

低高度空间高能质子通量分布计算^{*}

程永宏 薛炳森

(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

摘 要 介绍了 AP-8 模式、CRRESPRO 模式和 PSB97 模式,并用这 3 种模式分别计算低高度空间 300—1100 km 范围内的高能质子通量分布,由 IDL 软件绘出通量等值线图. AP-8 模式通量主要受银河宇宙线调制,即受太阳活动直接影响,与太阳活动高年相比,太阳活动低年的质子通量较大; CRRESPRO 模式中,因活动期和平静期的数据采集时间前后相差很短,从而使同一高度上两种环境条件下的通量分布相似. 模式之间的比较结果表明, AP-8 模式通量较小, CRRESPRO 模式通量较大, PSB97 模式通量介于二者之间,并与实测通量接近. PSB97 是为低高度(1000 km 以下)定制的模式,在低高度上优于 AP-8 模式和 CRRESPRO 模式,能较好地计算当前条件下的低高度高能质子通量.

关键词 AP-8 模式; CRRESPRO 模式; PSB97 模式; 质子通量

中图法分类号 P 41

Calculation of Flux Distribution of Energetic Proton at Low Altitude Space

CHENG Yonghong XUE Bingsen

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

Abstract AP-8 model, CRRESPRO model and PSB97 model are introduced in this paper and used to calculate the flux distribution of energetic proton between low altitude 300 and 1100 km, separately, and then the calculated flux distributions are plotted as contour graph by IDL software. AP-8 model flux is mainly modulated by galactic cosmic rays and is influenced directly by solar activity. Consequently, the proton flux is higher during the maximum part of the solar cycle than that during the minimum part. CRRESPRO model comprises conditions of active and quiet earth magnetic fields, which correspond to similar flux due to the short time difference of data collection at different earth magnetic conditions. Compared results between models show that AP-8 model flux is small, CRRESPRO model flux is large, and PSB97 model flux is between the two and is the nearest to the detected value. PSB97 model is compiled specially for low altitude (under 1000 kilometers) use and is applicable to calculate energetic proton flux at low altitude in current space environmental condition, significantly for prediction of energetic proton flux in SZ spacecraft orbit.

Key words AP-8 model, CRRESPRO model, PSB97 model, Proton flux

^{*} 中国科学院“空间辐射威胁应对辅助决策展示系统”课题资助(242305AS)

2004-09-30 收到原稿, 2005-03-07 收到修定稿

1 引言

地球近地空间是各种应用卫星、载人飞船、载人太空实验室的主要活动区域,区域内存在大量由地磁场捕获的高能带电粒子,严重影响航天器、探测仪器和宇航员的安全.为此,需要对内辐射带低高度空间的高能带电粒子环境及其通量分布进行研究.1958年Van Allen等人首次发现辐射带以来,高能带电粒子辐射环境的空间探测一直是各国科学探测卫星的重要任务之一,利用探测数据进行辐射带建模是辐射带研究的重大课题.从上世纪60年代到90年代,以大量卫星探测数据为基础,一系列的辐射带质子模式^{[1]~[3]}被建立,分别用于特定地磁场环境以及一定空间区域和能量范围的粒子通量计算.其中,AP-8模式、CRRESPRO模式和PSB97模式代表了不同时期被普遍接受的较成熟的模式.本文主要用这三种模式分别计算低高度空间300—1100 km范围内的高能质子通量分布,计算结果可为不同条件下的模式选用提供一定的参考.

2 模式构造背景

AP-8模式^[3]数据是二十多颗卫星探测结果的综合,模式使用了McIlwain's (1961) L - B 坐标空间,根据太阳活动状态的不同,分别编制了太阳活动低年模式AP-8-Min和活动高年模式AP-8-Max.模式忽略了外源场的影响,AP-8-Min模式和AP-8-Max模式分别使用了1962年的Jensen-Cain内源场模型和1967年的GSFC (12/66)内源场模型.AP-8模式为平均静态模式,可计算磁壳参量 $L = 1.17$ —7、能量范围在0.1—400 MeV的质子全向通量.

CRRESPRO模式^{[4]~[6]}由CRRES卫星上搭载的PROTEL质子望远镜收集的数据编制得到,坐标空间 L - λ 由磁壳参量 L 和磁纬 λ 确定.CRRESPRO模式同时使用了地磁内源场和外源场.内源场模型使用的是国际地磁参考场IGRF-1990,外源场使用的是1977年的Olson-Pfitzer静态模型.CRRESPRO分活动期和平静期两种情况,能够计算磁壳参量 $L = 1.0$ —5.5、能量在1—100 MeV范围的质子全向通量.

PSB97模式^[7]由SAMPEX卫星上的PET望远镜的探测数据编制得到,坐标空间 L - B 由磁壳参

量 L 和磁场强度 B 确定.模式使用了国际地磁参考场IGRF-1995,没有考虑外源场的影响.模式可计算磁壳参量 $L = 1.1$ —2.0、能量在18—500 MeV范围的质子平均方向通量.

3 模式通量计算与比较

分别用3种模式在300—1100 km高度上每隔100 km计算一组能量大于20 MeV和大于50 MeV的质子通量,并用IDL软件绘制通量等值线,得到一系列质子通量的空间分布图.计算结果表明:高度由低到高变化时,同一能量区间的质子通量增大,空间区域也增大;同一高度上,不同能量区间的通量分布不同,能量区间大,则通量大;通量由内向外的高低分布与地磁场线的分布相对应,正确反映了南大西洋地磁异常的特征.不同模式的通量计算结果相差很大,这里有选择地讨论典型高度300 km和800 km上、能量大于20 MeV的质子全向通量.

3.1 AP-8模式在300 km和800 km高度、能量大于20 MeV的质子通量分布

由图1可以看出,在同一高度下,AP-8-Min模式的通量比AP-8-Max模式的通量大,且通量中心向西北方向有小幅偏移.与300 km高度相比,800 km高度上的通量中心向北偏移,两模式通量大小的差别缩小.一般认为,质子通量变化的原因在于银河宇宙线和太阳宇宙线,一个太阳周平均模式下,在低高度的中低纬度上,太阳宇宙线对通量的贡献处于次要地位,通量的变化主要由银河宇宙线引起.银河宇宙线受太阳活动的调制,在太阳活动低年,银河宇宙线强度大;在太阳活动高年,银河宇宙线强度小^[8].因此,太阳活动低年的银河宇宙线在低高度能引发较多的质子,质子被地磁场捕获,从而使得AP-8-Min模式通量较大.

3.2 CRRESPRO模式在300 km和800 km高度、能量大于20 MeV的质子通量分布

由图2可以看出,CRRESPRO模式中活动期和平静期在同一高度上的通量分布相似,这是因为活动期和平静期的数据采集时间前后只相隔几个月,所以通量大小差别不大;与300 km高度相比,800 km高度上的通量分布较为分散,且通量中心向北有大幅偏移.

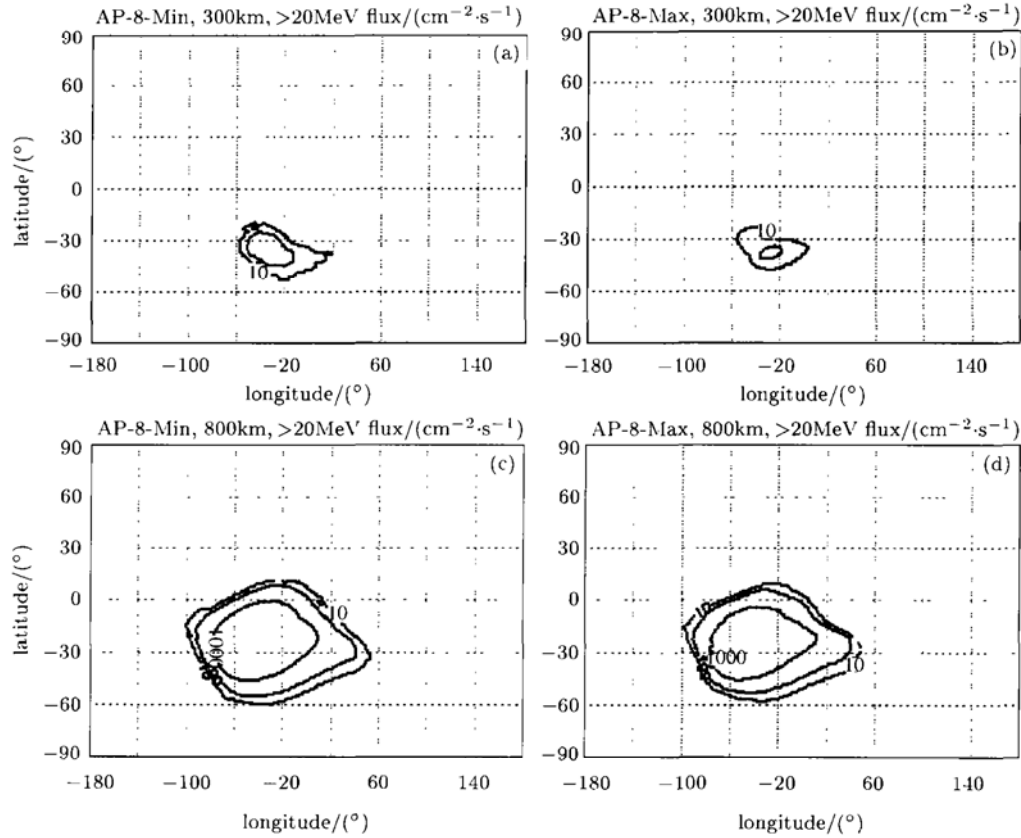


图 1 AP-8 模式质子全向通量分布

Fig.1 Omnidirectional proton flux distributions of AP-8-model

3.3 PSB97 模式在 300 km 和 800 km 高度、能量大于 20 MeV 的质子通量分布

由图 3 可以看出, 与上面两个模式相比, 在 300 km 和 800 km 高度上, PSB97 模式通量比 AP-8 模式大, 比 CRRESPRO 模式小. 高度增加时, 通量增大, 通量中心向北偏移.

3.4 模式通量与实测通量比较

由于客观条件的限制, 我们没有得到实测的质子全向通量分布图. 下面给出的是风云一号 D 星 (870 km 高度) 2004 年 7 月的实测方向通量. 由于 D 星探测器的张角较大, 为 60° , 可将该通量近似看作平均方向通量. 图 4(d) 中的 P3 是指探测的质子能量范围在 11.7—40 MeV, 将 800 km 高度的模式数据进行适当处理, 然后与实测通量比较.

AP-8 和 CRRESPRO 均是全向通量模式, 除以 4π 得到可与实测值比较的平均方向通量, 并把数据规划到 10—40 MeV 能量范围. PSB97 模式的最低能量为 18 MeV, 为了能与实测通量比较, 取大致相同的能量间隔 20—50 MeV. 处理后的数据如图 4 所

示.

AP-8 模式和 PSB97 模式的分布趋势与实测通量较为接近; CRRESPRO 模式和 PSB97 模式通量的中心与实测通量的中心位置大致相同. 由图 4 可见, PSB97 模式较为接近质子通量的真实分布. 另外, 采集 PSB97 模式数据的 SAMPEX 卫星运行在 520 km (近地点) 和 670 km (远地点) 的轨道上, 这也是在低高度数据收集方面优于 AP-8 模式和 CRRESPRO 模式 (CRRES 卫星轨道近地点 350 km 和远地点 33 584 km) 的地方. 然而, 实测通量并不是平均的方向通量, 而是与质子投掷角有关的, 有可能与真实的平均通量相差很大, 所以实测方向通量与 3 种模式的平均方向通量的比较, 只能作为定性的参考, 定量的分析还有待于进一步研究.

4 结果与讨论

3 种模式通量的差别很大, 其主要原因可能是

由收集数据期间的空间环境不同造成的。AP-8 是平均静态模式, 通量小, 分布稳定均匀, 主要受低强度银河宇宙线调制。CRRESPRO 模式的通量很

大, 比 AP-8 模式高一个数量级左右, 分布较为散乱。CRRESPRO 模式数据是在 1990 年 7 月至 1991 年 10 月的地磁活动短期内收集的, 当时的太阳质子

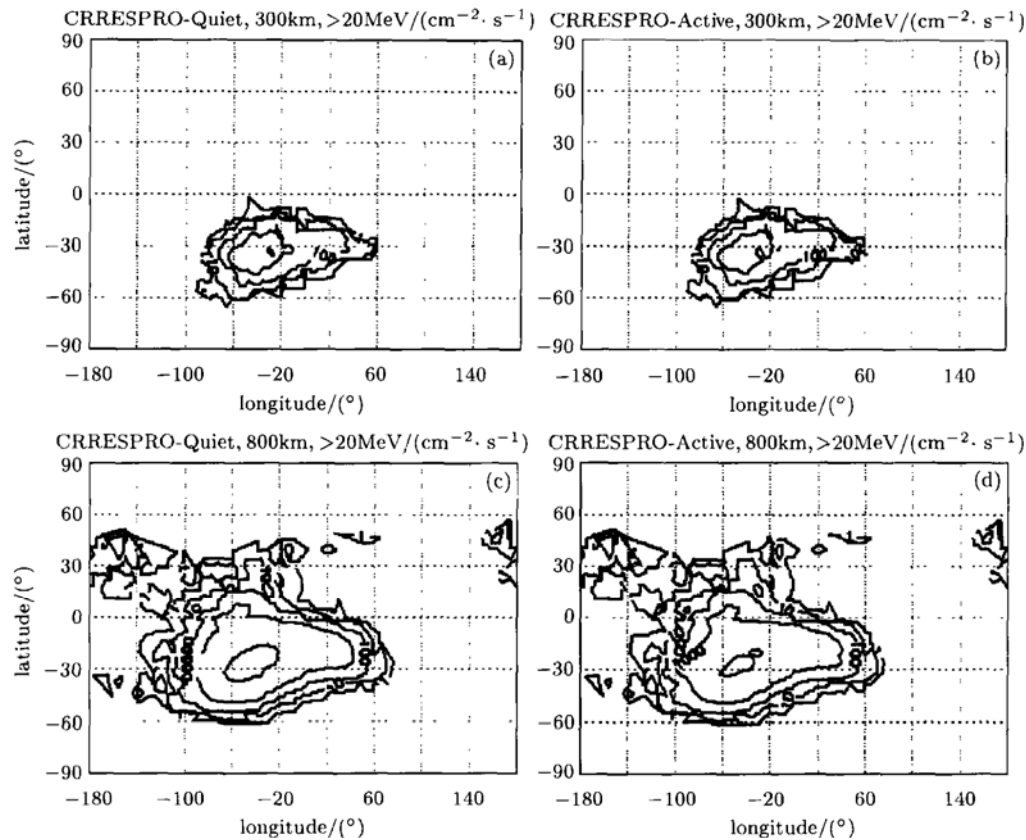


图 2 CRRESPRO 模式质子全向通量分布
Fig.2 Omnidirectional proton flux distributions of CRRESPRO-model

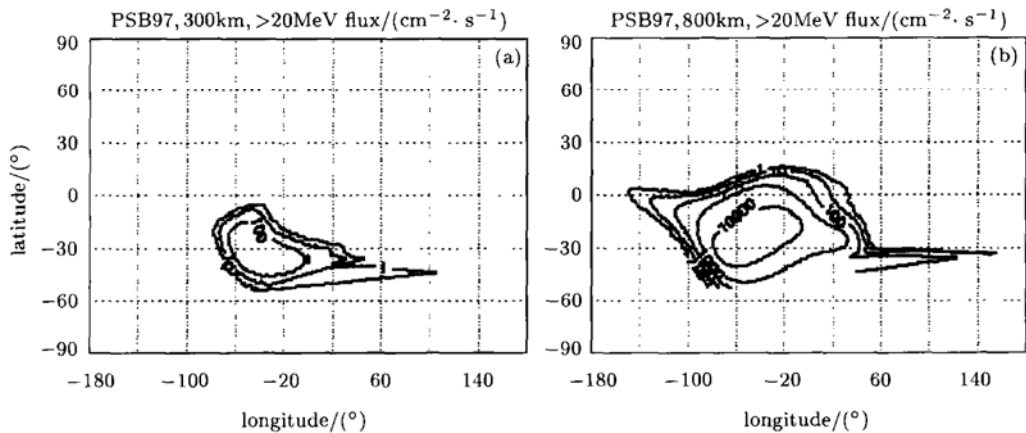


图 3 PSB97 模式质子全向通量分布
Fig.3 Omnidirectional proton flux distributions of PSB97-model

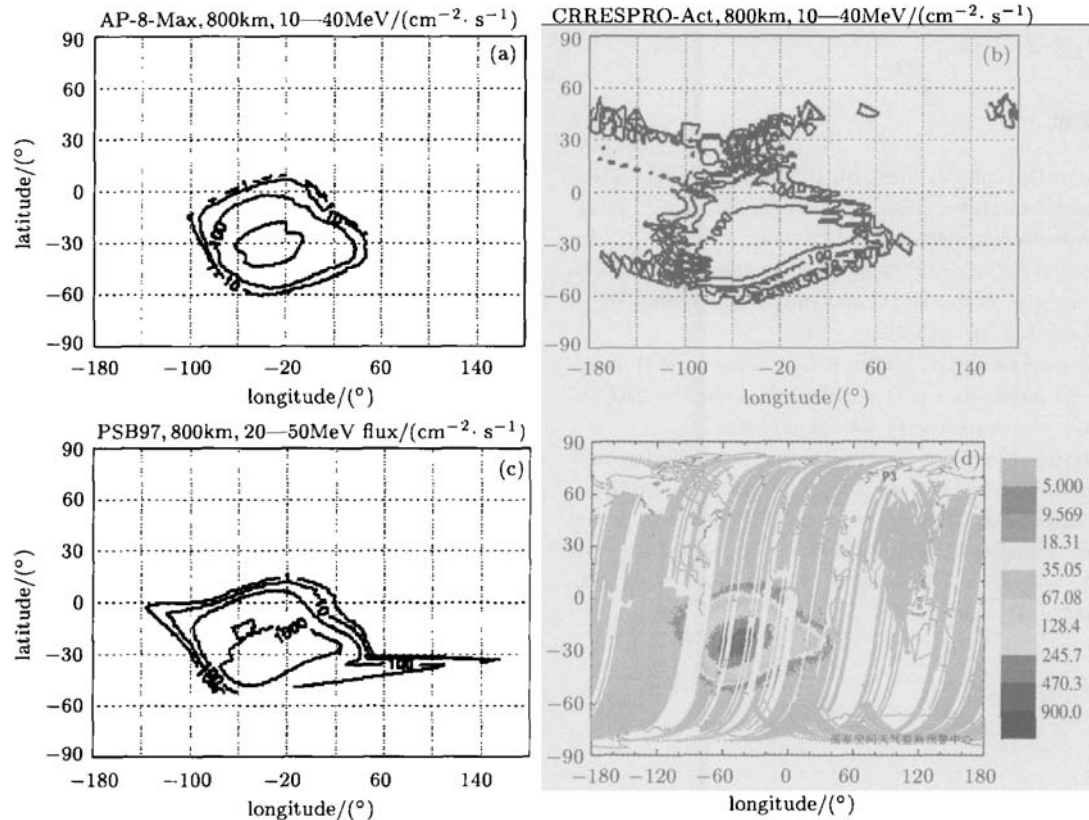


图 4 3 种模式与实测质子平均方向通量分布比较

Fig.4 Directional proton flux distributions of three models compared with that of detected flux

事件频繁, 高强度的太阳宇宙线主导了质子通量的变化。地磁场剧烈变动期间, 太阳风中的高能粒子向内磁层径向扩散, 并能运行到很低的高度, 从而使低高度质子通量急剧增加^[9]。PSB97 模式通量介于 CRRESPRO 模式和 AP-8 模式之间, 由于 PSB97 模式数据是从 1992 年 7 月至 1996 年间的 308 天中收集到的, 跨越半个太阳周期, 当时的太阳活动趋于平静, 太阳宇宙线和银河宇宙线的平均效果为中等强度, 所以 PSB97 模式通量处于中等大小。

从 800 km 通量分布图上可以看出, PSB97 模式通量中心较之 CRRESPRO 模式有向西的微小偏移, CRRESPRO 模式通量中心较之 AP-8 模式有向西的明显偏移。地磁场的中心每年向西方向有微小漂移, 通量中心的偏移可能是由地磁场的漂移造成的。在低高度上, 质子的运动主要受地磁场控制, 地磁场的空间位形是内辐射带高能质子空间分布位形的决定性因素^[10]。AP-8、CRRESPRO 和 PSB97 模式所用的地磁模型分别是由 20 世纪 60 年代、1990

年和 1995 年的地磁参数构建的, 年代愈新, 磁场中心向西漂移愈显著, 从而通量中心向西漂移亦愈显著。

不同模式算得的质子通量的大小、分布和中心位置不同, 但通量随高度降低而减小的趋势是相同的, 且都有一定的截止高度。实际内辐射带中具有一定动能的质子在地球磁场的作用下沿磁力线方向不断减速, 若磁镜点高于大气层以上, 则质子到达磁镜点后反弹, 向回运动; 若磁镜点位于大气层以下, 则质子将与大气中性分子相互碰撞而消失。因此, 不管是银河宇宙线还是太阳宇宙线, 它们引发的质子运动均在一定的高度截止, 模式计算结果真实反映了这一结论。

3 种模式计算了 3 种不同空间环境下的质子通量。AP-8 模式适合于计算长期的计量效应, CRRESPRO 模式适合于计算短期的高质子通量, PSB97 模式是为低高度定制的模式, 可建议用于计算当前太阳活动条件下神舟飞船轨道上的质子通量, 这对

当前我国载人飞船的空间环境预报和监测具有十分重要的意义。

参考文献

- [1] John D, Gaffer J, Dieter B. NASA/National space science data center, Trapped radiation models. *J. Spacecraft Rockets*, 1994, **31**(2):172—176
- [2] Daly E J, Lemaire J, Heynderickx D, Rodgers D J. Problems with models of the radiation belts. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, 1996, **43**(2):403—415
- [3] Gussenhoven M S, Mullen E G, Brautigam D H. Near-earth radiation model deficiencies as seen on CRRES. *Adv. Space Res.*, 1994, **14**(10):927—941
- [4] Heynderickx D, Kruglanski M. Trapped radiation environment model development. Technical Note 10, 1998
- [5] Gussenhoven M S, Mullen E G, Brautigam D H. Improved understanding of the earth's radiation belts from the CRRES satellite. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, 1996, **43**(2):353—368
- [6] Gussenhoven M S *et al.* CRRES high energy proton flux maps. *IEEE. Trans. Nucl. Sci.*, 1993, **40**(6):1450—1457
- [7] Heynderickx D, Kruglanski M, Pierrard V. Trapped radiation environment model development, Technical Note 5, 1998
- [8] DU Heng, YE Zonghai. Space environmental manual of aircraft in low altitude orbits. Beijing: National Defense Industry Press, 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)
- [9] CHEN Guifu, YE Zonghai *et al.* Time variation of the inner radiation belt proton intensities during solar proton events. *Chin. J. Geophys.*, 1993, **36**(4):428—433. in Chinese (陈贵福, 叶宗海等. 太阳质子事件期间内辐射带质子通量的变化. 地球物理学报, 1993, **36**(4):428—433)
- [10] LE Guiming, YE Zonghai. The study of space distribution configuration of the radbelt protons with high energy. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(4):278—285. in Chinese (乐贵明, 叶宗海. 低高度内辐射带高能质子空间分布位形的研究. 空间科学学报, 2003, **23**(4):278—285)