



论文

基于 THEMIS 卫星数据的等离子体层顶位置模型

刘旭^{①②}, 刘文龙^{①*}

① 北京航空航天大学宇航学院空间科学研究所, 北京 100191;

② 中国科学院空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

* 联系人, E-mail: liuwenlong@buaa.edu.cn

收稿日期: 2013-09-04; 接受日期: 2014-02-10; 网络版发表日期: 2014-08-20

国家自然科学基金项目(批准号: 41104109, 41274166)和空间天气国家重点实验室专项基金项目(编号: 201203FSK05)资助

摘要 利用 2010~2011 年的 THEMIS 卫星观测的卫星电位数据反演电子密度, 并用来确定等离子体层顶的位置, 研究其与地磁指数的关系. 利用观测数据得到了一个 THEMIS 卫星等离子体层顶位置数据库. 利用该数据库建立了新的等离子体层顶位置的磁地方时经验模型, 并比较了其现有的四个等离子体层顶位置经验模型的优劣. 发现新建立的等离子体层顶位置模型明显优于其余四个经验模型. 在模型的三种输入参数中, Kp 指数和 Dst 指数模型的预测效果相当, 并明显优于 AE 指数的模型, 这说明磁层的大尺度对流强度是影响等离子体层顶位置最主要的因素.

关键词等离子体层顶
地磁指数
磁地方时

等离子体层是内磁层的重要组成部分, 充斥着大量被束缚的冷等离子体, 这些被束缚的等离子体受大尺度的电场约束与地球一起共转. 等离子体层外边界被称为等离子体层顶, 由于在等离子体层顶内外等离子体特性差异很大, 所以等离子体层顶在控制内磁层能量粒子分布中扮演着非常重要的角色 (Lorentzen 等, 2001), 并明显地影响着各种波动的激发和传播 (Orr 和 Webb, 1975; Webb 和 Orr 1975; Takahashi 和 Anderson, 1992; Liu 等, 2009, 2011, 2013), 进而影响环电流 (Kozyra 等, 1995; Lorentzen 等, 2001) 和辐射带 (Horne 和 Thorne, 1998; Lorentzen 等, 2001; Li 等, 2006). 因此, 等离子体层顶的位置被认为是内磁层动力学研究中的一个重要的基本参数. 等离子体层顶的位置是由大尺度的共转电场和对流电场决定的, 受地磁活动强度的影响, 主要表现

在: 地磁平静时期, 由于高纬通量管慢慢充满等离子体, 等离子体层向外逐渐扩张; 地磁活动时期, 由于磁层大尺度对流电场的增强, 等离子体层顶受到挤压向地球移动 (Carpenter 和 Anderson, 1992). 同时, 在等离子体层顶半径变化时, 其构型也会发生很大变化, 如羽状、肩状、槽状和通道状结构 (张华等, 2013).

前人通过对等离子体层顶位置的观测数据进行统计分析, 提出了几个等离子体层顶位置的经验模型. 例如: Carpenter 和 Anderson (1992) 提出的模型认为等离子体层顶的位置是 Kp 指数的线性函数, 但由于数据量较少 (ISEE 卫星 208 次等离子体层顶穿越事例), 该模型只研究了 00:00~15:00 磁地方时 (MLT) 区间. 其给出了等离子体层顶的位置 $\hat{L}_{pp}$ 和前 24 小时至前 4 小时期间 Kp 指数最大值 $\max_{-24,-4} Kp$ 的线性关系:

$$\hat{L}_{pp} = 5.6 - 0.46 \times \max_{-24,-4} Kp. \quad (1)$$

中文引用格式: 刘旭, 刘文龙. 2014. 基于 THEMIS 卫星数据的等离子体层顶位置模型. 中国科学: 地球科学, 44: 1980~1986

英文引用格式: Liu X, Liu W L. 2014. A new plasmapause location model based on THEMIS observations. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-014-4844-1

在此基础上, Moldwin 等(2002)利用 CRRES 卫星的 969 个等离子体层顶穿越事例, 并分别对夜侧、晨侧、日侧和昏侧四个地方时区间进行拟合, 得到了各个区间的等离子体层顶位置和 Kp 指数的经验关系, 其给出了 $\hat{L}_{pp}$ 和前 12 小时内 Kp 指数的最大值 $\max_{-12,0}$ Kp 之间的线性拟合关系:

$$\hat{L}_{pp} = A + B \times \max_{-12,0} Kp, \quad (2)$$

其中, A 和 B 为拟合参数.

现在广泛运用的 O'Brien 和 Moldwin (2003)模型进一步提出等离子层顶的位置不仅是 Kp 指数的线性函数, 还是 AE 指数和 Dst 指数的线性函数并分别比较了利用 Kp 指数、AE 指数和 Dst 指数预报等离子体层顶位置的差异. 其模型为

$$\hat{L}_{pp} = a + b \times \text{INDEX}, \quad (3)$$

这里 INDEX 可以是前 36 小时内 AE 指数最大值的对数 $\log_{10}\max_{-36,0} \text{AE}$ 、前 24 小时内 Dst 指数最小值的绝对值的对数 $\log_{10}|\min_{-24,0} \text{Dst}|$ 或者前 36 小时至前 2 小时期间的 Kp 指数最大值 $\max_{-36,-2} Kp$.

O'Brien 和 Moldwin (2003)同时给出了一个综合地磁指数和磁地方时的经验公式, 其在地磁指数线性模型的基础上使拟合系数为磁地方时的余弦函数:

$$\begin{cases} \phi = 2\pi(\text{MLT}/24), \\ L_{pp} = a_1 \left[1 + a_{\text{MLT}} \cos(\phi - 2\pi a_\phi / 24) \right] \text{INDEX} \\ \quad + b_1 \left(1 + b_{\text{MLT}} \cos(\phi - 2\pi b_\phi / 24) \right), \end{cases} \quad (4)$$

其中, MLT 为磁地方时. 这个复杂的地磁指数和磁地方时函数可以更加细致地描绘每个磁地方时区的等离子层顶位置与地磁指数之间的关系.

综上所述, 现有的等离子体层顶模型建立时所使用的数据库都没有完整地覆盖内磁层区域, 例如 Carpenter 和 Anderson (1992)模型只研究了 00:00~15:00 磁地方时区间, 而后面几个模型所使用的 CRRES 卫星数据缺少对日侧高高度地区的观测. 并且前三个经验公式因缺少地方时信息而不能反映等离子体层顶的地方时差异, 而仅有的磁地方时模型的拟合准确度也不高(O'Brien 和 Moldwin, 2003). 基于以上原因, 考虑到在不同地方时区间等离子体层顶性质的明显的差异, 建立一个更加准确的等离子体层顶位置的地方时模型就十分必要. 在本文中, 我们利用 THEMIS 卫星测的数据, 建立了一个等离子体层顶穿

越事件的数据库, 分析了等离子体层顶位置的性质及其分布, 并进一步建立了一个基于 THEMIS 卫星数据的等离子体层顶磁地方时模型, 最后将我们的模型和现有的几种等离子体层顶位置模型进行了比较, 得到了一个拟合准确度更高的等离子体层顶模型.

1 等离子体层顶位置观测数据

1.1 等离子体层顶位置的判定

本文所使用的数据来自 NASA 的 THEMIS 卫星计划. THEMIS 五颗卫星发射于 2007 年 2 月 17 日, 用于研究亚暴、辐射带和其他空间物理现象. 其中 THEMIS-D 卫星远地点大约 12 个地球半径(R_E), 近地点 1.5 个地球半径, 轨道倾角 9° . 卫星在每个轨道周期两次穿越等离子体层顶, 大约 1 年的时间可以覆盖内磁层所有地方时.

本文选取 THEMIS-D 卫星在 2010 和 2011 年的观测数据进行分析, 研究的物理参量为利用卫星电位反演得到的等离子体电子密度. 利用该方法得到的电子密度具有 2 倍的不确定性(Pedersen 等, 1998), 该精度可以满足本文研究的要求, 这种方法已经被广泛的应用于等离子体层顶位置的判定中(Li 等, 2010). 在本文中, 我们利用 Carpenter 和 Anderson (1992)使用的判据来确定等离子体层顶的位置和宽度, 即要求等离子体密度在 $0.5L$ 值内变化超过 5 倍. 具体地, 如果在观测点内外 $0.25L$ 值范围内等离子体电子密度变化超过 5 倍, 我们就将这个观测点标记为位于等离子体层顶内, 通过相邻的被标记观测点的分布就可以确定这个等离子体层顶所在的区域, 这个区域的中心位置即为这次等离子体层顶穿越的位置, 区域的宽度即为等离子体层顶的宽度.

图 1 显示了在 2010 年 2 月 2 日的卫星观测到的电子密度在一个轨道周期内随时间的变化曲线. 可以看出, THEMIS-D 卫星在 01:20UT 和 21:20UT 两次观测到了电子密度的突变, 变化幅度达到了 3 个量级左右, 据此我们判定卫星两次穿越了等离子体层顶, 它们分别对应着卫星的升轨和降轨. 在图 1 中, 矩形框的宽度代表等离子体层顶. 我们得到两次等离子体层顶的中心位置为 $L=4.97$ 和 $L=4.94$, 宽度分别为 $0.46R_E$ 和 $0.52 R_E$.

我们利用同样的方法分析了 2010 和 2011 两年的

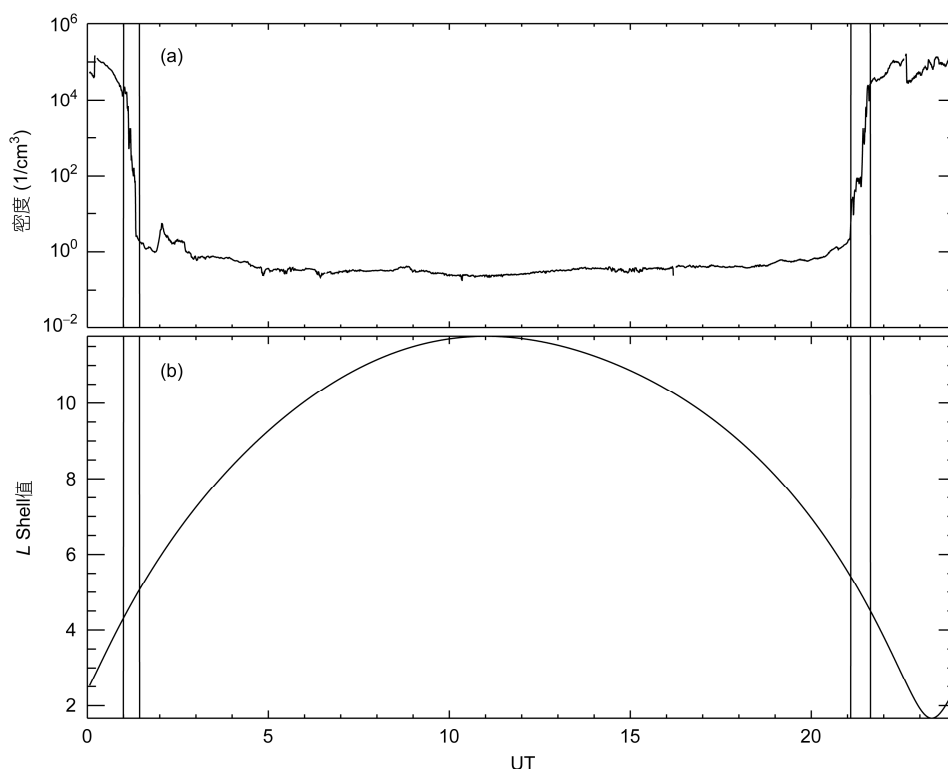


图 1 利用 THEMIS 卫星得到的电子数密度与世界时的关系和等离子层顶的典型位置

观测数据, 共找到了 1427 个等离子体层顶穿越的事例. 需要指出的是, 本文所研究的是具有电子密度突变特征的等离子体层顶, 或者被称为“陡峭等离子体层顶”, 而等离子体层顶的电子密度变化是非常复杂的: 有相当一部分的等离子体层顶处电子密度是缓慢变化的, 即不伴随着密度突变; 也有一部分等离子体层顶具有复杂的密度变化. 在上述 1427 个等离子体层顶穿越事例中, 有 121 次卫星没有观测到陡峭的等离子体层顶, 有 1183 次卫星观测到一次的密度突变, 有 123 次卫星观测到了多于一次的密度突变.

在本文剩余的部分, 当我们提到等离子体层顶都是指具有有一次电子密度突变特征的“陡峭等离子体层顶”, 这与上述四种等离子体层顶模型选取数据的类型相同, 其他类型的等离子体层顶和等离子体层边界层将在今后的工作中进行研究.

1.2 等离子层顶位置分布

我们将找到的 1183 个等离子体层顶穿越事例发生的 L 值和地方时(LT)分布显示在图 2(a)中. 可以看出, 绝大多数的等离子层顶位置集中于 $L=3\sim6$ 值之间, 基

本均匀地分散于各个地方时. 不同的地方时区间内事例的分布为: 夜侧(21:00~03:00 LT)346 次、晨侧(03:00~09:00 LT)251 次、日侧(09:00~15:00 LT)291 次和昏侧(15:00~21:00 LT)295 次. 图 2(b)给出了等离子体层顶与等离子体层顶厚度的统计分布, 可以看到在等离子体层顶剧烈变化时其最大厚度可达 $2 R_E$ 值, 而大部分事件中等离子体层顶的厚度在 0.2 至 0.6 个 R_E 值之间.

2 等离子体层顶位置模型

2.1 地磁指数

我们将利用观测到的等离子体层顶位置数据建立新的模型, 并与前人提出的四个等离子体层顶位置模型进行对比. 在这个过程中, 我们利用了京都大学的世界地磁数据中心提供的 Dst 指数、AE 指数和 Kp 指数数据(<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp>).

2.2 基于 THEMIS 卫星观测数据的等离子体层顶磁地方时模型

利用前面得到的 THEMIS 卫星的观测数据, 我

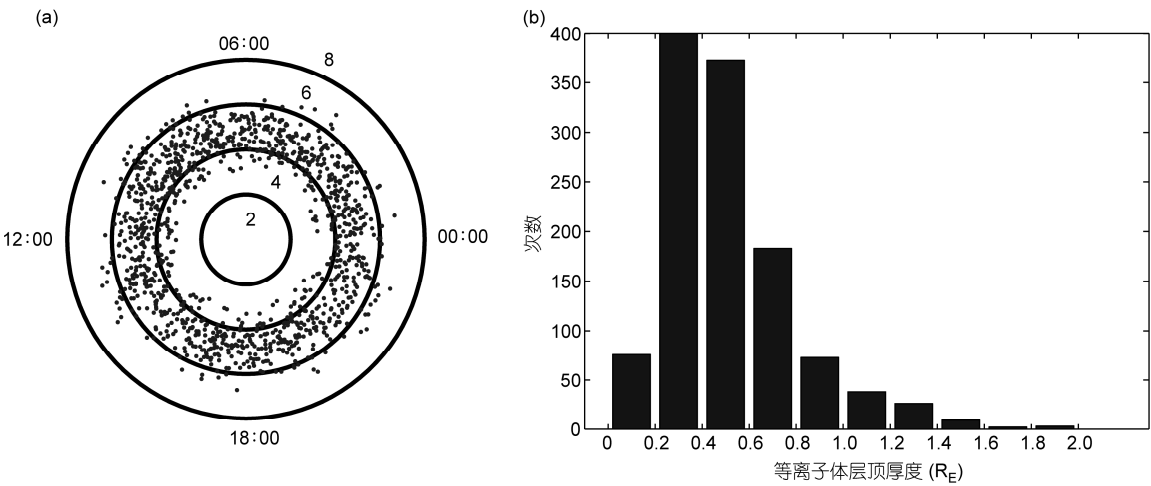


图 2 等离子体层顶位置在赤道面内的分布(a)及等离子层顶厚度的柱状统计图(b)

们对 O'Brien 和 Moldwin (2003)磁地方时模型使用的经验公式进行拟合, 得到了新的系数, 从而建立了基于 THEMIS 卫星观测数据的等离子体层顶地方时模型. 所得到的模型如下:

$$\phi = 2\pi(\text{MLT}/24),$$
$$\hat{L}_{pp} = a_1 \left[1 + a_{\text{MLT}} \cos(\phi - 2\pi a_\phi / 24) \right] \times \text{INDEX} + b_1 \left[(1 + b_{\text{MLT}} \cos(\phi - 2\pi b_\phi / 24)) \right], \tag{5}$$

其中系数的物理意义与 O'Brien 和 Moldwin (2003)磁地方时模型相同. 新的系数见表 1, 包括了 AE 指数、Dst 指数和 Kp 指数三个模型.

新建立的等离子体层顶位置磁地方时模型可以更好给出等离子体层顶位置. 表 2 列出了 2011 年

7 月 2 日的等离子体层顶穿越事件中各模型的预测误差(预测等离子体层顶位置与观测值的差别). 可以看出, 在本事件中, 本文建立的 THEMIS 模型 Kp 指数模型的预测误差为 0.0004R_E, Dst 指数模型的预测误差为 0.0175R_E, AE 指数模型的预测误差为 0.1663R_E, 小于利用其他几个模型的预测误差.

图 3 显示了新建立的等离子体层顶位置磁地方时模型中基于三个指数模型的拟合关系. 可以清楚地看到在 00:00~18:00MLT 的区间内, Dst 指数模型和 Kp 指数模型可以很好地拟合 THEMIS 数据库, 而在昏侧至夜侧的 18:00~24:00 的区间内, 曲线拟合离散程度较大, 这是由于在昏侧至夜侧等离子体层顶周围动力学过程的复杂性导致的.

为了比较新建立的模型与以往几个模型的优劣, 我们利用观测到的等离子体层顶位置 L_{pp} 和模型计算的等离子体层顶位置 $\hat{L}_{pp}$ 的差异计算了每个模型的均方根误差 RMSE (Root Mean Square Error), 即

$$\text{RMSE} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n (L_{ppi} - \hat{L}_{ppi})^2 \right) / n}, \tag{6}$$

这里, RMSE 值越小, 说明模型与观测数据符合得越

表 1 基于 THEMIS 卫星观测数据的等离子体层顶磁地方时模型参数

指数类型	模型参数					
	a_1	a_{MLT}	a_ϕ	b_1	b_{MLT}	b_ϕ
AE	-1.254	-0.218	18.52	8.199	0.0757	6.91
Dst	-1.111	-0.2416	21.502	6.03	-0.0565	23.3214
Kp	-0.338	-0.286	21.045	5.729	-0.0428	23.0397

表 2 2011 年 7 月 2 日等离子体层顶穿越事件中各模型预测误差对比(单位: R_E)

	THEMIS 模型	O'Brien 和 Moldwin(2003) 模型	O'Brien 和 Moldwin (2003) 磁地方时模型	Moldwin 等(2002) 模型	Carpenter 和 Anderson(1992) 模型
AE	0.1663	0.7540	0.4574		
Dst	0.0175	0.2935	0.1506		
Kp	0.0004	0.1176	0.0156	0.4668	0.2534

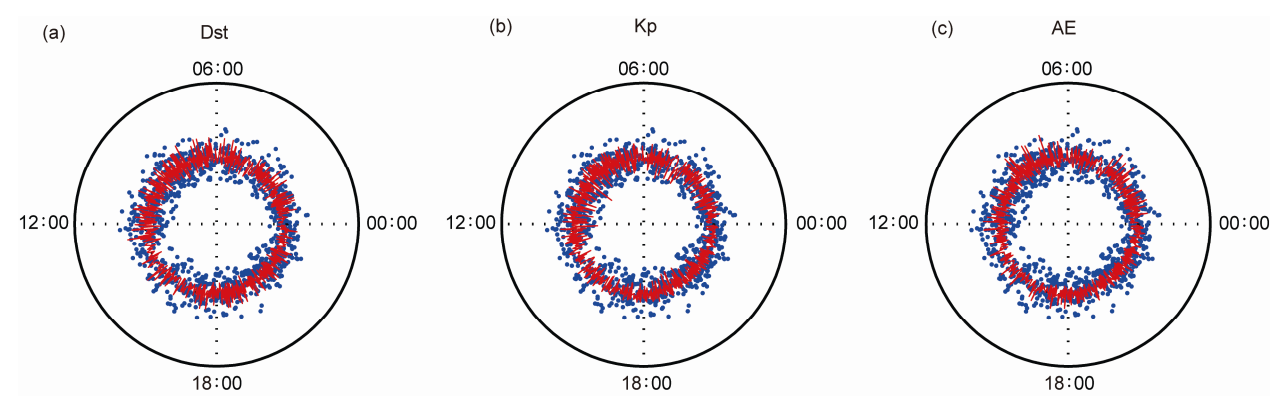


图 3 等离子体层顶位置与 THEMIS 磁地方时模型的关系

(a) $\max_{-24,0}$ Dst 模型, 包含所有磁地方时数据; (b) $\max_{-36,-2}$ Kp 模型, 包含所有磁地方时数据; (c) $\max_{-36,0}$ AE 模型, 包含所有磁地方时数据. 蓝色的点为观测的等离子体层顶散点图, 红色线为本文模型的拟合曲线

好, 越能真实地描述等离子层顶的位置.

表 3 给出了 THEMIS 磁地方时模型、Moldwin 等(2002)模型、O'Brien 和 Moldwin (2003)模型、O'Brien 和 Moldwin (2003)磁地方时模型和 Carpenter 和 Anderson (1992)模型的 RMSE 值. 总体来看, 在三个地磁指数中, 利用 AE 指数预报等离子体层顶位置的效果是最差的, 其主要原因可能是等离子体层顶位置主要受到磁层内的大尺度对流的影响.

对比几个模型, 可以发现预报效果最好的是我们新建立的 THEMIS 磁地方时模型, 利用三个地磁指数得到的 RMSE 值分别为 0.6319、0.6040 和 0.6094. 同时可以看到 Dst 指数模型和 Kp 指数模型在昏侧至夜侧区间的 RMSE 值较大, 与图 3 的结论一致.

其次是 O'Brien 和 Moldwin (2003)模型, 特别是其 Dst 指数模型和 Kp 指数模型, 这与前人的理论是一致的. 其在夜侧和晨侧的精度与 THEMIS 磁地方时的 Dst 指数模型和 Kp 指数模型相当, 但 O'Brien 和 Moldwin (2003)模型对其他地方时区间拟合效果不是很好.

再次是 Carpenter 和 Anderson (1992)模型, 其 RMSE 值为 0.6977, 相对比较小, 说明该模型基本上可以描述本文所得到的等离子层顶位置观测数据.

Moldwin 等(2002)模型的 RMSE 值较大, 特别是在日侧和昏侧, RMSE 值分别为 0.9193 和 1.0211, 说明该模型给出的经验公式在一定程度上不能很好地描述我们的观测结果.

表 3 等离子体层顶模型的均方根误差(RMSE)对比

模型	地磁指数	磁地方时区间				
		00:00–24:00	21:00–03:00	03:00–09:00	09:00–15:00	15:00–21:00
THEMIS 模型	AE	0.6319	0.5647	0.6358	0.6635	0.6642
	Dst	0.6040	0.5438	0.6142	0.6358	0.6237
	Kp	0.6094	0.5557	0.6228	0.6129	0.6422
Moldwin 等(2002)模型	Kp	0.7139	0.6529	0.7295	0.9193	1.0211
	AE	0.8107	0.7340	0.7693	0.8222	0.9068
O'Brien 和 Moldwin(2003)模型	Dst	0.6835	0.6175	0.6313	0.7416	0.7451
	Kp	0.6401	0.5838	0.6254	0.6454	0.6998
O'Brien 和 Moldwin(2003)磁地方时模型	AE	0.8661	0.7488	0.8335	1.0924	0.8085
	Dst	0.7380	0.5762	0.7242	0.9323	0.7215
	Kp	0.7435	0.5875	0.6468	0.9313	0.8055
Carpenter 和 Anderson(1992)模型		Kp 0.6977 (00:00–15:00MLT)				

表 3 同时给出了出了对 O'Brien 和 Moldwin(2003) 磁地方时模型的验证结果. 对比此表中的 RMSE 值可以发现, 该模型在预报的准确度上弱于其他四个模型, 尤其是其 AE 指数模型, 在日侧的 RMSE 值为 1.0924, 基本上不能正确地反映等离子体层顶的位置.

3 讨论与结论

我们利用 THEMIS 卫星的观测数据建立了等离子体层顶位置的数据库, 进而建立了一个新的等离子体层顶与磁地方时的经验模型, 并对现有的等离子体层顶模型进行了比较. 通过前面的分析, 我们发现新建立的 THEMIS 磁地方时模型和观测结果符合的最好, 尤其是 THEMIS 模型中 Dst 指数和 Kp 指数模型和我们的观测结果符合得最好, 说明环电流与磁层的大尺度对流强度是控制等离子体层顶位置的主要因素, 实际上大尺度对流电场不仅控制着等离子体层顶的位置, 也通过离子和电子漂移, 控制着等离子体片内边界的位置(丁维贞等, 2010; Cao 等, 2011; Wang 和 Zong, 2012; Fu 等, 2010a, 2010b).

Carpenter 和 Anderson (1992)模型是基于 ISEE 卫星 1977, 1982 和 1983 年的数据建立的, 其他三个模型都是基于 CRRES 卫星在 1990 和 1991 年的数据建立的, 只包含了太阳活动峰年的信息. 本文的数据库是基于 2010 和 2011 年 THEMIS 卫星的观测数据建

立的, 包含更多的数据点, 反映了太阳活动上升期的信息. 在太阳活动周期的不同阶段, 不同的太阳风结构性质对地球磁层的影响不同: 在太阳活动峰年期间, 强烈的太阳物质抛射事件可以激发很强的磁暴; 而太阳活动上升阶段, 磁暴主要是由共转相互作用区激发, 比较弱. 因此, 不同的太阳活动周期阶段中, 受磁层大尺度对流电场控制的等离子体层顶的位置也应该具有不同的性质. 这一点可以部分地解释本文提出的模型和前人模型的差异.

另外, 以往的模型基于太阳活动峰年期间的观测数据, 这期间发生的几次极端空间天气事件(如 1991 年 3 月 24 日的超强磁暴)可能对他们的建模工作产生影响, 增大了误差; 而我们建模所使用的数据来自太阳活动上升期, 并没有受到强的地磁活动的干扰, 因此我们模型的效果更好, 也更加可信. 例如, 我们的模型和 O'Brien 和 Moldwin (2003)模型基于同样的公式, 但是我们的预报效果更好(参见表 3).

最后, 值得一提的是, 我们现有的数据库只是包含了两年的观测数据, 为了得到完整的等离子体层顶位置的信息, 我们还需要大量的、能够覆盖整个太阳活动周期的数据. 本文的工作提醒我们现有的等离子体层顶位置模型仍然需要改进, 在今后的工作中, 我们将分析更多的卫星观测数据, 充实我们的等离子体层顶位置数据库, 并期望能进一步建立一个更准确的等离子体层顶位置模型.

致谢 感谢 THEMIS 卫星数据中心和京都大学提供的卫星数据和地磁指数数据. 感谢曹晋滨老师、符慧山老师、李柳元老师和马玉端老师提供的帮助.

参考文献

- 丁维贞, 曹晋滨, 曾立, 等. 2010. 等离子体片离子分界线的模拟研究. 地球物理学报, 53: 1505–1514
- 张华, 徐荣栏, 沈超等. 2013. 地磁扰动期间等离子体层顶结构的模拟研究. 地球物理学报, 56: 731–737, doi: 10.6038/cjg20130302
- Cao J B, Ding W Z, Reme H, et al. 2011. The statistical studies of the inner boundary of plasma sheet. Ann Geophys, 29: 289–298, doi: 10.5194/angeo-29-289-2011
- Carpenter D L, Anderson R R. 1992. An ISEE/whistler model of equatorial electron density in the magnetosphere. J Geophys Res, 97: 1097–1108
- Fu H S, Tu J, Cao J B, et al. 2010a. IMAGE and DMSP observations of a density trough inside the plasmasphere. J Geophys Res, 115: A07227, doi: 10.1029/2009JA015104
- Fu H S, Tu J, Song P, et al. 2010b. The nightside-to-dayside evolution of the inner magnetosphere: Imager for Magnetopause-to-Aurora Global Exploration Radio Plasma Imager observations. J Geophys Res, 115: A04213, doi: 10.1029/2009JA014668
- Horne R B, Thorne R M. 1998. Potential waves for relativistic electronscattering and stochastic acceleration during magnetic storms. Geophys Res Lett, 25: 3011–3014
- Kozyra J U, Rasmussen C E, Miller R H, et al. 1995. Interaction of ring current and radiation belt protons with ducted plasmaspheric hiss, 2, Time evolution and distribution function. J Geophys Res, 100: 21911–21919

- Li X, Baker D N, O'Brien, et al. 2006. Correlation between the inner edge of outer radiation belt electrons and the innermost plasmapause location. *Geophys Res Lett*, 33: L14107, doi: 10.1029/2006GL026294
- Li W, Thorne R M, Bortnik J, et al. 2010. Global distributions of suprathermal electrons observed on THEMIS and potential mechanisms for access into the plasmasphere. *J Geophys Res*, 115: A00J10, doi: 10.1029/2010JA015687
- Liu W L, Cao J B, Li X, et al. 2013. Poloidal ULF wave observed in the plasmasphere boundary layer. *J Geophys Res-Space Phys*, 118: 4298–4307, doi: 10.1002/jgra.50427
- Liu W L, Sarris T E, Li X, et al. 2009. Electric and magnetic field observations of Pc4 and Pc5 pulsations in the inner magnetosphere: A statistical study. *J Geophys Res*, 114: A12206, doi: 10.1029/2009JA014243
- Liu W L, Sarris T E, Li X, et al. 2011. Spatial structure and temporal evolution of a dayside poloidal ULF wave event. *Geophys Res Lett*, 38: L19104, doi: 10.1029/2011GL049476
- Lorentzen K R, Blake J B, Inan U S, et al. 2001. Observations of relativistic electron microbursts in association with VLF chorus. *J Geophys Res*, 106: 6017–6027
- Moldwin M B, Downward L, Rassoul H K, et al. 2002. A new model of the location of the plasmapause: CRRES results. *J Geophys Res*, 107: 1339, doi: 10.1029/2001JA009211
- O'Brien T P, Moldwin M B. 2003. Empirical plasmapause models from magnetic indices. *Geophys Res Lett*, 30: 1152, doi: 10.1029/2002GL016007
- Orr D, Webb D. 1975. Statistical studies of geomagnetic pulsations with periods between 20 and 120 sec and their relationship to the plasmapause region. *Planet Space Sci*, 23: 1169
- Pedersen A, Mozer F, Gustafsson G. 1998. Electric field measurements in a tenuous plasma with spherical double probes, in *Measurement Techniques in Space Plasmas: Fields*. *Ann Geophys-Geophys Monogr Ser*, 103: 1–12
- Takahashi K, Anderson B J. 1992. Distribution of ULF energy ($f < 80$ mHz) in the inner magnetosphere: A statistical analysis of AMPTE CCE magnetic field data. *J Geophys Res*, 97: 10751–10773
- Wang Y F, Zong Q G. 2012. Study of the nose event on 11 April 2002 with UBK method. *Sci China Tech Sci*, 55: 1929–1942, doi: 10.1007/s11431-012-4862-1
- Webb D, Orr D. 1975. Spectral studies of geomagnetic pulsations with periods between 20 and 120 sec and their relationship to the plasmapause region. *Planet Space Sci*, 23: 1551–1561