

# 低高度内辐射带高能质子 空间分布位形的研究<sup>\*</sup>

乐贵明 叶宗海

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

## 摘 要

利用国际地磁参考场模式 (IGRF 模式) 分析了 1970—2000 年低高度南大西洋负磁异常区位形的漂移与变化, 给出了几个高度异常区中心位置磁场强度的变化和位置的变化. 利用带电粒子的运动学方程, 简要分析了低高度辐射带高能粒子的运动, 得出在低高度, 磁场是决定辐射带高能粒子空间强度与分布的决定性因素. 低高度辐射带空间分布位形的变化特征应该与低高度南大西洋负磁异常区的变化特征基本一致. 低高度南大西洋负磁异常区的特征可以作为低高度辐射带空间分布位形的一个初步判据.

**关键词** 内辐射带; 高能质子; 南大西洋异常区; 低高度; 分布位形

## 1 引言

依据探险者号卫星的探测数据, Van Allen 在 1958 年 5 月 1 日宣布在地球上空发现了高辐射强度的区域<sup>[1]</sup>, 这就是现在的 Van Allen 辐射带. 美国从 20 世纪 60 年代开始一直到 20 世纪 70 年代, 开始大规模地对辐射带进行探测, 利用 30 多颗卫星的数据编制了一系列辐射带模式, 最新的模式为 1988 年编制的 AP8<sup>[2]</sup> 和 AE8<sup>[3]</sup>. 尽管模式本身存在很多的问题, 但是, AP8 与 AE8 仍在世界范围内得到最广泛的承认与应用. 需要指出的是模式的构造是采用 20 世纪 60—70 年代的地磁模式构造的. 现在已经过去 30 多年了, 地磁场已经发生了一定程度的变化, 相应地辐射带的特性已经发生了一些新的变化, 因此, 目前在辐射带模式的使用上有争议. 一种观点是应该继续使用原有的地磁模式来计算空间的粒子强度<sup>[4],[5]</sup>, 而另一种观点是应该考虑地磁场的变化, 采用过去的地磁模式来计算空间的粒子强度与分布会出现偏差<sup>[7]</sup>, 急需建立新的辐射带模式. 我们也认为现在空间的辐射带粒子环境不能采用 AP8 与 AE8 模式来计算, 因为不同的太阳周空间环境是有差异的, 目前普遍认为内辐射带的质子是银河宇宙线反照中子衰变形成的, 因此, 银河宇宙线的强弱对辐射带的强度有影响, 而不同太阳周银河宇宙线强度不同. 另一个影响较大的是地磁场, 经过 30 年, 地磁场的空间分布位形和强度都发生了一定程度的变化, 这会影响到地球附近空间的银河宇宙线强度, 进而影响辐射带的强度. 大气密度的变化也会影响低高度粒子的强度, 各向异性和空间分布, 当然, 大气对辐射带比较明显的影响主要在辐射带的低部高度. 总之, 采用过去的地磁模式来计算现在的空间粒子环境必然出现偏差. 那

<sup>\*</sup> 国家 863 资助项目 (228144)

2002-11-28 收到原稿, 2003-05-06 收到修定稿

么能否采用现在的地磁模式 (IGRF 2000) 来计算任意空间点的  $(L, B)$  坐标, 然后依据过去探测得到的模式数据来计算现在空间的粒子强度和分布呢? 现在还不能给出确切的结论, 尽管目前国内已有学者在这方面进行了尝试<sup>[6]-[9]</sup>, 但计算结果的正确与否还有待探测来检验, 因此, 在本文中我们不涉及粒子强度的计算问题, 主要分析低高度辐射带空间分布位形的变化特征. 在低高度 ( $< 1000$  km) 内, 辐射带高能质子主要分布在南大西洋负磁异常区 (SAA), 因此, 我们有必要研究低高度 SAA 区域的变化特征. 利用国际地磁参考场 (IGRF) 模式, 我们分析了低高度南大西洋异常区的漂移, 并依据粒子动力学方程对低高度辐射带空间分布位形与地磁分布位形的关系进行了讨论, 认为在低高度, 磁场的空间位形是辐射带高能质子空间分布位形的决定性因素. 在低高度, 辐射带粒子的空间分布位形变化特征应该与 SAA 的位形变化特征基本一致. 低高度 SAA 位形特征可以作为低高度辐射带高能粒子空间分布位形正确与否的一种初步判据.

## 2 低高度质子分布位形的研究与分析

首先我们重点分析低高度 SAA 区域的变化. 在低高度, 外源场 (磁层电流体系产生的磁场) 与内源场 (地球内部源产生的磁场) 相比可以忽略. 因此, 在低高度可以只考虑内源场, 而内源场的计算我们依据国际地磁参考场 (IGRF) 模式, 计算公式如下.

$$X(r, \theta, \lambda; t) = \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda] \frac{dp_n^m(\cos \theta)}{d\theta}, \quad (1)$$

$$Y(r, \theta, \lambda; t) = \frac{1}{\sin \theta} \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [g_n^m(t) \sin m\lambda - h_n^m(t) \cos m\lambda] m p_n^m(\cos \theta), \quad (2)$$

$$Z(r, \theta, \lambda; t) = - \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n (n+1) \left(\frac{a}{r}\right)^{n+2} [g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda] p_n^m(\cos \theta). \quad (3)$$

其中,  $(r, \theta, \lambda)$  代表被计算的空间点在球坐标系下的坐标, 坐标系的原点在地心.  $r, \theta, \lambda$  分别代表地球球心到空间观测点的距离, 余纬和经度,  $t$  表示时间.  $g_n^m, h_n^m$  是 IGRF 的

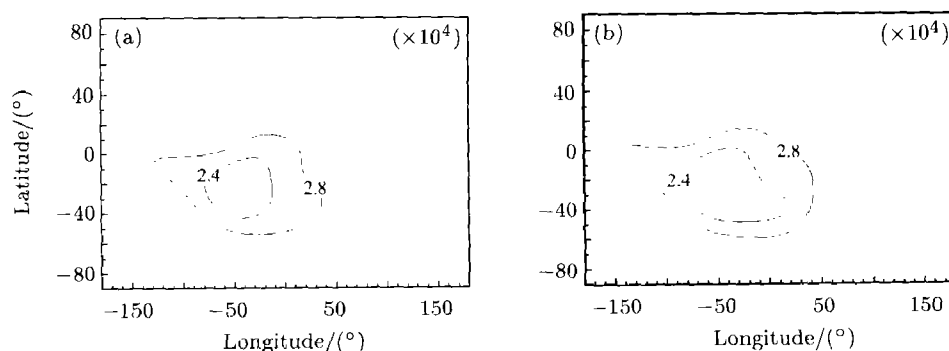


图 1 (a) 300 km 高度 1970 年的异常区, (b) 300 km 高度 2000 年的异常区  
Fig.1 (a) SAA region at 300 km in 1970, (b) SAA region at 300 km in 2000

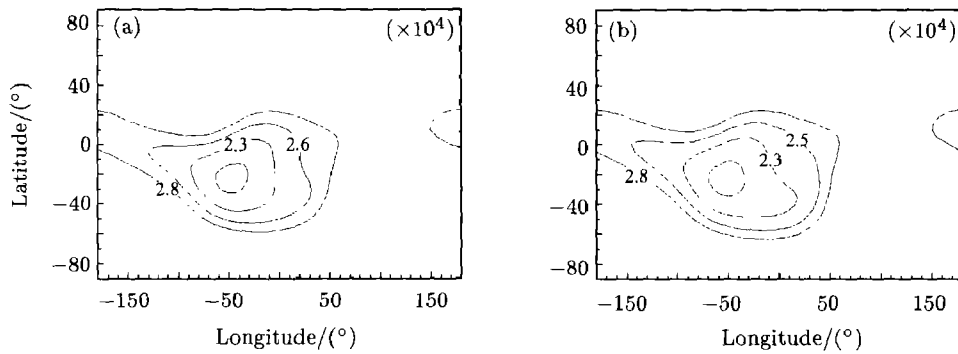


图 2 (a) 500 km 高度 1970 年的异常区, (b) 500 km 高度 2000 年的异常区  
Fig.2 (a) SAA region at 500 km in 1970, (b) SAA region at 500 km in 2000

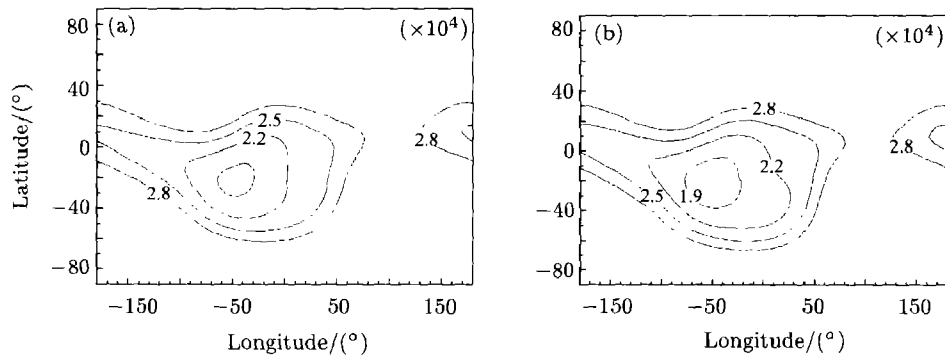


图 3 (a) 700 km 高度 1970 年的异常区, (b) 700 km 高度 2000 年的异常区  
Fig.3 (a) SAA region at 700 km in 1970, (b) SAA region at 700 km in 2000

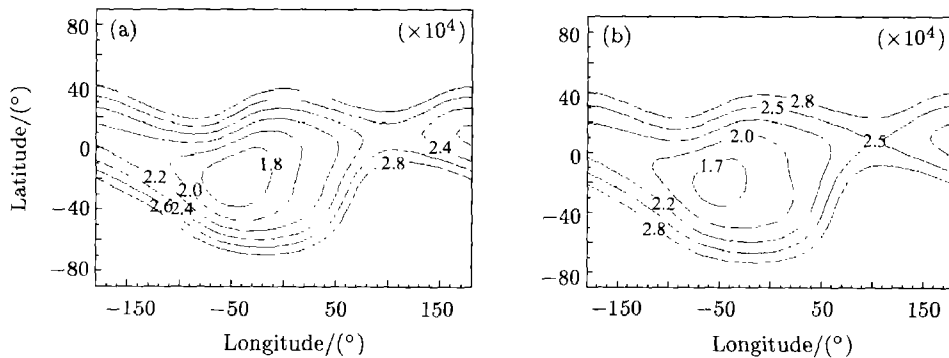


图 4 (a) 1000 km 高度 1970 年的异常区, (b) 1000 km 高度 2000 年的异常区  
Fig.4 (a) SAA region at 300 km in 1970, (b) SAA region at 300 km in 2000

球谐系数, 跟时间有关,  $p_n^m(\cos \theta)$  是施密特形式的缔合勒让德多函数. 不同年代的高斯系数不同,  $a$  为地球半径,  $X, Y, Z$  是经计算后得到的空间点的磁场的 3 个分量, 总磁场强度为  $B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$ , 图 1—4 是依据 IGRF 1970 和 IGRF 2000<sup>[10]</sup> 计算得到的

低高度, 分别在 300 km, 500 km, 700 km 和 1 000 km 高度, 总磁场强度  $B < 28\,000\text{ nT}$  (也可以选择其他值) 位形图。

从以上图形可以看出, 在各个高度上, 2000 年的南大西洋负磁异常区包含 1970 年南大西洋负磁异常区且其范围有一定程度的扩展。

表 1 与表 2 分别是由 IGRF 1970 与 IGRF 2000 给出的从地面到 1 000 km 每隔 100 km 的各个高度地磁异常区中心的经度, 纬度位置与磁场强度值。

表 1 1970 年南大西洋异常区磁场强度最低值在各高度的位置与强度  
Table 1 The Location and lowest value  
of geomagnetic field strong in SAA in 1970

| 高度 /km | 地磁模式 | 经度 /( $^{\circ}$ ) | 纬度 /( $^{\circ}$ ) | 强度值 /nT  |
|--------|------|--------------------|--------------------|----------|
| 0      | 1970 | -50                | -26                | 23 800   |
| 100    | 1970 | -50                | -26                | 22 911.6 |
| 200    | 1970 | -49                | -25                | 22 051.2 |
| 300    | 1970 | -49                | -24                | 21 224.6 |
| 400    | 1970 | -48                | -23                | 20 433.0 |
| 500    | 1970 | -48                | -23                | 19 669.8 |
| 600    | 1970 | -48                | -22                | 18 940   |
| 700    | 1970 | -48                | -22                | 18 241   |
| 800    | 1970 | -47                | -21                | 17 572.4 |
| 900    | 1970 | -47                | -21                | 16 932.6 |
| 1 000  | 1970 | -46                | -20                | 16 320.5 |

表 2 2000 年南大西洋异常区磁场强度最低值在各高度的位置与强度  
Table 2 The Location and lowest value  
of geomagnetic field strong in SAA in 2000

| 高度 /km | 地磁模式 | 经度 /( $^{\circ}$ ) | 纬度 /( $^{\circ}$ ) | 强度值 /nT  |
|--------|------|--------------------|--------------------|----------|
| 0      | 2000 | -55                | -26                | 22 888.4 |
| 100    | 2000 | -54                | -26                | 22 033.1 |
| 200    | 2000 | -54                | -25                | 21 206   |
| 300    | 2000 | -54                | -24                | 20 410.6 |
| 400    | 2000 | -54                | -23                | 19 647.6 |
| 500    | 2000 | -53                | -23                | 18 914   |
| 600    | 2000 | -53                | -22                | 18 210   |
| 700    | 2000 | -53                | -21                | 17 539.2 |
| 800    | 2000 | -52                | -21                | 16 894.6 |
| 900    | 2000 | -52                | -20                | 16 278.7 |
| 1 000  | 2000 | -52                | -20                | 15 689.6 |

从表 1, 表 2 的数据我们看到, 1970—2000 年, 在不同的高度南大西洋负磁异常区的中心位置都略有漂移, 而且中心位置的强度也发生了变化。下面我们给出几个高度中心位置漂移的实际值和中心位置磁场强度下降值和下降的幅度, 如表 3 所示。

表 3 南大西洋负磁异常区在几个高度的中心位置与磁场强度的变化

Table 3 The variation in central position  
and geomagnetic field strong of the SAA at several altitudes

| 高度 /km | 经度漂移 /( $^{\circ}$ ) | 纬度漂移 /( $^{\circ}$ ) | 磁场下降值 /nT | 磁场下降幅度 /( $\%$ ) |
|--------|----------------------|----------------------|-----------|------------------|
| 200    | -5                   | 0                    | 845.2     | 3.833            |
| 300    | -5                   | 0                    | 814       | 3.835            |
| 400    | -6                   | 0                    | 785.4     | 3.843            |
| 500    | -5                   | 0                    | 755.8     | 3.842            |
| 600    | -5                   | 0                    | 730       | 3.854            |
| 700    | -5                   | -1                   | 710.8     | 3.847            |
| 800    | -5                   | 0                    | 677.8     | 3.857            |
| 900    | -5                   | -1                   | 653.9     | 3.862            |
| 1 000  | -6                   | 0                    | 630.9     | 3.866            |

从表 3 的数据我们看到, 经过 30 年的时间, 在低高度, 南大西洋负磁异常区的中心位置发生了漂移, 主要是经度方向为向西漂移  $4^{\circ}$ — $6^{\circ}$ ; 纬度方向的漂移只在两个高度向北漂移  $1^{\circ}$ , 其他高度在纬度方向没有漂移. 另外, 中心位置的磁场强度下降了, 下降的绝对值随高度的增加逐渐下降, 但下降的幅度却随高度逐渐上升. 在 1000 km 的高度的中心位置, 磁场下降的值最小, 但也达到 630.9 nT, 这样的值远大于一次特大磁暴引起的地磁强度的变化, 因此, 经过 30 年的时间, 地磁场的变化不能忽略.

辐射带粒子是带电的高能粒子, 在低高度对卫星危害最大的是能量大于 10 MeV 以上的高能质子. 带电粒子的力学方程为

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) + m\mathbf{g}, \quad (4)$$

上式中  $m$  为粒子的质量,  $\mathbf{E}$  为空间电场,  $\mathbf{B}$  为空间磁场,  $\mathbf{g}$  为重力加速度. 在低高度, 对于能量大于 10 MeV 的质子,  $|\mathbf{v} \times \mathbf{B}| \gg \mathbf{E}$ , 重力项可以忽略. 因此, 在低高度, 高能质子 ( $> 10$  MeV) 的力学运动方程可以近似写为

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (5)$$

因此, 在低高度, 粒子的运动学状态主要是由磁场控制的. 在低高度, 磁场的空间位形是辐射带高能质子空间分布位形的决定性因素.

### 3 结果与讨论

由以上计算和分析我们可以得出如下结论.

(1) 从 1970 年到 2000 年, 低高度南大西洋负磁异常区的中心在经度方向向西漂移了  $4^{\circ}$ — $6^{\circ}$ , 在纬度方向向北的漂移不超过  $1^{\circ}$ .

(2) 从地面到 1000 km 之间的不同高度, 2000 年的南大西洋负磁异常区的范围包含 1970 年南大西洋负磁异常区, 且在经度和纬度方向都有一定程度的扩展.

(3) 在同一高度, 2000 年南大西洋负磁异常区中心位置的磁场强度值比 1970 年南大西洋负磁异常区中心位置的磁场强度要弱, 1000 km 以下高度, 异常区中心位置磁场强度的最大下降程度不超过 3.87%.

(4) 低高度磁场的空间位形是辐射带高能质子空间分布的决定性因素. 粒子在低高度的空间分布位形应该与磁场位形基本吻合, 可以把低高度南大西洋负磁异常区的空间位形作为低高度辐射带高能粒子 ( $> 10 \text{ MeV}$ ) 空间分布位形的一个初步判据.

由表 3 的计算结果看, 低高度南大西洋负磁异常区的磁场强度和中心位置的变化都已经不能忽略, 因此, 采用老的地磁模式来计算现在空间的辐射带粒子环境必然会出现偏差. 由于在低高度辐射带高能粒子 ( $> 10 \text{ MeV}$ ) 的空间分布位形取决于磁场的空间分布位形, 即低高度粒子的空间分布位形应该与磁场的空间分布位形基本吻合. 由此, 我们可以推测, IGRF 2000 地磁模式下的辐射带粒子环境结果与采用 IGRF 1970 模式计算得到的结果相比应该具有以下几个特征. 第一个特征是, 辐射带的中心位置在经度方向向西发生了一定程度的漂移, 相对经度向西的漂移, 纬度方向向北的漂移更小. 第二个特征是, 在 300 km 到 1000 km 之间, 同样的高度, 2000 年辐射异常区的范围比 1970 年辐射异常区的范围要大且包含 1970 年辐射异常区的范围. 第三个特征是, 负磁异常区内 2000 年的磁场强度比 1970 年的磁场强度总体上要弱, 因此, 在同一高度上 IGRF 2000 模式下的粒子通量的等值线强度的最大值比由 IGRF 1970 模式计算得到的结果要高. 过去我们利用过去的地磁模式大量计算了低高度辐射带的粒子环境<sup>[11]</sup>, 但计算的结果仅代表过去的空间辐射带粒子环境. 依据 IGRF 2000<sup>[12]</sup> 计算空间点的  $(L, B)$  坐标, 然后依据 AP8 与 AP8 模式的探测数据来计算空间的辐射带环境的正确与否需要由探测来检验.

TOMS 卫星已经观测到辐射带的低部移到更低的高度, 这与地磁长期变化的特征是相符的; 低高度辐射带质子各向异性随时间的变化也有报道. 现在的地磁环境下低高度辐射带高能粒子在的空间分布位形也需要由探测来检验.

**致谢** 与本研究所的周国成研究员和北京大学的濮祖荫教授进行了非常有益的讨论, 在此表示衷心的感谢.

## 参 考 文 献

- [1] Van Allen J A, Ludwig G H, McIlwain C E. Observation of high intensity radiation by satellites 1958  $\alpha$  and  $\beta$ , *Jet Propulsion*, **28**:588—592
- [2] Sawyer D M, Vette J I. AP-8 trapped proton environment for solar maximum and solar minimum, NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976
- [3] Vette J I. The AE-8 trapped electron model environment, NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, NASA Goddard Space Flight Center, 1991
- [4] Zang Zhenqun. The effect of the earth magnetic field long-term changes on the calculation of proton flux in the radiation belt. *Chin. J. Space Sci.*, 1997, **17**(1):59—63. in Chinese (臧振群. 地磁场的长期变化对辐射带质子通量计算的影响. 空间科学学报, 1997, **17**(1):59—63)
- [5] Vampola A L. Solar cycle effects on trapped energetic particles. *J. Spacecraft*, 1989, **26**(6):416—427
- [6] Daly E J, Lemaire J, Heynderickx D, Rodgers D J. Problems with models of the radiation belts. *IEEE Trans. Nuc. Sci.*, 1996, **43**(2):403—415
- [7] Fang Xiaohua, Pu Zuyin. Drift shell tracing method and the secular variation of inner radiation fluxes. *Chin. J. Space Sci.*, 2000, **20**(2):150—158. in Chinese (方晓华, 濮祖荫. 漂移壳追踪方法与内辐射带的长期变化. 空间科学学报, 2000, **20**(2):150—158)
- [8] Jiao Weixin, Pu Zuyin, Fang Xiaohua, Fu Suiyan. The radiation environment within the south atlantic anomaly region and the calculating trapped particles fluxes for low orbit satellite. *Chin. J. Geophys.*, 1999, **42**(2):163—168. in Chinese (焦维新, 濮祖荫, 方晓华, 傅绥燕. 南大西洋异常区的辐射环境与低轨卫星粒子计算. 地球物理学报, 1999, **42**(2):163—168)
- [9] Pu Zuyin, Fang Xiaohua, Jiao Weixin. The study of Space weather for inner radiation belt in South Atlantic Anomaly region. *Sci. China*, 2000, (13A):131—135. in Chinese (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. 中国科学(A 辑), 2000, (13):131—135)
- [10] Le Guiming, Ye Zonghai, Zhou Guocheng. Low altitude satellite orbit radiation belt particle environment variation due to geomagnetic field long term variation. *Chin. J. Space Sci.*, 2001, **21**(3):238—245. in Chinese (乐贵明, 叶宗海, 周国成. 地磁长期变化引起的低高度卫星轨道辐射带粒子环境的变化. 空间科学学报, 2001, **21**(3):238—245)
- [11] Du Heng, Ye Zonghai. Handbook for spacecrafts traveling in low orbit. National Defence Industry press, Beijing, 1996. in Chinese (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)
- [12] Mandea M. international geomagnetic field reference-2000. *Pure Appl. Geophys.*, 2000, **157**(10): 1797—1802

## THE STUDY OF SPACE DISTRIBUTION CONFIGURATION OF THE RADBELT PROTONS WITH HIGH ENERGY

LE Guiming      YE Zonghai

(Center for Space and Applied Research, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)

### Abstract

By using International Geomagnetic Reference Field (IGRF), the paper computes the drift of South Atlantic Anomaly (SAA) region at several altitudes lower than 1 000 km for the interval of 1970—2000. The results show that the center of the SAA moves  $4^{\circ}$ — $6^{\circ}$  towards west, while the center of the SAA no more than  $1^{\circ}$  towards the north. The extent of the SAA in the year 2000 includes that of the SAA in 1970 and its coverage extends with some scale in both latitude and longitude directions. The value of geomagnetic field strength at the center of SAA in 2000 is lower than that in 1970. The biggest scale for the decrease in geomagnetic field strength at the center of the SAA is no more than 3.87% for the altitudes lower than 1 000 km. It is enough to use internal field for the altitudes lower than 1 000 km, so the results are reliable.

The charged particles with energy higher than 10 MeV mainly distribute in the SAA region for low altitudes based on AP8 Model, but the model was just suit for epoch 1960 to 1970. Because the kinetic properties of a charged particle are almost completely decided by the properties of the geomagnetic field at altitudes lower than 1 000 km, so we can know the charged particles with energy higher than 10 MeV still distribute in SAA region. The space distribution configuration of charged particles with high energy should basically be consistent with the space distribution configuration of the geomagnetic field for low altitudes. The space configuration of the SAA region in low altitudes can be considered as the criterion of the space configuration of radiation belt protons with energy higher than 10 MeV.

**Key words** Inner radiation belt, High energy proton, South atlantic anomaly, Low altitude, Space distribution configuration