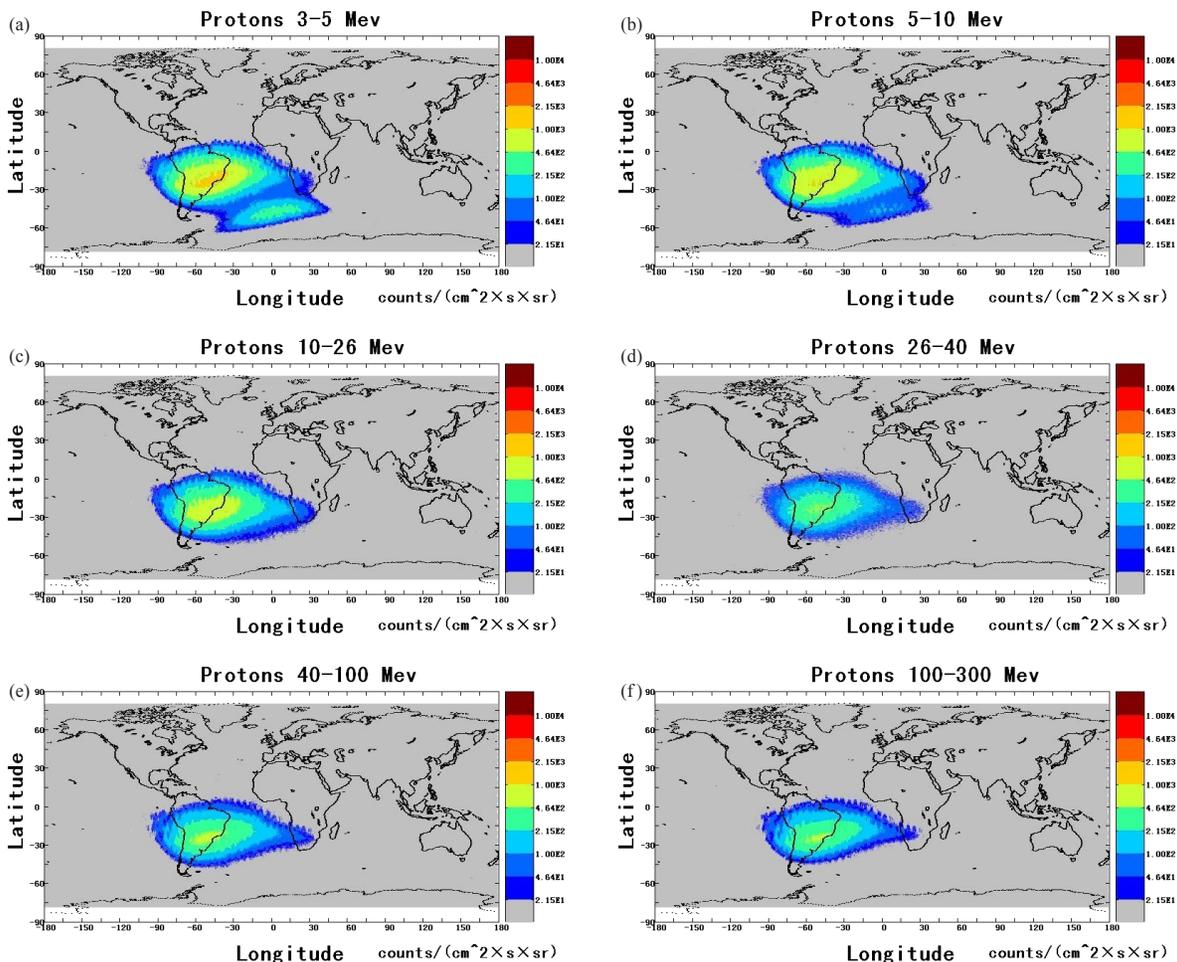


图1 2010年11月11日—12月11日（世界时）FY-3A/B空间环境监测器（SEM）质子全球分布
 (a) 3~5MeV通道质子探测结果；(b) 5~10MeV质子探测结果；(c) 10~26MeV通道质子探测结果；
 (d) 26~40MeV通道质子探测结果；(e) 40~100MeV通道质子探测结果；(f) 100~300MeV通道质子探测结果

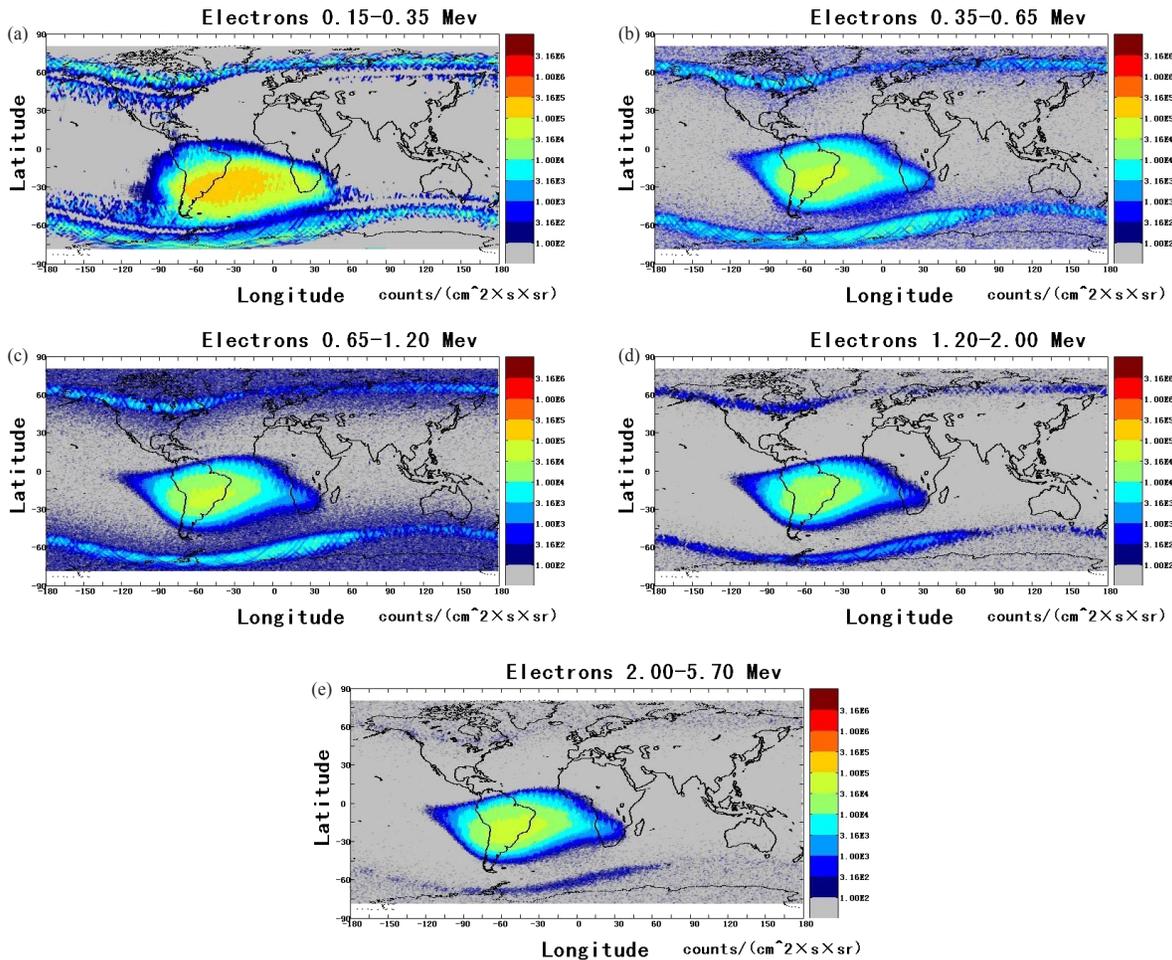


图2 2010年11月11日—12月11日(世界时)FY-3A/B SEM电子全球分布

(a) 0.15~0.35MeV通道电子探测结果; (b) 0.35~0.65MeV通道电子探测结果; (c) 0.65~1.20MeV通道电子探测结果; (d) 1.20~2.00MeV通道电子探测结果; (e) 0.65~1.20MeV通道电子探测结果

能带电粒子被约束在这一地区,南大西洋异常区对轨道舱外的宇航员是有害的。它也可以探测重离子成分: He (12~110MeV), Li (24~220MeV), C (60~570MeV), Mg (0.2~1.2GeV), Ar (0.3~2.0GeV)和Fe (0.5~2.0GeV)。电子探测器视场角度为40°,它可以探测5个能段的电子: 0.15~0.35, 0.35~0.65, 0.65~1.20, 1.20~2.00和2.00~5.70MeV(图2a~e)。在南大西洋异常区和极区一直存在着高能电子。由于地磁活动影响,高能电子分布在极区变化快。高能电子可以沿磁场线进入地球静止轨道,并在空间天气灾害发生时,导致同步卫星表面发生充电现象。这两个探测器位置与卫星轨道平面(y方向)垂直,并探测来自77°~116°投掷角的平均粒子通量。在卫星发射前,探测器通过了地面加速器和辐射源测试,满足定标要求。

2.2 表面电位探测器

表面电位探测器由两台探测器组成。一台朝

日向工作,另外一台朝夜向工作,探测范围是300~3000V。通过分析探测数据,可得卫星表面的电位差,即空间辐射环境的扰动强度。

2.3 辐射剂量探测器

辐射剂量探测器由三台探测器组成。这三台传感器分别位于:载荷舱底部并朝向+Y方向(与轨道平面垂直),载荷舱的+Y平面,服务舱的+Z平面(天顶方向)。探测器收集来自卫星不同位置的辐射剂量信息。这些探测器都是相似的,每台都有两种测量范围: 0~10³rad(Si)(高分辨率,最低响应值13rad(Si)); 0~10⁴rad(Si)(低分辨率,最低响应值33rad(Si))。

2.4 单粒子事件探测器

单粒子事件探测器是一片名为1750A的芯片(中国制造),设计该仪器的目的是测试1750A的抗辐射性能,并在此基础上为将来新一代芯片改进设计提供基础。这个探测器可以记录单粒子翻转事件(SEU)

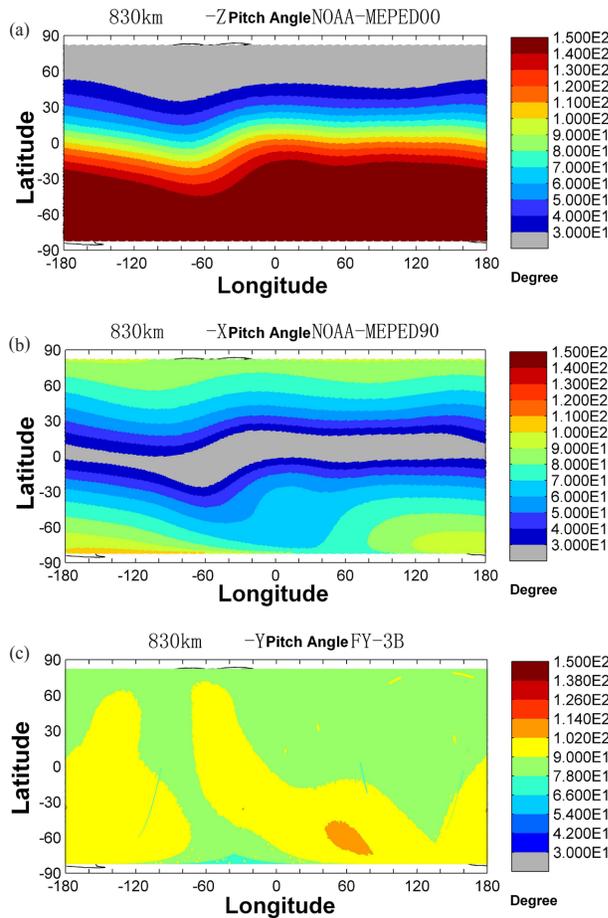


图3 FY-3A/B SEM探测到的粒子全球分布
(a) MEPEDE-0投掷角分布; (b) MEPEDE-90投掷角分布;
(c) SEM投掷角分布

和翻转事件在空间轨道上的分布。这些记录有助于提高卫星抗辐射设计。

3 数据有效性验证

为了确定空间环境监测器上质子和电子通量观测数据的有效性,采用NOAA卫星上中高能质子、电子探测器(MEPED)的观测数据进行比对分析。极地轨道环境卫星(POES),又称TIROS/NOAA,是太阳同步极轨卫星。它运行在98°倾角的低地球轨道平面上(850km高度)。MEPED有两套定向探测器和一套全方向探测器。定向探测器测量5个能段的质子,分别是:30~80,80~240,240~800,800~2500和2500~6900KeV,及超过6900KeV。3个能段的电子,分别是:30,100和300KeV。两套定向探测的视角朝向分别为0°(MEPED-0)和90°(MEPED-90)对应于天顶方向。全方向探测器测量四个能段的质子强度:16~220,35~235,70~235和140~275MeV。其中,16~220MeV能段探测器被相邻仪器遮挡,质子通量探测不准确。

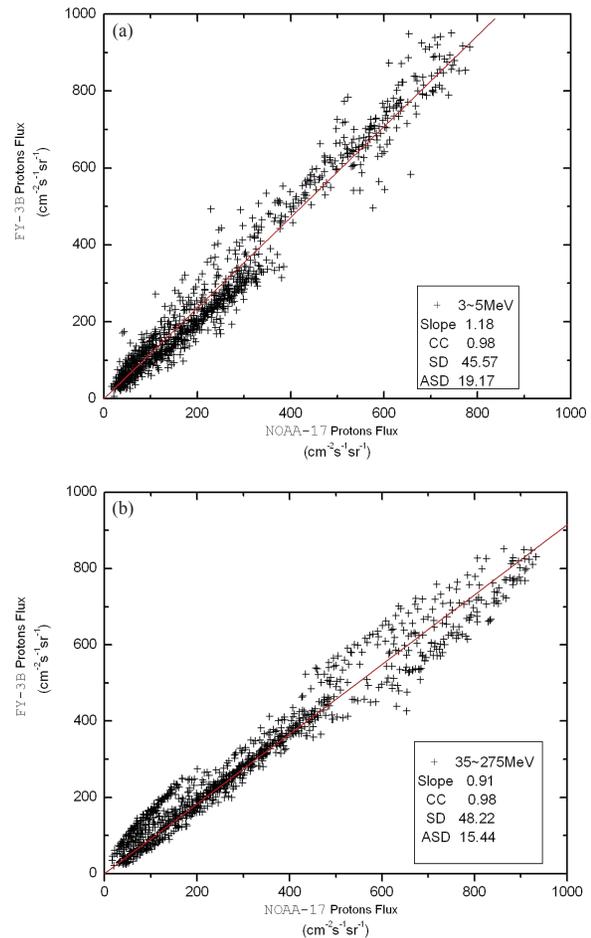


图4 2010年11月11日—12月11日(世界时)FY-3A SEM质子通量探测结果与极地轨道环境卫星(POES)中高能质子、电子探测器(MEPED)探测数据的比较结果(N17数据)(图中Y坐标代表MEPED的质子通量结果,X坐标代表SEM质子通量结果)
(a)3~5MeV通道质子;(b)35~275MeV通道质子

低地球轨道(LEO)上的带电粒子主要分布于南大西洋异常区和极光带地区。这些粒子受地磁活动影响,并且在时空分布上呈现出复杂的各向异性。由于仪器在设计和安装方向上有所不同,所以SEM和MEPED探测出粒子的能段和投掷角不同(图3)。图中可以看出,与MEPED不同的是SEM的投掷角度约为90°。不同的粒子投掷角会导致探测到的粒子通量不同,在极区的电子探测结果尤其明显。因此,有必要选择相近投掷角探测数据,并在对比研究过程中对数据进行归一化处理。SEM其他观测结果(比如重离子成分,表面电位,辐射剂量等)都利用了空间科学理论或已有的探测数据进行了验证。

3.1 质子通量观测数据

在空间天气平静期,高能质子主要集中在南大西洋异常区,并且分布稳定^[9]。为了便于比较,选择

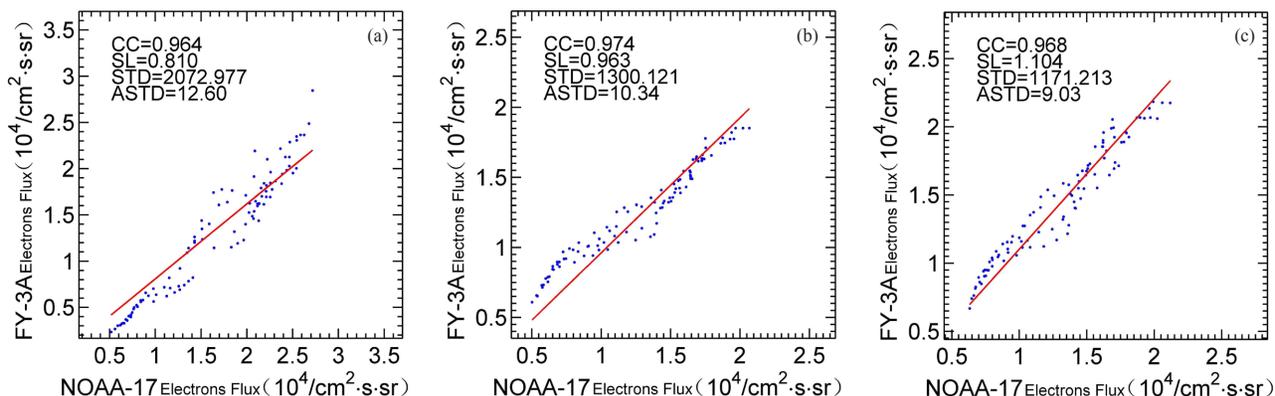


图5 2010年11月11日—12月11日（世界时）FY-3A SEM电子通量探测结果与极地轨道环境卫星（POES）中高能质子、电子探测器（MEPED）的数据的比较结果（N17数据）
（a）0.65~1.20MeV通道电子通量；（b）0.35~0.65MeV通道电子通量；（c）0.15~0.35MeV通道电子通量

了空间天气平静期间在南大西洋异常区内的SEM和MEPED质子通量探测数据（定义地磁指数 $A_p < 5$ 为地磁平静期）进行比对。考虑到粒子各向异性并且随着空间位置变化而变化，选择两探测器在相近经纬度空间位置处的质子通量探测结果（探测器经纬度坐标附近的平均通量），相近的粒子投掷角的探测结果，并且探测时间也相近（两探测器所在的经纬度位置之差 $< 1^\circ$ ，探测时间之差少于30d，粒子投掷角之差的绝对值 $< 10^\circ$ ，详见附录A）。由于SEM质子探测能段与MEPED的有所不同，所以对数据进行了归一化拟合处理，使得不同卫星的质子通量探测数据，都位于相同能段：3~5或35~275MeV。质子通量由幂律谱拟合得出： $Y=AX^B$ ，其中Y是粒子的微分通量，X是粒子的能量^[10]。将质子探测数据代入公式，可以得到A和B的数值。用此公式可以计算得到3~5和35~275MeV范围内的质子通量结果（详见附录C）。

SEM和MEPED的质子通量结果见图4。图中可见SEM探测得到的质子通量与由MEPED探测得到的质子通量有着良好的相关关系。同时也可以看出，两台仪器探测结果的总体趋势一致，相关系数大于0.9。我们选择的质子数探测数据有以下特点：探测位置相近（为了滤除涨落影响，对每个经度和纬度附近的质子通量进行了平均），粒子投掷角相近，观测时间相近。结果表明，SEM结果与中高能质子、电子探测器（MEPED）有着良好的相关关系，这表明SEM的质子探测数据是有效的。

3.2 电子通量观测数据

电子通量的探测受地球磁场影响明显。在本项研究中，利用SEM和MEPED收集到的低纬度南大西洋异常区中不同时间和空间位置处的电子探测数据进行比对。由于电子会受到地磁场和极光带粒子沉降

影响，我们滤除了高纬度地区电子观测数据（<http://poes.ngdc.noaa.gov/docs/status2008-01-10.pdf>）。电子通量的比较方法类似于上文质子的方法。

通过归一化拟合使得来自不同卫星探测得到的电子通量处于以下能段：0.15~0.35，0.35~0.65，0.65~1.2MeV。电子通量的比较方案（图5）与质子比较方案类似。由于电子强度受地磁活动影响严重，所以选择空间位置和观测时间更接近，在低纬度南大西洋异常区的电子探测数据。比较发现，SEM的电子通量结果与MEPED的结果有很好的相关关系，变化趋势一致。然而，因为筛选标准更严格，所以用来比对的电子通量格点数据要比质子比对中的网格数少。

对比SEM和MEPED探测得到的电子通量，两者的趋势相同，相关系数大于0.9。有所不同的是，电子通量数据对比过程中采用了更严格的标准（探测位置经纬度之差 $< 0.5^\circ$ ，探测时间之差少于15d，投掷角之差的绝对值 $< 5^\circ$ ）。

3.3 重离子成分数据

空间天气预报需要低地球轨道（LEO）的重离子成分结果。本文比较了空间环境监测器观测得到的重离子成分通量与CREME86模型的结果。通过空间环境监测器探测到的重离子分布（图6）（由于数据处理方法的不同带来了图6a与b的差异。虽然He是“重离子”，但处理方法上更接近质子的处理方法，所以我们的He分布结果与质子分布结果相似），比较细节详见表1。由于目前缺乏低地球轨道重离子成分的公开数据，因此我们利用CREME86模型检测SEM重离子成分数据的有效性。图中的SEM重离子成分数据结果与CREME86模型的输出结果符合得很好。

CREME86是一种评估宇宙射线对微电子线路影响的模型（1986年版）。它是研究重离子电离辐射

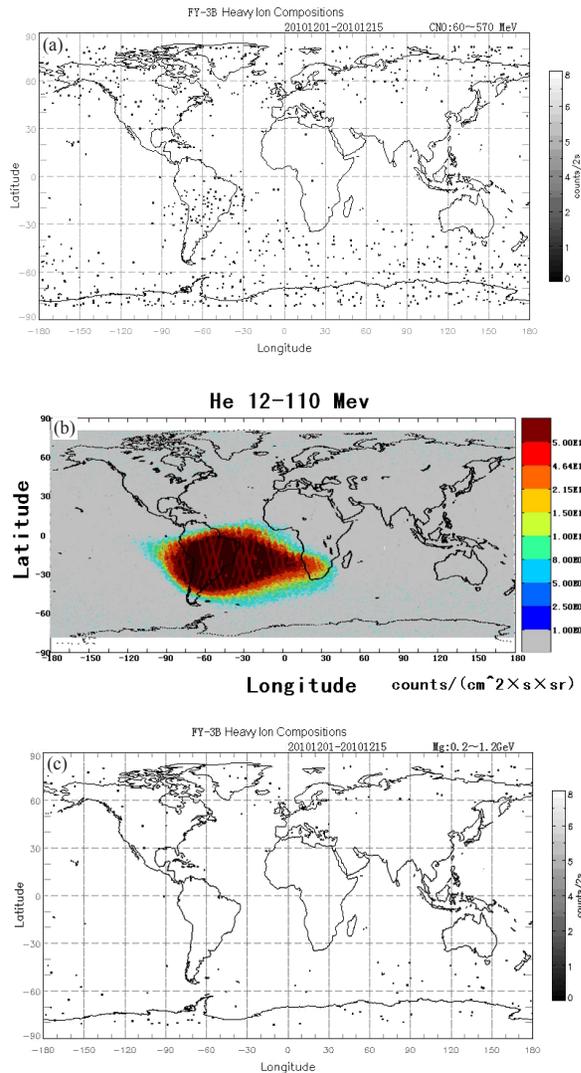


图6 2010年11月11日—12月11日(世界时)FY-3B SEM探测到的重离子成分
(a) 60~570MeV碳氮氧离子; (b) 12~110MeV氦离子; (c) 0.2~1.2GeV镁离子

对卫星微电子线路影响的工具,例如单粒子事件翻转(SEU)。该模型可以计算SEU发生概率,同时给出多种重离子与其能量分布结果等。根据地球上的测量数据,CREME86可以给出行星际辐射通量(银河宇宙射线,异常宇宙射线和太阳高能粒子)。在CREME的通量子程序中(又称“空间电离辐射环境模型”)输入日期、指定的核电荷数范围、轨道类型和“行星际天气指数(M)”,就可以得到该轨道上指定粒子的通量,更多信息请参考网站<https://creme.isde.vanderbilt.edu>。

3.4 表面电位数据

表面电位探测器可以探测到的最小表面电位响应约为13V。根据空间科学原理,在平静的空间

表1 重离子的比较(2010-11-11—2010-12-15)

种类	CREME86 ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	SEM ($\text{cm}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)
Li	1.9~20.9	12.0
C	1.7~18.5	9.6
Mg	0.3~3.0	0.5
Ar	0.04~0.5	0.0
Fe	0.07~0.84	0.38

环境下,探测器在白天可以探测到正电势(最高约16.7V),夜间可以探测到负电势(最低约-21V)。在2010年4月5日的地磁暴过程中,FY-3A卫星上的SEM探测到一次明显的电位变化(图7)。带电粒子造成卫星表面电位约有一50V的下降。该充电事件发生在 70° — 80° S区域(在极区卫星的经度位置是变化非常快的),有显著电子通量增加(E1和E2通量甚至达到了 2×10^5 ,是一般情况的两倍)。最小位置约在 73° S, 18° W。

3.5 辐射剂量数据

在过去3年中,随着在轨运行时间的增加,SEM探测到的辐射剂量也在累积,如图8所示。结果的差异是由仪器位置和探测方向不同造成。探测器做累积辐射剂量探测(图8为逐日平均结果),探测器采样频率为42s。探测器在低分辨率和高分辨率下探测到的辐射剂量都在增加。随着时间的推移,辐射剂量呈现增加趋势,反映出了空间环境的特点。在2010年4月5日(世界时)磁暴后由于受到空间环境中带电粒子带来的干扰,辐射剂量大幅增加,达到 $36 \text{ rad}(\text{Si})/\text{d}$ 。

3.6 单粒子事件数据

至今为止,单粒子事件(SE)探测器仍然没有探测到SEU的记录。根据地面加速器测试,单粒子事件翻转SEU的线性能量转移(LET)值约为 $65 \text{ MeV}(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 。由此可见,1750A的辐射防护设计得相当好,发生单粒子事件翻转SEU的机会不大。在地面试验中,本研究利用CREME86模式计算了在FY-3A轨道宇宙射线水平最坏的情况下,3mm厚的铝蒙皮屏蔽下发生单粒子事件翻转SEU的概率,其结果为 $2.23 \times 10^{-13}/(\text{bit} \times \text{d})$ 。本计算结果和地面加速器测试结果以及在轨探测结果两者一致。

4 数据应用

SEM可以提供空间环境信息,这些信息可以用于空间天气的预警和预报、载人航天飞行服务、航天器的抗辐射设计和空间科学研究等相关领域。

4.1 监测空间天气事件

当空间天气事件发生时,许多带电粒子会干扰空间辐射环境,这种现象在极区的低地球轨道上尤其明

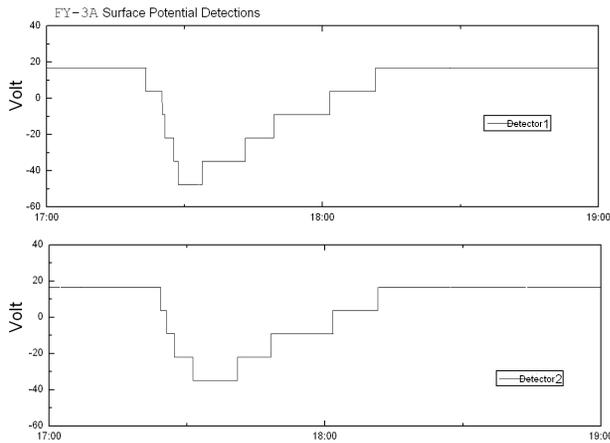


图7 2010年4月5日（世界时）地磁暴爆发之后 FY-3A SEM卫星表面电位探测结果

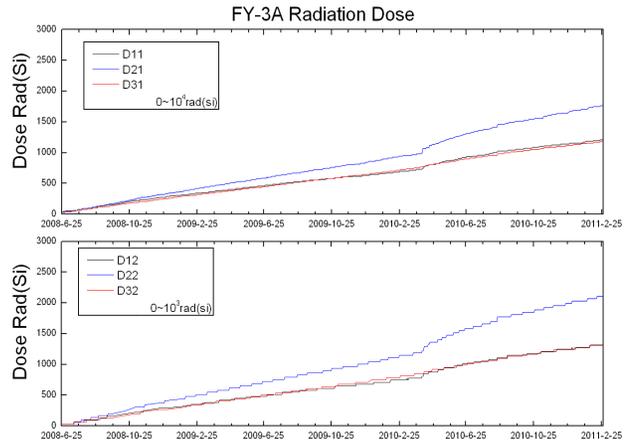


图8 2008年6月25日—2011年2月25日（世界时），FY-3A SEM辐射剂量探测结果

显。FY-3A/B卫星每天14次穿越极区，监测高能带电粒子的变化。在剧烈太阳耀斑和磁暴发生期间，沉降的带电粒子迅速增多，同时高能质子出现在高纬度地区（高能质子通常出现在南大西洋异常区，出现在高纬度地区的情况很少）。对于在低地球轨道上运行的航天器来说，这些质子是有害的，所以这些质子被称为“杀手粒子”。图9所示为太阳质子耀斑爆发后，SEM在极光区检测到的太阳质子事件（SPE）（质子能量超过10MeV）。剧烈的太阳耀斑活动或者日冕物质抛射（CME）都会导致SPE发生。SPE总是伴随着高能质子在高纬度地区出现。粒子能量超过10MeV的质子被称为“杀手粒子”。这些粒子可能会损害卫星，破坏卫星系统。图9b显示2012年1月15—31日（世界时）期间，在太阳耀斑同时伴有CME引起的太阳质子事件过程中，10~26MeV能量段的质子通量超过了5000。

对于单一卫星，如SEM，需要测量16d才能得到所有辐射带数据。如果遇到空间天气灾害，FY-3A/B的SEM可以采取加密观测，即结合两颗卫星的观测数

据，观测10d左右就可以得到所有辐射带数据，如图10所示。空间天气监测是整体观测系统。当观察到有强烈太阳耀斑或CME向地球袭来的时候，意味着来自太阳的粒子将很快到达近地空间环境并且沿磁场线进入极区（极光产生的原因）。当极区有超过10MeV能量的质子存在时，则定义此空间天气事件是空间天气灾害，并结合两颗卫星结果出图。

4.2 载人航天服务

载人航天轨道通常位于低地球卫星轨道（高度约300km）。轨道空间上的粒子辐射常常给进行太空行走的宇航员带来危害。利用SEM观测数据计算南大西洋异常区粒子分布（即利用830km高度上的粒子观测数据和地磁场模型，计算在300km高度上的全球粒子分布），可以给出宇航员走出轨道舱的安全时间窗口。在神舟七号载人航天飞行任务执行时，我们就成功地预测了宇航员太空行走的安全时间窗口（图11）。根据以下几个方面计算安全时间窗口：（1）SAA的探测结果；（2）地磁场模型（IGRF模型）；（3）航天

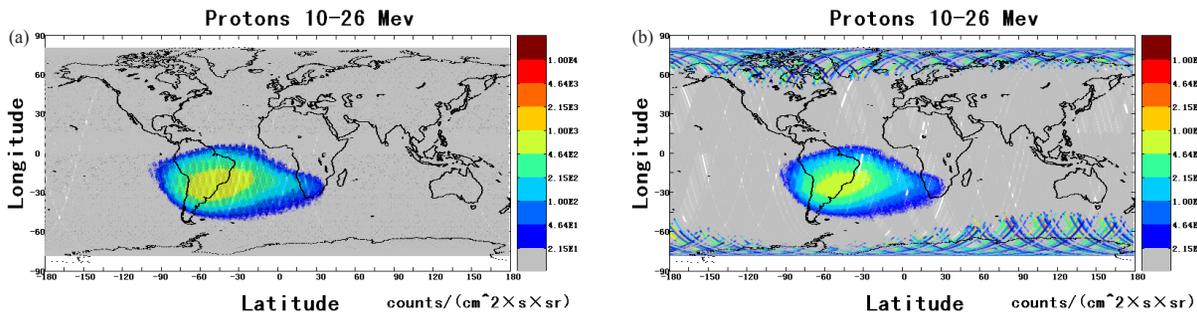


图9 FY-3A SEM质子探测器对极区太阳质子事件（SPE）探测结果
(a) 2011年8月29日—9月13日（世界时）空间天气平静期间SPE的探测结果；(b) 2012年1月15—31日（世界时）空间天气受到扰动期间SPE的探测结果

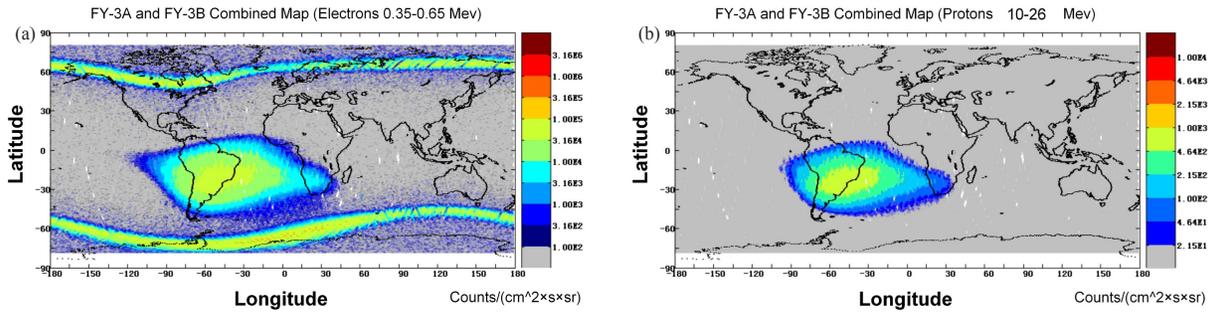


图10 2010年11月12—21日（世界时），FY-3A和FY-3B观测结果的全球辐射带分布
(a) 0.35~0.65MeV通道电子通量；(b) 10~26MeV通道质子通量

器轨道预测结果。首先，利用IGRF模型和空间环境监测器探测结果（SEM，830km高度）计算300km高空上南大西洋异常区的形状（由于带电粒子被地球磁场束缚，所以可以通过插值方法，利用IGRF模型来构建三维网格）。其次，根据300km的高度上南大西洋异常区的形状结果和航天器的轨道预测结果，可得航天器进入和驶出南大西洋异常区的时间，这一时间段对轨道舱外的宇航员是危险的。

4.3 跨学科研究

目前这方面的研究主要集中在沉降粒子对地球环境的影响。当这些粒子在地球大气层沉降时，会产生氮氧化物。这些氮氧化物被视为破坏臭氧的催化剂^[11]。科学家们发现，高能粒子沉降（EPP）事件与极区平流层上层臭氧显著减少相关^[12, 13]。EPP可以通过改变平流层臭氧含量，影响平流层辐射平衡，并可能与气候变化相关。一些研究结果指出极区约2K的气温变化是由EPP引起的^[14]。EPP对大气的影响程度甚至可能超过太阳紫外线通量变化对大气的影响。FY-3A/B上还载有臭氧总量探测仪（TOU）。TOU和SEM将有助于分析高能粒子沉降导致的臭氧损耗是否是全球气候变化的因素之一。

5 结论与讨论

本文介绍了SEM的仪器特点以及相关科研成果。FY-3A/B卫星上的星载空间环境监测器在发射前进行了校准并且符合发射要求。利用NOAA的极轨环境卫星（POES）MEPED探测数据对比验证了SEM的探测结果。结果表明，SEM的探测数据是有效的，并与空间科学原理一致。但是由于地磁活动导致粒子分布复杂，目前比对高纬度地区SEM与MEPED的电子通量探测数据仍然是困难的。空间环境信息可用于空间天气预报和预警，卫星安全设计，卫星的故障分析和科学研究。希望未来SEM的观测数据，可以更广泛地在空间科学领域中应用。

附录

A 如何选择观测点以及怎样比较

首先，根据MEPED数据的空间位置、观测时间和观测投掷角，找出SEM相匹配的数据。然后，得到两组被筛选出的数据。如果存在同一个点同时对应用于几个点，则计算这几个点的平均值，使两组数据一一对应。其次，按整数经纬度做空间网格（比如1°S，1°W；1°S，2°W；1°S，3°W等）。计算每一个网格点附近0.5°的范围内的通量平均，并把平均通量视为该网格点的通量（这样以避免计数涨落影响）。就得到了SEM和MEPED网格化的通量结果。以SEM数据为X，MEPED的数据为Y，计算两组数据的相关系数，拟合直线斜率和标准差。

B 不同能段电子的拟合算法

选择MEPED方向电子探测通道（在低纬度地区（MEPED-0）通道；0.03~1.10，0.1~1.1和0.3~1.1MeV）与SEM电子探测通道结果对比（0.15~0.35，0.35~0.65，0.65~1.20，1.2~2.0和2.0~5.7MeV）。定义MEPED-0通道0.03~1.1，0.1~1.1和0.3~1.1MeV分别对应 f_1 ， f_2 和 f_3 。能谱方程满足指数形式： $Y = aX^b$ ，其中，Y是微分通量，X是能

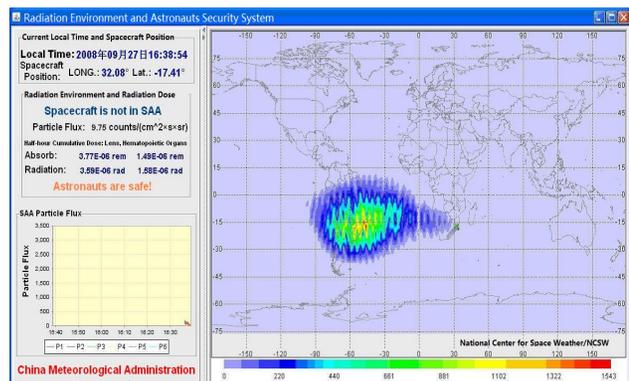


图11 FY-3A SEM的探测数据用于计算宇航员太空行走的安全时间窗口

量范围中位数（将方程两边作对数变换）。下面是两个方程：

$$y = \left[\frac{f_1 - f_2}{0.1 - 0.03}, \frac{f_2 - f_3}{0.3 - 0.1}, \frac{f_3}{1.1 - 0.3} \right]$$

$$x = \left[10^{\frac{\lg 0.03 + \lg 0.1}{2}}, 10^{\frac{\lg 0.1 + \lg 0.3}{2}}, 10^{\frac{\lg 0.3 + \lg 1.1}{2}} \right] \quad (1)$$

然后，将两个方程带入指数方程获得 a 和 b 的值。同时获得对应SEM的拟合能段通量（ f' ）：

$$f' = \left[\sum_{0.15}^{0.35} ax^b \Delta x, \sum_{0.35}^{0.65} ax^b \Delta x, \sum_{0.65}^{1.2} ax^b \Delta x, \sum_{1.2}^{2.0} ax^b \Delta x, \sum_{2.0}^{5.7} ax^b \Delta x \right] \quad (2)$$

由于1.2~2.0和2.0~5.7MeV能带超出了电子探测器（MEPED-0）的能量范围，拟合通量可能偏离真值，因此，在对比SEM过程中，只用了拟合通量的前三个能段（0.15~0.35，0.35~0.65和0.65~1.2MeV）。

C 不同能段质子的拟合算法

(1) 35~275MeV能段

MEPED全方向探测4个能带的质子，它们分别是：16~220，35~235，70~235和140~275MeV。由于16~220MeV通道受到了相邻仪器的影响，此能段的质子数探测结果不准确，因此，剔除了此通道数据。在此定义 P_1 ， P_2 和 P_3 分别对应于35~235，70~235和140~275MeV通道通量。35~275MeV（MEPED）通量是质子总量 P_{total} 。利用方程： $P_{total} = 0.849(P_1 - P_2) + 0.341(P_2 - P_3) + 0.341 \times P_3$ 。在自述文件中提到此公式<http://poes.ngdc.noaa.gov/data/>。然后，得出MEPED每个网格点质子数探测的 P_{total} 。

SEM有6个质子探测能段，它们分别是：3~5，5~10，10~26，26~40，40~100和100~300MeV。粒子具有的能量越高，表现出各向同性的特征就越强。因此选择最高能量的4个能带（10~26，26~40，40~100和100~300MeV）与MEPED全方向探测35~275MeV通道结果作比较。在此定义各个通道通量10~26，26~40，40~100和100~300MeV，分别对应 f_1 ， f_2 ， f_3 和 f_4 。SEM35~275MeV通道拟合通量为 f_{total} 。对于SEM每个网格检测结果，分别拟合能谱方程 f_1 ， f_2 ， f_3 和 f_4 值： $y = Ax^B$ （指数曲线）。该方法与电子拟合方法类似。然后，得出 A 与 B 的结果。对 $y = Ax^B$ 从35~275MeV积分得到 f_{total} ，并且比较 f_{total} 与 P_{total} 的结果。

(2) 3~5MeV能带

粒子能量越低，表现出的各向异性特点越强。因此，选择MEPED（MEPED-0，在低纬度地区）

方向探测结果（800~2500和2500~6900KeV，两个能段）与SEM3~5MeV的探测结果比对。方法与35~375MeV的相似。利用幂指数方程（ $y = Ax^B$ ）拟合800~2500和2500~6900KeV通道结果，得 A 和 B 值，并对此方程在每个网格上3~5MeV能量区间做积分得到该网格点的粒子通量。然后，比较MEPED-0与SEM在3~5MeV能段内每个网格点的通量。

D 关于电子探测通道内质子污染问题

关于在POES探测器文档（http://poes.ngdc.noaa.gov/docs/sem2_docs/2006/SEM2v2.0.pdf）中所提到的质子污染问题，已经在文章的2.1节第一段这样叙述过：“这些粒子落在传感器中，并产生电脉冲，通过这些电脉冲的幅度、符合和反符合电路筛选可以用来确定该粒子的类型。”传感器是可以根据粒子在仪器中的沉积能量阈值来识别粒子种类的，也就是说，这是一个仪器的电子学特性。根据仪器设计报告，在发射前的地面试验中做了相关模拟表明电子探测通道中质子的污染是可以忽略不计的。换句话说，避免质子在电子探测通道中的污染在传感器的设计之初就已经在硬件设计上考虑了。举个例子，如果2MeV能量的电子和10MeV能量的质子在传感器中沉积能量一样，首先传感器的设计会根据粒子的能量屏蔽10MeV能量的质子而只让2MeV能量的电子进入传感器，然后符合一反符合电路可以根据不同种粒子产生的不同电脉冲形态来识别粒子的种类。虽然这两种方法不能彻底的消除质子的污染问题，但是可以把污染的程度降低到一个可以接受的程度。

就像先前已经描述的那样，风三卫星的空间环境监测器的电子数据通过硬件设计避免了质子的污染问题。在交叉比对的工作中，定义美国的极轨环境卫星（POES）的公开数据为数据标准源（因为POES的数据经过交叉定标）。没有对POES的电子数据做任何的处理。选取的是空间天气平静期，这时内辐射带是很稳定的。质子的污染可能会给POES的MEPED数据和SEM数据之间带来一个比较稳定的系统差（非随机）。这个系统差可以在在轨期间的定标工作中通过拟合的方法修正过来。修正系数会加入SEM数据的处理系统。在这些处理之后加上严格的挑选规则，认为MEPED的数据和SEM的数据是可以放到一块进行比较的，关于电子通量的比较也是可信的。

致谢：感谢中国科学院空间科学与应用研究中心仪器研制组王世金等研究人员的帮助。感谢翁富忠博士和邹晓蕾教授在本文撰写过程中给予的帮助。

参考文献

- [1] 都亨, 叶宗海. 低轨道航天器空间环境手册. 北京: 国防工业出版社, 1996.
- [2] Codrescu M V, Fuller-Rowell T J, Roble R G, et al. Medium energy particle precipitation influences on the mesosphere and lower thermosphere. *J Geophys Res*, 1997, 102(A9): 19977-19987.
- [3] Sawyer D M, Vette J I. AP8 Trapped Proton Environment for Solar Maximum and Solar Minimum. NSSDC/WDC-A-R&S Report, Washington: NASA-GSFC, 1976.
- [4] Vette J I. The AE 28 Trapped Electron Model Environment. NSSDC/WDC-A-R&S Report. Washington: NASA-GSFC, 1991.
- [5] Heckman H H, Nakano G H. Low-altitude trapped protons during solar minimum period. *J Geophys Res*, 1969, 74(14): 3575-3590.
- [6] Hess W N. The Radiation Belt and the Magnetosphere. New York: Blaisdell, 1968.
- [7] McIlwain C E. Coordinates for mapping the distribution of magnetically trapped particles. *J Geophys Res*, 1961, 66(11): 3681-3691.
- [8] Northrop T G, Teller E. Stability of the adiabatic motion of charged particles in Earth's field. *Phys Rev*, 1960, 117(1): 215-225.
- [9] Li X L, Baker D N, Kanekal S G. Long term measurements of radiation belts by SAMPEX and their variation. *J Geophys Res Lett*, 2001, 28(20): 3827-3830.
- [10] Gubby R, Evans J. Space environment effects and satellite design. *J Atmos Solar-Terr Phys*, 2002, 64(14): 1723-1733.
- [11] Brasseur G, Solomon S. *Aeronomy of the middle atmosphere* (3rd). Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 2005.
- [12] Randall C E, Harvey V L, Manney G L, et al. Stratospheric effects of energetic particle precipitation in 2003-2004. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L05802-1-L05802-4, doi:10.1029/2004GL022003.
- [13] Seppälä A, Clilverd M A, Rodger C J. NO_x enhancements in the middle atmosphere during 2003-2004 polar winter: Relative significance of solar proton events and the aurora as a source. *J Geophys Res*, 2007, 112(D23): D23303-1-D23303-11, doi:10.1029/2006JD008326.
- [14] Rozanov E, Callis L, Schlesinger M, et al. Atmospheric response to NO_y source due to energetic electron precipitation. *Geophys Res Lett*, 2005, 32: L14811-1-L14811-4, doi:10.1029/2005GL023041.