0254-6124/2012/32(6)-804–08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Shi Liqin, Lin Ruilin, Liu Siqing, Zheng Huinan. Effect of solar cycle activity on high energy proton of inner radiation belt in the low altitude region. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(6): 804-811

太阳周期活动对低高度内辐射带高能质子的影响*

师立勤[1,2] 林瑞淋[2] 刘四清[2] 郑惠南[1]

1(中国科学技术大学地球与空间科学学院 合肥 230026)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

摘 要 利用 NOAA-15 卫星 1998 年到 2011 年近 13 年的高能质子全向通量观测资料, 分析了一个太阳活动周内, 低高度内辐射带高能质子通量的分布变化特性及其物理原因, 比较了观测结果与 AP8 模型的不同. 研究表明, 低高度内辐射带高能质子通量与太阳活动水平的反相关关系与磁壳参数 L 值及磁场 B 值有关; L 值越低, B 值越大的空间点, 其高能质子通量与太阳活动水平的反向相关性越明显. 高能质子通量随太阳活动水平的变化存在明显滞后现象, L 值越高、B 值越小的空间点, 滞后现象就越明显, 滞后严重时可以达到一年左右的时间; 这种滞后现象反映出低高度内辐射带高能质子的源与损失达到平衡是一个中长期过程. 通过与 AP8 模型计算结果的比较分析可以看出, 利用 AP8 模型时, 仅考虑地磁场长期变化对质子通量的影响可能会夸大低高度内辐射带局部高能质子通量的增强.

关键词 高能质子, 辐射带, 太阳活动, 南大西洋异常区

中图法分类号 P 353

Effect of Solar Cycle Activity on High Energy Proton of Inner Radiation Belt in the Low Altitude Region

SHI Liqin[1,2] LIN Ruilin[2] LIU Siqing[2] ZHENG Huinan[1]

1(*School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei* 230026)

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

Abstract The NOAA-15 high energy proton observation from 1998 to 2011 is used to analyze the effect of solar cycle activity on high energy proton flux. The statistic research indicates that there is an inverse correlative relationship between the proton flux in inner radiation belt and solar activity. This anti-correlation is related to geomagnetic coordinates L and B, and more significant with the increasing of L and decreasing of B. There is also a phase lag between the solar activity and the proton flux. This hysteresis effect is more obvious in the region with smaller L or larger B. The lag

* 国家重点基础研究发展计划 (2011CB811406) 和中国科学院知识创新工程项目 (YYYL-1110) 共同资助

2011-08-03 收到原稿, 2012-08-30 收到修定稿

E-mail: shilq@nssc.ac.cn

can reach one year in some regions. This hysteresis effect means it takes a long time to reach the dynamic balance between the source and the loss for the proton of inner radiation belt in the low altitude region. The unbalance between the source and loss is the reason why the intensity of proton flux at the same solar activity is different. The comparison with the result of AP8 model indicates the energetic proton flux from AP8 is higher than the satellite's observation in the region with large B, which suggests that the AP8 model may overstate the proton flux enhancement at inner radiation belt in the low altitude region if only the long-term variation of magnetic field is considered.

Key words High energy proton, Radiation belt, Solar activity, South Atlantic Anomaly (SAA)

0 引言

辐射带的高能粒子可以损伤卫星的电子元器件和材料, 诱发卫星故障异常. 通常可将辐射带分为内辐射带和外辐射带, 内辐射带的主要成分是高能质子和高能电子, 内辐射带的高能质子在低高度区域 (250~1000 km) 主要分布在南大西洋异常区, 是威胁低轨道卫星运行的主要环境因素. 内辐射带的高能质子分布相对稳定, 但对于低高度内辐射带南大西洋异常区的高能质子, 由于高能质子与高层大气的相互作用以及地磁场的长期变化, 存在中长期缓慢变化. 研究低高度内辐射带南大西洋异常区高能质子的中长期变化特征有助于建立准确的低轨道辐射带模型, 对卫星的防护设计有重要意义.

辐射带是高能带电粒子被地磁场捕获和束缚而形成的, 地磁场的长期缓慢变化会影响辐射带的分布. Fung[1] 等利用 NOAA-10 和 OHZORA 卫星 1989 年及 1986 年的观测发现, 内辐射带低高度, 特别是南大西洋异常区 (SAA) 的高能质子通量比六七十年代有了显著增强, 认为地磁场的长期缓变是引起这一变化的主要原因. Fang[2], Pu[3], Xie[4] 等利用漂移壳追踪法研究了地磁场长期变化对内辐射带的影响, 指出地磁场的长期变化会引起 SAA 区域的西漂和增强. Zang[5], Le[6], Jiao[7] 等基于 AP8 模型和 IGRF 磁场模型计算了磁场变化引起的低轨道内辐射带高能粒子通量的变化, 也指出磁场变化会引起 SAA 区域的西漂和增强. 这些研究中, 仅考虑了磁场长期变化带来的低高度内辐射带高能粒子的变化, 而忽略了太阳活动的影响. 辐射带的稳定分布是高能粒子捕获和损失动态平衡的结果, 在讨论辐射带粒子增强的同时, 必须考虑损失机制对这种增强的影响. 对于低高度内辐射带, 高能质子与高层大气中性成分相互碰撞是高能质子的主要损失机制, 而大气密度的变化受到太阳周期活动的调制. 另外, 目前普遍认为内辐射带的高能质子主要由银河宇宙线反照中子衰变形成, 而银河宇宙线的强度也受太阳周期活动调制. 因此, 研究低高度内辐射带高能质子的中长期变化必须考虑太阳周期活动影响.

目前普遍使用的辐射带模型是 AP8[8] 和 AE8[9], AP8 和 AE8 模型是美国 NASA 利用 20 世纪六七十年代卫星探测数据编制的辐射带高能质子和高能电子模型. 模型构造采用的磁场模型是当时的地磁场模型. AP8 和 AE8 模型是静态的平均模型, 模型中对于太阳活动周的影响仅分为太阳活动高年和低年两种情况, 不能详细反应太阳活动周期对低高度内辐射带的影响. 研究太阳周期活动对辐射带高能粒子分布的影响, 需要一个太阳活动周以上的数据. 受数据限制, 目前的辐射带经验模型也往往不能精确反映太阳活动周的影响.

本文利用 NOAA-15 卫星 1998 年到 2011 年近 13 年高能质子全向通量的观测资料, 分析研究了一个太阳活动周低高度内辐射带高能质子通量的分布变化特性及其物理原因, 比较了观测结果与 AP8 模型的不同, 为研究内辐射带高能质子的损失机制, 建立准确的低高度内辐射带高能粒子模型提供了基础. 而且, NOAA 卫星的轨道也是卫星常用轨道, 对今后类似轨道卫星的工程设计具有参考价值.

1 数据资料

研究太阳周期活动对低高度内辐射带高能粒子的影响, 需要超过一个太阳活动周的稳定探测数据. 这里选择 NOAA/POES 系列卫星中的 NOAA-15 卫星的高能质子全向通量探测数据作为研究对象.

NOAA/POES 系列卫星是美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 的极轨环境探测卫星. POES 卫星搭载了一个探测卫星轨道能量电子和能量质子的空间环境监测包, 监测包中包含一个中高能量质子和电子的通量监测仪 (MEPED), 其能量探测范围主要在 30 keV∼200 MeV 内, 覆盖辐射带高能粒子的能量范围. NOAA/POES 卫星系列从 1978 年开始发射, 至今已发射十多颗. 为排除不同卫星不同探测设备的探测偏差, 选择了探测时间最长的 NOAA-15 的探测数据进行处理分析. NOAA-15 卫星于 1998 年发射, 轨道倾角是 98.5°, 轨道高度约为 815 km, 至今累计的探测数据有近 13 年. NOAA-15 的 MEPED 设备中包含四个分立的高能质子全向固态探头, 可以分别测量 16∼35 MeV, 35∼70 MeV, 70∼140 MeV, 140∼500 MeV 四个能段的高能质子.

本文按照卫星的探测数据格式以及全向通量的反演算法 [10], 将原始探测数据处理为间隔 8 s 的全向通量值, 四个能道分别转化为 16∼500 MeV, 35∼500 MeV, 70∼500 MeV, 140∼500 MeV. 由于能量大于 500 MeV 的高能质子相对很少, 可以认为这四个能道的结果分别代表能量 >16 MeV, >35 MeV, >70 MeV, >140 MeV 的高能质子探测结果.

这里主要研究太阳周期活动引起的低高度内辐射带高能质子通量的长期变化, 为了忽略和规避短期影响以及数据波动引起的变化, 在数据资料分析处理中, 对通量探测数据按三个月进行了平均, 即每年按 1−3 月, 4−6 月, 7−9 月和 10−12 月分别进行平均. 磁场的计算采用了国际地磁场参考模型 IGRF 模型, 年代取卫星的具体探测时间. 研究中太阳活动水平以太阳 $F_{10.7}$ 指数表征.

2 分析结果与讨论

2.1 地磁 B-L 坐标下高能质子通量随太阳周期活动的变化

辐射带高能带电粒子受地磁场束缚, 在稳定或缓变的地磁场中运动时, 粒子的三个绝热不变量守恒 [11], 高能带电粒子在固定的漂移壳内运动. 这时, 根据刘维定理, 辐射带中相同地磁 B-L 坐标下的高能带电粒子的全向通量相等 [12]. 因此, 这里首先分析了 1998 年到 2011 年期间, 地磁 B-L 坐标下, 辐射带高能质子通量随太阳周期活动的变化. 这里, 主要分三种情况考察高能质子随太阳活动指数 $F_{10.7}$ 的变化.

图 1 给出的是磁赤道 ($B/B_{\min}=1.0$, $B_{\min}$ 是磁赤道处的磁场值) 不同 L 值下, 能量大于 16 MeV 高能质子通量随时间的变化. 从图 1 可以看出, 高能质子通量存在随太阳周期活动反向变化的趋势, 太阳活动高年, $F_{10.7}$ 指数大时, 高能质子通量小, 太阳活动低年, $F_{10.7}$ 小时, 高能质子通量高; 而且高能质子通量随太阳活动的变化强烈依赖于磁壳参数 L 值, L 值越大, 太阳活动水平的影响越小, 当 $L=1.15$ 时, 从太阳活动高年到太阳活动低年, 高能质子通量上升 10 倍左右; 而当 $L=1.21$, 高能质子通量随太阳活动变化的趋势已不很明显, 高能质子通量变化在 1 倍以内. 高能质子通量随太阳活动的变化存在滞后现象. 随着 L 值的增大, 滞后现象越明显; 而且滞后现象在太阳活动低年更明显. 第 23 太阳活动周, 三个月太阳 $F_{10.7}$ 均值的极大值出现在 2001 年的第 4 季度, 而 $L=1.15$ 的高能质子通量的谷值却出现在 2002 年第 1 季度, $L=1.21$ 的高能质子通量的谷值甚至出现在 2003 年第 1 季度, 滞后长达一年多; 第 23 太阳活动周三个月太阳 $F_{10.7}$ 均值的极小值出现在 2008 年第 3 季度, 而 $L=1.15$ 的高能质子通量的峰值却出现在 2009 年第 4 季度, 比谷值的滞后时间多 4 个

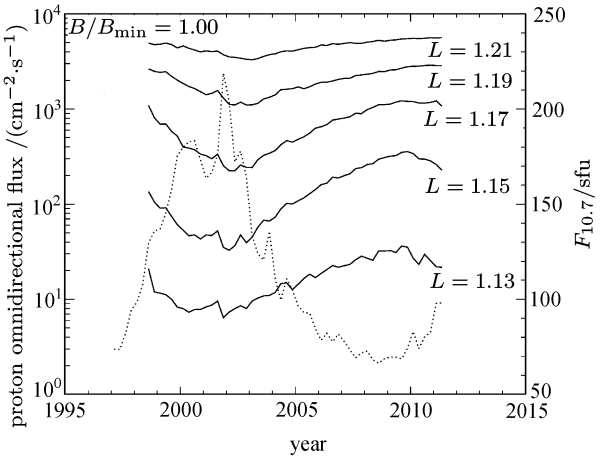


图 1 磁赤道 ($B/B_{\min}=1.0$) 上大于 16 MeV 高能质子通量随时间的变化 (虚线为太阳 $F_{10.7}$ 指数三个月的平均值)

Fig. 1 Flux Variations of greater than 16 MeV protons at the geomagnetic equator during the period from 1998 to 2011 (dashed line represents the average value of $F_{10.7}$ in three months)

季度. 相同太阳 $F_{10.7}$ 值情况下, 高能质子的通量也可能存在较大差异. 1999 年第 2 季度与 2002 年第 4 季度太阳 $F_{10.7}$ 指数相近, 但前者的高能质子通量却明显高于后者. 对于低 L 值, 质子通量随太阳活动水平的变化更为灵敏, 例如, 当 $L = 1.13$ 时, $F_{10.7}$ 指数发生一些小波动, 质子通量也随之相应变化.

图 2 给出的是 $L = 1.30$ 时, 不同地磁场情况下高能质子通量随太阳活动水平变化的情况. 总体来看, 高能质子通量同样存在与太阳活动水平反相关关系. 在 $B/B_{\min} = 1.22$ 时, 高能质子通量随太阳周期活动的变化趋势还不是很明显, 高能质子通量在整个太阳活动周中变化不大. 但随着 $B/B_{\min}$ 的增加, 高能质子通量与太阳活动水平反相关关系逐渐明晰. 在 $B/B_{\min} = 1.50$ 时, 一个太阳活动周内, 太阳高能质子通量变化接近 10 倍. 高能质子通量随太阳活动的变化也存在滞后现象. 随着 $B/B_{\min}$ 的减小, 滞后效果愈加明显.

图 3 给出的是 $B/B_{\min} = 1.0$, L =1.17 情况下, 4 个能道高能质子全向通量随时间的变化情况. 从图 3 可以看出, 4 个能道高能质子通量有相同的变化趋势, 均与太阳活动水平成反相关关系. 各能道高能质子随太阳活动变化也同样存在滞后效果, 不过在太阳活动高年, 高能道通量的谷值滞后时间较低能道的更长.

以上统计结果可以用辐射带高能质子运动规律和损失机制来解释. 对于低高度内辐射带, 与高层大气原子的碰撞是高能质子的主要损失机制. 太阳活动高年, 太阳辐射通量高, 导致高层大气平均温度上升, 进而大气平均密度上升, 使低高度辐射带高能质子的损失加强, 而太阳活动低年情况正好相反, 因而高能质子通量存在与太阳活动水平的反相关关系. 分析导致 L 值越低, 则 B 值越大, 负相关关系越明显的因素, 认为虽然卫星探测到的是相同轨道高度上的高能质子, 但对于不同的 L, B 值, 质子的运动轨迹是不同的. L 值越低, 质子运动的漂移壳相对地面的高度越低; 而对于近似为偶极场的地磁场磁力线, B 值越大的点距离地面越近. 因而对于 L 值越低, B 值越大的空间点, 过其点的高能质子运动轨迹相对越低, 受大气的影响越大. 因此对于低高度内辐射带的高能质子, L 值越低, B 值越大的点, 高能质子的通量随太阳活动的变化越明显; 反之, L 值越高, B 值越小的点, 受太阳活动水平的影响越小.

此外, 太阳活动水平增强对辐射带粒子通量影响的过程也是一个动态平衡的过程. 随着太阳活动水平增强, 大气密度增加会引起辐射带高能粒子的损失增强; 同时随着高能粒子自身通量的逐步减少, 又会降低这种影响, 最终辐射带粒子源与大气的碰撞损失达到动态平衡时, 辐射带高能粒子通量达到稳定值. 如果这一动态平衡过程不能很快完成, 就会看到高能质

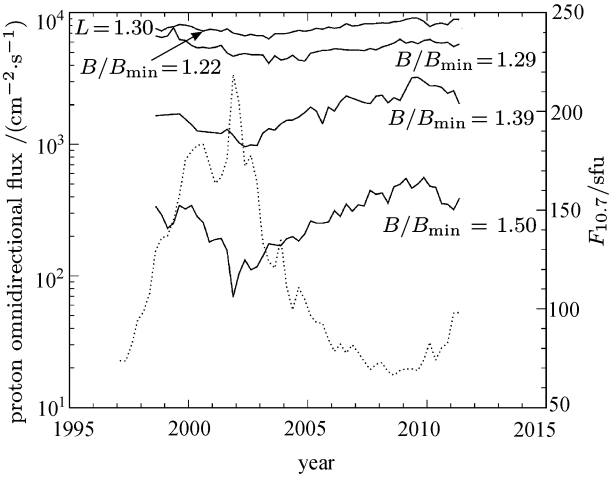


图 2 $L = 1.3$ 时大于 16 MeV 高能质子通量随时间的变化

Fig. 2 Flux variations of greater than 16 MeV protons under $L = 1.3$ during the period from 1998 to 2011

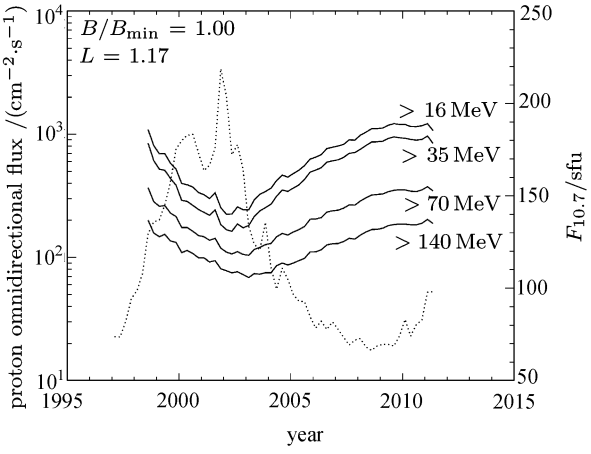


图 3 $B/B_{\min} = 1.0$, $L = 1.17$ 情况下 4 个能道高能质子通量随时间的变化

Fig. 3 Variations of greater than 16 MeV proton flux under $B/B_{\min} = 1.0$ and $L = 1.17$ during the period from 1998 to 2011

子通量随太阳活动的变化有一个滞后效应. 一般来说, 受大气影响越大的位置, 高能粒子损失得越快, 其达到动态平衡的过程越快, 因此, 低 L 值、高 B 值处的高能粒子通量对太阳活动水平变化的响应较为明显, 峰值滞后时间也较短.

在太阳活动高年, 大气密度的增加引起高能粒子损失增强, 出现通量谷值, 在太阳活动低年, 大气密度下降, 宇宙线反照中子衰变形成的高能质子源不断使高能质子的通量增加, 最终出现峰值. 低年的滞后时间较高年更长, 说明对于低高度内辐射带, 高能质子的损失机制比源的作用效果更迅速.

对于同一地磁坐标点, 出现了高能道的质子通量谷值出现时间比低能道的滞后更长一点的现象 (见图 3), 分析认为这可能与辐射带高能质子的源有关. 银河宇宙线反照中子衰变形成内辐射带的高能质子, 而银河宇宙线粒子能谱在几十 MeV 到几百 MeV 之间存在粒子通量随能量增长的情况, 这可能使内辐射带某些能段上高能量质子的直接源相对强于低能量质子的源, 因而高能道的质子对大气密度的响应更慢一些.

2.2 南大西洋异常区高能质子通量随太阳周期活动的变化

通过对磁场 B-L 坐标下高能质子通量随太阳周期活动变化的分析, 可以进一步研究太阳周期活动对低轨道高度上高能质子通量分布的影响. 图 4 和图 5 分别给出的是 NOAA-15 监测的太阳活动高年和太阳活动低年南大西洋异常区能量大于 16 MeV 质子的通量分布. 考虑通量变化存在一定的滞后期, 高年取 2002 年 1—3 月的平均值, 低年取 2009 年 10—12 月的平均值.

比较图 4 与图 5 中南大西洋异常区的轮廓可以看出, 图中显示的太阳活动高年的轮廓分布明显较低年小, 而且南大西洋异常区中心的高通量区也明显小于低年. 图 6 为 $-25°$ 纬线上高年和低年通量随经度的变化情况. $-25°$ 纬线穿越了南大西洋异常区中心. 从图中可看出, 高年通量大于 $10^3\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$ 的经度跨度约为 70°, 而低年约为 85°. 高年在 $-25°$ 纬线上大于 16 MeV 高能质子的平均通量约为 $9.6\times10^2\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$, 而低年约为 $1.3\times10^3\,\mathrm{cm^{-2}\cdot s^{-1}}$, 低年较高年约高 35%.

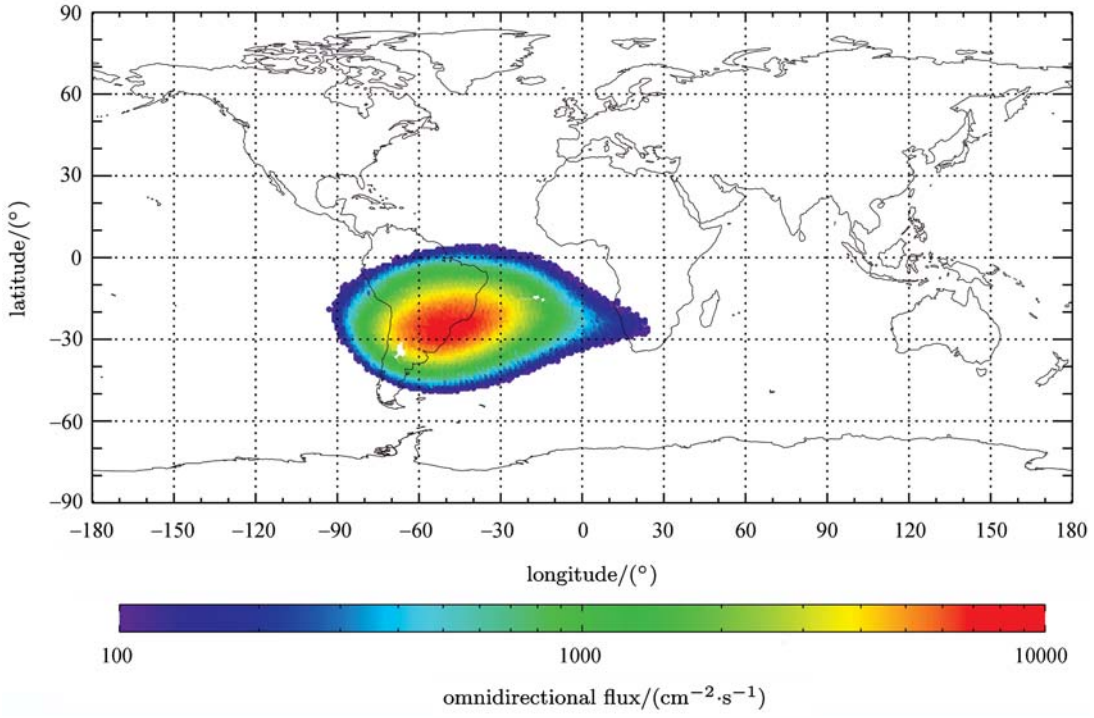


图 4 太阳活动高年南大西洋异常区大于 16 MeV 高能质子的通量分布

Fig. 4 Flux distribution of protons greater than 16MeV at SAA on solar maximum

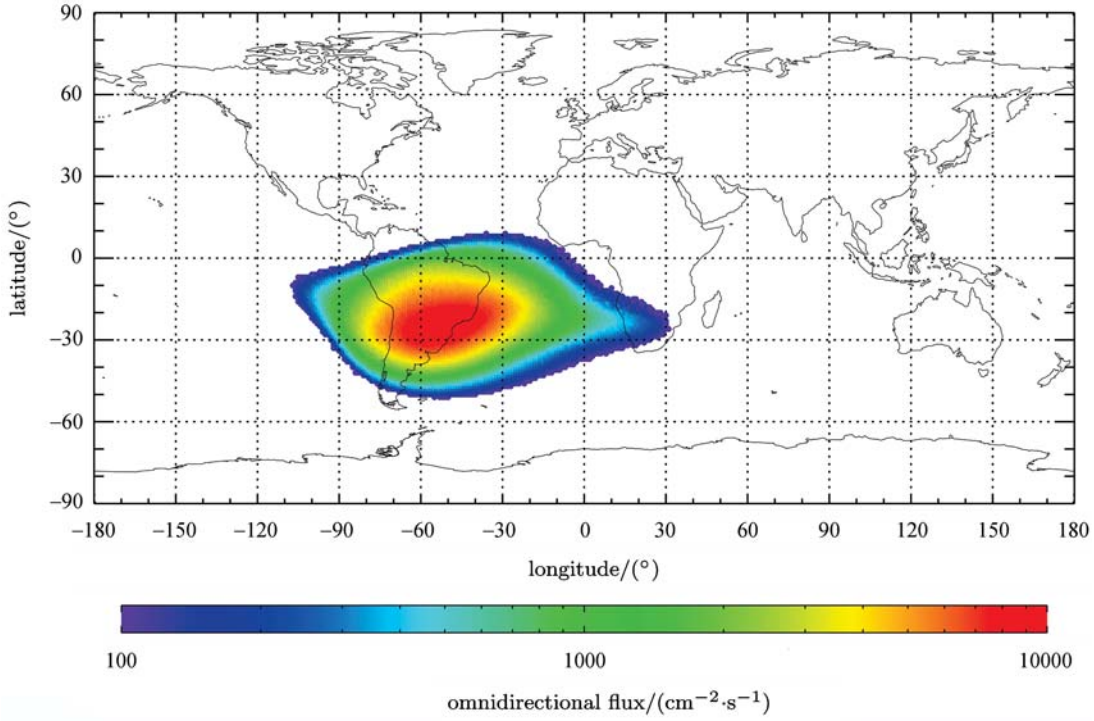


图 5 太阳活动低年南大西洋异常区大于 16 MeV 高能质子的通量分布

Fig. 5 Flux distribution of protons greater than 16 MeV at SAA on solar minimum

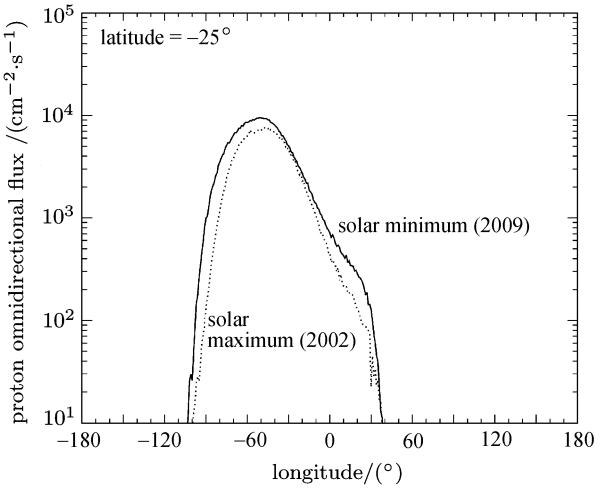


图 6 −25° 纬线上太阳活动高年和低年大于 16 MeV 高能质子通量随经度的变化情况

Fig. 6 Flux variations of protons greater than 16 MeV at the line of −25° latitude on solar maximum and solar minimum

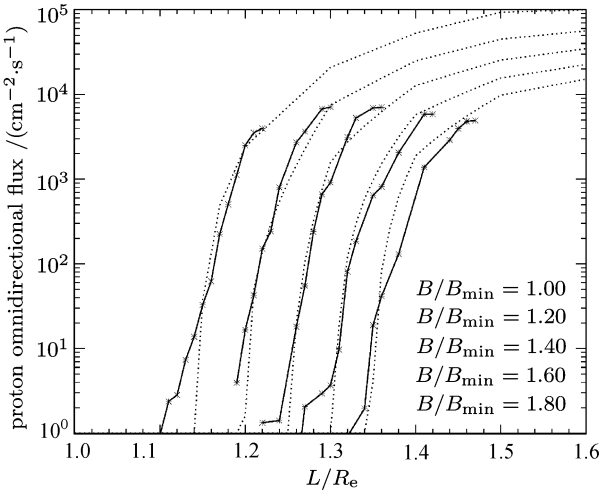


图 7 太阳活动高年能量 > 16 MeV 的高能质子通量 (点划线) 与 AP8 模型 (虚线) 的比较

Fig. 7 Comparison between observation data and results by model AP8 on solar maximum

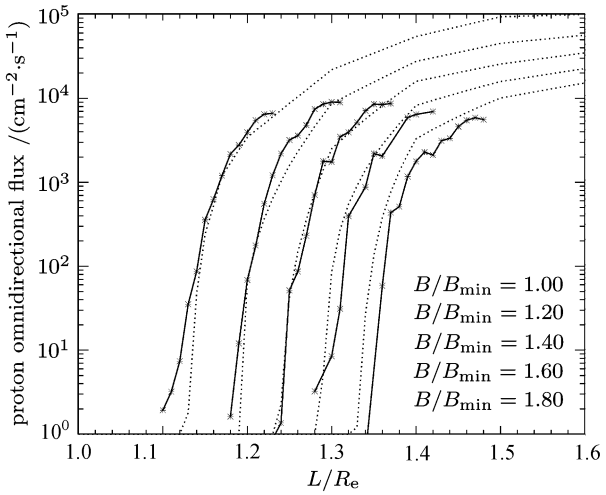


图 8 太阳活动低年能量 > 16 MeV 的高能质子通量 (点划线) 与 AP8 模型 (虚线) 的比较

Fig. 8 Comparison between observation data and results by model AP8 on solar minimum

2.3 与 AP8 模型的对比

目前, 航天工程中常用的辐射带高能质子模型是 AP8 模型. 本文对比了 NOAA-15 探测结果与 AP8 模型的异同. 图 7 和图 8 分别给出的是太阳活动高年 (2002 年 1—3 月) 以及太阳活动低年 (2009 年 10—12 月) 不同 $B/B_{\min}$ 下, 能量 > 16 MeV 的高能质子通量随 L 值的变化. 图中虚线是 AP8 模型的计算结果, 图中曲线从左到右分别对应 $B/B_{\min}$ 为 1.00, 1.20, 1.40, 1.60, 1.80 的情况. 从图中可以看出, 对于 $B/B_{\min}$ 较小的情况, NOAA-15 的探测结果与 AP8 模型的结果差距不大, 而对于 $B/B_{\min}$ 为 1.6, 1.8 的情况, 模型计算结果高估了实际情况.

AP8 模型计算时采用的磁场坐标是 IGRF 模式按卫星探测时间计算得到的, 因此, AP8 模型的计算结果包含了磁场长期变化的因素. 从 20 世纪六七十年代至今, 地磁场存在偶极矩长期缓慢衰减的变化. 随着磁场逐渐衰减, 粒子的漂移壳会下降, 对于高 $B/B_{\min}$ 的情况, 从六七十年代到近期, 大气对高能粒子的影响可能显著增加, 而 AP8 模型是根据当时的探测数据建立的, 因此仅考虑磁场变化的影响可能会放大低高度内辐射带局部高能质子通量的增强.

3 结论

通过对 NOAA-15 卫星 1998—2011 年大于一个太阳活动周观测数据的统计分析, 研究了低高度内辐射带高能质子通量分布随太阳活动水平变化的特性及其物理机制. 得出如下结论.

(1) 低高度内辐射带高能质子通量存在与太阳长周期活动相反的变化趋势, 太阳活动水平高时, 质子通量小. 这种反向相关性与磁壳参数 L 及磁场 B 有关; L 值越低、B 值越大, 这种反向相关性越明显. 造成这种反相关现象的主要原因是太阳活动对高层大气密度的影响. 对于 L 和 B 值不同的空间点, 过其点的高能质子运动轨迹不同, 则受高层大气的影响也不同, 这使 L 和 B 成为决定高能质子通量随太阳周期活动变化显著与否的因素.

(2) 高能质子通量随太阳活动水平的变化存在明显的滞后现象, L 值越高、B 值越小, 滞后现象就越明显, 滞后严重时可以达到一年左右的时间. 高能质子通量随太阳活动水平变化的滞后现象反映出低高度内辐射带高能质子的源与损失达到平衡是一个中长期过程. 这种滞后使得在相同太阳活动水平情况下, 同一空间点的高能质子通量也可能不同.

(3) 通过 NOAA-15 卫星观测资料与 AP8 模型计算结果的比较发现, 对于高磁场值处的高能质子通量, 模型计算结果明显高于卫星观测资料. 分析认为, 利用 AP8 模型时, 仅考虑磁场变化对质子通量的影响可能会放大低高度内辐射带局部高能质子通量的增强.

综上研究结果与分析, 认为要建立准确的低高度内辐射带高能质子中长期变化模型, 必须考虑太阳周期活动对低高度内辐射带高能质子影响的复杂性. 另外, 对于低高度内辐射带高能质子的长期模型, 在考虑地磁场长期缓变带来的变化时, 还必须考虑高层大气对这种变化的抑制作用.

参考文献

[1] Fung S F. Recent development in the NASA trapped radiation models [G]//Radiation Belts. AGU Books Board, 1997. 79-91

[2] Fang Xiaohua, Pu Zuyin. Drift shell tracing method and the secular variation of inner radiation flux [J]. *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 [J]. 空间科学学报, 2000, **20**(2):150-158)

[3] Pu Z Y, Xie L. Drift shell tracing and secular variation of inner zone high energy proton environment in the SAA [J]. *Adv. Space Sci.*, 2005, **36**:1973-1978

[4] Xie Lun, Pu Zuyin, Jiao Weixin, *et al.* The study of the secular variation of high energy proton environment of inner radiation in SAA. *Sci. China: D*, 2005, **35**(7):658-663. In Chinese (谢伦, 濮祖荫, 焦维新, 等. 南大西洋异常区内辐射带高能质子辐射环境长期变化的研究. 中国科学 D 辑, 2005, **35**(7):658-663)

[5] Zang Zenqun. The effect of the earth magnetic field long term changes on the calculation of proton flux in the radiation belts [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 1997, **17**(1):34-39. 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 [J]. 空间科学学报, 1997, **17**(1):34-39)

[6] Le Guiming, Ye Zonghai, Zhou Guocheng. Low altitude satellite orbit radiation belt particle environment variation due to geomagnetic field long term variation [J]. *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 [J]. 空间科学学报, 2001, **21**(3):238-245)

[7] Jiao Weixin, Pu Zuyin. The radiation environment within the south Atlantic anomaly region and the calculating trapped particles fluxes for low orbital satellite [J]. *Chin. J. Geophys.*, 1999, **42**(2):163-168. In Chinese (焦维新, 濮祖荫. 南大西洋地磁异常区的辐射环境与低轨卫星粒子辐射通量计算 [J]. 地球物理学报, 1999, **42**(2):163-168)

[8] Sawyer D M, Vette J I. AP-8 Trapped Radiation Environment for Solar Maximum and Solar Minimum [R]. NSSDC/WDC-A-R&S 76-06, 1976

[9] Vette J I. The AE-8 Trapped Electron Model Environment [R]. NSSDC/WDC-A-R&S 91-24, 1991

[10] Evans D S, Greer M S. Polar Orbiting Environmental Satellite Space Environment Monitor 2 Instrument Descriptions and Archive Data Documentation [R]. Boulder, Colorado: NOAA Technical Memorandum. 1.4, Space Environment Laboratory, 2004

[11] Roederer J G. Introduction to trapped particle flux mapping [G]//Radiation Belts: Models and Standards. Geophysical Monograph 97. Washington D C: American Geophysical Union, 1996. 149-153

[12] Roederer J G. Dynamics of Geomagnetically Trapped Radiation [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1970