0254-6124/2007/27(6)-474-07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Lai Zhijuan, Xue Bingsen. Reverting the distribution of space protons and ions from the ground cosmic ray neutrons intensity. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(6): 474~480

由地面宇宙线中子强度反演空间质子和重离子的分布

赖志娟 薛炳森

[1](中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100080)

[2](中国科学院研究生院)

摘 要 采用线性回归的方法研究了太阳活动平静时期空间高能质子和重离子微分通量与地面 OULU 宇宙线台站中子强度之间的相关性，利用地面中子强度数据来反演空间高能质子和重离子通量. 从质子和重离子的能谱出发，结合 OULU 台站中子强度的数据，提出了由地面中子强度数据反演空间高能质子和重离子微分通量的新方法. 文中以 GOES 卫星上 350~420 MeV, 420~510 MeV, 510~700 MeV, > 700 MeV (P8~P11) 四能道的高能质子和 ACE 卫星上的元素 C 为例，并将反演的数据与测量结果比较，二者符合较好. 为了探索这种反演方法在空间辐射环境描述中的应用，同时利用 2006 年 11 月和 12 月质子通量的反演结果对反演方法进行了验证，证明利用这一反演方法可以从地面中子强度的数据很好地反演出空间质子和重离子的微分通量.

关键词 质子; 微分通量; 中子强度

中图法分类号 P 353

Reverting the Distribution of Space Protons and Ions From the Ground Cosmic Ray Neutrons Intensity

LAI Zhijuan XUE Bingsen

[1](*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100080)

[2](*Graduate University of Chinese Academy of Sciences*)

Abstract By using the method of linear regress, the relation between the cosmic ray intensity of the OULU neutron monitor and the differential fluxes of space energetic proton and ion during quiet time has been studied. The differential spectrum of interplanetary particles with high energy is also calculated through the intensity of neutron at the ground level. On the basis of the energy spectra of proton and ion, a new calculation of the differential fluxes of proton and ion with high energy is suggested by combining the intensity of the neutron measured by OULU neutron monitor. For particular discussion, four channels (350~420 MeV, 420~510 MeV, 510~700 MeV, >700 MeV) on the GOES satellite and the element C on the ACE satellite are chosen as examples. Through comparison, it is concluded that the result is well consistent with the measurements. In order to prove the practicability of the method mentioned above in description of the space radiant condition,

* 中国科学院知识创新工程项目资助 (KGCX3-SYW-403-05)

2007-03-19 收到原稿, 2007-06-21 收到修定稿

the differential proton fluxes are calculated during November and December in 2006 by the method. As a result, it is concluded that the differential fluxes of space proton and ion may be well rebuilt from the intensity of the ground neutron with this method.

Key words Proton, Differential flux, Intensity of neutron

1 引言

地球磁层外空间的高能辐射环境对月球、火星探测活动非常重要, 但实时监测存在困难, 因此需要建立相关的描述模式. 20 世纪 90 年代初, Badhwar 和 O'Neill 基于 1954—1992 年气球和卫星探测数据提出了 Badhwar-O'Neill 银河宇宙线模型 [1]. 经过对宇宙线长达 40 年的直接观测, 1998 年莫斯科州大学提出了一个新的银河与太阳宇宙线模式, 描述了带电荷数为 1~28 的粒子在 1~1000 MeV 能量范围的通量情况 [2]. 2004 年 O'Neill 又利用 ACE 卫星的数据对 Badhwar-O'Neill 银河宇宙线模型进行了修正, 形成了更精确的银河宇宙线环境模式 [3]. 但上述模式与应用仍存在距离. 例如, 模式的输入参数还没有确定的规则.

大量研究已经证实, 地面宇宙线通量与空间高能粒子特别是其中能量较高粒子的通量关系密切 [4]. 对于 OULU 站, 其垂直截止刚度为 0.8 GV, 要大于 800 MeV 的粒子才能进入大气产生次级中子被探测到. 但由于宇宙线粒子具有连续谱, 能量偏低的粒子 (例如, GOES 卫星上测得的 P8~P11 能段的高能质子、ACE 卫星测得的离子) 与中子强度也有较强的相关性. 鉴于它们之间的这种关系, 本文将以 GOES 卫星上 P8~P11 能段的质子微分通量、ACE 卫星上重离子 (以元素 C 为例) 微分通量和 OULU 宇宙线台站中子强度的数据为基础, 分析空间高能质子和重离子的微分通量与地面宇宙线中子强度之间的关系, 介绍了一种由地面中子数据反演空间高能粒子通量的新方法, 并将得出的结果与直接反演的结果及测量值相比较, 对结果进行分析. 采用这种方法可以为将来, 当不能从 GOES 或 ACE 卫星上获得数据时, 获得 GOES 和 ACE 卫星上质子和重离子微分通量的数据提供方便.

2 与中子强度的相关性分析

2.1 质子微分通量与中子强度的相关性

分析采用的是 1995 年 3 月至 2006 年 10 月期间 GOES-8 和 GOES-10 卫星上 P8~P11 四个能量能段质子微分通量数据 (5 min 平均) 及相应时间段的 OULU 宇宙线台站中子强度数据 (一天平均). 为了与中子强度的数据进行比较分析, 将质子数据进行一天平均, 同时除去有事件发生的当天数据, 并将 GOES-8 的数据归一到 GOES-10 的精度水平, 以获得更长时间的高能粒子通量变化. 质子微分通量和中子强度随时间的变化如图 1 所示. 从图 1 中可以看到, P10 能段质子微分通量与中子强度随时间的变化趋势吻合得非常好, 同时表现出了明显的 11 年周期性, 且随太阳活动进入高年, 都呈现出下降的趋势 [3]. 图 2 给出了与图 1 对应的质子通量与

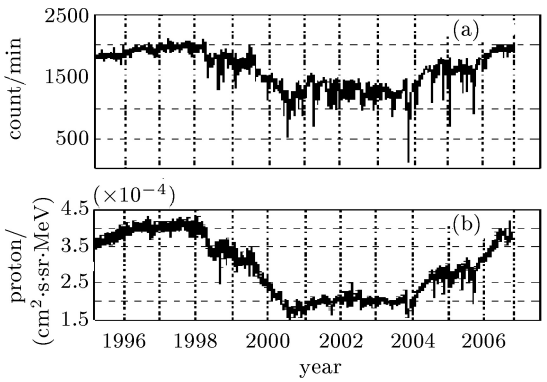


图 1 高能质子通量与地面宇宙线通量变化趋势

Fig.1 Temporal profiles of the high energetic proton flux and cosmic ray intensity

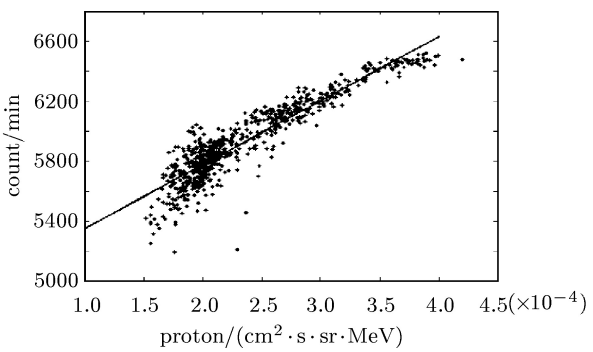


图 2 质子微分通量与中子强度的相关性

Fig.2 Correlation of the differential proton flux and the neutron intensity

中子强度的相关性结果. 很明显, 两者的相关性非常好. 对其他能段也得出了相同的结论. 所求得的各能段质子微分通量与中子强度的相关系数分别为 P8, 0.9447; P9, 0.9355; P10, 0.9246; P11, 0.9559. 因此, 地面中子能够很好地反映空间质子的变化情况, 可以根据地面中子强度的数据来反演出空间质子的微分通量.

2.2 重离子微分通量与中子强度之间的相关性

对 ACE 卫星上 1997 年 8 月至 2006 年 10 月的重离子微分通量数据也进行类似的分析. 考虑到空间高能重离子通量变化通常比较缓慢, 为了提高精确度, 采用了 27 天平均的重离子微分通量数据. 图 3 是元素 C 微分通量的时间变化及与中子强度的相关性结果. 所求得的各种离子的各个不同能段与中子强度的相关系数如表 1 所示. 可以看到, 太阳活动平静时期重离子微分通量与地面中子强度的相关性比较好. 因此, 从地面中子强度的数据推算空间重离子的微分通量水平具有可行性.

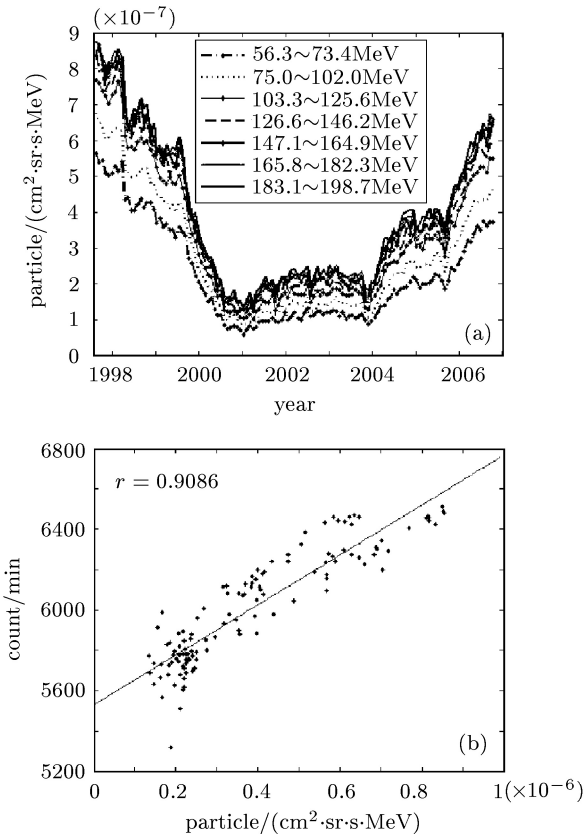


图 3 C 离子微分通量的时间变化及与中子强度的相关性

Fig.3 Temporal profiles of the differential flux of element C and its correlation to neutron intensity

3 反演方法

长期以来, 人们一直用一幂律来表示各种元素的能谱 [4]. 在 Badhwar-O'Neill 宇宙线模型中, 传输过程粒子的扩散、对流和绝热减速由 Fokker-Planck 方程来描述; 解方程求得太阳对粒子能谱的调制情况, 太阳活动周调制水平用减速参数 $\Phi(t)$ 来描述, 离太阳一定距离粒子的能谱通过 $\Phi(t)$ 来确定. 根据 O'Neill 的分析结果, 所得的新能谱形式比以往的幂律形式能更好地拟合粒子的能谱. 因此采用的新能谱公式为

$$J(E) = j_0 \beta^{\delta} / (E + E_0)^{\gamma}. \qquad (1)$$

其中, E 为粒子的动能, $E_0 = 938\,\mathrm{MeV}$ 为粒子的静止能量, $\beta = v_\mathrm{i}/c$ (v_i 为粒子速度, c 为光速), γ, δ 和 j_0 为能谱参数 [3]. 对于不同的元素, 通过能谱可以求得不同的能谱参数.

3.1 对质子微分通量的反演

采用 2.1 节的方法, 对 1995 年 3 月至 2006 年 10 月的 GOES 卫星上 P8~P11 能段高能质子的微分通量数据进行归一化, 结合能谱公式 (1) 来求解各能谱参数.

表 1 1~7 能段各种离子微分通量与中子强度的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between neutron intensity and differential fluxes of several elements

元素	1	2	3	4	5	6	7
C	0.8715	0.8838	0.8943	0.8965	0.9027	0.9079	0.9086
O	0.8788	0.8907	0.8996	0.9057	0.9146	0.9208	0.9248
Si	0.8949	0.9066	0.9167	0.9179	0.9118	0.9278	0.9291
Fe	0.9107	0.9241	0.9322	0.9392	0.9324	0.9375	0.9326

假设对于不同能段 γ 的值不同， δ 和 j_0 的值保持不变. 对式 (1) 两边同时求对数得到

$$\ln J(E) = -\gamma \ln(E + E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta.$$

因此，对选取的 P8~P11 能段的质子微分通量数据，可以得到如下欠定方程组：

$$\begin{cases} \ln J_8(E) = -\gamma_8 \ln(E + E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta, \\ \ln J_9(E) = -\gamma_9 \ln(E + E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta, \\ \ln J_{10}(E) = -\gamma_{10} \ln(E + E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta, \\ \ln J_{11}(E) = -\gamma_{11} \ln(E + E_0) + \ln j_0 + \delta \ln \beta. \end{cases} \tag{2}$$

求得方程组的通解为

$$\begin{pmatrix} \gamma_8 \\ \gamma_9 \\ \gamma_{10} \\ \gamma_{11} \\ j_0 \\ \delta \end{pmatrix} = \alpha_1 \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \\ a_6 \end{pmatrix} + \alpha_2 \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_6 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{pmatrix}.$$

其中， α_1 和 α_2 为任意常数. 为了计算方便，同时又不影响计算结果，可以取 α_1 和 α_2 为 1，于是得到方程组的一组解 j_0, δ, γ_8, γ_9, γ_{10}, γ_{11}. 它们随时间的变化情况分别如图 4 所示. 与图 1 进行比较，可以看到 j_0 的变化趋势与质子微分通量及中子强度的变化趋势非常一致. 图 4(d) 为太阳黑子数的时间变化曲线. 将 δ 与太阳黑子数进行比较，发现 δ 的变化很好地体现了太阳黑子数的变化情况，因而体现了太阳活动水平的高低，它代表了太阳活动对该种粒子的调制能力. γ 反映的是不同能量的某种粒子对太阳活动的响应情况. 从图 4(c) 可以看到，高能段 (P8~P11 能段范围) 的 γ 值比低能段的大，且随着太阳进入活动高年， γ 值不断增大. 这说明从低能段到高能段 (从 P8 到 P11) 质子的微分通量减小，且随太阳进入活动高年同一能段质子的微分通量减小. 这一结论正好与 GOES 卫星的观测结果一致.

结合图 1 还可以看到， j_0, δ 和 γ 的时间变化曲线与 OULU 台站中子强度的时间变化曲线呈现一定的相关性. 因此可以通过这种相关性算出对应的 j_0, δ 和 γ, 从而建立一种模式，由地面中子强度的数据推出相应的质子微分通量.

图 5 所示为 j_0, δ 和 γ_8 与中子强度的相关特征，可以看到它们之间存在一定的线性相关. 可以假设各能谱参数与中子强度之间的关系服从

$$y = a + bx,$$

其中， x 表示中子强度， y 表示能谱参数，所求得的相关系数及参数 a 和 b 见表 2.

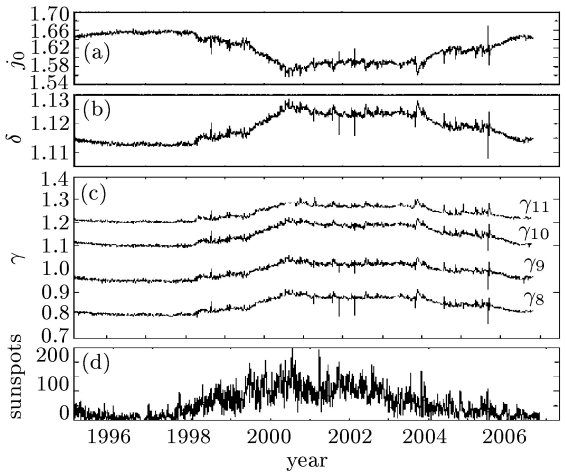


图 4 各能谱参数及太阳黑子数的变化趋势

Fig.4 Temporal profiles of parameters of energetic proton spectrum and sunspots variation

根据 j_0, δ, γ_8, γ_9, γ_{10}, γ_{11} 与 OULU 中子强度的相关性，从 OULU 中子强度数据和拟合公式 $y = a + bx$ 出发，可以推出相应的 j_0, δ, γ_8, γ_9, γ_{10}, γ_{11} 的值，再代入公式

$$J(E) = j_0 \beta^{\delta} / (E + E_0)^{\gamma},$$

从而得到与中子数据时间对应的 GOES-10 上 P8~P11 能段上一天平均的质子微分通量数据. 图 6 列

表 2 各能谱参数对应的 a, b 和相应的与中子强度的相关系数

Table 2 List of a, b and correlation coefficients

	j_0	δ	γ_8	γ_9	γ_{10}	γ_{11}
a	1.0126	1.2140	1.5405	1.6326	1.9421	1.8778
b	9.94×10^{-5}	-1.57×10^{-5}	-1.15×10^{-4}	-1.06×10^{-4}	-1.30×10^{-4}	-1.04×10^{-4}
相关系数	0.9562	−0.9514	−0.9437	−0.9508	−0.9545	−0.9605

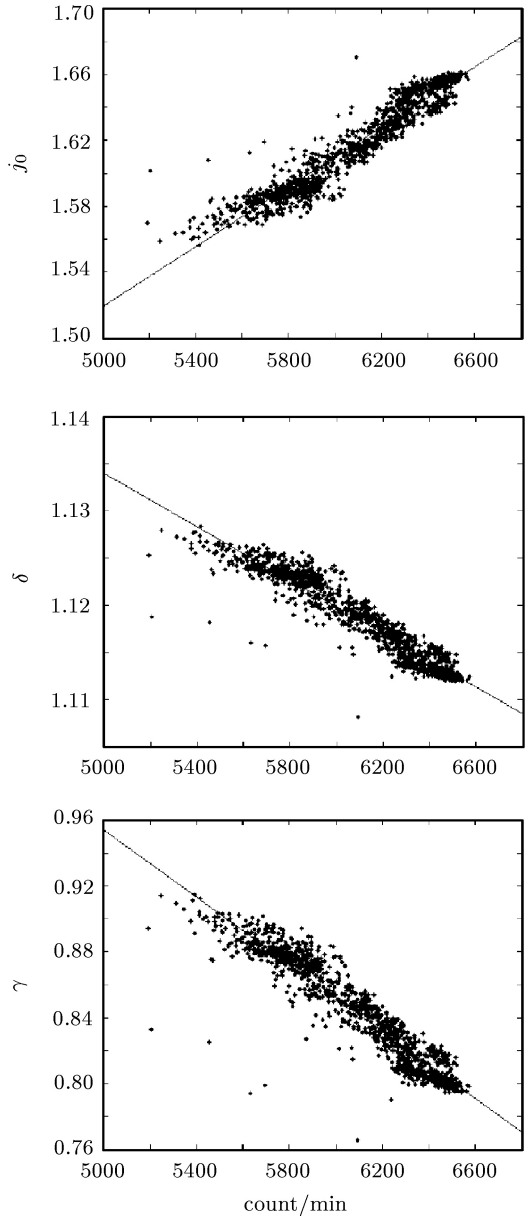


图 5 GOES 卫星高能粒子能谱参数 j_0, δ 和 γ 与地面中子强度的统计相关特征

Fig.5 Statistic correlations of ground neutron intensity and parameters of energetic proton j_0, δ, γ

举了 1995 年 3 月至 2006 年 10 月 P9 能段的反演结果, 图 7 为相应的误差分布情况. 从图中可以看到, 反演的结果与观测值吻合得非常好. 为了便于比较, 还利用 2.1 节求得的质子微分通量与中子强度之间的相关性, 由中子强度对质子通量进行直接拟合, 也获得了较好的结果. 在表 3 中, 分别给出了由两种方法求得的 P8~P11 能段反演值的误差 (净值误差) 分布情况. 从表 3 中可以看到新反演方法所得结果 95% 左右误差都落在 15% 以内, 而直接反演的误差只有 90% 左右落在 15% 以内, 并且新方法所得的平均相对误差非常小, 为 10^{-3} 的量级, 比直接反演所得的平均相对误差小一个数量级. 因此新反演方法比直接反演的方法有明显的进步.

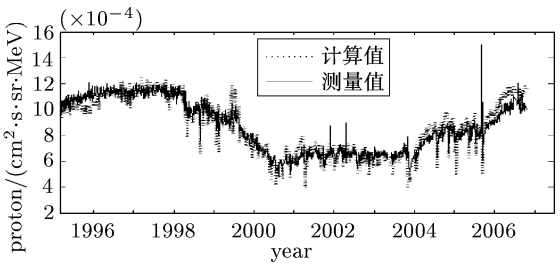


图 6 1995 年 3 月至 2006 年 10 月 P9 能段的反演结果

Fig.6 Temporal profiles of differential proton flux of channel P9 on GOES satellite

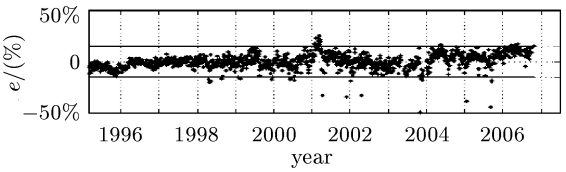


图 7 与图 6 相对应的 P9 能段计算值相对于测量值的误差分布

Fig.7 Errors between calculations and measurements for channel P9 corresponding to Fig.6

表 3 由两种不同方法所得质子 P8~P11 能段反演值的误差分布情况

Table 3 Calculation errors for proton flux on channel P8~P11 from the two different method

误差	方法	P8 (350~420 MeV)	P9 (421~510 MeV)	P10 (511~ 700 MeV)	P11 (> 700 MeV)
$\lvert e\rvert < 15\%$	新方法	0.9517	0.9681	0.9237	0.9634
	直接反演	0.9206	0.9361	0.8863	0.8847
平均通量	新方法	3.55×10^{-3}	2.81×10^{-3}	4.01×10^{-3}	2.48×10^{-3}
误差	直接反演	-4.42×10^{-2}	-4.04×10^{-2}	-3.7×10^{-2}	-4.78×10^{-2}

表 4 C 元素 1~7 能段反演结果的误差 (对数误差) 分布情况

Table 4 Calculation errors (logarithm error) for flux of element C on channel 1~7

	C1 (56.3~ 73.4 MeV)	C2 (75.0~ 102.0 MeV)	C3 (103.3~ 125.6 MeV)	C4 (126.6~ 146.2 MeV)	C5 (147.1~ 164.9 MeV)	C6 (165.8~ 182.3 MeV)	C7 (183.1 ~ 198.7 MeV)
$\|e\| < 4\%$	0.9677	0.9758	0.9758	0.9758	0.9839	1	0.9839
平均通量误差	6.34×10^{-5}	6.60×10^{-5}	6.77×10^{-5}	6.45×10^{-5}	6.19×10^{-5}	5.99×10^{-5}	6.03×10^{-5}

3.2 对元素 C 微分通量的反演

运用同样的方法, 我们对 ACE 卫星上 27 天平均重离子的微分通量也进行了反演. 限于篇幅, 仅以元素 C 为例, 只对反演的结果进行简单的介绍, 其具体的方法与质子的反演一样. 图 8 和图 9 分别为 C4 能段元素 C 微分通量的反演结果和误差分布. 所有能段反演结果的误差分布情况由表 4 给出, 需要注意的是, 这里给出的误差不是净值误差, 而是对数误差. 分析发现, 地面中子强度数据较好地反演出了空间元素 C 的微分通量值.

综上分析可以得出, 利用上述方法, 结合地面宇宙线中子强度的数据可以很好地反演出空间高能质子和重离子的微分通量水平.

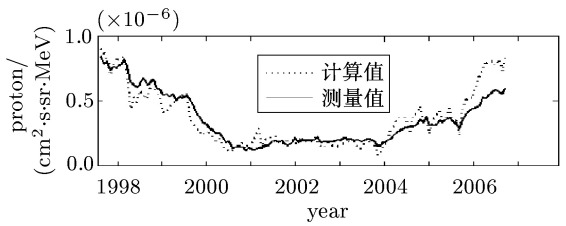


图 8 C4 能段的反演结果

Fig.8 Temporal profiles of differential flux of element C on ACE satellite

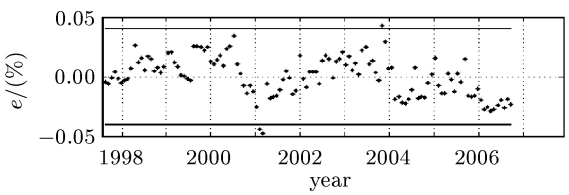


图 9 与图 8 相对应的 C4 能段计算值相对于测量值的误差 (对数误差) 分布

Fig.9 Errors (logarithm errors) between calculations and measurements for channel C4 corresponding to Fig.8

4 最新数据对比验证

为了进一步验证上述方法的有效性, 我们取 2006 年 11 月 1 日至 12 月 31 日 OULU 宇宙线台站的中子强度数据 (一天平均), 除去有事件发生的数据后, 代入 3.1 节给出的反演空间质子微分通量的模式中, 得到的结果如图 10 和图 11 所示. 其对应误差由表 5 给出. 可以看到, 所有反演结果的误差都落在 20% 以内; 除了 P11 以外, 其余各能段有 93% 以上的误差都在 15% 以内. 因此, 由模式反演得到的结果与 GOES 卫星的观测结果吻合得很好, 说明模式初步具备了实用性. 关于重离子的情况这里不再赘述.

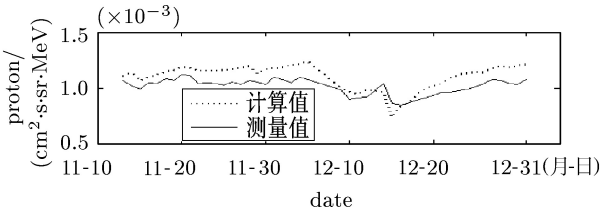


图 10 2006 年 11 至 12 月 P9 能段的反演结果

Fig.10 Temporal profiles of differential proton flux of channel P9 on GOES satellite for the period November—December, 2006

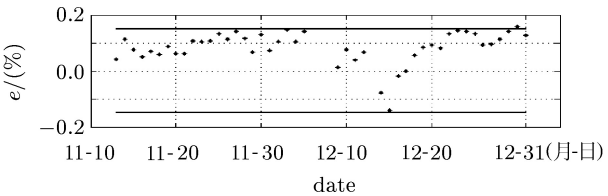


图 11 与图 10 相对应的 2006 年 11 至 12 月 P9 能段计算值相对于测量值的误差分布

Fig.11 Errors between calculations and measurements for channel P9 corresponding to Fig.10

表 5 质子 P8∼P11 能段反演值的误差分布情况

Table 5 Calculation errors for proton flux on channel P8∼P11

误差	P8 (350∼420 MeV)	P9 (420∼510 MeV)	P10 (510∼ 700 MeV)	P11 (> 700 MeV)
$\|e\| < 20\%$	1	1	1	1
$\|e\| < 15\%$	0.9333	0.9778	0.9778	0.7556
平均通量误差	8.86×10^{-2}	8.33×10^{-2}	5.74×10^{-2}	1.12×10^{-1}

5 结论与讨论

(1) 通过对太阳活动平静时期 GOES 卫星上高能质子和 ACE 卫星上重离子的微分通量与地面 OULU 宇宙线台站中子强度之间相关性的统计研究，得出空间质子和重离子的微分通量与地面中子强度成正相关，且相关系数超过 90%.

(2) 通过统计分析地面宇宙线与空间高能粒子的相关特性，提出了由地面宇宙线中子强度来反演空间高能质子和重离子微分通量的新方法，并依据大量历史数据建立了较为完整的计算模式，所得结果与测量值比较符合较好.

(3) 为了进一步验证模式的可靠性, 选取了最新的探测数据进行计算，计算出质子的微分通量与测量结果基本符合.

综上所述，通过地面宇宙线的测量，可以较为准确地确定空间高能粒子环境状况. 这对深空探测具有实用价值. 目前我们只引入了单站的宇宙线数据开展研究，台站所处地方时的变动会引入额外误差. 如果增加 1∼2 个宇宙线台站的数据，可使模式的误差进一步下降，这正是我们下一步的工作.

参考文献

[1] Badhwar G D, O'Neill P M. An improved model of galactic cosmic radiation for space exploration missions. In: Proceedings of the 22rd International Cosmic Ray Conference. Dublin: OG-5.2-13, 1991. 643∼646

[2] Nymmik R A. Predicting the solar and galactic cosmic ray fluxes influencing the upper atmosphere: Dependence on solar activity level. *Adv. Space Res.*, 1998, **22**(1):143∼146

[3] O'Neill P M. Badhwar-O' Neill galactic cosmic ray model update based on advanced composition explorer (ACE) energy spectra from 1997 to present. *Adv. Space Res.*, 2006, **37**:1727∼1733

[4] Allkofer O C. Introduction to Cosmic Radiation. Beijing: Science Publishing Company, 1987. 200∼235. in Chinese (O.C. 阿尔科费尔著. 宇宙线入门. 北京：科学出版社, 1987. 35∼235)

[5] Dorman L I. Variation of Cosmic Ray Intensity. Beijing: Science Publishing Company, 1965. 40∼47. in Chinese (多尔曼著. 宇宙线强度变化. 北京：科学出版社, 1965. 40∼47)