0254-6124/2019/39(1)-018–10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHONG Qiuzhen, WEI Lihang, LIN Ruilin, ZHENG Jinlei, LIU Siqing. Statistical model of the relativistic electron fluence forecast at geostationary orbit (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2019, **39**(1): 18-27. DOI:10.11728/cjss2019.01.018

GEO 轨道相对论电子日积分通量预报统计建模

钟秋珍[1,2] 耒历航[1,2] 林瑞淋[1] 郑金磊[3] 刘四清[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(美国阿拉巴马汉茨维尔大学空间科学学院 汉茨维尔 AL35805)

摘 要 基于辐射带相对论电子哨声波局地加速理论, 将地磁 *AE* 指数作为源电子通量和通量各向异性的指标, 将地磁 *Dst* 指数作为损失机制的指标, 利用滑动窗口线性滤波器方法, 建立了一个地球静止轨道大于 2 MeV 相对论电子预报模型. 利用该模型开展了 2000—2009 年地球静止轨道相对论电子通量预报试验. 研究发现, 这 10 年总预报效率为 0.818, 2003 年的预报效率 (0.633) 最低, 2009 年的预报效率 (0.856) 最高. 模型预报效果与持续模型相比有很大提高, 略低于利用太阳风参数作为输入的同类预报模型的预报效果. 这说明即使在缺少太阳风参数的情况下, 该模型利用地磁扰动参数也能取得较好的预报效果. 当模型输入参数增加了太阳风速度时, 即综合考虑了行星际扰动和磁层扰动对辐射带粒子加速过程的影响, 模型逐年的预报效率进一步提升. 其中, 2005 年的预报效率提升了 9.5%, 这 10 年的总预报效率增加到 0.848, 预报值与实测值之间的线性相关系数为 0.918, 均方根误差为 0.422.

关键词 地球静止轨道, 哨声波局地加速, 地磁 *AE* 指数, 太阳风速度, 相对论电子预报

中图分类号 P 353

Statistical Model of the Relativistic Electron Fluence Forecast at Geostationary Orbit

ZHONG Qiuzhen[1,2] WEI Lihang[1,2] LIN Ruilin[1]

ZHENG Jinlei[3] LIU Siqing[1,2]

1(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

3(*Department of Space Science, University of Alabama in Huntsville, Huntsville AL*35805)

Abstract Based on the theory of local acceleration by chorus mode wave, *AE* index is selected as a good indicator for both source electron flux and flux anisotropy, and *Dst* index is selected as a good indicator for relativistic electron loss. By use of *AE* and *Dst* indices as input parameters, a prediction model for relativistic electrons at GEO orbit has been established on the basis of linear filter technology. The results are as follows. The total Prediction Efficiency (PE) of our model for the

2018-01-19 收到原稿, 2018-07-10 收到修定稿

E-mail: zhongqz@nssc.ac.cn

data from 2000 to 2009 is 0.818. The highest PE is about 0.856, which occurred in 2009. The lowest PE is about 0.663, which occurred in 2003. The prediction accuracy of the model is significantly better than that of the persistence model and is slightly less than the model developed by the same method but taking the solar wind as the input parameters. Furthermore, the model is improved by taking solar wind speed as an additional input parameter. The values of PE from 2000 to 2009 increase every year. The PE of 2005 is increased by 9.5%. The total prediction efficiency from 2000 to 2009 increased to 0.848. The linear correlation coefficient between forecasts and observations is 0.918, and the root mean square error is 0.422.

Key words Geostationary orbit, Local acceleration by chorus mode wave, AE index, Solar wind speed, Relativistic electron forecast

0 引言

地球静止轨道位于外辐射带的边缘, 这个区域充满了能量高达 MeV 量级的高能电子, 即相对论电子. 相对论电子速度接近光速, 可以穿透卫星的屏蔽层并在内部电介质上聚集, 造成卫星内部电介质深层充电放电过程, 进而可能导致卫星发生故障甚至报废. 因此, 相对论电子增强事件是静止轨道卫星面临的最主要威胁之一. 深层充电引起 DRA δ 卫星出现虚假指令, 导致高度测量装置出现跳变, 即开关异常事件. Wrenn 等 [1] 统计了 1991 年至 2000 年 DRA δ 卫星高度测量装置开关异常事件和静止轨道区域能量大于 2 MeV 的电子连续两天通量之间的关系. 研究发现: 在通量高于 $1\times10^9\,\mathrm{cm^{-2}\cdot d^{-1}\cdot sr^{-1}}$ 时, 开关异常发生的比例为 31.6%; 在通量为 $10^8\sim10^9\,\mathrm{cm^{-2}\cdot d^{-1}\cdot sr^{-1}}$ 时, 发生比例为 10.7%; 而在通量低于 $1\times10^8\,\mathrm{cm^{-2}\cdot d^{-1}\cdot sr^{-1}}$ 时, 发生比例仅为 0.3%.

外辐射带对行星际和地磁条件的扰动十分敏感, 其电子能谱、通量, 投掷角分布及整个外辐射带形态经常随之发生剧烈变化. 外辐射带电子的起源、加速以及损失机制一直是空间物理领域的一大难题. 磁暴期间相对论电子通量的变化取决于电子加速机制与损失机制的平衡. Li 等 [2]、Friedel[3]、Millan 等 [4] 对电子加速机制、损失机制以及二者相互制衡的关系进行了回顾和讨论.

在磁暴主相期间, 磁层中各个能量段的电子通量会突然下降, 但是能量较低的电子通量首先大幅恢复增长, 随后能量较高的电子通量开始增长, 这时能量较低的电子通量则逐渐降低 [5]. 传统理论认为, 磁暴引发的 ULF 波导致外辐射带电子向内径向扩散, 产生加速. 但这种加速机制很难解释磁暴恢复相期间相对论电子的大幅度上升及其上升的时间尺度. 基于此, Summers 等 [6]、Horne 等 [7]、Thorne 等 [8] 及 Gao 等 [9] 提出哨声模合声波与电子的回旋共振作用是导致外辐射带中相对论电子加速的主要物理机制. 合声波可能是由亚暴期间源电子注入激发产生的 [10,11]. 一些观测证明, 在亚暴期间, 磁尾注入大量能量为几十到几百 keV 的电子 [12−14]. 这些中能电子的通量增长通常比相对论电子的通量增长提前 1~3 天. 观测表明, 在磁暴恢复相期间, 长时间高强度亚暴活动是导致磁层相对论电子通量增长并超过暴前水平的一个重要原因 [15].

地球静止轨道辐射环境变化会对卫星产生严重影响. 已有很多研究基于外辐射带电子的不同加速机制和先兆因子建立了地球静止轨道相对论电子通量预报模式. 1990 年 Baker[16] 利用太阳风参数和线性滤波技术预测了 6.6 R_e 处的相对论电子通量. Li 等 [17] 基于径向扩散理论, 提出了地球静止轨道相对论电子通量预报模型 [17]. Turner 等 [18] 利用低能电子和相对论电子通量的相关性, 建立了基于低能电子通量变化的相对论电子通量预报模型. He 等 [19] 基于 ULF 波加速机制, 利用 Pi1 和 Pi2 地磁脉动作为种子电子的指标, 利用 Pc5 地磁脉动作为相对论电子加速效果的指标, 建立了相对论电子预报模型. 基于相对论电子通量变化与太阳风扰动、磁层扰动之间的非线性变化关系, 也有研究利用机器学习方法来建立相对论电子预报模型. Xue 等 [20] 利用全连接神经网络模型, 使用高能电子通量、日平均太阳风速度、太阳风等离子体密度、行星际磁场总强度以及这

三个参数相对于前一日的变化作为输入量, 预报第二天相对论电子通量. Ling 等 [21] 采用单隐层神经网络结构, 将连续 10 天的历史电子通量和连续 7 天的逐日 Kp 指数之和作为输入, 提前 1~3 天预报静止轨道大于 2 MeV 的相对论电子通量. Wang 等 [22] 利用支持向量机开展了静止轨道相对论电子事件预报试验. 上述模型用到的输入参数可以分为二类, 一是太阳风参数, 二是是磁层扰动参数. 磁层扰动参数包括地磁扰动参数和磁层内能量粒子的变化等.

地磁亚暴活动与相对论电子通量密切相关. 激发哨声波的两个重要条件是源电子通量及源电子温度各向异性, 而这两个条件与亚暴活动密切相关. 源电子通量及温度各向异性程度的增强会加强局地加速, 影响相对论电子的产生. 因此, 地磁 AE 指数可以作为相对论电子产生率的指标. 对 2010 年清明节期间相对论电子通量增强事件 [23] 分析发现, 磁暴强度对辐射带不同能段电子分布具有调制作用. 因此, 选取 Dst 指数作为同步轨道相对论电子损失率指标因子. 这里基于哨声波局地加速机制, 选取地磁亚暴 AE 指数和 Dst 指数作为预报因子, 对地球静止轨道相对论电子通量预报进行统计建模, 寻求在太阳风缺失时相对论电子预报的替代参量, 提升预报准确率.

1 数据

在数据统计和预报建模过程中, 相对论电子通量数据采用美国 GOES 系列卫星测量的能量大于 2 MeV 的电子日积分通量. 这些科学数据来源于 NASA 的空间物理数据库, 已除去质子污染. GOES 系列卫星覆盖的年份不同, 数据质量也有差别. 表 1 给出了 GOES-10, GOES-11 和 GOES-12 卫星观测数据的时间范围及坏数据天数.

考虑每颗卫星的数据质量以及数据的连续性, 1999−2005 年选取 GOES-10 卫星数据, 2006 年选取 GOES-12 卫星数据, 2007−2009 年选取 GOES-11 卫星数据. 不同卫星的观测结果有一定偏差. 由于 GOES-10 卫星观测覆盖的时间跨度最长, 这里以 GOES-10 卫星 2006 至 2009 年的数据为标准, 对 GOES-11 和 GOES-12 卫星的观测数据通过非线性拟合进行处理.

图 1(a) 给出了 2006 年 GOES-10 和 GOES-12 卫星数据散点, 红色曲线的拟合公式为

$$y = -44.035\,571 + 18.277\,778x - 2.233\,022\,8x^2 + 0.095\,456\,205x^3,$$

表 1 1999−2009 年 GOES-10, GOES-11 和 GOES-12 观测数据坏数据天数

Table 1 Bad data days for GOES-10, GOES-11 and GOES-12 satellites from 1999 to 2009

年份	GOES-10		GOES-11		GOES-12	
	坏数据天数	比例	坏数据天数	比例	坏数据天数	比例
1999	10	0.027	—	—	—	—
2000	8	0.022	—	—	—	—
2001	1	0.003	—	—	—	—
2002	1	0.003	—	—	—	—
2003	4	0.011	—	—	243	0.666
2004	2	0.005	—	—	2	0.005
2005	4	0.011	—	—	1	0.003
2006	86	0.236	182	0.498	1	0.003
2007	69	0.189	3	0.008	14	0.038
2008	44	0.120	1	0.003	21	0.057
2009	33	0.090	1	0.003	100	0.274

注 阴影部分为所选取的数据.

拟合度 CHISQ 为 9.255 692 3. 图 1(b) 给出了 2007—2009 年 GOES-10 和 GOES-11 卫星数据散点, 红色曲线的拟合公式为

$$y = 12.240\,431 - 3.579\,168\,6x + 0.551\,173\,35x^2 - 0.021\,897\,278x^3,$$

拟合度 CHISQ 为 18.175 803. 图 2 给出了 2006—2009 年 GOES-10, GOES-11 和 GOES-12 卫星观测的大于 2 MeV 的相对论电子通量和拟合后的通量. 源电子通量采用的是极轨卫星 NOAA 15 观测数据. NOAA 15 搭载的中能质子探测器可以探测 >30 keV, >100 keV 及 >300 keV 的电子通量. 探测器有两个探头, 一个探头指向天顶, 另外一个探头指向与前一个探头指向垂直. NOAA 15 测量的 $L>2$ 的数据基本是中高纬地区数据, 这些区域的磁场方向与地面之间的角度接近于垂直. 因此可以认为指向天顶探头测量的是投掷角接近 0° 的电子, 与之垂直探头测量的是投掷角接近 90° 的电子.

地磁 *AE* 指数和 *Dst* 指数采用日本京都大学地磁数据中心 (World Data Center for Geomagnetism,

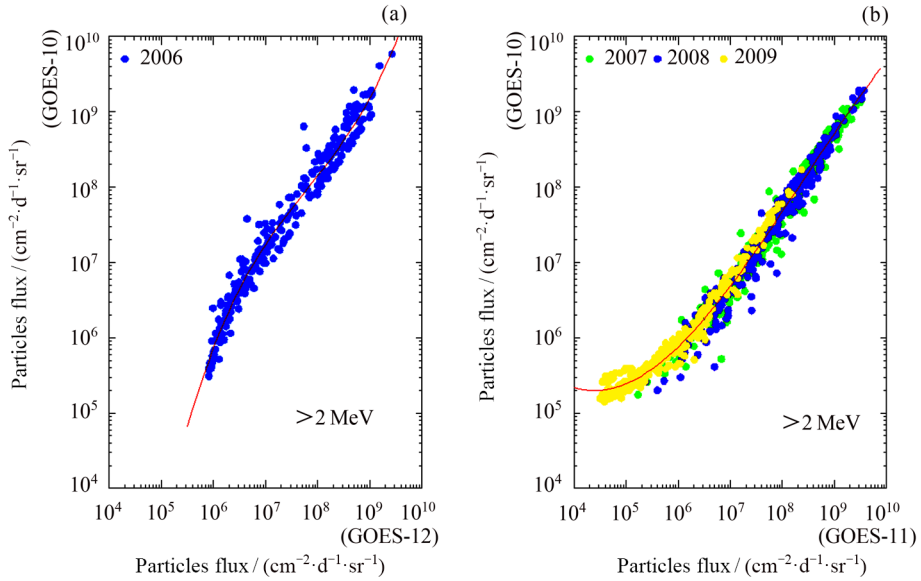


图 1 不同年份 GOES-10 和 GOES-12 (a) 及 GOES-10 和 GOES-11 (b) 卫星的观测数据

Fig. 1 Observations of GOES-10, GOES-12 (a) and GOES-10, GOES-11 (b) from 2006 to 2009

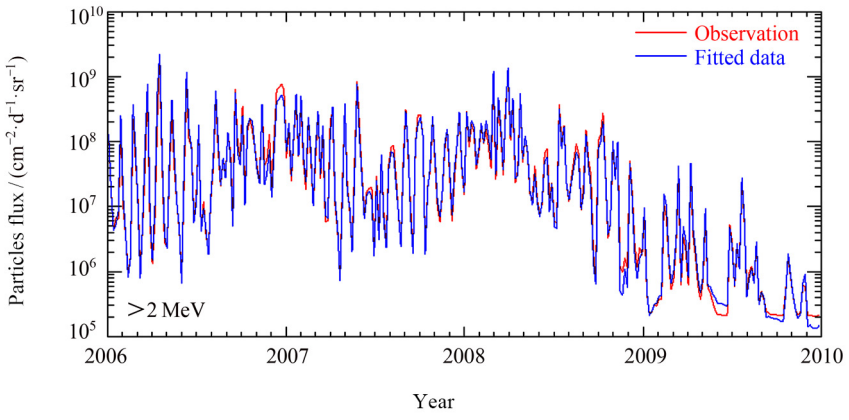


图 2 2006—2009 年 GOES 卫星观测的大于 2 MeV 相对论电子通量和拟合后的通量

Fig. 2 Flux of relativistic electrons with energies greater than 2 MeV obtained by GOES and fitting method from 2006 to 2009

Kyoto) 的数据. 太阳风数据采用 ACE 卫星测量的 1 h 平均的太阳风速度.

2 参数分析

2.1 地磁 *AE* 指数与源电子的统计关系

激发哨声波的两个重要条件是源电子通量以及源电子温度的各向异性. 首先统计分析地磁 *AE* 指数与源电子的相关性. 地磁 *AE* 指数采用日平均值, 源电子能量为 30~100 keV. 为了确保在不同磁暴条件下计算范围能基本涵盖整个辐射带区域, 采用 L 为 2~8 区域的日平均积分通量. $L>8$ 区域的源电子通量很低, 对结果几乎没有影响, 因此不计入 L 值更高区域的通量.

图 3 给出了 2003 年地磁 *AE* 指数与源电子通量的关系. 因为二者在对数坐标下呈现出较好的相关性, 因此在分析建模中采用的是对数值. 从图 3 可以看出, 源电子通量对地磁亚暴的响应没有时间延迟, 而且线性相关系数随延迟时间周期性变化, 最显著的是准 27 天周期. 这是由于冕洞引起的太阳风高速流具有准 27 天周期, 因此太阳风高速流驱动下的地磁活动以及由此引起的源电子通量也具有准 27 天周期.

图 4 给出了 2005 年地磁 *AE* 指数与源电子通量各向异性的相关关系. 这里用 0° 投掷角电子通量 F_0 与 90° 投掷角电子通量 F_{90} 的比值 F_0/F_{90} 表征源电子通量各向异性的程度.

由图 5 可以看出, 地磁 *AE* 指数与源电子通量及其各向异性有较强的线性相关性. 2003 年 *AE* 指数与源电子通量的相关系数最高, 达 0.9253; 2009 年

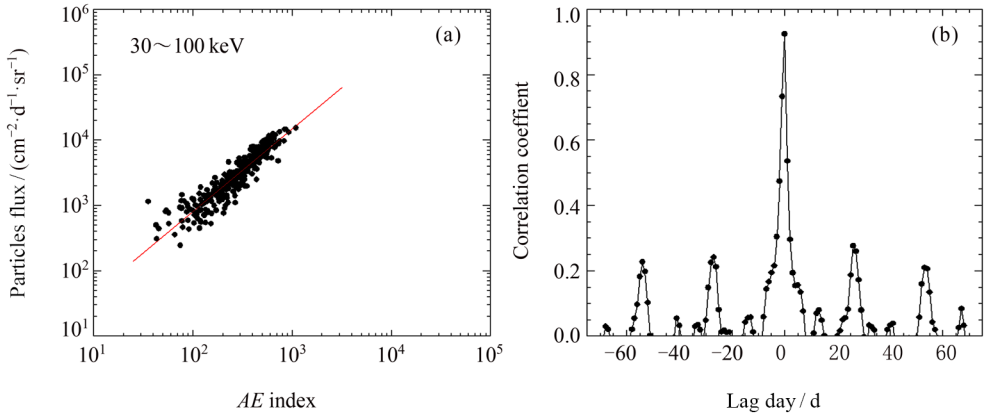


图 3 2003 年源电子通量与地磁 *AE* 指数的散点分布 (a) 及相关性 (b)

Fig. 3 Distribution (a) and correlation analysis (b) of source electron flux and *AE* in for 2003

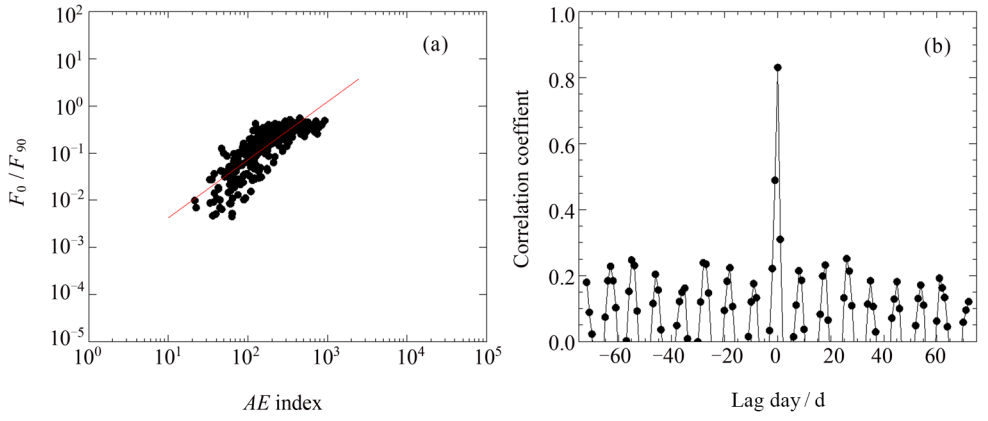


图 4 2005 年源电子通量各向异性程度和地磁 *AE* 指数的散点分布 (a) 及相关性 (b)

Fig. 4 Distribution (a) and correlation analysis (b) of the source electron flux anisotropy and *AE* index in 2005

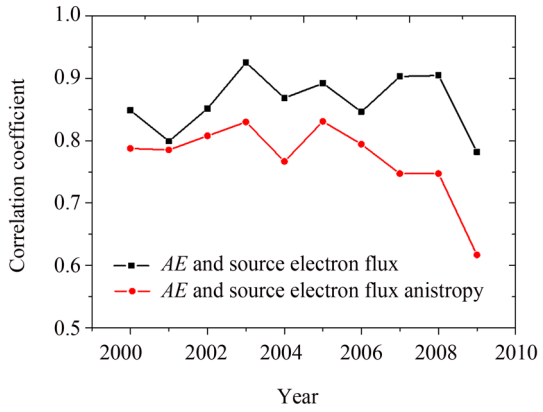


图 5 地磁 AE 指数、源电子通量及源电子通量各向异性的线性相关性

Fig. 5 Linear correlation coefficient between the logarithm of source electron flux, the source electron flux anisotropy and AE index

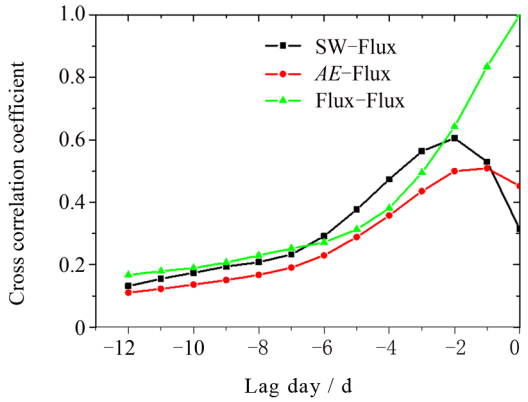


图 6 太阳风速度、地磁 AE 指数与 GEO 轨道相对论电子通量以及相对论电子通量自身之间的线性相关关系

Fig. 6 Linear correlation coefficients between solar wind speed, AE index and GEO flux with different lag days, and self-correlation coefficients of GEO flux with different lag days

最低, 为 0.7818. 2005 年 AE 指数与源电子通量各向异性的相关系数最高, 达 0.8310; 2009 年最低, 为 0.617.

前面的分析进一步说明地磁 AE 指数与激发哨声波的两个条件——源电子通量和通量分布各向异性之间密切相关. 因此可以利用地磁 AE 指数作为源电子通量和哨声波局地加速机制的指标.

2.2 GEO 轨道相对论电子通量与地磁 AE 指数和太阳风参数的关系

相对论电子通量与地磁 AE 指数和太阳风参数之间的关系分别对应 GEO 轨道相对论电子通量预报的两类输入参数. 图 6 给出了不同滞后时间下, 地磁 AE 指数、太阳风速度与相对论电子通量以及相对论电子通量自身的线性相关关系. 从图 6 可以看出, 随着时间延长, 相关性逐渐降低. 相对论电子通量滞后一天的自相关系数达 0.8 以上, 这与磁暴或亚暴过后外辐射带相对论电子通量通常能维持较长时间密切相关. 因此, 在很多经验模式中, 相对论电子通量历史值是重要的输入参数. 太阳风速度与相对论电子通量的线性相关性比地磁 AE 指数的相关性强, 在 Baker 的模式 [16] 和径向扩散模式中 [17] 均采用太阳风参数作为预报因子.

综上所述, 地磁 AE 指数与相对论电子通量的相关性比其与太阳风参数的相关性弱. 但由于地磁 AE 指数是地面观测结果, 数据质量稳定且连续可靠, 并能快速反映源电子的变化, 与激发哨声波的条件密切相关, 因此利用地磁 AE 指数开展相对论电子预报建模研究很有意义.

3 预报模型及结果评估

3.1 基于地磁扰动指数的预报模型

相对论电子通量 $J(n)$ 取决于前一天相对论电子通量 $J(n-1)$、相对论电子通量增加量 $J_{\rm s}$ 以及损失量 $J_{\rm L}$, 即

$$J(n) = J(n-1) + J_{\rm s} - J_{\rm L}. \tag{1}$$

地磁 AE 指数与源电子通量以及源电子通量的各向异性均有很强的相关性. 这里把增加量表示为地磁 AE 指数的函数. 从图 6 可以看到, 前几天的地磁 AE 指数与相对论电子通量具有较好的相关性. 因此, 选取多天的地磁 AE 指数作为输入, 这里选取前 9 天的地磁 AE 指数作为预报输入. $J_{\rm s}$ 表达式为

$$\lg J_{\rm s} = \sum_{i=1}^{9} a_i \lg(I_{AE_i}). \tag{2}$$

磁暴期间 Dst 绝热效应是导致磁层相对论电子通量下降的一个主要因素. 这里把损失量 $J_{\rm L}$ 表示为地磁 Dst 指数的函数, 其表达式为

$$\lg J_{\rm L} = a_{10} \lg f_{Dst} + a_{11} \lg(100 - I_{Dst}). \tag{3}$$

其中, f_{Dst} 表示前一天 Dst 指数的平均波动程度, 计

算方法是将相邻两个小时 Dst 指数差值的平方和除以 24, 得到每小时的平均值.

结合式 (1)~(3) 得到的预报函数为

$$\lg J(n)=a_0\lg J(n-1)+\sum_{i=1}^{9}a_i\lg I_{AE_i}-a_{10}\lg f_{Dst}-a_{11}\lg(100-I_{Dst}). \quad (4)$$

其中, a_0~a_{11} 为线性滤波器系数, I_{AE_i} 和 I_{Dst} 分别代表 AE, Dst 指数. 相对论电子通量既有太阳活动周变化, 又有季节变化和卡林顿周期变化. 为了体现这些变化特征, 采用滑动训练窗口方法拟合线性滤波器系数, 即在每次预测前都重新拟合来获得新的系数. 这里选取的训练窗口是 175 天. 为了对比分析, 称该模型为 Model-1.

Model-1 输入数据从 1999 年 7 月开始, 连续开展了 2000—2009 年同步轨道相对论电子通量预报试验. 首先将 Model-1 与持续模型进行对比. 持续模型是把前一天观测值作为当天预报值的简单模型. 表 2 列出了不同年份的预报效率. 从表 2 中看到, Model-1 2000—2009 年的预报效率比持续模型有不同程度的提高. 其中 2003 和 2005 年预报效率提高较多, 分别提升了 28.1% 和 35.4%; 2000 和 2009 年预报效率提高较少, 不到 6%. 图 7 给出了 2000—2009 年地磁 AE 指数对数值与源电子通量对数值、通量各向异性对数值的线性相关性以及 Model-1 预报效率的提高比率. 由图 7 可以看出, 几条曲线的变化趋势基本一致, 2003 和 2005 年 Model-1 预报效率提升最多, 地磁 AE 指数对数值与源电子通量对数值及通量各向异性对数值的线性相关性呈现出两个峰值. 2000 和 2009 年上述线性相关性较低, Model-1 预报效率提升有限, 这也说明地磁 AE 指数是有效的相对论电子预报参数.

预报效率 (定义符号 $P_{\rm e}$) 表达如下:

$$P_{\rm e}=1-\frac{\sum_{i=1}^{n}(F_i-f_i)^2}{\sum_{i=1}^{n}(F_i-\bar{F})^2}. \quad (5)$$

其中, f_i 为预报值, $\bar{f}$ 为样本内所有预报值的平均值, F_i 为实测值, $\bar{F}$ 为样本内所有实测值的平均值. 预报效率反映了预报值与实测值接近的程度. 若每个预报值 f_i 都与对应的实测值 F_i 相等, 则预报效率 $P_{\rm e}=1$.

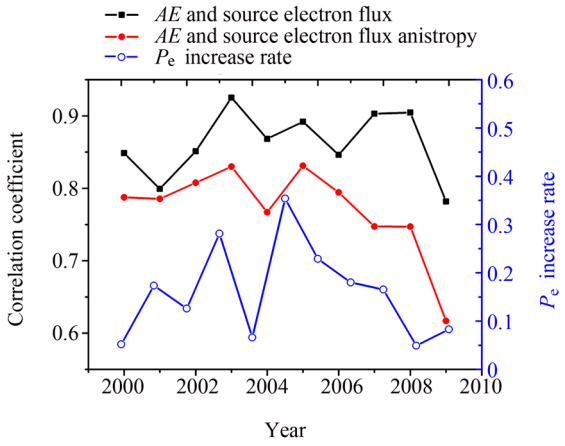


图 7 Model-1 较持续模型的预报效率提升比例, AE 指数对数值与源电子通量对数值和通量各向异性对数值的相关性

Fig. 7 $P_{\rm e}$ increase rate between Model-1 and persistence model, the linear correlation coefficient between the logarithm of source electron flux and AE index, the linear correlation coefficient between the logarithm of source electron flux anisotropy and AE index

若所有预报值 f_i 都等于测量值平均值 $\bar{F}$, 则 $P_{\rm e}=0$, 模型没有预报效率. 预报效率越高, 表明模型的预报能力越强. 这里 f_i, $\bar{f}$, F_i, $\bar{F}$ 都是相对论电子通量的对数值.

3.2 模型改进及效果评估

太阳风速度与相对论电子具有很好的相关性, 在 Baker 的模式 [16] 和径向扩散模式 [17] 中都将太阳风速度作为重要的输入参数. 这里把太阳风速度加入 Model-1 模型中, 考察预报效率的变化. 将不同天数 AE 指数和不同天数太阳风平均速度的组合作为输入, 发现输入前 3 天 AE 指数和前 2 天太阳风平均速度的预报效果最佳. 最终预报模型函数如下:

$$\lg J(n)=a_0\lg J(n-1)+\sum_{i=1}^{3}a_i\lg I_{AE_i}+\sum_{i=4}^{5}a_iv_{\rm sw}-a_6\lg f_{Dst}-a_7\lg(100-I_{Dst}). \quad (6)$$

将式 (6) 代表的预报模型称为 Model-2. 这里为了衡量 Model-2 的预报能力, 利用相同数据, 参照 Baker[16] 的建模思想, 即以太阳风速度为输入, 利用线性滤波器建立一个类似的预报模型, 称为 REFM 模型. 表 2 给出了 Model-1, REFM 及 Model-2 模型的逐年预报效率. 从表 2 可以看到, Model-1 的预报效

率略低于 REFM 模型, 也就是说, 即使在缺少太阳风数据的情况下, 利用地磁 *AE* 指数和地磁 *Dst* 指数也能得到较好的预报效果. 增加太阳风速度参量后, 相对于 REFM 模型, Model-2 预报效率逐年提升, 其中 2003 和 2005 年的预报效率提升最多, 分别达到了 7.5% 和 9.5%, 2000—2009 年的总预报效率增加到 0.848.

图 8 给出了 2000—2009 年预报值与实测值的散点分布. 二者相关系数为 0.918, 线性拟合的标准偏差为 0.38, 均方根误差为 0.422. 图 9 给出了预报效率较低的 2003 年和预报效率最高的 2009 年相对论电子通量观测值和预报值的变化. 由图 9 可以看到, 在太阳活动低年 2009 年, 相对论电子的周期性变化比较明显, 而 2003 年相对论电子的变化非常复杂. 这些因素影响了预报效率.

利用 Model-2 模型也开展了提前 2 天和 3 天的相对论电子预报试验. 提前 3 天的预报效率列于表 3. 由表 3 可以看到, 随着时间提前量增加, 预报效率逐渐降低.

4 结语

基于哨声波局地加速思想, 把地磁 *AE* 指数作为加速因子、*Dst* 指数作为损失因子, 利用滑动窗口线性滤波器方法, 建立地球静止轨道大于 2 MeV 相对论电子的预报模型. 此模型物理基础清晰, 数学形式简单, 预报能力良好. 利用所建立的模型开展了 2000—2009 年的地球静止轨道大于 2 MeV 相对论电子通量预报试验, 取得了良好的预报效果. 2000—2009 的预报效率为 0.818. 其中: 2009 年的预报效率

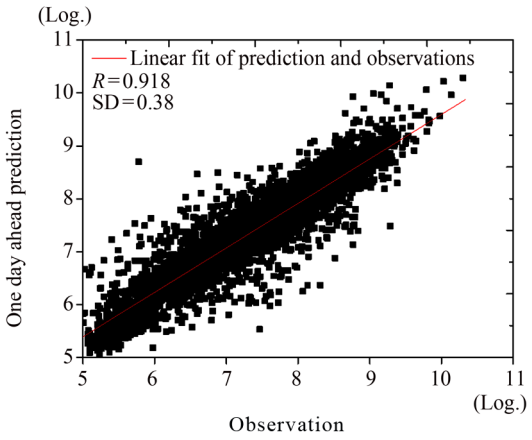


图 8 2000—2009 年大于 2 MeV 相对论电子观测值对数值和提前一天预测值对数值

Fig. 8 Logarithm of electron flux observations and predictions one day ahead which energy is greater than 2 MeV from 2000 to 2009

表 2 持续模型、REFM 模型、Model-1 和 Model-2 的预报效果对比

Table 2 P_e comparison between persistence model, REFM model, Model-1 and Model-2

年份	预报效率			
	持续模型	REFM	Model-1	Model-2
2000	0.615	0.702	0.647	0.715
2001	0.554	0.646	0.650	0.667
2002	0.635	0.741	0.715	0.768
2003	0.494	0.644	0.633	0.692
2004	0.680	0.774	0.725	0.781
2005	0.506	0.683	0.685	0.748
2006	0.616	0.764	0.757	0.801
2007	0.611	0.761	0.721	0.771
2008	0.689	0.822	0.803	0.831
2009	0.816	0.852	0.856	0.863
2000—2009	0.755	0.832	0.818	0.848

表 3 Model-2 模型提前 1~3 天相对论电子通量预报效率

Table 3 Relativistic electron flux prediction efficiency of 1~3 days in advance using Model-2

年份	预报效率		
	提前 1 天	提前 2 天	提前 3 天
2000	0.715	0.544	0.354
2001	0.667	0.552	0.410
2002	0.768	0.653	0.463
2003	0.692	0.516	0.306
2004	0.781	0.664	0.509
2005	0.748	0.558	0.294
2006	0.801	0.683	0.520
2007	0.771	0.585	0.345
2008	0.831	0.702	0.550
2009	0.863	0.753	0.623
2000—2009	0.848	0.758	0.641

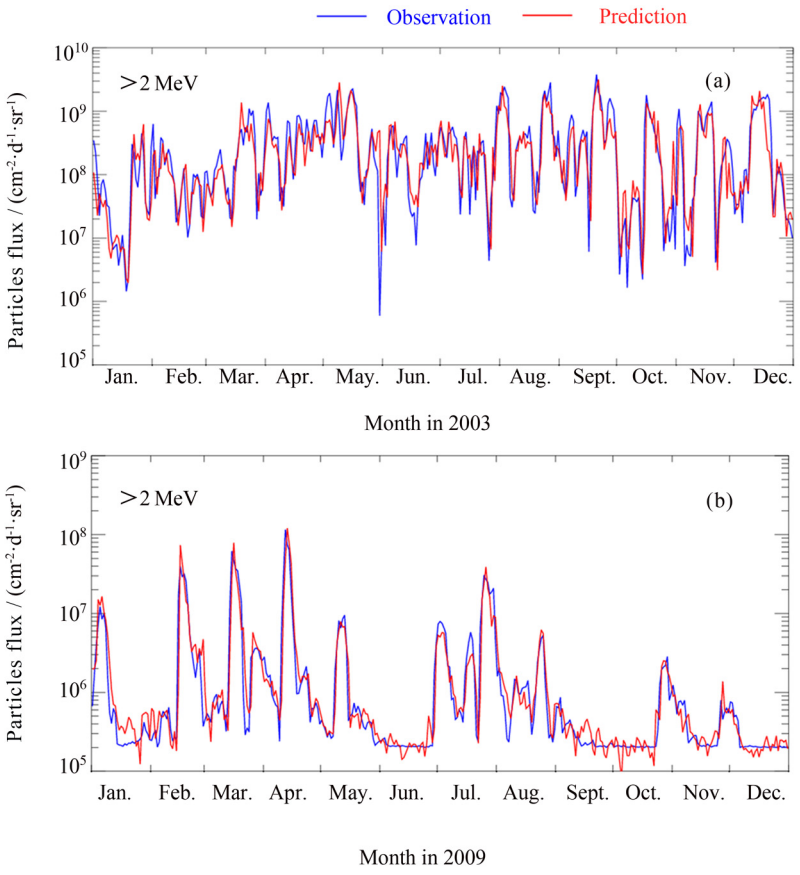


图 9 2003 和 2009 年 Model-2 预报结果与观测值对比

Fig. 9 Predictions of Model-2 and observations of 2003 and 2009

最高, 达 0.856; 2003 年预报效率最低, 为 0.633. 本文模型的预报结果与持续模型相比有很大提高, 略低于利用太阳风参数作为输入的 REFM 模型预报效果. 研究结果表明, 对于 GEO 轨道相对论电子通量预报, 地磁扰动指数是太阳风参量很好的代替参数, 而且地磁扰动指数来自地面观测, 数据连续性好, 稳定可靠, 更易获取.

GEO 轨道相对论电子通量预报模式的输入参数可以分为两类: 一是太阳风参数, 二是磁层扰动参数. 磁层扰动指数包括地磁扰动指数及磁层内能量粒子的变化. 当模型输入参数中增加太阳风速度, 即综合考虑太阳风对磁层扰动的驱动力和磁层自身扰动强度时, 模型预报效率进一步提升. 2000−2009 年的总预报效率增加到 0.848, 2003 和 2005 年的预报效率与 REFM 模型相比提升最多, 分别达到了 7.5% 和 9.5%. 这说明尽管太阳风是磁层的扰动源, 但是对于磁层粒子加速过程的贡献, 两者均有不可替代的作用.

相对论电子的加速机制一直是空间物理的难题, 在弄清其物理过程和机制之前, 通常根据某些预报因子的相关性, 利用统计方法建立预报模型. 本文建模思想是基于哨声波局地加速, 但本质上也是基于统计方法的经验模型.

本文建立的模型有预测 GEO 轨道相对论电子通量的能力. 必须指出的是, 外辐射带变化与太阳风和磁层扰动之间并非简单的线性关系, 而是复杂的非线性关系. 在后续工作中需进一步研究地磁 AE 指数与加速效果的函数关系. 此外, 可以根据哨声波加速的物理机制加入其他预报因子, 结合其他加速机制进一步完善预报模型.

参考文献

[1] WRENN G L, RODGERS D J, RYDEN K A. A solar cycle of spacecraft anomalies due to internal charging [J].

Ann. Geophys., 2002, **20**: 953-956. DOI:10.5194/angeo-20-953-2002

[2] LI X, TEMERIN M A. The electron radiation belt [J]. *Space Sci. Rev.*, 2001, **95**(1/2): 569-580. DOI:10.1023/A:1005221108016

[3] FRIEDEL R H W, REEVES G D, OBARA T. Relativistic electron dynamics in the inner magnetosphere—a review [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2002, **64**(2): 265-282. DOI:10.1016/S1364-6826(01)00088-8

[4] MILLAN R M, THORNE R M. Review of radiation belt relativistic electron losses [J]. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.*, 2007, **69**(3): 362-377. DOI:10.1016/j.jastp.2006.06.019

[5] MEREDITH N P, HORNE R B, SUMMERS D, *et al.* Evidence for acceleration of outer zone electrons to relativistic energies by whistler mode chorus [J]. *Ann. Geophys.*, 2002, **20**: 967-979. DOI:10.5194/angeo-20-967-2002

[6] SUMMERS D, THORNE R M, XIAO FULIANG. Relativistic theory of wave-particle resonant diffusion with application to electron acceleration in the magnetosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(A9): 20487-20500

[7] HORNE R B, THORNE R M. Potential waves for relativistic electron scattering and stochastic acceleration during magnetic storms [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15): 3011-3014

[8] THORNE R M, LI W, NI B, *et al.* Rapid local acceleration of relativistic radiation-belt electrons by magnetospheric chorus [J]. *Nature*, 2013, **504**: 411-414. DOI: 10.1038/nature12889

[9] GAO Z, ZHU H, ZHANG L, *et al.* Test particle simulations of interaction between monochromatic chorus waves and radiation belt relativistic electrons [J]. *Astrophys. Space Sci.*, 2014, **351**(2): 427-434. DOI:10.1007/s10509-014-1859-1

[10] LAUBEN D S, INAN U S, BELL T F, *et al.* Source characteristics of ELF/VLF chorus [J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, **107**(A12): 1429-1425. DOI:10.1029/2000JA003019

[11] MIYOSHI Y, MORIOKA A, MISAWA H, *et al.* Rebuilding process of the outer radiation belt during the 3 November 1993 magnetic storm: NOAA and Exos-D observations [J]. *J.Geophys. Res.*, 2003, **108**(AI): 1004-1018. DOI:10.1029/2001JA007542

[12] BAKER D N, LI X, TURNER N, *et al.* Recurrent geomagnetic storms and relativistic electron enhancements in the outer magnetosphere: ISTP coordinated measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**(A7): 14141-14148. DOI:10.1029/97JA00565

[13] BAKER D N, PULKKINEN T I, LI X, *et al.* A strong CME-related magnetic cloud interaction with the Earth's Magnetosphere: ISTP observations of rapid relativistic electron acceleration on May 15, 1997 [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 1998, **25**(15): 2975-2978. DOI:10.1029/98GL01134

[14] LI X, BAKER D N, TEMERIN M, *et al.* Rapid enchancements of relativistic electrons deep in the magnetosphere during the May 15, 1997, magnetic storm [J]. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(A3): 4467-4476

[15] LI L Y, CAO J B, ZHOU G C. Relation between the variation of geomagnetospheric relativistic electron flux and storm/substorm [J]. *Chin. J. Geophys.*, 2006, **49**(1): 9-15 (李柳元, 曹晋滨, 周国成. 磁层相对论电子通量变化与磁暴/亚暴的关系 [J]. 地球物理学报, 2006, **49**(1): 9-15)

[16] BAKER D N, MCPHERRON R L, CAYTON T E, *et al.* Linear Prediction Filter Analysis of Relativistic Electron Properties at 6.6 R_e [J]. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95**(A9): 15133-15140

[17] Li X, Temerin M, Baker, D N, *et al.* Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2001, **28**(9): 1887-1890

[18] Turner D L, Li X. Quantitative forecast of relativistic electron flux at geosynchronous orbit based on low-energy electron flux [J]. *Space Weather*, 2008, **6**(5). DOI:10.1029/2007SW000354

[19] HE Tian, LIU Siqing, XUE Bingsen, *et al.* Study on a forecasting method of the relativistic electron flux at geostationary orbit using geomagnetic pulsation data [J]. *Chinese J. Geophys.*, 2009, **52**(10): 2419-2427. DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.1001 (何甜, 刘四清, 薛炳森, 等. 利用地磁脉动预报地球同步轨道相对论电子通量的方法研究 [J]. 地球物理学报, 2009, **52**(10): 2419-2427. DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2009.10.1001)

[20] XUE Bingsen, YE Zonghai. Forecast of the enhancement of relativistic electron at the geo-synchronous orbit [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2004, **24**(4): 283-288 (薛炳森, 叶宗海. 地球同步轨道高能电子增强事件预报方法 [J]. 空间科学学报, 2004, **24**(4): 283-288)

[21] LING A G, GINET G P, HILMER R V, *et al.* A neural networkbased geosynchronous relativistic electron flux forecasting model [J]. *Space Weather*, 2010, **8**(9). DOI:10.1029/2010SW000576

[22] WANG Renzhong, SHI Liqin. Study on the forecasting method of relativistic electron flux at geostationary orbit based on support vector machine [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(3): 354-361 (王任重, 师立勤. 基于支持向量机方法的地球同步轨道相对论电子事件预报模型研究 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(3): 354-361)

[23] ZHENG Jinlei, ZHONG Qiuzhen, CHEN Liangxu, *et al.* Analysis on relativistic electron flux enhancement Event at GEO in April 2010 [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2012, **32**(4): 488-500 (郑金磊, 钟秋珍, 陈良旭, 等. 2010 年 4 月地球同步轨道相对论电子增强事件分析 [J]. 空间科学学报, 2012, **32**(4): 488-500)