0254-6124/2016/36(6)-888–09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

YAN Xingya, CHEN Hongfei, YU Xiangqian, ZOU Hong, SHI Weihong. The southward and northward difference of proton flux in South Atlantic anomaly (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2016, **36**(6): 888-896. DOI:10.11728/cjss2016.06.888

南大西洋异常区高能质子通量南北向差异*

闫兴亚　陈鸿飞　于向前　邹　鸿　施伟红

(北京大学地球与空间科学学院　100871　北京)

摘　要　利用 2012 年 8 月 NOAA N15, N16, N17, N18 卫星中能质子和电子探测器 (MEPED) > 6.9 MeV 质子能档的数据, 研究了 800 km 高度处南大西洋异常区 (SAA) 质子分布的南北方向差异. 数据显示, 质子计数率沿经线随纬度的变化近似满足高斯分布, 且向南运动的质子多于向北运动的质子. MEPED 具有 0° 和 90° 两个探测方向, 可对质子投掷角分布进行估算, 从而消除在探测南向和北向质子时探测器方向角偏差所造成的影响. 结果表明, 在经度 40°W、纬度 13°S 至 23°S 位置上, 仍然存在南向质子比北向质子多 20%∼30% 的现象. 其原因可能与地磁异常使南向质子镜像点更低, 更多质子散射进入大气层沉降有关. 分析还发现, 南大西洋异常区质子通量存在地方时变化. 日侧比夜侧强约 20%, 这可能是由于地磁场日变化引起的.

关键词　质子投掷角分布, 南大西洋异常区, 内辐射带

中图分类号　P353.4

The Southward and Northward Difference of Proton Flux in South Atlantic Anomaly

YAN Xingya　CHEN Hongfei　YU Xiangqian　ZOU Hong　SHI Weihong

(*School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract　This paper discusses the southward and northward proton distributions at 800 km height of the South Atlantic Anomaly (SAA) according to the data detected by the > 6.9 MeV channel of the Medium Energy Proton and Electron Detector (MEPED) of NOAA N15, N16, N17 and N18 satellites. The data show that the counting rate of protons satisfies approximately the Gauss distribution with latitudes along a longitude while the number of southward protons is larger than the northward protons. MEPED has two heads on 0° and 90° directions. It can be used to evaluate the pitch-angle distribution of protons, then to eliminate the direction errors of the detectors between detecting the southward and the northward protons. The result shows that the southward protons are 20%∼30% more than the northward protons in the latitudes of 13°S about 23°S along 40°W longitude. The phenomenon may be related to the lower mirror position in the southern hemisphere than in the northern hemisphere due to the geomagnetic anomaly. It causes more southward protons precipitating in SAA. Otherwise, the proton flux in SAA presents a local time dependency. The flux

* 国家自然科学基金项目 (41374181) 和国家重大科学仪器专项项目 (2012YQ03014207) 共同资助

2015-11-13 收到原稿, 2016-03-31 收到修定稿

E-mail: yanxia0522@163.com

in the dayside is about 20% more than that in the nightside. It may be caused by the daily variation of the geomagnetic filed.

Key words Distribution of proton's pitch angle, South Atlantic Anomaly, Inner radiation belt

0 引言

辐射带是地磁场捕获带电粒子的重要区域. 自 1958 年辐射带发现以来, 人们已意识到空间辐射环境对空间活动的重要性, 开始对辐射带持续关注并开展了大量研究工作 [1]. 在对空间环境的探测中, 研究致力于辐射带和内磁层物理过程, 例如辐射带的起源、粒子加速机制、粒子损失过程等 [2]. 早期研究大多是针对粒子辐射的全向通量, 有关带电粒子辐射强度随投掷角变化的研究相对较少. 投掷角分布是辐射带粒子的一个重要参数, 直接影响带电粒子在空间中动力学演化的物理方式和物理状态 [3−7]. 粒子的投掷角分布不仅为研究粒子的起源、加速、损失等过程提供了重要依据, 而且对于探测器设计具有重要指导意义 [8].

Selensnick 等 [9] 利用 Van Allen Probes 卫星的质子数据, 分析了内辐射带质子分布与 L 值、能量 E、投掷角 α 的关系, 并与模型模拟的数据进行对比. 卫星数据显示出在 L 值较低的地方, 质子通量随投掷角的分布呈现头肩形态, 即投掷角 90° 附近的通量明显突出. Zhao 等 [10−11] 利用 Van Allen Probes 卫星的电子数据, 发现了内辐射带和槽区相对论电子的分布异常: 90° 投掷角处的通量为极小值. 这种分布在内辐射带一直存在, 磁暴时在槽区出现. 可能的原因是 90° 投掷角附近的电子优先被合声波 (chorus) 加热.

由于地磁场非偶极场的影响, 内辐射带在大约南大西洋上空降到较低高度. LEO 卫星经过这一区域时会遭受到较强的辐射环境, 称为南大西洋异常区 (SAA). Campana 等 [12] 使用 BeppoSAX 卫星数据研究发现, SAA 区域的辐射通量和区域大小随高度发生明显变化, 从 600 km 降至 550 km, 卫星穿过 SAA 区时受到的辐射积分通量降低了一个量级, SAA 区域的大小也明显缩小. Heirtzler 等 [13] 利用过去 100 年 SAA 的磁场数据预测了未来 SAA 区域的形态, 结果显示 SAA 区域的磁场强度将会进一步降低, 航天器在此处受到的辐射损伤也随之增强.

本文利用 NOAA 的 POES 系列卫星 NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17 和 NOAA-18 的探测数据来研究南大西洋异常区的辐射区域形态. 由于 NOAA 卫星具有两个方向的探测器, 可以探讨投掷角分布, 从而对内辐射带质子投掷角分布特征进行研究.

1 数据和方法

NOAA 系列卫星是美国海洋和大气管理局发射的第三代极轨气象观测卫星, 运行于太阳同步轨道 [14]. 卫星轨道高度约 800 km, 轨道倾角约 98°, 轨道周期约 101 min, 不同卫星的轨道参数略有差异. 本文中使用的是 NOAA N15, N16, N17, N18 卫星在 2012 年 8 月的质子探测数据, 该期间为太阳活动平静时期. 使用的仪器是中能质子和电子探测器 (MEPED) > 6.9 MeV 质子能档. MEPED 包含两个组成部分: 0° 探测器和 90° 探测器, 探测器开角为 30°. 卫星坐标系的定义为: x 轴指向地心, y 轴与卫星速度方向相反, z 轴满足右手定则. 0° 探测器的方向 (探测器中轴线的方向) 在 xz 平面内, 从 $-x$ 向 $-z$ 旋转 9°; 90° 探测器的方向在 yz 平面内, 从 $+y$ 向 $-z$ 旋转 9°. 数据采样率为每 16 s 一个数据点.

MEPED 给出的数据是一定时间内质子的计数率, 计数率除以探测器几何因子即为质子通量. MEPED 探测器的几何因子为 0.01 $\mathrm{cm^2}$·sr. 由于这里关注的是质子投掷角分布的各向异性, 而对质子通量的具体数值并不关心, 因此直接使用探测器的质子计数率来研究质子投掷角分布的各向异性.

1.1 南大西洋异常区的边界变化

SAA 边界理想上认为是有辐射和无辐射的分界线. 由于探测器基本数据为计数率, 从有辐射 (计数率大于 0) 到无辐射 (计数率为 0) 的边界存在较大随机误差. 另外, 宇宙射线在大气层中的次级质子也会在非 SAA 区产生个别计数. 这里将 SAA 区域定义为探测器计数率 $\geqslant 10$ 的位置, 误差为 $1/\sqrt{10}$, 以减小辐射边界的不确定性. 若选择更大的计数率为边界则会造成更大误差. 将其换算为辐射, 这里定义的边

界即是辐射为 $1000\,\mathrm{cm^{-2}\cdot sr^{-1}\cdot s^{-1}}$ 的边界.

寻找边界的办法是将卫星数据按照时间序列排序, 从中找到所有计数率 $\geqslant 10$ 的点以及这些点在整个序列中的位置. 如果相邻两个计数率 $\geqslant 10$ 的点的位置相差少于 10 个数据点 (换算成卫星飞行时间为 160 s, 换算成位置纬度约相差 10°), 即认为这两个点以及中间数据点均为南大西洋区内点, 从而排除随机涨落带来的边界不确定性.

当卫星的星下点经过地面同一区域时, 卫星轨道存在两种可能情况, 即升轨道和降轨道. 卫星由南向北运行为升轨道, 反之由北向南为降轨道. 当卫星处于升轨道时, 飞行方向向北, 90° 探测器的方向指向南, 探测到的质子运动方向向北. 当卫星处于降轨道时, 飞行方向向南, 90° 探测器的方向指向北, 探测到的质子主要运动方向向南. 因此, 可将 90° 探测器数据分为升轨道和降轨道数据, 分别给出各自的 SAA 边界. 由两个边界的差异讨论 SAA 区域质子速度分布的南北向差异.

图 1 所示是由 NOAA N15 卫星 90° 探测器数据得到的 SAA 边界. 从图 1 中可以明显看出, 升轨道数据得到的 SAA 边界比降轨道得到的边界小. 图 2 和图 3 所示为探测数据的等值线, 从外向内等值线分别代表计数率为 10, 20, 30, 40, 50. 图 2 为降轨道数据, 图 3 为升轨道数据. 从图中还可以明显看出升轨道探测的数据比降轨道小.

1.2 同一条经线上探测数据差异

为进一步研究升降轨道探测数据的南北向差异, 选取西经 20°, 30°, 40° 和 50° 的观察探测数据分析其随纬度的变化, 如图 4 所示. 可以看出在不同经线上探测数据大小不同, 但是显现出的整体形态是相同的. 探测数据随纬度的变化基本符合高斯分布. 升轨道和降轨道探测数据存在很大差异, 降轨道数据约为升轨道数据的两倍.

2 分析与讨论

造成升降轨道探测数据差异的原因可能有很多, 在此进行简单讨论, 这里首先分析卫星速度可能对探测数据造成的影响. NOAA 系列卫星的轨道高度约为 800 km, 轨道周期约为 101 min, 卫星速度约为 $7.4\,\mathrm{km\cdot s^{-1}}$, 换算成质子能量约为 0.58 eV, 而本文使用的能档范围是 > 6.9 MeV, 因此卫星速度造成的影响可以忽略.

2.1 地方时影响

卫星处于升轨道或降轨道时, 星下点经过地面同一区域的地方时不同, 这可能是造成数据差异的原因之一. 可以选择其他地方时的 NOAA 卫星来探讨地方时差异, 例如 NOAA N15, N16, N17 和 N18 这四

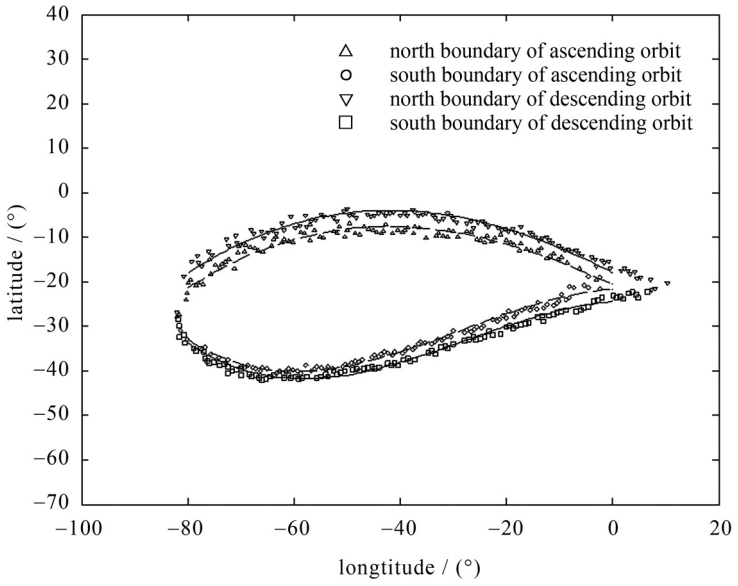


图 1 N15 卫星升降轨道 90° 探测器数据确定的 SAA 边界

Fig. 1 Boundary of SAA obtained by the 90° detector in the ascending and descending orbits of N15

颗卫星的升交点时间分别为 17:31 LT, 15:36 LT, 22:16 LT 和 13:40 LT. 图 5 所示是其探测数据在经度 40°W 上的辐射数据. 这四颗卫星轨道高度差异在 50 km 以内, 倾角差异在 0.4° 以内, 除地方时外其他轨道特征相近, 仪器相同. 从图 5 中可以看到四颗卫星数据均显示出同样的南北向差异, 即降轨道探测数据约为升轨道的两倍, 说明这种差异并不是由于地方时不同而造成的.

另外从图 5 中还可以看出四颗卫星探测数据的数值存在一定差异, 说明不同地方时南大西洋异常区的辐射是不相同的. 例如, N17 卫星的升交点地方时在夜侧接近午夜, N18 卫星的升交点地方时在日侧接

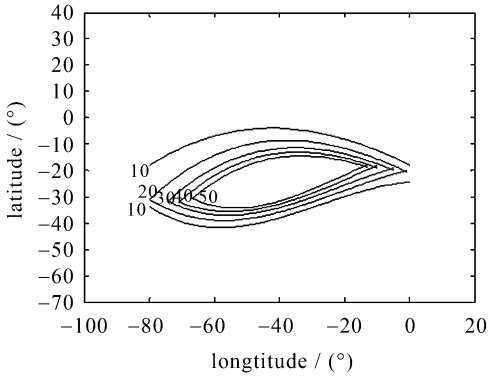


图 2 N15 卫星降轨道质子计数率等值线

Fig. 2 Contour of the N15 data in the descending orbits

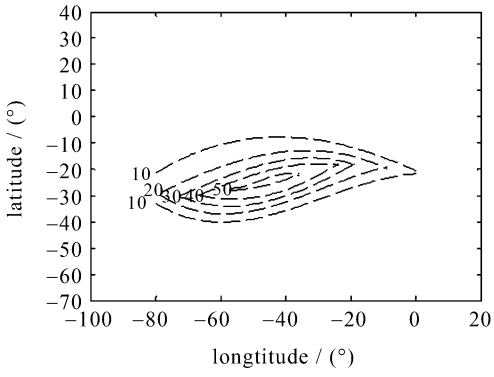


图 3 N15 卫星升轨道质子计数率等值线

Fig. 3 Contour of the N15 data in the ascending orbits

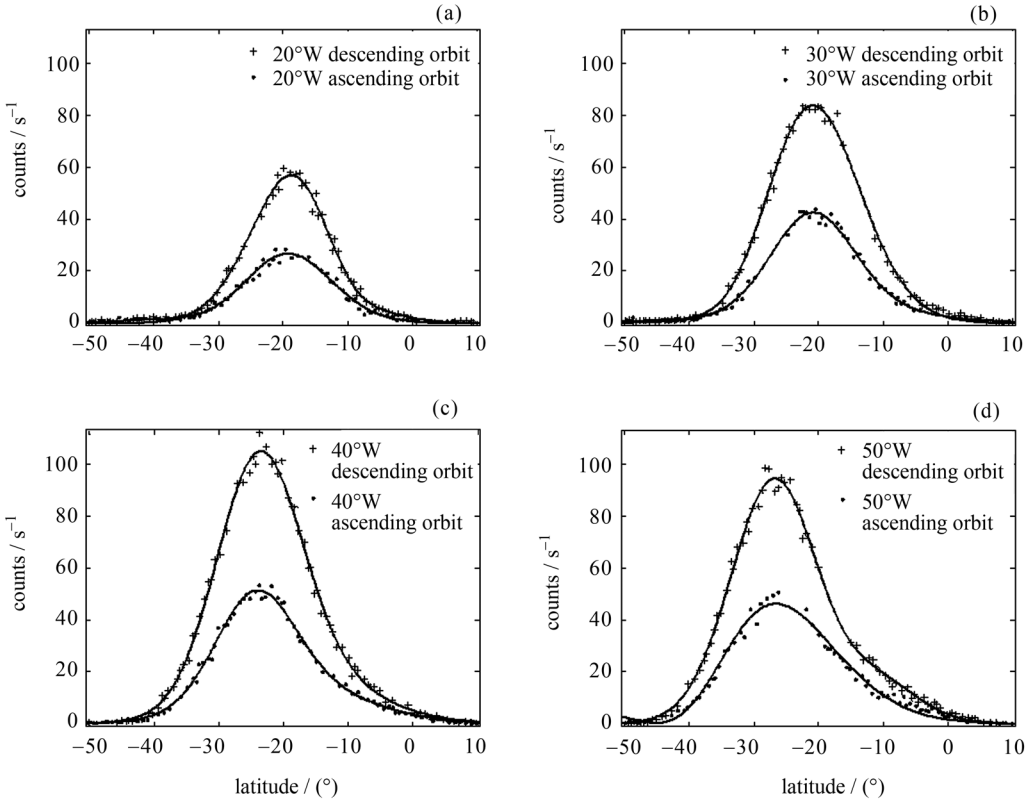


图 4 不同经度线 N15 卫星升降轨道 90° 探测器质子计数率随纬度的变化

Fig. 4 Latitude variations of proton counts in several longitudes by ascending and descending orbits of the 90° detector of N15

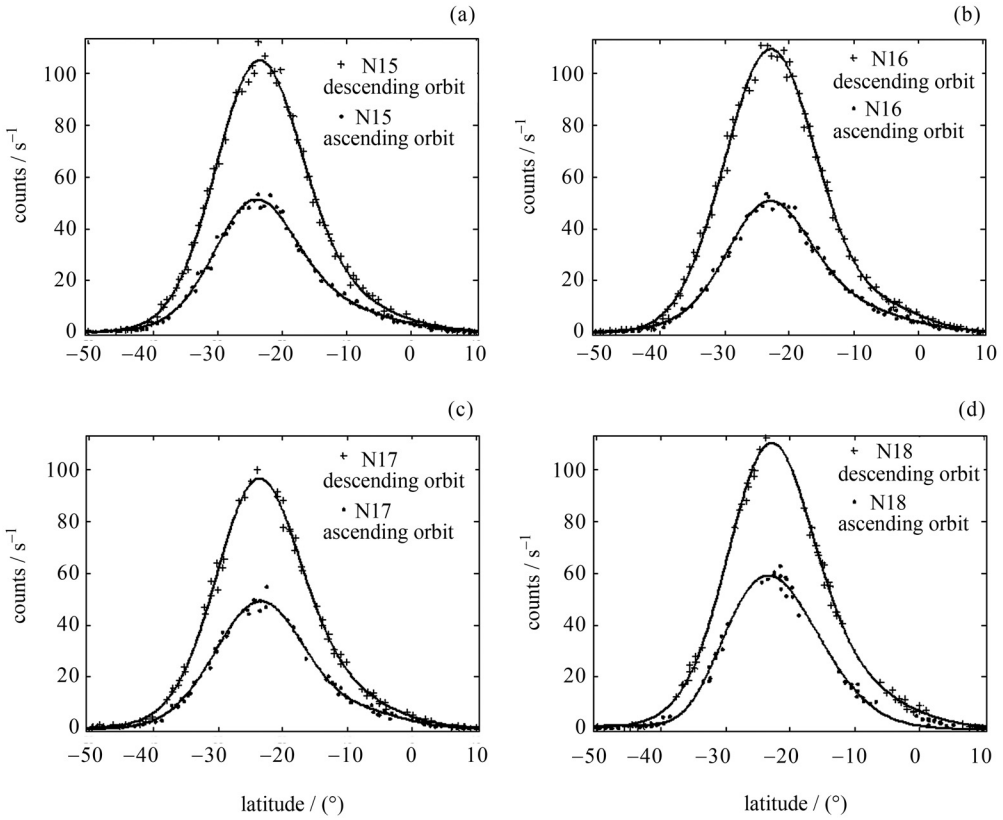


图 5 N15, N16, N17 和 N18 经过 40°W 时 90° 探测器的质子计数率

Fig. 5 Proton counts of the 90° detector of N15, N16, N17 and N18 on 40°W longitude

近正午. N18 的数据比 N17 大了约 20%, 说明南大西洋异常区质子辐射强度存在夜晚和白天的不对称性. 这种不对称性可能是由于地磁场日变化引起的, 也可能是日侧磁层压缩的结果.

2.2 SAA 质子投掷角分布的南北差异性

内辐射带质子的分布是各向异性的, 卫星探测器方向角 (探测器中轴线与磁力线夹角) 的差异可能是造成升降轨道探测数据差异的一个原因. 图 6 所示为 40°W 经线上升降轨道 90° 探测器方向角随纬度的变化. 图 6 中数据由 NOAA 卫星直接给出. 根据其说明文件, 探测器方向与磁力线的夹角是根据 IGRF 磁场模型推算得出的. 从图 6 中可以看出升降轨道探测器方向角的确存在一定差异.

为排除探测器方向角差异的影响, 需要根据质子分布函数将探测数据归算到同一方向下进行比较. 结合 0° 和 90° 探测器的数据, 可以消除探测器方向角差异造成的影响, 进而研究 SAA 质子投掷角分布的特征.

假设内辐射带质子分布符合

$$f = c\sin^n\theta, \tag{1}$$

其中, f 为单位投掷角内的通量, c 为常数, n 为各向异性系数, θ 为质子投掷角. 由于探测器的计数率与通量成正比, 有

$$F = C\sin^n\theta. \tag{2}$$

其中 F 为单位时间单位投掷角内的计数率. 由于探测器的开角为 30°, 探测器记录的计数率数据为开角内各个方向 F 的积分, 有

$$I = \iint_{\Omega} F\sin\alpha\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta. \tag{3}$$

其中: α 为质子方向与探测器中轴线的夹角, 范围为 0° ~ 15°; β 为积分方位角, 范围为 0° ~ 180°; Ω 为开角 30° 的立体角区域.

图 7 给出的是探测器中轴线方向、磁场方向以及质子运动方向的几何关系.

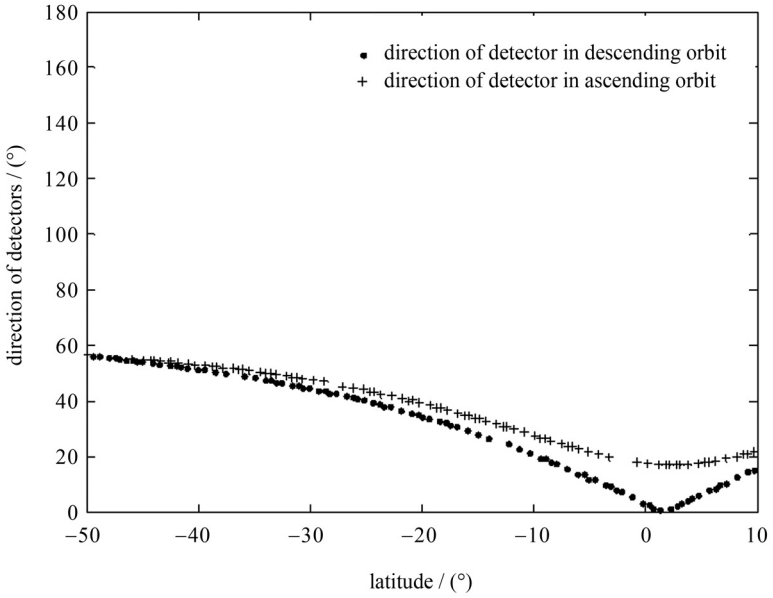


图 6　升降轨道 90° 探测器的方向与磁力线的夹角

Fig. 6　Angel between the 90° detector and the field line in the ascending and descending orbits

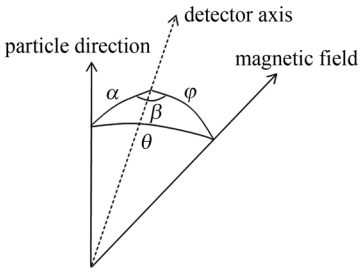


图 7　探测器方向、磁场和质子运动方向的几何关系. α 为质子方向与探测器中轴线的夹角, β 为积分方位角, φ 为探测器中轴线的方向角, θ 为质子的投掷角

Fig. 7　Geometric sketch of the detector direction, magnetic field and integral particle direction. α (range from 0° to 15°) is the angle between the integral position and the detector axis, β (range from 0° to 180°) is the azimuth angle for integral, φ is the angle between the detector axis and the field line, θ is the pitch angle of the integral particle

利用球面三角公式

$$\sin\theta = \sqrt{1-(\cos\alpha\cos\varphi+\sin\varphi\sin\beta)^2}, \tag{4}$$

得到

$$I = C\iint_{\Omega}\sin\alpha\big[1-(\cos\alpha\cos\varphi+\sin\varphi\sin\beta)^2\big]^{n/2}\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta. \tag{5}$$

假设同一位置南向质子和北向质子分布的各向异性指数 n 相同, 但常系数 C 不同, 则南向和北向质子的计数率分别为:

$$I_{\mathrm{south}} = C_{\mathrm{south}}\iint_{\Omega}\sin\alpha[1-(\cos\alpha\cos\varphi+\sin\varphi\sin\beta)^2\big]^{n/2}\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta, \tag{6}$$

$$I_{\mathrm{north}} = C_{\mathrm{north}}\iint_{\Omega}\sin\alpha\big[1-(\cos\alpha\cos\varphi+\sin\varphi\sin\beta)^2\big]^{n/2}\mathrm{d}\alpha\mathrm{d}\beta. \tag{7}$$

卫星处在降轨道时 0° 和 90° 探测器均朝北, 探测到的质子运动方向向南, 其探测数据分别用 I_{d0} 和 I_{d90} 表示. 使用 I_{d0} 和 I_{d90} 可以计算出各个位置的 n 值. 图 8 是 0° 和 90° 探测器方向角之差, 在 27°S 附近 0° 和 90° 探测器方向角之差趋近于 0, 计算出的 n 值不具有实际参考价值, 而在纬度较低的区域 ($-23°$ 至 $-5°$), 方向角差异较大 ($\geqslant 10°$), 计算出的 n 值比较精确. 图 9 所示为 40°W 经线上 n 随纬度的变化. 同样可以看出在纬度 $-23°$ 至 $-5°$ 误差较小.

当卫星处于升轨道时, 0° 探测朝北, 探测到的质子运动方向向南; 90° 探测器朝南, 探测到的质子运动方向向北. 探测的质子运动方向分别用 D_{a0} 和 D_{a90} 表示, 探测数据分别用 I_{a0} 和 I_{a90} 表示. 假定 n 值不因升降轨道不同而不同, 利用前面用降轨道数据获得

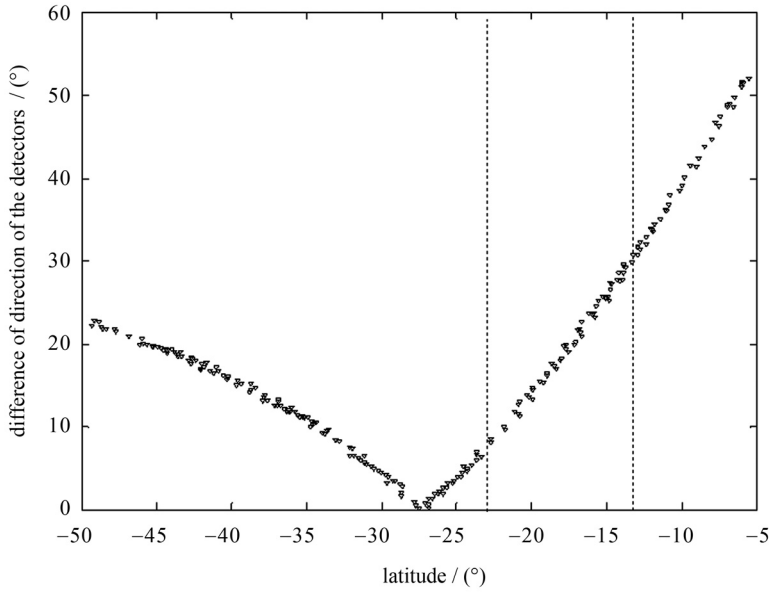


图 8 0° 和 90° 探测器的方向角之差

Fig. 8 Difference between the direction of 0° and 90° detectors to the field line

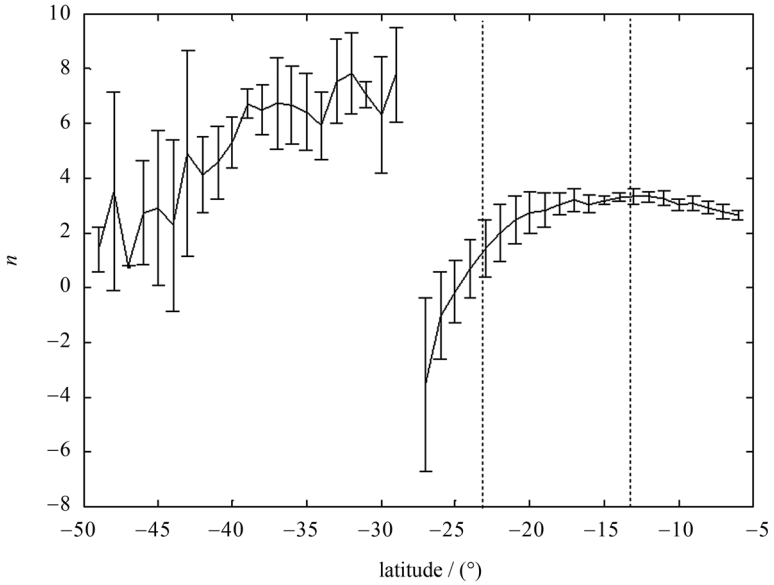


图 9 使用降轨道 0° 和 90° 探测器数据计算的模型参数 n

Fig. 9 Model value n obtained by the data of 0° and 90° detectors in the descending orbits

的参数 n 值, 根据式 (6) 可以把 I_{a0} 数据换算成与 I_{a90} 数据对应方向角 180° 互补方向 (D'_{a90}) 上的通量, 用 I'_{a90} 表示, 即 D_{a90} 与磁场 $+B$ 方向的夹角和 D'_{a90} 与磁场 $-B$ 方向的夹角相同. 前者顺磁力线指向北, 后者反磁力线方向指向南, 如图 10 所示. I_{a90} 和 I'_{a90} 的差异即可反映质子投掷角分布南北方向的差异, 如图 11 所示.

在计算 I'_{a90} 时, 选择按纬度平均的 n 值计算, 结果如图 11 所示, 分为四个区间. 在纬度 $-5°$ 至 $-13°$ 区间质子通量较低, 没有明显的南北向差异. 在纬度 $-13°$ 至 $-23°$ 区间, 南向质子通量比北向质子通量高约 20% 至 30%. 在 $-23°$ 至 $-30°$ 区间, 由图 8 和图 9 可以看出, 在 $-27°$ 附近两个探测器的方向角很接近, n 值计算接近奇点, 因此这一区间误差较大.

在纬度 −30° 至 −50° 区间, 从图 11 中可以看到南北向质子数差异不大. 原因可能是此处纬度较高, 质子运动接近反射足点, 南北向 (沿磁力线) 运动速度不高, 差异不明显.

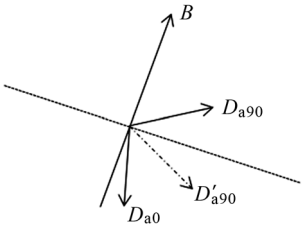


图 10 探测方向的几何关系. D_{a0} 为 0° 探测器中轴线方向, 对应数据是 I_{a0}; D_{a90} 为 90° 探测器中轴线方向, 对应数据是 I_{a90}; D'_{a90} 为与 D_{a90} 方向角 180° 互补的方向, 对应数据是 I'_{a90}

Fig. 10 Geometry of the detecting directions. D_{a0} is direction of 0° detector, paired with I_{a0}. D_{a90} is direction of 90° detector, paired with I_{a90}. D'_{a90} is the complementary direction of D_{a90}, paired with I'_{a90}

3 结语

利用 NOAA 系列卫星在 2012 年 8 月的中能质子和电子探测器 (MEPED)> 6.9 MeV 质子能档数据对 SAA 区域质子投掷角分布进行了研究. 探测数据显示, 南向质子与北向质子计数率存在很大差异. 在同一条经线上, 南北向质子的计数率随纬度都近似满足高斯分布, 并且南向质子计数率约为北向质子的两倍.

分析差异原因, 首先排除卫星速度的影响. 通过四颗不同升交点地方时的卫星数据进行分析发现, 不同地方时存在同样比例的南北向质子辐射差异. 并且发现南大西洋异常区质子辐射强度存在日侧和夜侧的不对称性, 差异约为 20%. 这种不对称性可能是由于地磁场的日变化而产生的, 也可能与日侧磁层压缩有关.

由于内辐射带质子分布是各向异性的, 探测器方向角的差异对探测数据具有一定影响. 假定内辐射带质子按照投掷角正弦幂次方分布. 通过降轨道的

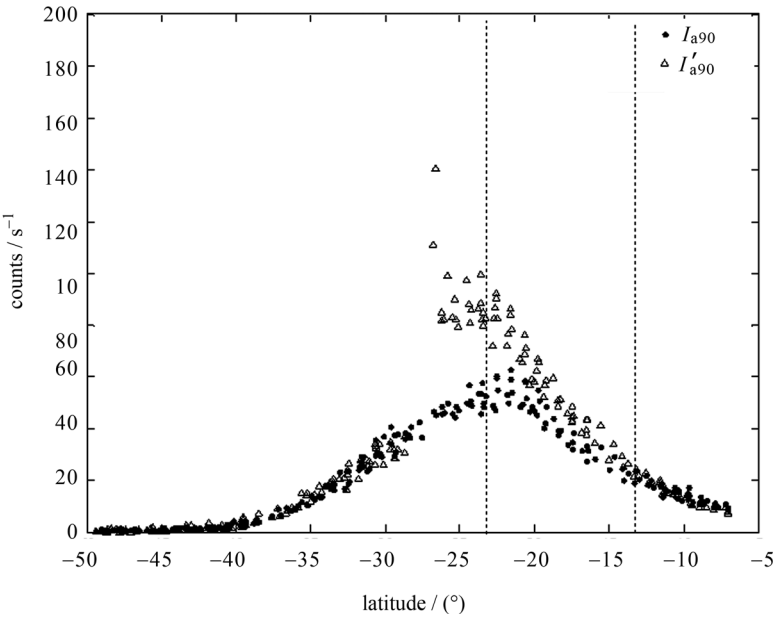


图 11 质子计数率南北向分布的比较. I_{a90} 为升轨道 90° 探测器的南向质子计数率; I'_{90} 为把 0° 探测器归算到与 90° 探测器方向角 180° 互补的北向质子计数率

Fig. 11 Comparison of the north and south distribution of the protons. I_{a90} are the data of 90° detector in the ascending orbit. It counts the southward protons. I'_{90} are the data after converting the data of 0° detector to the 180° complementary direction of 90° detector but anti-paralleled to the field line. I'_{a90} counts the northward protons

数据计算正弦幂次方 n 值. 升轨道 90° 探测器方向角向北, 其数据为南向质子计数率 (记为 I_{a90}), 而升轨道 0° 探测器向南, 其数据为北向质子计数率 (记为 I_{a0}). 可以用分布函数推算将 I_{a0} 归算到与 90° 探测器 180° 互补的方向上, 即与磁力线夹角和 90° 探测器相同但方向向南的方向上, 记为 I'_{a90}. 比较 I_{a90} 和 I'_{a90} 发现, 在纬度 −23° 至 −13° 区域仍然是南向质子比北向质子多 20%∼30%. 即部分南向质子发生投掷角散射沉降至大气层中, 致使返回的北向 (捕获) 质子变少了.

致谢 NOAA POES 卫星数据由 NOAA 空间天气预报中心 (NOAA Space Weather Prediction Center) 提供. (http://www.ngdc.noaa.gov/stp/satellite/poes/data-access.html)

参考文献

[1] CHEN Guozhen, LIN Guocheng. The influence of charged particle radiation environment on the spacecraft at LEO [J]. *Chin. Space Sci. Tech.*, 1994(6): 43-48 (陈国珍, 林国成. 低地球轨道带电粒子辐射环境对航天器的影响 [J]. 中国空间科学技术, 1994(6): 43-48)

[2] TVERSKAYA L. Dynamics of the Earth's radiation belt [J]. *Moscow Univ. Phys. Bull.*, 2010, **65**(4): 246-251

[3] BADHWAR G D, KONRADI A. Conversion of omnidirectional proton fluxes into a pitch angel distribution [J]. *J. Spacecraft Rockets*, 1990, **27**(3): 350-352

[4] EVANS H, DALY E. Anisotropies in the low altitude radiation environment [J]. *J. Br. Interplanet. Soc.*, 1995, **48**: 149-151

[5] GLAUERT S A, RICHARD B H. Calculation of pitch angle and energy diffusion coefficients with the PADIE code [J]. *J. Geophys. Res*: *Space Phys.*, 2005, **110**(A4). DOI: 10.1029/2004JA010851

[6] KUZNETSOV N V, NIKOLAYEVA N I. Empirical model of pitch angel distributions of trapped protons on the inner boundary of the earth radiation belt [J]. *Cosmic Res.*, 2012, **50**(1): 13-20

[7] QIN M R, ZHANG X G, NI B B, *et al.* Solar cycle variations of trapped proton flux in the inner radiation belt [J]. *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 2014, **119**(12): 9 658-9 669

[8] YANG X C, WANG S J, LIANG J B, *et al.* Multidirectional design research of the sun-synchronous orbit electron detectors [J]. *J. Astron.*, 2013, **33**(2): 281-284 (杨晓超, 王世金, 梁金宝, 等. 太阳同步轨道电子探测器的多方向设计研究 [J]. 宇航学报, 2013, **33**(2): 281-284)

[9] SLESNICK R S, BAKER D N, JAYNES A N, *et al.* Observations of inner radiation belt: CRAND and trapped solar protons [J]. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, 2014, 119(8): 6 541-6 552

[10] ZHAO H, LI X, BLAKE J B, *et al.* Characteristic of pitch angel distribution of hundreds of keV eletrons in the slot region and inner radiation belt [J]. *J. Geophys. Res.*: *Space Phys.*, 2014, 119(12): 9 543-9 557

[11] ZHAO H, LI X, BLAKE J B, *et al.* Peculiar pitch angel distribution of relativistic eletrons in inner radiation belt and slot region [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2014, **41**(41): 2 250-2 257

[12] CAMPANA R, ORLANDINI M, MONTE E D, *et al.* The radiation environment in a low earth orbit: the case of *BeppoSAX* [J]. *Exp. Astron.*, 2014, **37**: 599-613

[13] HEIRTZLER J R. The future of the South Atlantic anomaly and implications for radiation damage in space [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2002, **64**: 1 701-1 708

[14] EVANS D S, GREER M S. Polar orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor - 2: Instrument Descriptions and Archive Data Documentation: NOAA Technical Memorandum OAR SEC-93 [R]. Boulder, Colorado: NOAA, 2000