

张华,徐荣栏,沈超等. 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, 2013, 56(3): 731-737, doi:10. 6038/cjg20130302.

Zhang H, Xu R L, Shen C, et al. The simulation of the plasmaspheric morphology during a magnetospheric disturbance event. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(3): 731-737, doi:10. 6038/cjg20130302.

地磁扰动期间等离子体层顶结构的模拟研究

张 华^{1,2}, 徐荣栏^{1,3}, 沈 超¹, 赵 华¹

1 中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室, 北京 100190

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 澳门科技大学, 澳门

摘 要 本文选取 2001 年 6 月 8—10 日的一个亚暴事件, 模拟了在这期间等离子体层的结构演化过程. 选取 Weimer(2001 模式) 电场和 Tsyanenko(1996 模式) 磁场作为背景电磁场, 基于 $E \times B$ 的漂移运动计算磁赤道面内的带电粒子分布, 模拟磁扰期间的等离子体层变化. 模拟了等离子体层顶的结构和形状, 结果有羽状、肩状和通道状结构, 与同一时间点的 EUV/IMAGE 探测结果一致.

关键词 等离子层结构, 等离子体层顶, 模拟, EUV

doi:10. 6038/cjg20130302

中图分类号 P353

收稿日期 2012-03-21, 2012-05-16 收修定稿

The simulation of the plasmaspheric morphology during a magnetospheric disturbance event

ZHANG Hua^{1,2}, XU Rong-Lan^{1,3}, SHEN Chao¹, ZHAO Hua¹

1 State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Macau University of Science and Technology, Macau, China

Abstract In this paper, we have simulated the evolution of the plasmaspheric formation during the geomagnetospheric substorm on 8 to 10 June, 2001. The simulation is based on the mechanism of $E \times B$ drift motion of plasmaspheric charged particles in the magnetic equatorial plane. We used the models of Weimer's convection electric field in ionosphere [2001] and Tsyanenko's magnetic field [T96] as the background fields. The results of the simulations have reproduced the structures of plasmapause, such as plumes, shoulders and channels, which are in consistence with the EUV observations of IMAGE satellite.

Keywords Plasmaspheric formation, Plasmas pause, Simulation, EUV

1 引 言

等离子体层是内磁层内的一个重要区域, 它是由大量的冷等离子体组成. 等离子体层内的粒子环

境和结构受外界条件的变化的影响, 一直是空间物理研究的热点.

过去的研究表明, 等离子体层的半径和形状受地磁活动的控制^[1-2]. 等离子体层的羽状结构的形成和演化, 理论上和实际观测已经做了大量的研

基金项目 国家自然科学基金(40974101, 41231066, 41204116), 国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2011CB811404)和空间天气学国家重点实验室专项基金资助.

作者简介 张华, 男, 1984 年生, 博士研究生, 研究方向: 磁层物理. E-mail: 289534957@qq.com

究^[3-5]. 近来,除了羽状结构外,IMAGE 卫星探测发现了等离子体层的其它形状和结构,如肩状、槽状和通道状等^[6]. 对这些结构和它们形成的机制,在理论上做了大量的探讨^[4,7-8].

目前为止,有两种机制解释等离子体层顶的形成. 一种是漂移运动理论:如果对流电场保持较长时间不变,最外层等势线(LCE)即为等离子体层顶. 或者,对流电场随着时间变化时,磁流体方法计算的最外层流线(LCS)即为等离子体层顶^[9-10]. 另一种是对流不稳定机制,首先由 Lemaire 于 1974 年提出,该理论的主要观点是:当对流电场突然增强时,在等离子体层外层的等离子体分布会变得对流交换不稳定,离心力会驱使等离子体向上运动,沿着磁力线的切面方向,会产生一个密度的突然下降,该位置就是等离子体层顶^[11].

等离子体层的结构,如羽状和肩状,很多研究者通过理论模拟再现了这两种结构并给出了物理解释. Chen(1972)利用漂移运动理论,详细地解释和分析了羽状结构的演化^[1]. Li & Xu(2005)也模拟了一个磁暴期间的等离子体层的演化过程,得到一个细长的等离子体尾巴,包裹着主等离子体层,并作日向对流运动^[5]. 这些结果在理论上解释了等离子体层的羽状结构. Pierrard 和 Lemaire 利用交换不稳定理论,模拟得到等离子体层的羽状和肩状结构,并给出了物理解释,得到了很好的结果^[7,9,12].

本文选用 Weimer 电场和 T96 磁场作为背景电磁场^[13-14],用 Li & Xu(2005)的方法,追踪带电粒子在磁赤道面内的漂移运动,得出不同时刻的粒子分

布,模拟等离子体层的结构. 选择 2001 年 6 月 8—10 日期间的亚暴事件作为例子,并将模拟结果与 EUV/IMAGE 探测结果作比较.

2 选取电磁场模型

2.1 旋转电场

在相对太阳静止的坐标系里,近地空间存在一个旋转电场,它是由于等离子体围绕地球旋转所产生的. 近地空间中任意一点的旋转电场的表达式为:

$$\mathbf{E}_r = (\mathbf{r} \cdot \mathbf{B})\boldsymbol{\Omega} - (\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{B})\mathbf{r}, \quad (1)$$

式中, $\boldsymbol{\Omega}$ 是地球的旋转角速度, \mathbf{r} 是近地空间一点的位置矢量, \mathbf{B} 是 T96 磁场模式计算的磁场值.

图 1 是根据方程(1)计算的,在磁赤道面上旋转电场的等势线图. 从图 1 a 和图 1 b 可以看出等势线的子午不对称,等势线向太阳方向扩展,这是因为 T96 磁场的子午不对称性,背阳面的磁场强度较向阳面小所引起的. 图 2 表示的是,沿着磁赤道面上子午线的电势值随 L 的分布,虚线表示的是背阳面的 L 值与电势值的关系,实线表示的是向阳面的 L 值与电势值的关系,很明显在图中相同的电势值,实线对应的 L 值较虚线大,且 ΔL 与 Dst 值负相关. 这个图可以解释在平静期或小扰动期间,等离子体层的子午不对称性,向阳面的等离子体层比背阳面大,这在实际观测中得到印证.

2.2 对流电场

等离子体层是由对流电场和旋转电场共同作用所形成的,所以等离子体层的形状受电场控制. 目前

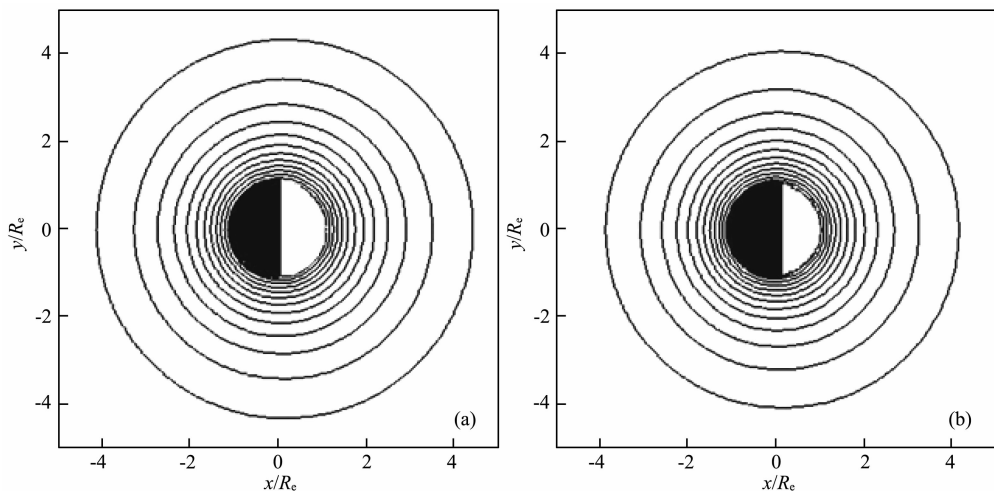


图 1 选取 T96 磁场模式计算的旋转电场等电势图

(a), (b)对应的 Dst 指数分别为 0 nT 和 -50 nT.

Fig. 1 Equipotential contours of the corotation electric field dependent on the Dst index

The panels (a) and (b) correspond to 0 nT, -50 nT, respectively.

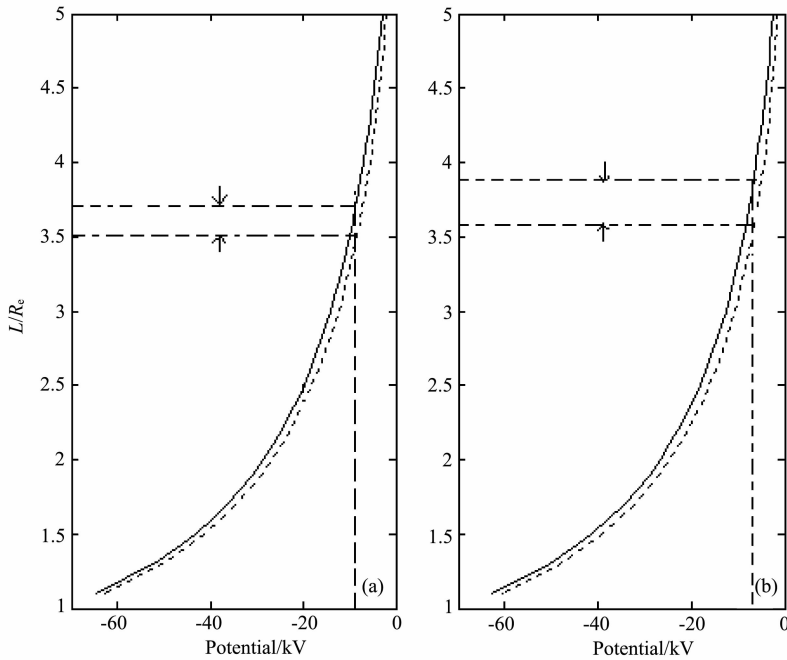


图 2 图 1a 和 1b 中电势值沿子午线的分布

虚线和实线分别表示夜侧和向阳侧 L 值与电势的关系.

Fig. 2 Variation of the potential distribution along the meridian line in Figs. 1a and 1b

The dotted line shows the relation of L and potential in night sector, and the solid line shows the relation of L and potential in day sector.

有很多种电场模式,用于对等离子体层的理论研究.例如,Volland 电场和 E5D 电场^[9],Hepper & Maynard 电场^[10]等.本文选取电离层内的 Weimer 电场(2001),沿 T96 磁力线投影到磁层空间内得到的电场作为对流电场^[14].这个电场的具体描述可以看文献^[13].模型的输入参数包括:太阳风速度和数密度,即太阳风动压;行星际磁场(IMF)的 y 和 z 分量,以及 IMF 的大小;磁轴倾角和 AL 指数.

基于磁力线是等势线的假设,将电离层内的 Weimer 电场的电势沿磁力线投影到磁层空间内,投影电场作为模型的对流电场.计算空间一点 $P(x_{\text{gsm}}, y_{\text{gsm}}, z_{\text{gsm}})$ 的电势值,将 $P(x_{\text{gsm}}, y_{\text{gsm}}, z_{\text{gsm}})$ 点沿 T96 磁力线投影到电离层的 $P'(x'_{\text{gsm}}, y'_{\text{gsm}}, z'_{\text{gsm}})$ 点, P' 和 P 在同一条磁力线上,利用 GSM 坐标系和 CGM 坐标系的转换关系,将 $P'(x'_{\text{gsm}}, y'_{\text{gsm}}, z'_{\text{gsm}})$ 转换为 $P'(x'_{\text{cgm}}, y'_{\text{cgm}}, z'_{\text{cgm}})$,根据 Weimer 电场模式,计算 $P'(x'_{\text{cgm}}, y'_{\text{cgm}}, z'_{\text{cgm}})$ 的电势值,该电势值即为空间一点 $P(x_{\text{gsm}}, y_{\text{gsm}}, z_{\text{gsm}})$ 的电势值^[14].

文献^[14]指出 IMF 的时钟角和大小是影响对流电场的分布形态和大小的最重要参数,这与文献^[10]的结论是一致的.此外,磁轴倾角也影响着对流电场的等势线分布,这在以前的文献中较少提及,其它的参数对对流电场的影响很小^[14].

3 方 法

等离子体层中,带电粒子的运动有梯度漂移和电场漂移.梯度漂移的速度正比于粒子能量,等离子体层中的带电粒子为冷等离子体,假设其能量为零,梯度漂移的速度为零,带电粒子只有电场漂移^[5].

在本文中,计算区域是磁赤道面上 $[2, 7]R_e \times [0, 359]^\circ$,将该区域等步长离散,径向步长是 $0.1R_e$ (地球半径),方位角的步长是 1° .在亚暴期间, $L < 2$ 区域内,对流电场和旋转电场的总等势线是闭合的,在该区域内的粒子受外界条件的影响小,不会流出等离子体层,所以 $L < 2$ 区域在本文中被排除.在每个网格中随机放入 10 个粒子,粒子的密度正比于 L^{-1} ,与实际等离子体层的饱和粒子密度不一致,文献^[5]中的密度是正比于 L^{-3} ,但是用粒子的分布图来研究等离子体层的形状,这个密度模型能够满足要求.然后我们追踪这 108000 个粒子的漂移运动.漂移速度由下面公式给出:

$$\mathbf{V} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / |\mathbf{B}|^2, \quad (2)$$

方程中的 \mathbf{B} 是 T96 模型计算的磁场,电场 \mathbf{E} 是旋转电场和 Weimer 对流电场的叠加.

在二维模拟中,我们只研究投掷角为 90° 的实

验粒子,因此平行于磁力线的速度分量 $v_{\parallel}=0$. 根据第二绝热不变量守恒,沿磁力线方向的积分始终为零,所以粒子始终在磁赤道面内做二维运动. 此外,注入过程的时间比模拟时间长很多,在本文模拟中不考虑电离层的注入过程^[5].

4 结果与分析

本文选择一个典型的亚暴事件,2001年6月8—10日作为模拟时间段^[12],用来研究等离子体层在磁扰期间的演化过程. 图3从上到下分别表示的是2001年6月6—10日期间地磁和 IMF 的实际观测数据:IMF 的 B_y 和 B_z 分量, Dst 指数和 Kp 指数. 从图中可以看出 Kp 指数由 1^+ 逐渐增大到 5^+ , 然后减小,为一个典型的亚暴事件.

磁赤道面 $[2,7]R_e \times [0,359]^\circ$ 区域,每个网格内植入 10 个粒子,在低地磁条件下运行 3 天后,实验粒子继续在 2001 年 6 月 6—7 日的地磁条件下运行两天.

图 4a—4t 显示的是 6 月 8—10 日期间,大约每 3 个小时,实验粒子在磁赤道面上分布的模拟结果,各对应的时间标注在各子图的顶部. 在 21 个子图

中,11 个子图中有蓝色曲线,它们表示的是该时刻 IMAGE/EUV 实际观测到的等离子体层顶,可以与模拟结果作对比,数据由 <http://euvs.lpl.arizona.edu> 提供. 剩下的 10 个子图中没有蓝色曲线,是因为该时刻 EUV 没有观测数据. $L < 2$ 区域为空白区,没有放入实验粒子,原因在第 3 节已经做了解释.

图 4a—4d 表示的是在 6 月 8 日 00:03 UT、02:57 UT、06:00 UT 和 09:00 UT 时刻等离子体层结构的模拟结果. 黑色区域表示等离子体层,等离子体层顶到地心的距离大于 $2R_e$,最里面表示的是地球,黑色阴影区表示的是背阳面,太阳方向在图的右侧. 这四个图的等离子体层顶的形状近似为不规则圆形,半径大约位于 $3.8R_e$ 处. 这段时间内的地磁活动较此前的强度小, LCE 向外扩展到 $5R_e$ 处,粒子不会对流进入磁层. 距离地球越近等离子体层旋转越快,一条细细的尾巴包裹着主等离子体层,并且尾巴逐渐变细变长. Dst 指数在这期间为正,从图 4a—4d 可以看出,等离子体层的子午不对称性不明显.

图 4a—4b 给出了模拟结果与 EUV 观测结果对比,蓝色曲线表示的是等离子体层顶的实际观测形状和位置. EUV 观测的等离子体层顶,除了在昏

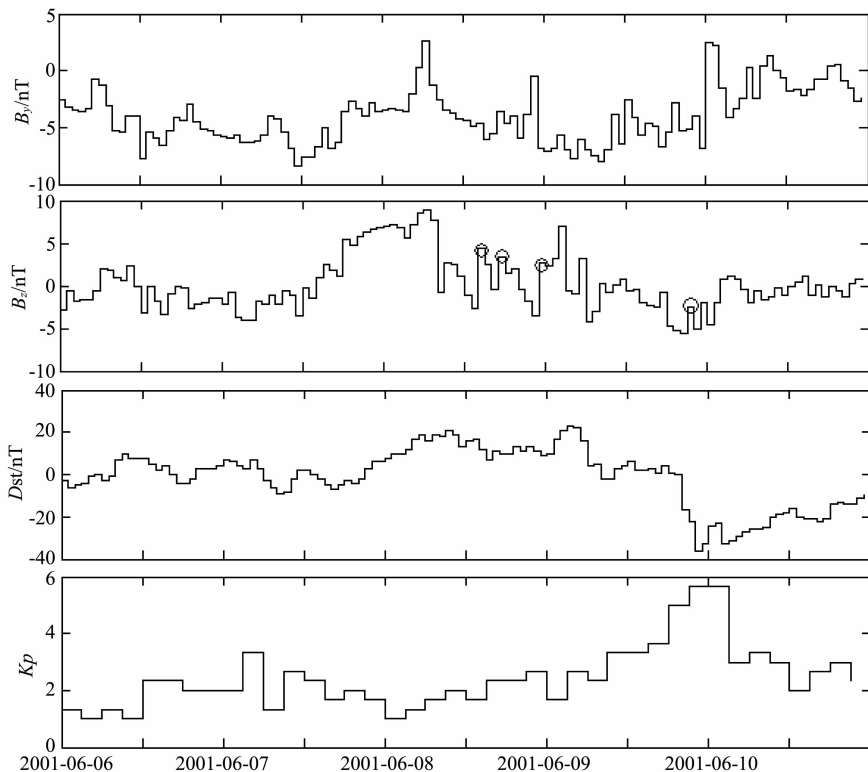


图 3 2001 年 6 月 6—10 日的地磁指数变化,由上到下分别为行星际磁场 B_y , B_z , Dst 指数和 Kp 指数随时间的变化关系

Fig. 3 From top to bottom presented, the variation of the B_y and B_z component of the IMF, the Dst index and Kp index, from 6 to 10 June 2001

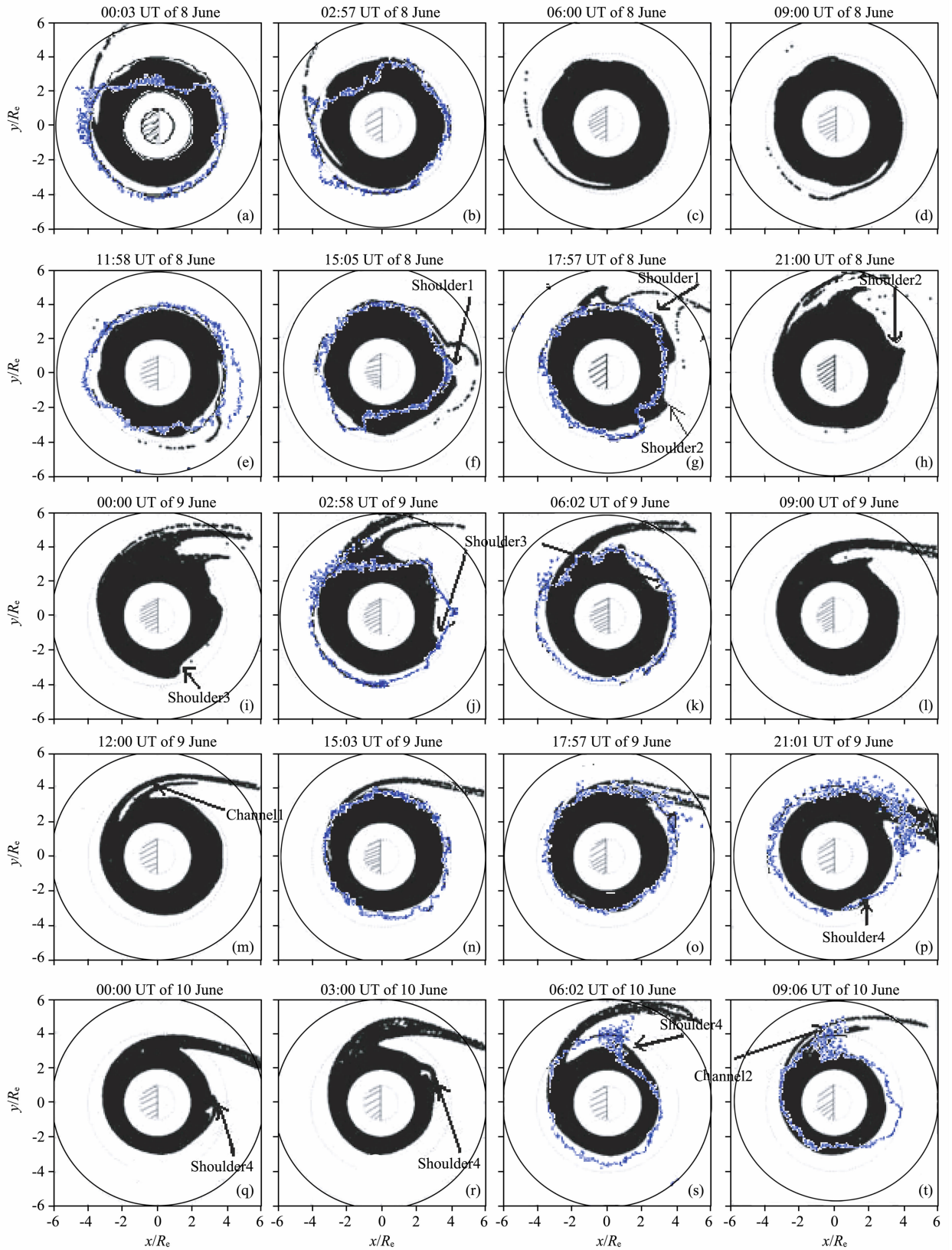


图 4 基于漂移轨道,采用实验粒子的方法,模拟 2001 年 6 月 8—10 日亚暴期间等离子体层结构的分布图
蓝色曲线是同时刻的等离子体层顶 EUV/IMAGE 观测结果,无蓝色曲线是该时刻没有 EUV 观测结果。

Fig. 4 Based on the drift motion, the results of the simulation show particles distribution in the geomagnetic equatorial plane at different times from 8 to 10 June 2001

The blue irregular curves in some panels show the plasmapause observed by EUV in IMAGE, in the geomagnetic equatorial plane. No curves in some panels indicate IMAGE is too close to the Earth to provide a global view of the plasmasphere during this period of time. The dotted circles on the panels correspond to $L=1, 2, 4$ and 6 .

侧区外,基本为圆形且位于 $4R_e$ 处,而模拟结果位于 $3.8R_e$ 处,模拟与观测是基本一致的.但是,模拟和观测还是有一些不同,观测的等离子体层顶形状在昏侧区是不规则的,且距离地球更近,与模拟结果差别较大,这是因为此时的模拟结果与初始的粒子分布有关,并受粒子的初始分布影响,随着时间的推移,等离子体层的形状将与输入参数有关而与初始的等离子体无关,类似于数学上的迭代方法.

图 4e—4t 是在 6 月 8 日 11:58 UT 到 10 日 09:06 UT 期间等离子体层的模拟结果,大约每 3 h 画出一幅图.模拟结果出现了等离子体层典型的结构,如羽状、肩状和通道状,下面将分别对模拟结果进行分析.

以前的研究表明,等离子体层肩状结构出现在 IMF 由南向北转换时刻,也就是对流电场由强变弱时刻,且首次出现在磁地方时的晨侧位置^[4,9,12].本文模拟结果也产生了四个肩状结构,首次分别出现在图 4f、4g、4i 和 4p 中(文中按照出现的先后顺序依次标注为 shoulder1, shoulder2, shoulder3 和 shoulder4),肩状首次出现的时刻,依次分别为 8 日的 14:00 UT、17:00 UT、23:00 UT 和 9 日的 21:00 UT,在图 3 的第二行子图中用红色圆圈标注.以前的研究结果指出肩状出现在 IMF 分量 B_z 由负转正时刻,但是本文研究发现并非所有的 B_z 由负转正时刻都出现肩状,只有在 B_z 值较之前 24 h 的值都小,且由负转正时等离子体层肩状才出现,所以在图 3 中 B_z 有多次的负正切换过程而只有四个肩状结构的出现.作者认为这是由于对流电场值必须比之前 24 h 的值大,LCE 向地球更近的位置收缩,才能对最外层的等离子体层粒子产生剥蚀作用,出现肩状结构.EUV 观测结果出现了两个肩状,分别出现在图 4f 和 4g 中,但是磁地方时稍微落后模拟结果.肩状出现以后,会绕着地球逆时针旋转,由晨侧区旋转到下午区,向太阳方向对流,形成等离子体层羽状结构(或称为等离子体层尾),图 4h 和 4i 中的羽状结构就是由 shoulder1 和 shoulder2 形成的,图 4t 中的第二个羽状结构是由 shoulder4 形成.

模拟结果显示了等离子体层羽状结构的形成,图 4h—4t 中在下午区都有羽状结构的存在,上面分析得出肩状对流是形成羽状结构的一种方式.当 IMF 南向时,对流电场增强,LCE 向地球方向收缩,居于等离子体层外层的粒子被剥蚀,在下午区向太阳方向对流进入磁层顶,形成长长的尾巴,即为等离子体层羽状结构.模拟结果出现了三个双羽状结构,

分别在图 4j、4m 和 4t 中,第二个羽状结构是来自于等离子体层顶的凸起部分,也就是等离子体层肩,它旋转到下午区向太阳方向对流形成第二羽状结构.图 4o、4p、4s 和 4t 中显示探测结果也出现了羽状结构,实际的等离子体层顶形状如这四个图中的蓝色曲线所示,模拟结果与实际探测是吻合的.

等离子体层顶的通道状结构,是羽状包裹主等离子体层形成的空洞,或者是双羽之间的空洞,然后围绕地球旋转并最终消失,图 4m 和 4t 中模拟结果出现了通道状结构(按照出现的顺序标注为 channel1 和 channel2).

5 结论与讨论

本文采用基于漂移运动的方法,计算带电粒子在磁赤道面上的运动,模拟了 2001 年 6 月 8—10 日期间的亚暴事件中等离子体层演化.经过上述的分析,得到如下结果:

(1)模式中输入的参数:IMF 的时钟角和磁轴倾角对对流电场的影晌很大,所以磁扰期间等离子体层受其影响较大;其它参数如 D_{st} 指数、 AL 指数和太阳风动压对等离子体层的影响较小; D_{st} 指数在小扰动情况下是产生等离子体层子午不对称性的原因.

(2)当 IMF 方向由南向北转换时,在磁地方时的晨侧位置产生等离子体层肩,但是并不是所有 IMF 由南向北转换时都产生等离子体层肩,只有在此时的对流电场较前 24 h 都小的情况下才出现.

(3)本文模拟出了等离子体层的羽状结构,且有双羽状结构产生.等离子体层的羽状出现在下午区或昏侧区,并向太阳方向对流,羽状逐渐变细,最终消失.模拟过程显示双羽状结构是肩状对流形成的.

(4)模拟结果产生了通道状结构,它是由等离子体层羽围绕主等离子体层形成的空洞构成的.

本文模拟过程中没有考虑电离层的注入过程,在此后的工作中将注入过程考虑进来,期望得到与实际探测结果更加接近的等离子体层图像.如果每个粒子携带密度权重,利用密度值表示等离子体层顶,则可以优化结果中的细尾巴状,模拟与观测结果更加吻合.

致谢 感谢 D. R Weimer 教授提供的电场模式代码,感谢 Tsyganenko 教授提供的 T96 磁场模拟代码,感谢 ACE 卫星数据中心和 IMAGE 数据中心提供的数据,感谢京都大学提供的地磁指数,感谢黄娅

博士和曾刚博士提供的帮助.

参考文献(References)

- [1] Chen A J, Wolf R A. Effects on the plasmasphere of a time-varying convection electric field. *Planet. Space Sci.*, 1972, 20(4): 483-509.
- [2] 何飞, 张效信, 陈波等. 地球等离子体层极紫外波段辐射特性计算. *中国科学*, 2010, 40(1): 71-76.
He F, Zhang X X, Chen B, et al. The calculation of the earth plasmaspheric extreme ultraviolet radiation. *Science China* (in Chinese), 2010, 40(1): 71-76.
- [3] Darrouzet F, De Keyser J, Pierrard V. The Earth's Plasmasphere A CLUSTER and IMAGE Perspective. New York: Springer, 2009: 58.
- [4] Goldstein J, Spiro R W, Reiff P H, et al. IMF-driven overshielding electric field and the origin of the plasmaspheric shoulder of May 24, 2000. *Geophys. Res. Lett.*, 2002, 29(16): 66-1-66-4.
- [5] Li L, Xu R L. Model of the evolution of the plasmasphere during a geomagnetic storm. *Adv. Space. Res.*, 2005, 36(10): 1895-1899.
- [6] Sandel B R, Broadfoot A L, Curtis C C, et al. The extreme ultraviolet imager investigation for the IMAGE mission. *Space Sci. Rev.*, 2000, 91(1-2): 197-242.
- [7] Lemaire J F. The formation of the light-ion trough and peeling off the plasmasphere. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2001, 63(11): 1285-1291.
- [8] Liemohn M W, Ridley A J, Gallagher D L, et al. Dependence of plasmaspheric morphology on the electric field description during the recovery phase of the 17 April 2002 magnetic storm. *J. Geophys. Res.*, 2004, 109: A03209, doi: 10.1029/2003JA010304.
- [9] Pierrard V, Khazanov G V, Cabrera J, et al. Influence of the convection electric field models on predicted plasmopause positions during magnetic storms. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113: A08212, doi: 10.1029/2007JA012612.
- [10] Doe R A, Moldwin M B, Mendillo M. Plasmopause morphology determined from an empirical ionospheric convection model. *J. Geophys. Res.*, 2002, 97: 1151-1156.
- [11] Lemaire J F. The "Roche-limit" of ionospheric plasma and the formation of the plasmopause. *Planet. Space Sci.*, 1974, 22: 757-766.
- [12] Pierrard V, Cabrera J. Comparisons between EUV/IMAGE observations and numerical simulations of the plasmopause formation. *Ann. Geophys.*, 2005, 23(7): 2635-2646.
- [13] Weimer D R. An improved model of ionospheric electric potentials including substorm perturbations and application to the Geospace Environment Modeling November 24, 1996, event. *J. Geophys. Res.*, 2001, 106(A1): 407-416.
- [14] 张华, 徐荣栏, 赵华等. Weimer 电场模式在地球磁层内的特征. *地球物理学报*, 2012, 55(1): 36-45.
Zhang H, Xu R L, Zhao H, et al. The characteristics of the model of Weimer's electric field within the magnetosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2012, 55(1): 36-45.

(本文编辑 何 燕)