0254-6124/2019/39(1)-069–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

MA Jie, XUE Bingsen, FANG Hanxian, WENG Libin, ZHOU Yaqin, XIA Jilu. Formation mechanism of sub South Atlantic Anomaly region observed by FY-3A (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 69-75. DOI:10.11728/cjss2019.01.069

FY-3A 观测的次南大西洋异常区形成机理 *

马 杰[1] 薛炳森[2] 方涵先[3] 翁利斌[3]
周雅琴[4] 夏际炉[5] 卢晓姗[1] 孙志强[3]

1(61741 部队 北京 100094)

2(中国气象局国家卫星气象中心 北京 100081)

3(国防科技大学气象海洋学院 南京 211101)

4(96631 部队 北京 100081)

5(95903 部队 孝感 432000)

摘 要 研究 FY-3A 卫星观测到的内辐射带质子通量分布, 发现 3~5 MeV 能道出现除南大西洋异常区以外的第二个异常区. 该异常区是一个质子通量的次极值区, 由于该质子通量极值区比主南大西洋异常区强度弱、面积小, 因此称之为次南大西洋异常区. 通过在主南大西洋异常区和次南大西洋异常区分别选取有代表性的样本点进行研究, 发现内辐射带质子通量随投掷角近似呈正态分布, 当投掷角在 90° 附近时, 质子通量出现极大值; 当投掷角大于 120° 或者小于 60° 时, 质子通量几乎为零. 此外, 主南大西洋异常区质子通量在各个能道均为完全各向异性, 次南大西洋异常区质子通量随着能道增高逐渐趋于各向同性. 通过 NOAA 观测数据对此规律进行了验证, 并由此解释了次南大西洋异常区的形成机理.

关键词 风云 3A, 次南大西洋异常区, 投掷角分布

中图分类号 P 353

Formation Mechanism of Sub South Atlantic Anomaly Region Observed by FY-3A

MA Jie[1] XUE Bingsen[2] FANG Hanxian[3] WENG Libin[3]

ZHOU Yaqin[4] XIA Jilu[5] LU Xiaoshan[1] SUN Zhiqiang[3]

1(*PLA 61741, Beijing* 100094)

2(*National Satellite Meteorological Center, China Meteorological Administration, Beijing* 100081)

3(*Institute of Meteorology and Oceanography, National University of Defense Technology, Nanjing* 211101)

4(*PLA 96631, Beijing* 100081)

5(*PLA 95903, Xiaogan* 432000)

* 国家自然科学基金项目资助 (40505005)

2017-09-18 收到原稿, 2018-04-26 收到修定稿

E-mail: fanghx@qq.com

Abstract Based on the proton flux distribution in the inner radiation belt obtained by FY-3A, it is found that the 3∼5 MeV energy channel shows a second anomalous region besides the South Atlantic Anomaly region. The anomaly zone is a sub-extreme area of proton flux, compared with the main South Atlantic Anomaly region, the new proton flux extremum is weaker and smaller, so it is called the sub South Atlantic Anomaly region. By selecting representative sample points in the main South Atlantic anomaly and sub South Atlantic anomaly areas, the formation mechanism of the sub South Atlantic Anomaly region is studied. The results show that the inner radiation belt proton flux approximately normally distributes with pitch angle, proton fluxes appear at a maximum near the 90° pitch angle; when the pitch angle is greater than 120° or less than 60°, the proton flux is almost zero. In addition, the proton flux in the main South Atlantic Anomaly region is completely anisotropic in each energy channel, and the proton flux in the sub South Atlantic Anomaly region tends to be isotropic as the energy channel increases. And this phenomenon is further verified by the NOAA observation data. Moreover, it is used to explain the formation mechanism of the sub South Atlantic Anomaly region.

Key words FY-3A, Sub South Atlantic Anomaly region, Pitch angle distribution

0 引言

内辐射带 [1] 是地球辐射带的一部分, 主要以高能质子为主, 会对低轨道极轨卫星造成危害. 内辐射带存在一个分布在巴西上空的通量异常区, 称为南大西洋异常 (South Atlantic Anomaly, SAA) 区, 该异常区的通量特别高, 会对卫星造成严重损害 [2−4], 因此也被称为太空的百慕大三角.

辐射带是需要重点监测的区域, 很多卫星都搭载了探测辐射带高能粒子的载荷, 如 NOAA/TIROS 卫星、SAMPEX 卫星、Polar 卫星及中国的风云系列卫星 [5−9] 等. 在研究 FY-3A 观测到的内辐射带质子通量分布过程中, 发现 3∼5 MeV 能道出现了除南大西洋异常区以外的第二个异常区, 而在国际上其他卫星的观测结果中并未发现这一现象. 该新异常区比主南大西洋异常区强度弱、面积小, 这里称之为次南大西洋异常区, 简称次异常区. 虽然次异常区比主异常区强度弱, 但仍然高出背景值 1∼2 个数量级, 也会对卫星造成严重影响. 因此, 探索次南大西洋异常区的形成机理具有重要应用价值.

FY-3A 和 NOAA 卫星都载有高能粒子探测器, 二者探测器朝向不同 [10], 因此探测到的粒子投掷角不同, 这可能是次南大西洋异常区出现的根本原因. 已有一些关于辐射带粒子投掷角分布规律的研究. Wang 等 [11] 在 2003 年第十届全国日地空间物理学术讨论会上进行了成果汇报. 由于缺乏多方向观测数据, 统计结果不可靠. Yang 等 [12] 在 2012 年进行了粒子探测器的多方向设计研究. 基于辐射带 AP9 模式, 这里对主异常区和次异常区的质子投掷角分布规律进行研究, 并利用 NOAA 观测数据对研究结果进行验证, 最后对次南大西洋异常区的形成机理进行解释.

1 FY-3A 数据中的次南大西洋异常区

图 1 给出了 2010 年 1 月 FY-3A 得到的 p1∼p6 能道的方向质子通量分布. 由图 1 可以看出, 前两个通道 (3∼5 MeV, 5∼10 MeV) 的分布在南大西洋异常区右下角有一块突出的次异常区, 这里称其为次南大西洋异常区. 利用文献 [10−11] 的研究结果可以推断, 质子通量随投掷角各向异性分布可能是次南大西洋异常区出现的根本原因.

2 AP9 模式中质子通量随投掷角的分布规律

2.1 方向质子通量随投掷角的分布

图 2(a) 给出了 FY-3A 卫星 p1 通道 (3∼5 MeV) 方向质子通量分布, 可以看出, 该通道的次南大西洋

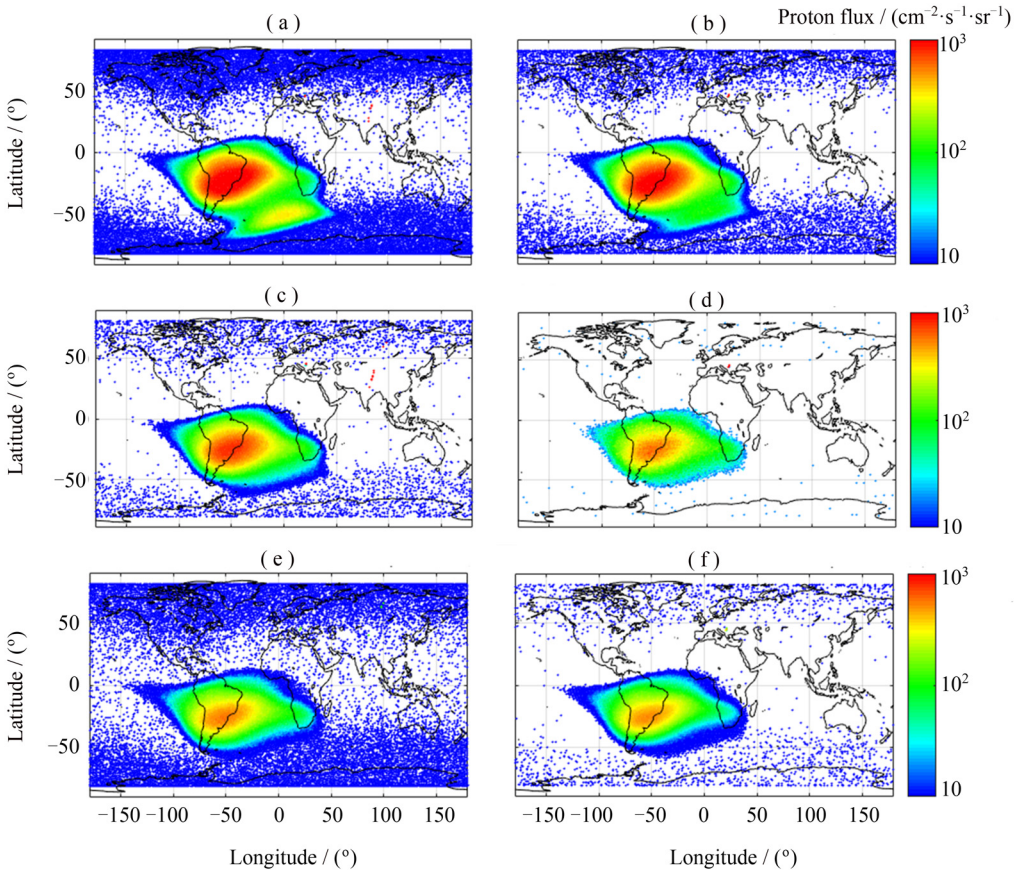

图 1　FY-3A 得到的 p1~p6 能道的方向质子通量分布

Fig. 1　Directional proton flux distribution of the six energy channels measured by FY-3A

异常区最明显. 为了分析方向质子通量随投掷角的变化, 在主南大西洋异常区和次南大西洋异常区分别选取一些样本点. 通过 AP9 模式 [12] 分别计算 2010 年 1 月 31 天里这些样本点处 0~180° 投掷角对应的 p1 通道 (3~5 MeV) 质子通量, 得到主异常区样本点的通量随投掷角分布曲线 (见图 2b) 及次异常区样本点的通量随投掷角分布曲线 (见图 2c). 由图 2(b)(c) 可以看到, 除去一些极大和极小值的样本点分布曲线, 质子通量随投掷角近似呈正态分布, 投掷角关于 90° 附近对称, 在小于 60° 和大于 120° 的投掷角处通量几乎为零.

2.2　各向异性指数随能级的变化

前面得到 FY-3A 卫星 p1 (3~5 MeV) 能道方向质子通量随投掷角近似呈正态分布, 这里将其定义为

$$\phi = A\mathrm{e}^{-\frac{(x-90)^2}{\sigma(\alpha)}}. \tag{1}$$

式中: A 为 90° 投掷角对应的通量; x 为投掷角; α 为各向异性因子, 取值范围为 $[0,1]$, 其中 $\alpha=0$ 代表各向同性, $\alpha=1$ 代表完全各向异性; $\sigma(\alpha)$ 表达式为

$$\sigma(\alpha) = 2\times\left[\frac{A}{3\times\tan\left(\alpha\frac{\pi}{2}\right)}\right]^2. \tag{2}$$

FY-3A 可探测 6 个能级的高能质子, 能量范围为 3~300 MeV[13]. 继续分析其他能道方向质子通量随投掷角的分布规律, 这里仍然选择之前的样本点, 通过 AP9 模式分别计算这些样本点处 60°~120° 投掷角下 2010 年 1 月 31 天对应的各能级质子通量.

这里将主异常区和次异常区各自样本点同一能道 31 天的数据取平均, 得到图 3. 由图 3 可以看到, 主异常区 6 个能道基本为完全各向异性, 次异常区随着能级增高逐渐趋向于各向同性.

3　通量随投掷角分布规律的验证

分别利用观测数据和模式数据拟合不同能道的

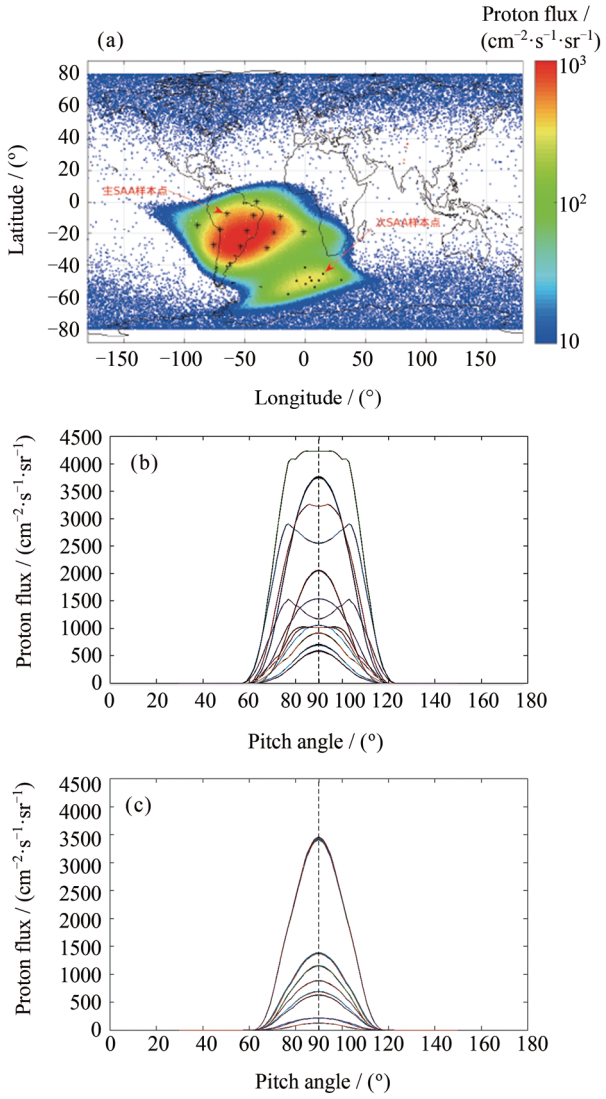

图 2 (a) FY-3A 卫星 p1 通道 (3~5 MeV) 方向质子通量分布, (b) 主异常区样本点的通量随投掷角分布曲线, (c) 次异常区样本点的通量随投掷角分布曲线

Fig. 2 (a) Directional proton flux distribution of the p1 energy channel obtained by FY-3A, (b) distribution curves of flux with pitch angle at sample points in the main SAA, (c) distribution curves of flux with pitch angle at sample points in the sub SAA

各向异性因子, 然后对二者进行对比, 如果二者在同一能道下的拟合结果基本相同, 则说明之前的分布规律合理.

3.1 利用观测数据拟合各向异性因子

这里的观测数据为 NOAA 卫星 mep0 和 mep90 探测器数据 [14]. 但只采用 mep0 和 mep90 数据样本点太少. 因此, 引入 90° 投掷角下的 AP9 数据.

利用 AP9 模式可以计算的最小质子能量为 0.10 MeV[15]. 这里选择 mep0/90 探测器的 p3 (0.24~0.80 MeV), p4 (0.80~2.50 MeV), p5 (2.50~ 6.90 MeV) 通道进行计算, 时间段选择 2010 年 1 月, 计算 AP9 与 mep0/90 探测器之间的比例因子, 结果列于表 1.

表 1 AP9 与 mep0/90 探测器之间的比例因子

Table 1 Scale factor between AP9 and mep0/90 detector

	p3 能道	p4 能道	p5 能道
主异常区	0.216	0.862	3.868
次异常区	16.876	1.060	0.400

由 AP9 与 mep0/90 探测器之间的比例因子, 可以将 90° 投掷角下 AP9 模式的计算值归一化到 mep0/90 探测器的观测值, 这相当于有了 3 个投掷角方向的观测数据, 从而可对各向异性因子进行拟合, 拟合结果如图 4(a) (b) 所示. 由图 4 可以看出, 除去一些异常值, 样本点基本落在了拟合曲线上.

3.2 利用模式数据拟合各向异性因子

利用模式数据重新拟合各向异性因子, 并结合观测数据拟合结果, 对分布规律的可靠性进行验证. 主次 SAA 的样本点固定不变, 时间段仍为 2010 年 1 月, 对主次 SAA 样本点和时间做平均, 拟合 p3 (0.24~0.80 MeV), p4 (0.80~2.50 MeV) 及 p5 (2.50~6.90 MeV) 通道的各向异性因子. 定量拟合结果列于表 2. 由表 2 可以看到, 利用观测数据拟合的各向异性因子与利用模式拟合的结果基本相同, 变换趋势也吻合, 从而验证了粒子通量随投掷角近似正态分布的可靠性.

4 次南大西洋异常区的形成机理

图 5 给出了 FY-3A 卫星 p1 能道的方向质子通量和投掷角分布, 三角形区域为次南大西洋异常区的样本区域. 为了清晰看到次南大西洋异常区粒子的投掷角分布, 将三角形区域的投掷角单独提取出来, 如图 6 所示. 由图 6 可以看到, 次南大西洋异常区存在 60° 到 120° 的投掷角, 根据这里提出的正态分布规律, 即会出现次南大西洋异常区这一新的质子通量峰值区.

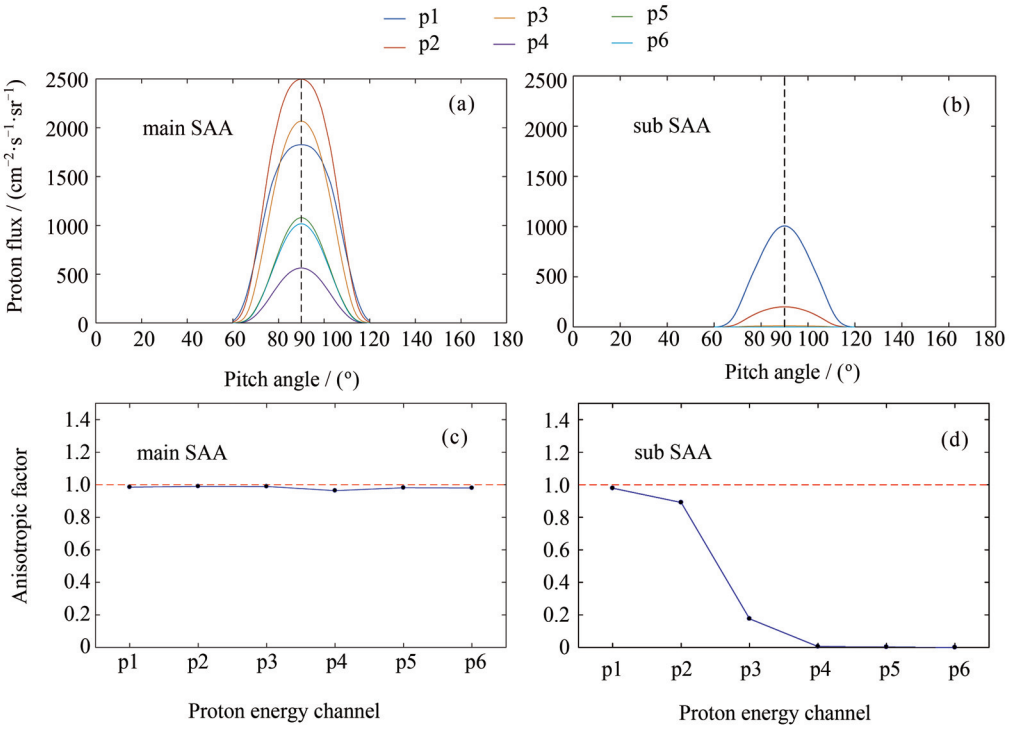

图 3　FY-3A 卫星 p1～p6 能道各向异性因子分布

Fig. 3　Distributions curves of the anisotropic factor of the p1～p6 energy channels measured by FY-3A

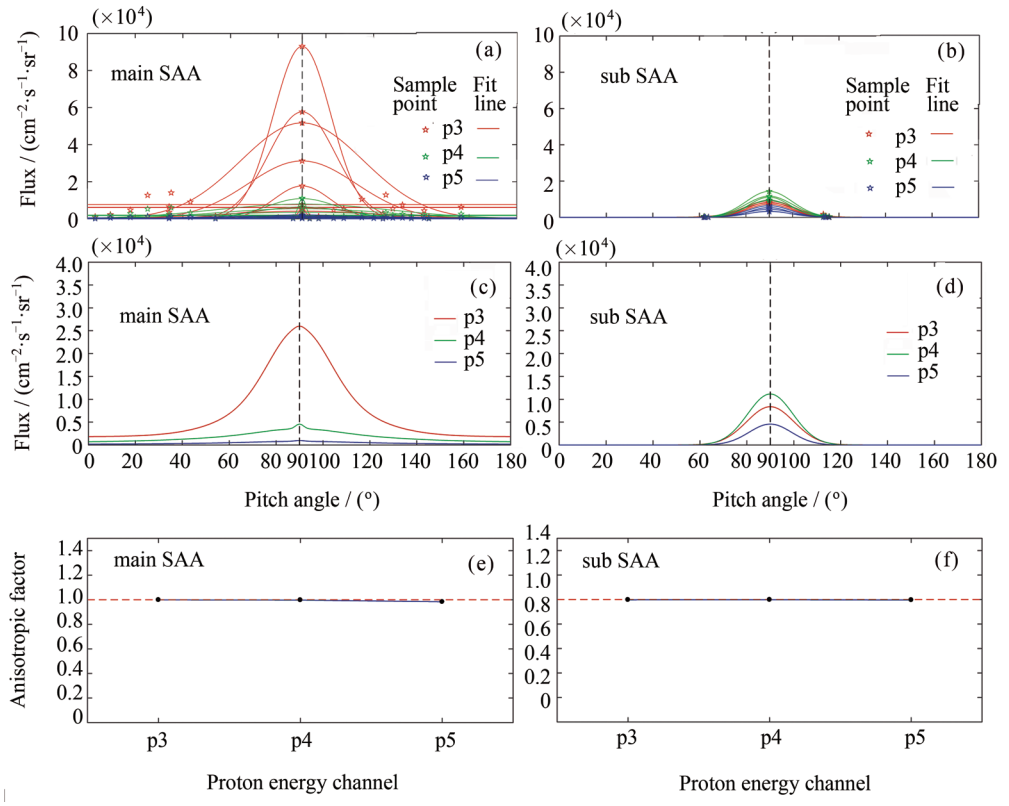

图 4　NOAA 卫星 p3～p5 能道的各向异性因子拟合分布

Fig. 4　Distributions fitting curves of the anisotropic factor of the p3～p5 energy channels obtained by NOAA satellite

表 2 观测数据和模式数据拟合的各向异性因子

Table 2 Anisotropy factor fitted by the observation data and model data

能道	主异常区各向异性因子		次异常区各向异性因子	
	观测拟合值	模式拟合值	观测拟合值	模式拟合值
p3	0.999	0.999	0.998	0.997
p4	0.998	0.993	0.998	0.998
p5	0.984	0.972	0.996	0.995

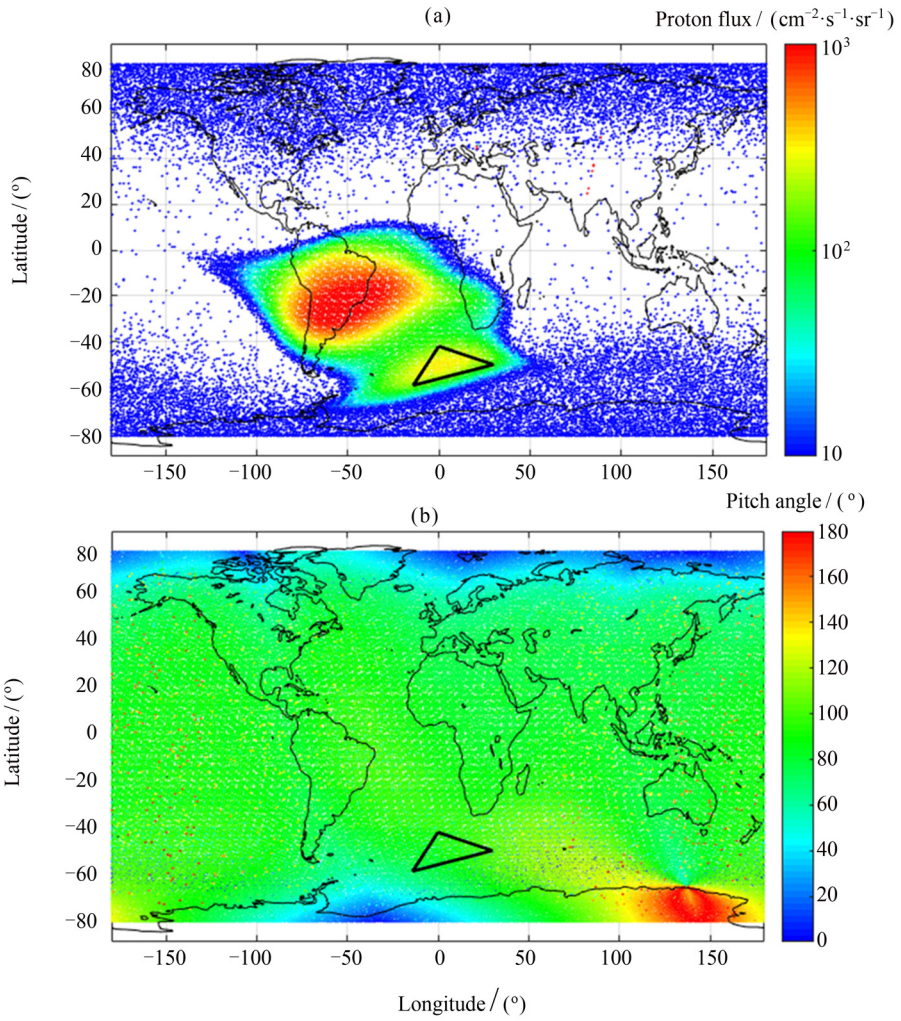

图 5 FY-3A 卫星 p1 能道的方向质子通量分布和投掷角分布

Fig. 5 Directional proton flux distribution of the p1 energy channel of FY-3A and pitch angle distribution

5 结论和讨论

通过研究发现辐射带质子通量随投掷角近似呈正态分布, 利用观测数据和模式数据对这一规律的可靠性进行了验证, 并据此解释了 FY-3A 观测到的次南大西洋异常区的形成机理. 具体结论如下.

(1) 南大西洋异常区质子通量随投掷角近似呈正态分布, 关于 90° 附近投掷角对称, 小于 60° 和大于 120° 投掷角处的通量几乎为零.

(2) 主南大西洋异常区质子通量在各个能道基本

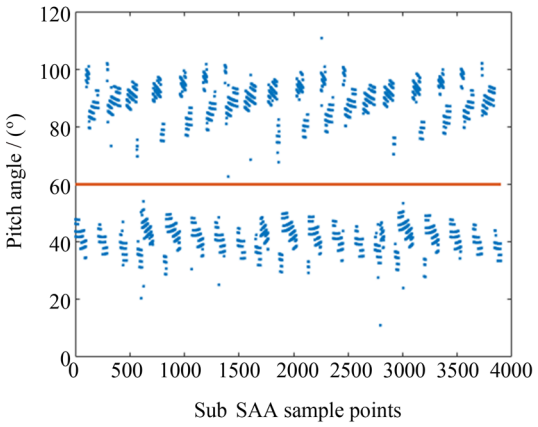

图 6　FY-3A 卫星 p1 能道粒子在次南大西洋异常区的投掷角分布

Fig. 6　Pitch angle distribution of the p1 energy channel of FY-3A in the sub SAA

为完全各向异性, 次南大西洋异常区质子通量随能道增高逐渐趋向于各向同性.

这里拟合的质子通量随投掷角分布对辐射带质子通量计算具有一定参考价值, 但由于不同投掷角方向的数据量较少, 拟合的分布规律还有待进一步验证和改善, 这是下一步研究的重点.

参考文献

[1] ALLEN J A V. Observation of high intensity radiation by satellites 1958 Alpha and Gamma [J]. *J. Jet Prop.*, 1958, **28**(9): 588-592

[2] BRAUTIGAM D H. CRRES in review: space weather and its effects on technology [J]. *J. Atmos. Solar-Terr. phys.*, 2002, **64**(16): 1709-1721

[3] ZHAO Xue, CAI Zhenbo. Analysis on space environment and satellite anomaly in orbit [C]//17th Conference of the Space Exploration Committee of Chinese Society of Space Science. Beijing: Chinese Society of Space Science, 2004 (赵雪, 蔡震波. 空间环境与卫星在轨异常分析 [C]//中国空间科学学会空间探测专业委员会第十七次学术会议论文集. 北京: 中国空间科学学会, 2004)

[4] PU Zuyin, FANG Xiaohua, JIAO Weixin. The study of "space climate" of SAA in the inner radiation belt [J]. *Sci. China A: Math.*, 2000, 1 (濮祖荫, 方晓华, 焦维新. 内辐射带南大西洋异常区 "空间气候" 研究 [J]. 中国科学: A, 2000, 1)

[5] HUSTON S L, KAUFFMAN W. Space environments and effects: Trapped proton model, NASA/CR-2002-211784, NASA Marshall Spaceflight Center, Huntsville, AL, 2002

[6] HEYNDERICKX D, KRUGLANSKI M, PIERRARD V, *et al.* A low altitude trapped proton model for solar minimum conditions based on SAMPEX/PET data [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 1999, **46**(6): 1475-1480

[7] ROEDER J L, CHEN M W, FENNELL J F, *et al.* Empirical models of the low-energy plasma in the inner magnetosphere [J]. *Space Weather,* 2005, **3**(12): 3-10

[8] CHEN Guifu, YE Zonghai, ZHU Guangwu, *et al.* The recent observational results of the geomagnetically trapped protons [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1993, **13**(1): 50-60 (陈贵福, 叶宗海, 朱光武, 等. 风云一号 (B) 星对内辐射带质子的观测结果 [J]. 空间科学学报, 1993, 13(1): 50-60

[9] HUANG Cong, LI Jiawei, XUE Bingsen, *et al.* The capabilities and applications of Fengyun-3A/B SEM on monitoring space weather events [J]. *Adv. Meteor. Sci. Technol.*, 2013, **3**(4): 126-135 (黄聪, 李嘉巍, 薛炳森, 等. 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 [J]. 气象科技进展, 2013, **3**(4): 126-135

[10] WANG C Q, ZHANG X G, WANG S J, *et al.* Comparison of high energy particles observation results between FY-3A satellite and NOAA series satellites [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2010(1): 49-54 (王春琴, 张贤国, 王世金, 等. FY-3A 卫星与 NOAA 系列卫星高能带电粒子实测结果的比较 [J]. 空间科学学报, 2010(1): 49-54)

[11] YANG Xiaochao, WANG Shijin, LIANG Jinbao, *et al.* Electron orientation detection design on sun-synchronous orbit [J]. *J. Astron.*, 2012, **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, 2012, **33**(2): 281-284)

[12] GINET G P, O'BRIEN T P, HUSTON S L, *et al.* AE9, AP9 and SPM: New models for specifying the trapped energetic particle and space plasma environment [J]. *Space Sci. Rev.,* 2013, **179**(1-4): 579-615

[13] ZHANG Yi, ZHANG Xianguo, WANG Chunqin, *et al.* The geometric factor of high energy protons detector on FY-3 satellite [J]. *Sci. China: Earth Sci.*, 2014, **57**: 2558-2566. DOI:1007/s11430-014-4853-0

[14] YAN Xingya, CHEN Hongfei, YU Xiangqian,*et al.* The southward and northward difference of proton flux in south Atlantic anomaly [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2016, 36(6): 888-896 (闫兴亚, 陈鸿飞, 于向前, 等. 南大西洋异常区高能质子通量南北向差异 [J]. 空间科学学报, 2016, **36**(6): 888-896)

[15] JOHNSTON W R, O'BRIEN T P, HUSTON S L, *et al.* Recent updates to the AE9/AP9/SPM radiation belt and space plasma specification model [J]. *IEEE Trans. Nucl. Sci.*, 2015, **62**(6): 2760-2766