

## \* 研究简讯 \*

## 1965~2000年北京宇宙线台垂直截止刚度的变化

乐贵明<sup>1</sup> K. Kudela<sup>2</sup> 薛丙森<sup>1</sup> 叶宗海<sup>1</sup>

1. 中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100080;

2. Institute of Experimental Physics, SAS, Watsonova 47, 04353 Kosice, Slovakia

**摘要** 根据带电粒子的力学运动方程分别计算了有外源场和无外源场情况下北京宇宙线观测台的垂直截止刚度, 计算结果表明, 北京宇宙线观测站的截止刚度随时间是变化的. 在1965~2000年期间, 1990年的垂直截止刚度最低. 考虑外源场后, 除1990年以外, 北京宇宙线台的截止刚度都低于不考虑外源场的计算结果

**关键词** 银河宇宙线 地磁场 垂直截止刚度

地球内辐射带质子是银河宇宙线反照中子衰变形成的<sup>[1]</sup>, 60 km 以下甚至 80 km 以下的大气电离主要是由银河宇宙线与大气的作用引起<sup>[2]</sup>. 此外, 银河宇宙线还可以用来进行空间天气预测<sup>[3~5]</sup>, 银河宇宙线本身也是空间环境的一部分. 因此, 银河宇宙线与空间天气紧密相连. 为了研究银河宇宙线与空间环境的相互作用, 在全球地面布了很多宇宙线的地面台站. 对于每一个宇宙线台站, 都对应着惟一的一个垂直截止刚度(以下简称截止刚度), 这个截止刚度取决于台站的地理位置和空间磁场的强度和位形特征, 国外学者在这方面进行了大量的研究<sup>[6~8]</sup>. 由于地磁场的强度是时间的函数, 因此, 同一个地面宇宙线台站在不同年代对应的截止刚度是不同的. 北京宇宙线台是其中的台站之一, 北京宇宙线台的地理位置为东经 116°11'30", 北纬 40°02'22", 海拔 47.81 m. 朱邦耀在 1979 年采用 1955 年的地磁模式计算过北京宇宙线台的截止刚度<sup>[9]</sup>, 当时的地磁模式不是很精确, 另外没有考虑外源场, 因为当时还没有外源场的模式, 不过依据当时的计算条件得到的结果还是相当不错的. 国内有人也进行过截止刚度的计算, 主要计算的是一些卫星轨道上的垂直截止刚度, 当时采用的地磁模式为 IGRF1995<sup>[10]</sup>, 没有考虑外源场.

Shea 和 Smar<sup>[11]</sup>采用内源场计算过北京宇宙线台的截止刚度的变化, 但是, 他们在进行计算时把北京的纬度弄错了, 他给的是 39.08°, 同时他们的计算也没有考虑外源场. 在这之后, 北京宇宙线台的截止刚度再没有进行过修正计算. 北京宇宙线观测台的观测数据被列为国际标准的一个宇宙线观测台站, 台站的数据既是我们用于研究的重要资料, 也被用于国际数据交换, 因此, 必须了解截止刚度的时间变化情况. 由于截止刚度由空间磁场位形决定, 而空间磁场是由两部分组成: 起源于地球内部的源形成的磁场称为内源场, 起源于空间电流形成的磁场称之为外源场. 考虑到内源场一直在缓慢变化, 同时空间存在外源场, 因此, 首先我们计算了只考虑内源场(采用 DGRF 模式)情况下北京宇宙线台截止刚度的时间变化, 然后采用内源场加外源场(TS89 模式<sup>[12]</sup>)的方法计算了北京宇宙线台截止刚度的时间变化, 最后把两种情况下得到的计算结果进行了比较并进行了简要的讨论.

## 1 计算方法

本质上说, 截止刚度是解决带电离子在地磁场中的运动规律问题. 因此, 我们先研究粒子的运动方程. 带电粒子在磁场中的运动方程为

2003-02-12 收稿, 2003-03-04 收修改稿

E-mail: lgm@earth.sepc.ac.cn

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = \frac{e}{c} \left( \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{B} \right), \quad (1)$$

上式中的  $m$  为粒子的运动质量,  $e$  为粒子的电荷,  $\mathbf{r}$  为粒子的空间位置,  $\mathbf{B}$  为空间的磁场. 跟过去一样, 我们依旧解一个带负电的质子离开地球到无穷远处的方程. 其中  $\mathbf{B}$  包括外源场和内源场, 外源场采用 T89 模式<sup>[12]</sup>.

对于空间任意一点, 所谓垂直截止刚度是指带电粒子以垂直方向入射(即沿天顶方向)到该点所必需具有的最小刚度. 刚度的定义为

$$R = pc / ze = 300B\rho, \quad (2)$$

其中  $p$  为粒子的动量,  $z$  为粒子的电荷数,  $c$  为光速,  $e$  为电子的电荷,  $B$  为磁场强度,  $\rho$  为粒子在磁场中的回旋半径.  $R$  的单位为 GV.

设  $R_s$  为 Störmer 锥截止刚度,  $R_m$  为主锥截止刚度, 则有效的截止刚度为:

$$R_c = R_m - \sum_{R_s}^{R_m} \delta R_{\text{allowed}}, \quad (3)$$

上式中的  $\delta R_{\text{allowed}}$  取 0.01 GV, 找出  $R_s$  和  $R_m$  之间的允许轨道数目, 就可依据上式计算出北京宇宙线台的有效截止刚度.

在给出截止刚度计算结果之前我们先计算北京宇宙线台的磁场强度随时间的变化, 考虑到在地面内源场远强于外源场, 因此, 我们不考虑外源场而仅考虑内源场. 内源场的计算方法为:

$$X(r, \theta, \lambda, t) = \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^{n+2} \cdot [g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda] \cdot \frac{dp_n^m(\cos\theta)}{d\theta}, \quad (4)$$

$$Y(r, \theta, \lambda, t) = \frac{1}{\sin\theta} \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n \left( \frac{a}{r} \right)^{n+2} \cdot [g_n^m(t) \sin m\lambda - h_n^m(t) \cos n\lambda] m p_n^m(\cos\theta), \quad (5)$$

$$Z(r, \theta, \lambda, t) = - \sum_{n=1}^{10} \sum_{m=0}^n (n+1) \left( \frac{a}{r} \right)^{n+2} \cdot [g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda] p_n^m(\cos\theta), \quad (6)$$

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.  $r, \theta$  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 的球谐系数, 跟时间有关,  $p_n^m(\cos\theta)$  是 Schmidt 形式的缔合 Legendre 函数. 不同年代的 Gauss 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, 依据(4)~(6)式计算得到磁场的 3 个分量后, 再依据下式计算得到总磁场强度  $B$ :

$$B = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}, \quad (7)$$

依据(7)式计算得到的北京总磁场强度随  $B$  的变化如图 1 所示. 图 2 为北京宇宙线台的磁壳参量  $L$  值随时间变化的图. 任意一点的  $L$  值是指通过该点的磁力线与磁赤道相交的点到地心的距离和地球半径的比.

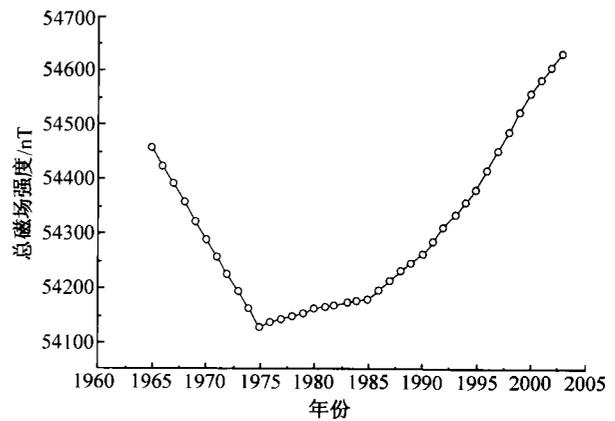


图 1 北京地磁强度的随时间变化

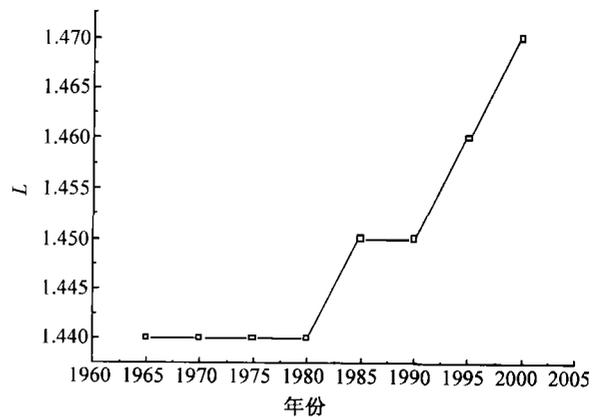


图 2 北京宇宙线台的磁壳参量  $L$  随时间的变化

从图 1 我们可以看到, 从 1965~1975 年, 北京的地磁场强度连续下降, 而从 1975 年开始到 2000 年, 北京的地磁场强度上升. 从图 2 可以看到, 北京宇宙线台的磁壳参量  $L$  是渐进增加的. 我们来看

看北京宇宙线台的截止刚度的变化情况, 在计算北京宇宙线台的截止刚度时, 我们选择的日期是每年的第1天, 地方时都是23:00点. 1965~2000年北京宇宙线台的截止刚度随时间的变化, 如图3所示.

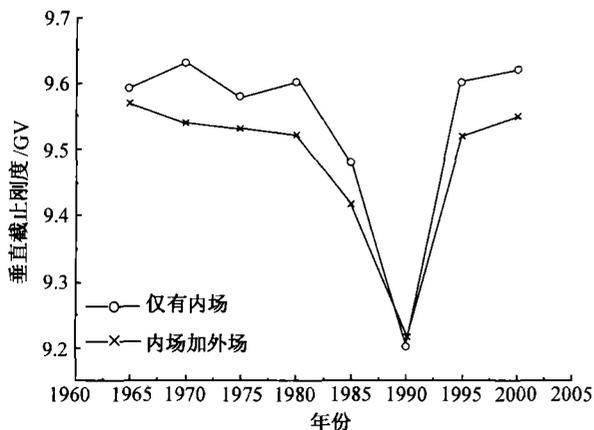


图3 北京宇宙线台截止刚度随时间的变化

从图3我们可以看到, 北京宇宙线台的截止刚度随时间的变化不是单调递减, 也不是单调递增的, 而是在起伏. 其中1990年北京宇宙线台的截止刚度下降到最低, 分别为9.2 GV(不考虑外源场)和9.21 GV(考虑外源场), 随后北京宇宙线台的截止刚度又迅速上升. 另外, 图3中的结果还说明, 考虑外源场与不考虑外源场计算得到的结果是有差异的. 除1990年外, 考虑外源场后得到的截止刚度都低于没有考虑外源场的情况, 说明外源场对截止刚度的影响是存在的而且不能忽略.

## 2 结果与讨论

由以上的计算表明, 在1965~2000年这段时间内, 从1965~1975年北京的地磁场强度连续下降至1975年的地磁场强度最低, 从1975到2000年北京的地磁场强度连续增加. 北京的磁壳参量 $L$ 值从1965~2000年总趋势是增加的. 北京宇宙线台的截止刚度随时间是变化的, 无论是否考虑外源场, 1990年北京宇宙线台的截止刚度都是最小的, 分别为9.21和9.2 GV.

在1965~2000年这段时间范围内, 北京的磁场

强度在1975年为最低, 但截止刚度最小的年份为1990年, 这两者时间不一致. 此外,  $L$ 值的变化趋势与截止刚度的变化趋势也完全不一致, 某点 $L$ 值得增加, 不能保证该点的截止刚度一定下降. 说明影响粒子垂直到达某点的截止刚度不仅取决于观测点位置的特性( $B$ ,  $L$ 值), 而且还取决于粒子经过的空间磁场位形. 由于考虑外源场与不考虑外源场有差异, 而外源场是确实存在的, 因此, 在计算北京宇宙线观测台的截止刚度时必需考虑外源场, 这样才能给出正确的计算结果. 不同地方时北京所处的空间位置不同, 因此, 不同地方时的截止刚度也会稍有差异, 这是我们下一步的研究工作.

## 参 考 文 献

- 1 涂传诒. 日地空间物理学. 北京: 科学出版社, 1988
- 2 Bazilevskaya G A. Observations of variability in cosmic rays. *Space Sci Rev*, 2000, 94: 25
- 3 Dorman L I, et al. The use of cosmic rays monitoring and prediction of some dangerous phenomena for the earth's civilization. *Astrophys and Space Sci*, 1993, 208: 55
- 4 Kudela K, et al. Power spectra of neutron monitor time series at frequencies  $f > 1.15 \times 10^{-5}$  Hz. In: *Proc 25th Int Cosmic Ray Conf*, Durban, 1997. 2: 425
- 5 Kudela K, et al. Cosmic rays in relation to space weather. *Space Sci Rev*, 2000, 93: 153
- 6 Sauer H H. A New method of computing cosmic ray cutoff rigidity for several geomagnetic field models. *J Geophys Res*, 1963, 68 (4): 957
- 7 Shea M A, et al. A study of vertical cutoff rigidities using sixth degree simulations of the geomagnetic field. *J of Geophys Res*, 1965, 70(17): 4117
- 8 Bobik P, et al. Geomagnetic cutoff penumbra structure: Approach by transmissivity function. In: *27th Int Cosmic Ray Conf*, Hamburg, 2001, SH3. 3: 4056
- 9 朱邦耀. 北京宇宙线台渐近方向, 垂直截止刚度和变化系数的计算. *地球物理学报*, 1979, 22(3): 255
- 10 都亨等主编. 低轨道航天器手册. 北京: 国防工业出版社, 1996
- 11 Shea M A. Vertical cutoff rigidities for cosmic ray stations since 1955. In: *27th Int Cosmic Ray Conf*, Hamburg, 2001, SH3. 3: 4063
- 12 Tsyganeko N A. A magnetospheric magnetic field model with a warped tail current sheet. *Planetary Space Sci*, 1989, 37: 5