

杨升高, 张北辰, 张清和等. 2014. 数值模拟日侧磁场重联对极盖等离子体云块形成的影响. 地球物理学报, 57(11):3551-3557, doi:10.6038/cjg20141107.

Yang S G, Zhang B C, Zhang Q H, et al. 2014. Numerical simulation of the role of dayside magnetic reconnection in polar cap patch formation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(11):3551-3557, doi:10.6038/cjg20141107.

数值模拟日侧磁场重联对极盖等离子体云块形成的影响

杨升高^{1,2}, 张北辰^{2*}, 张清和³, 方涵先¹, 刘俊明², 周霄林⁴, 张建彬⁵

1 解放军理工大学气象海洋学院, 南京 211101

2 中国极地研究中心, 上海 200136

3 山东大学空间科学与物理学院, 山东 威海 264209

4 61741 部队气象中心气象保障室, 北京 100094

5 63655 部队五室, 乌鲁木齐 841700

摘要 极盖等离子体云块是极区空间天气重要现象之一, 其形成过程是当前重要研究课题. 观测表明, 日侧磁场重联对应的极区电离层高速流可能对舌状等离子体(TOI)形成“切割”作用, 最终形成极盖等离子体云块. 伴随磁场重联, 同时存在极光粒子沉降, 会引起 F 层等离子体密度的增大, 阻碍“切割”效应. 本文利用耦合极区电离层模型, 模拟研究电场和软电子沉降共同作用下 F 层等离子体密度的演化. 结果表明, 在局部电离层电场大于一定数值(80 mV)的情况下, “切割”效应能有效发生. 并详细分析了“切割”效应发生时等离子体各参量的演化过程, 对“切割”效应的内在物理过程进行了探讨.

关键词 极盖等离子体云块; 磁重联; 对流电场

doi:10.6038/cjg20141107

中图分类号 P352

收稿日期 2013-12-03, 2014-10-17 收修定稿

Numerical simulation of the role of dayside magnetic reconnection in polar cap patch formation

YANG Sheng-Gao¹, ZHANG Bei-Chen^{2*}, ZHANG Qing-He³, FANG Han-Xian¹,
LIU Jun-Ming², ZHOU Xiao-Lin⁴, ZHANG Jian-Bin⁵

1 Institute of Meteorology and Ocean, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 211101, China

2 Polar Research Institute of China, Shanghai 200136, China

3 School of Space Science and Physics, Shandong University, Weihai Shandong 264209, China

4 Unit No. 61741 of PLA, Beijing 100094, China

5 Unit No. 63655 of PLA, Wulumuqi 841700, China

Abstract As a significant polar space weather phenomenon, the polar cap patch formation is one of the important research subjects. Observations suggest that the strong convection flow due to the dayside magnetic reconnection has a “breaking off” effect on the TOI (Tongue of ionization), as a result the polar cap patch is formed. However, the auroral particles precipitation increases

基金项目 国家重点基础研究发展计划(2012CB825603), 国家自然科学基金(41104090, 41274148, 40505005, 41431072, 41274149), 国家重点实验室专项基金(Y22612A33S), 南北极环境综合考察与评估专项(CHINARE-2014-02-03)资助.

作者简介 杨升高, 男, 1987 年生, 解放军理工大学气象海洋学院在读博士生, 学位论文研究方向为极区电离层物理.

E-mail: shenggao_yang@163.com

*** 通讯作者** 张北辰, 男, 1970 年生, 中国极地研究中心研究员, 主要研究日地空间扰动和极区电离层-磁层耦合的数值模拟.

E-mail: zhangbeichen@pric.gov.cn

the F region electron density, which will block the “breaking off” effect. Based on a self-consistent model of polar ionosphere, this paper simulated the F region plasma density evolution under the combined effect of soft precipitation and electric field. The results show that when local electric field is more than 80mV, the “breaking off” occurs effectively. Also, we analyzed the evolution of various plasma parameters in the process of the “breaking off”, and discussed its internal physical mechanism.

Keywords Polar cap patch; Magnetic reconnection; Convection electric field

1 引言

极盖等离子体云块(Polar cap patch)是极区空间天气重要的现象之一,是2~10倍于背景等离子体密度的位于极盖区的空间区域,以 $300\sim 1000\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的速度运动,尺度从几百到上千公里(Bust et al., 2007). 等离子体云块可使超视距无线电通讯和星地链路中断,直接影响近地飞行器和低轨卫星正常运行及地面通讯,其形成过程是当前重要的研究课题.

Weber等(1984)首次在全天空辉成像仪上观测到极盖等离子体云块,自此越来越多的观测手段被用来研究等离子体云块的形成、发展和消亡(Hosokawa, 2011; Moen, 2007),这些手段包括相干散射高频雷达、非相干散射雷达、测高仪、卫星以及其他光学观测仪器等. 对于极盖等离子体云块形成机制,一直以来存在争议,还没有形成统一定论. 而形成等离子体云块的等离子体源,有两种观点,一种认为来自亚极光带的太阳远紫外辐射(Solar EUV radiation)(Foster, 1993),另一种是极隙区软电子沉降(Walker, 1999). 通过对多种观测数据分析,一些物理过程被提出用来解释等离子体云块的产生机制. Anderson等(1988)认为突然增强的跨极盖电势,使得对流范围扩大,对流赤道向边界向低纬延伸,这样会把磁低纬F层光致电离的高密度等离子体带入极隙区附近,进而对流输送进极盖,当极盖边界缩回原位时,就会“切割”等离子体云块. 这种机制的发生依赖于对流边界附近高电子密度梯度的存在. 通过对三次等离子体云块形成过程的相干散射雷达观测, Milan等(2002)认为受IMF控制的对流形态的变化是等离子体云块形成的主导机制. Rodger等(1994)通过对两个极盖等离子体云块形成事件的分析,发现等离子体云块形成于磁层极隙区在电离层投影区域附近,并伴随FCEs(Flow Channel Events)发生和IMF B_y 快速变化. Rodger等(1994)发现FCEs是一条经向延伸($>900\text{ km}$)的窄

带(100 km)区域,该区域等离子体速度明显强于背景,峰值速度可达 $3\text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$,出现在极隙区的电离层投影区域,南半球(北半球)更易在 $B_y<0(B_y>0)$ 情况下产生.

太阳风可以通过日侧磁层顶向地球磁层运输或转换质量、动量和能量,而磁场重联是这一运输或转换过程中最为重要的物理过程之一. 当行星际磁场南向(IMF $B_z<0$),在向日侧磁层顶与地磁场联接,太阳风携带的等离子体可沿着磁力线直接进入磁层;当行星际磁场北向(IMF $B_z>0$)时,在背日侧磁层顶与地磁场联接(Dungey, 1961). Zhang等(2013a)首次直接观测到2011年9月强磁暴期间,极区电离层等离子体云块形成、进入极盖、跨极盖、出极盖以及向日回流的完整演化过程,并揭示了磁场重联在等离子体云块形成和演化过程中的调制作用. Valladares等(1996)数值模拟了磁中午附近等离子体云块进入极盖的过程,未对源区进一步明确,着重分析了焦耳热对 O^+ 变化的影响. 本文针对一个典型的日侧磁场重联事件,考虑伴随磁场重联的强电场和低能电子沉降,数值模拟重联事件发生期间局地F层电子密度的变化,对强电场“切割”高密度光致电离层等离子体的过程进行分析.

2 模型简介

采用Zhang等(2003)的极区电离层一维自治模型,在综合考虑沉降粒子电离、光化学过程、运输过程的基础上(刘俊明等,2009;刘顺林等,2005;张北辰等,2001),通过求解连续性方程、动量方程以及能量方程,得到电离层等离子体各参量. 考虑的离子包括 O^+ , O_2^+ , NO^+ , N_2^+ , 中性成分包括 O 、 O_2 、 NO 、 N_2 . 模型着重考虑强电场作用下Farley-Buneman不稳定性及电急流区焦耳热、摩擦热等引起的电离层各种热效应(Zhang et al., 2004).

磁重联过程表现在极区电离层的一个重要特征就是局地对流电场的增强. 本文模拟日侧磁场重联

引起的局部增强电场作用下电离层 F 层等离子体参量的变化(Zhang et al., 2004). 通过分析 2004 年 3 月 13 日北半球极区 TEC 分布, 观测到 TOI(Tongue of Ionization)结构, 在 0710-0715UT 时刻发生日侧磁重联(Zhang et al., 2013b), 高频雷达观测到晨侧局地对流电场增强, 如图 1. 图 2 是 2004 年 3 月 13 日 0600-0700UT 行星际磁场 IMF 三分量随时间的变化, 可以看出, 在 0715UT(延时后时间)附近以及之前, IMF 有持续南向(负的 B_z)和向阳分量(正的 B_x), 并有晨向分量(负的 B_y), 这都是形成日侧磁重联非常有利的条件(Crooker, 1979).

数值模拟考虑对流电场增强区域的电子密度、温度变化, 选取模拟区域地理位置为 $69.6^\circ\text{N}, 19.2^\circ\text{E}$, 对流增强区软电子沉降平均能量为 0.5 keV , 能通

量为 $0.5\text{ erg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. 与 2004 年 3 月 13 日相对应, A_p 指数选为 15, $F_{10.7}$ 和 $F_{10.7}A$ 分别为 $102.6\times 10^{-22}(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})\cdot\text{Hz}^{-1}$. 理论模拟改变对流电场大小, $20\sim 100\text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$. 时间步长为 10 s .

3 模拟结果

图 3 是仅考虑光致电离过程的电离层等离子体密度、温度高度剖面, 模型将其作为初始值, 计算在其他物理过程如电子沉降、对流电场等作用下的电离层参量随时间演化.

图 4 中三曲线分别代表光致电离(实线)、光致电离+软电子沉降(虚线)和光致电离+软电子沉降+ $80\text{ mV}\cdot\text{m}^{-1}$ 电场(点划线)作用下 250 km 高度

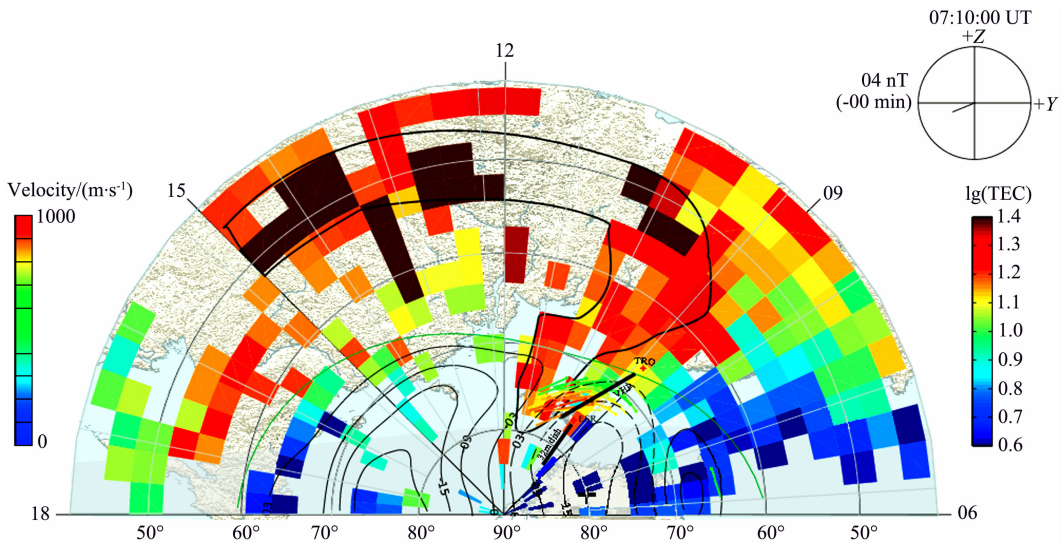


图 1 2004 年 3 月 13 日 GPS TEC 观测到的北半球典型 TOI(Zhang et al., 2013b)

Fig. 1 Typical TOI structure in the Northern Hemisphere on 2004 Mar. 13 observed by GPS TEC(Zhang et al., 2013b)

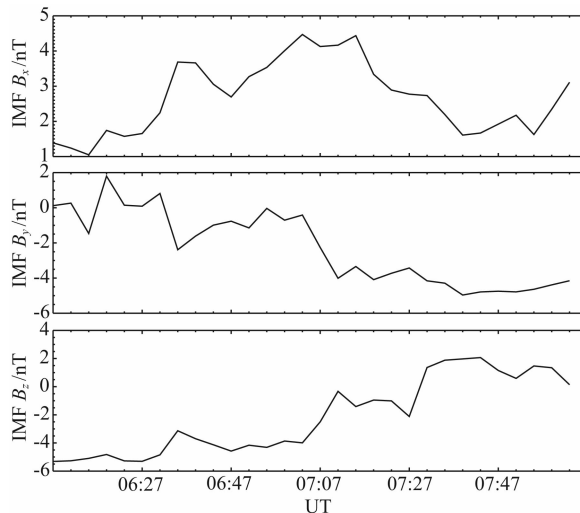


图 2 2004 年 3 月 13 日 0600-0700UT 行星际磁场 IMF 三分量 B_x (a)、 B_y (b) 和 B_z (c) 的时间变化(延时 7 min)

Fig. 2 IMF B_x (a), B_y (b) and B_z (c) variation with UT during 0600-0700UT on 2004 Mar. 13 (lagged 7 min)

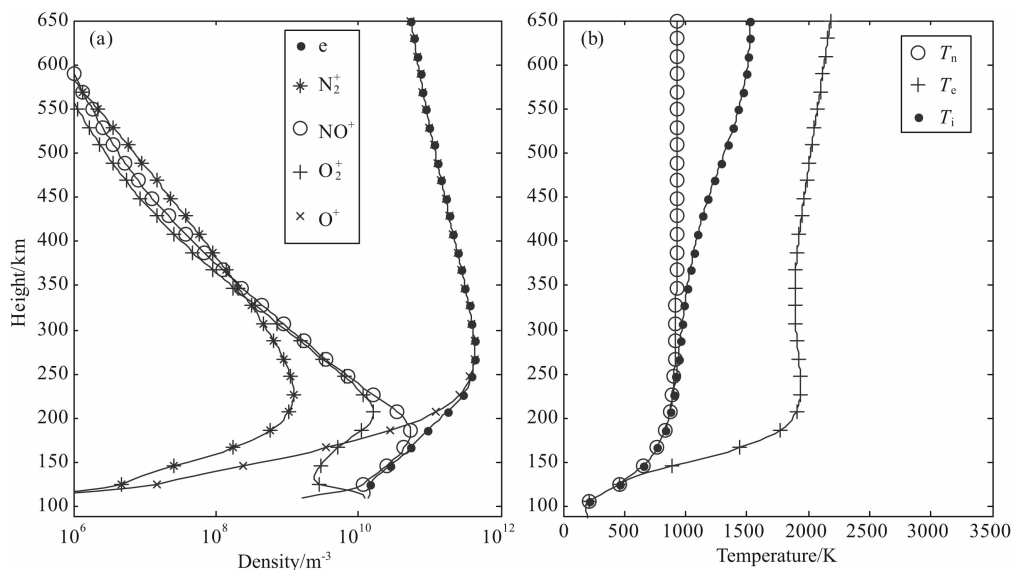


图 3 光致电离条件下电离层(a)等离子体密度、(b)电子和离子温度(T_e 、 T_i)廓线

Fig. 3 Altitude profiles of (a) plasma densities, (b) electron and ion temperature in the presence of the photoionization

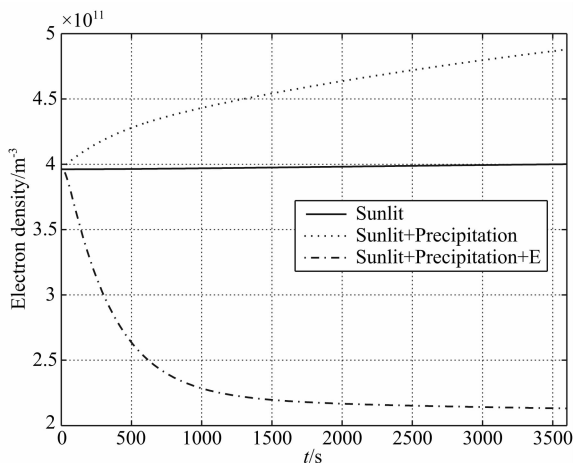


图 4 不同物理过程作用下 250km 高度电子密度的时间演化

Fig. 4 The electron density evolution at the height of 250 km in the presence of the three conditions

电子密度的演化图,横轴是以 s 为单位的演化时间,纵轴是对应的电离层 250 km 高度的电子密度,时间分辨率 10 s,空间分辨率 4 km.从图中明显看出,粒子沉降能显著增大 F 层电子数密度.当日侧重联引起的局地增强电场即使存在软电子额外电离源的情况下,仍能使局地电子密度小于周围背景电子密度,起到“切割”高密度等离子体结构的作用.所需时间为几十分钟量级.

图 5a 是 $80 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场并软电子沉降共同作用下电子密度高度剖面随时间的演化,色标值对应某高度、时间的电子密度.可见在电场作用下,F 层电子密度随时间减小.为直观电场作用下电子密

度高度剖面的时间演化,取每 100 s 间隔电子密度高度剖面显示于图 5b 中,箭头指向时间演化方向,在箭头所指方向,F 层峰高逐渐向上抬升,F1 层变得愈加明显.

图 6 是在 $80 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场并软电子沉降共同作用下 1 h 后电离层等离子体参量的高度剖面.同仅考虑光致电离作用下各参量高度剖面(图 3)相比,强电场作用下焦耳加热明显,离子温度在 150 km 左右显著增大,F 层电子温度增大.可以看出,F1 层明显,主要因为分子离子密度在此高度增大造成.

图 7 是不同强度电场作用下,1 小时后 $N_m F_2$ 随电场的变化.图中虚线为仅在光致电离作用下的 $N_m F_2$.由图可见电场 $> 53 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ (对应等离子体对流速度为 $930 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 局地电子密度减小;当电场 $> 80 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ (对应等离子体对流速度为 $1403 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$) 时,电子密度减小为背景的 1/2,可有效“切割”光致电离层等离子体结构,使之形成独立等离子体结构.

4 总结讨论

本文考虑磁场重联引起的局地电场增强和软电子沉降过程,数值模拟了一个典型日侧磁重联事件(2004 年 3 月 13 日 0710UT)期间局地 ($69.6^\circ \text{N}, 19.2^\circ \text{E}$) F 层等离子体参量变化.结果显示,由日侧磁场重联引起的极区电离层局地对流电场的增强在大于一定量值的条件下能有效降低局地等离子体密度,形成“切割”效应,有利于极盖等离子体云块的形成.

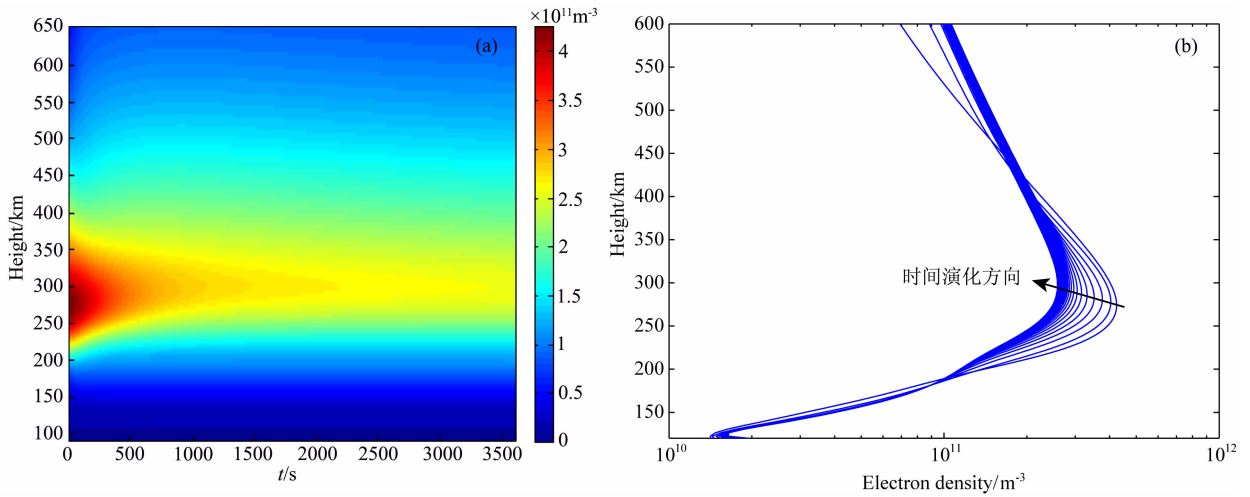


图 5 电子密度剖面的时间演化(a)及 100 s 间隔的电子密度剖面演化(b)

Fig. 5 Evolution of the electron density profiles(a) and Evolution of the electron density profiles (b)

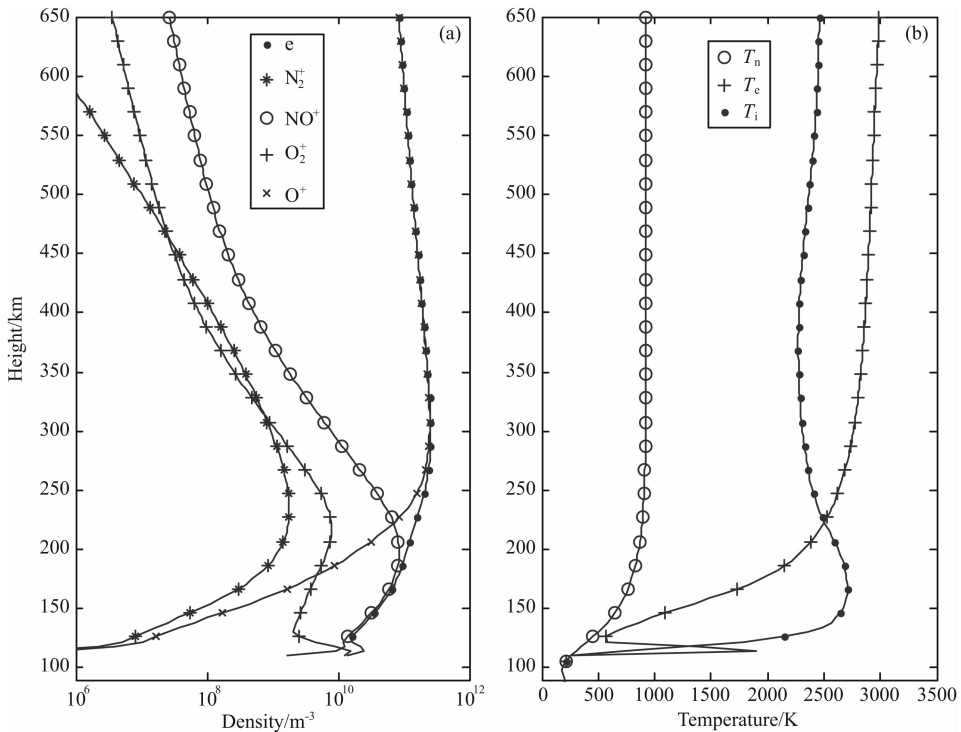


图 6 $80 \text{ mV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场并软电子沉降作用下等离子体密度(a)、温度(b)剖面

Fig. 6 Altitude profiles of plasma densities (a), temperature (b) in the presence of 80 mV electric field and soft electron precipitation

为进一步理解电场对 F 层等离子体密度的“切割”效应,图 8 给出 80 mV 电场并软电子沉降作用 1 h 后等离子体密度、温度与光电离初始值之差,如图 8a 显示, O^+ 密度在 250 km 高度减小幅度达到最大值,是 F 层等离子体密度减小的主要贡献者, NO^+ 密度的增大是 F1 层明显增强的主要原因. 磁场重联引起的局部电场增强使得等离子体对流增强,焦耳加热明显,电子温度增大. 由于摩擦加热,离

子温度快速增加,促使化学反应 $\text{O}^+ + \text{N}_2 \rightarrow \text{NO}^+ + \text{N}$ 的反应速率增大,导致 O^+ 同分子离子的复合率增加和 O^+ 上行通量增加(Balmforth, et al., 1999),这些过程造成 F 层 O^+ 浓度的减小和低电离层分子离子浓度的增加.

Anderson 等(1988)认为形成等离子体云块的电离源是来自较低纬度的太阳极紫外辐射,因此在模型中未考虑粒子沉降电离,且忽略中性风的作用,

通过改变对流模式中的跨极盖电场和极盖半径大小,得出不断变化的对流模式是形成极盖等离子云块的原因。Sojka 等(1993)利用 PL(Phillips Laboratory)和 TDIM(Time-Dependent Ionospheric Model)两个独立的电离层物理模型,模拟了极盖等离子云块的形成过程:在 IMF B_z 南向分量时,伴随着对流增强,电离层舌状电离物(TOI, Tongue of Ionization)从极隙延伸至极盖区,在此过程中形成等离子体云块。受 IMF B_y 分量控制的随时间变化的对流形态决定 TOI 从日侧($B_y > 0$)或夜侧($B_y < 0$)进入极盖。该模拟分别在 PL 和 TDIM 模型中考虑了 Hairston and Heelis(1990)的半球经验对流模式和 Heppner and Maynard(1987)对流模式,但未涉及复杂的等离子体源和汇,认为 TOI 就是形成等离子体云块的源。Valladares(1996)的模拟结果同本文基本一致,快速运动的等离子体流(plasma jet)使得焦耳加热增强,增强的焦耳加热促使离子温度升高,从而增加了 O^+ 的复合率,使得 F 层等离子体总密度减小,而本文考虑光电离和软电子沉降共同作用下,认为磁

场重联引起局部电场增强,通过改变电场大小,发现当局地电场大于 80 mV(对应等离子体对流速度约 $1.4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$),可发生有效切割,形成等离子体云块,这同等离子体云块形成时等离子体速度增强峰值 $3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ 的观测事实相符。

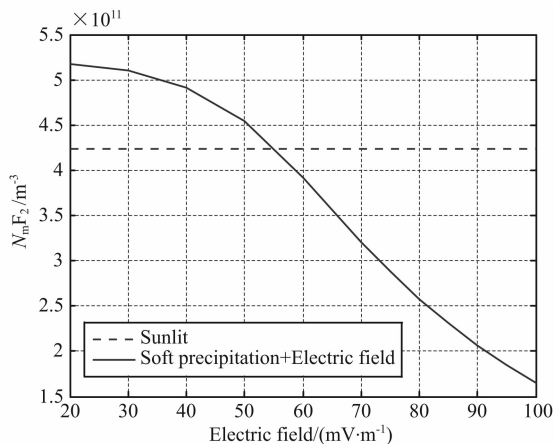


图 7 $N_m F_2$ 随电场变化

Fig. 7 $N_m F_2$ variation with electric field

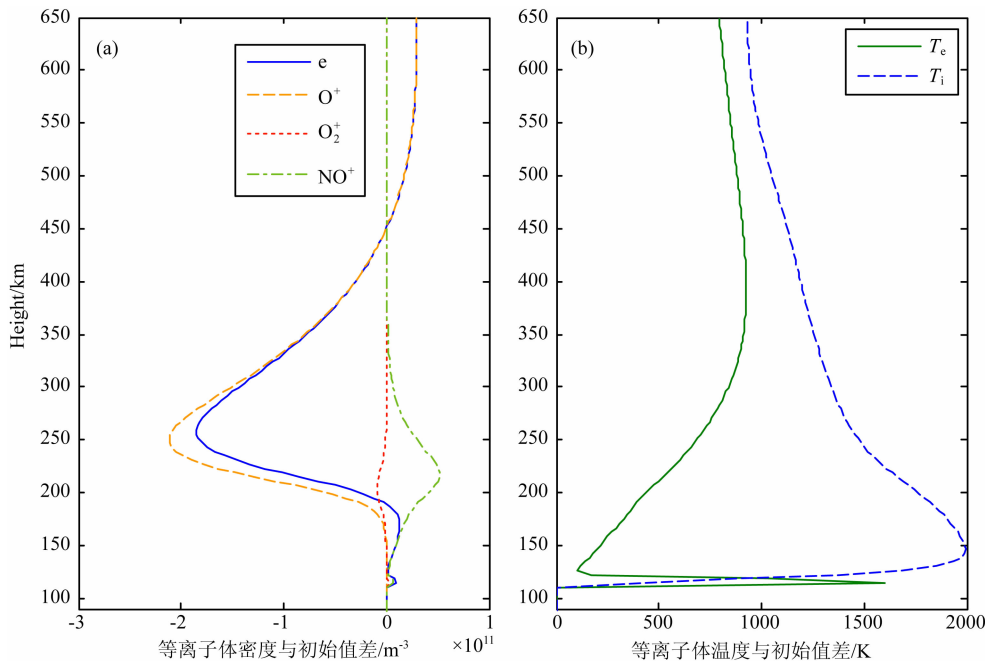


图 8 80 mV 电场并软电子沉降作用下 1 h 等离子密度(a);温度(b)与光电离初始值之差

Fig. 8 The difference between plasma parameters in the role of 80 mV electric field and soft precipitation and initial plasma parameters

致谢 本文用到的 IMF 数据来自网站: <http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/>,在此表示感谢。

References

Anderson D N, Buchau J, Heelis R A. 1988. Origin of density enhancements in the winter polar cap ionosphere. *Radio*

Science, 23(4): 513-519.

Balmforth H F, Moffett R J, Rodger A S. 1999. Localized structure in the cusp and high-latitude ionosphere: a modelling study. *Ann. Geophys.*, 17: 455-462.

Bust G S, Crowley G. 2007. Tracking of polar cap ionospheric patches using data assimilation. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978—2012), 112(A5): A05307, doi: 10.1029/2005JA011597.

- Crooker N U. 1979. Dayside merging and cusp geometry. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978—2012), 84 (A3): 951-959.
- Dungey J W. 1961. Interplanetary magnetic field and the auroral zones. *Phys. Rev. Lett.*, 6(2): 47-48.
- Foster J C. 1993. Storm time plasma transport at middle and high latitudes. *Journal of Geophysical Research: Space Physics* (1978—2012), 98(A2): 1675-1689.
- Hairston M R, Heelis R A. 1990. Model of the high-latitude ionospheric convection pattern during southward interplanetary magnetic field using DE 2 data. *J. Geophys. Res.*, 95(A3): 2333-2343.
- Hepner J P, Maynard N C. 1987. Empirical high-latitude electric field models. *J. Geophys. Res.*, 92(A5): 4467-4489.
- Hosokawa K, Moen J I, Shiokawa K, et al. 2011. Decay of polar cap patch. *J. Geophys. Res.*, 116(A5): A05306, doi: 10.1029/2010JA016297.
- Liu J M, Zhang B C, Liu R Y, et al. 2009. Effects of the precipitation electrons on the polar ionosphere with different energy spectrum. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 52(6): 1429-1437.
- Liu S L, Zhang B C, Liu R Y, et al. 2005. The influence of upper boundary conditions on the polar ionosphere. *Chinese J. Space Sci.* (in Chinese), 25(4): 504-509.
- Milan S E, Lester M, Yeoman T K. 2002. HF radar polar patch formation revisited: Summer and winter variations in dayside plasma structuring. *Ann. Geophys.*, 20: 487-499.
- Moen J, Gulbrandsen N, Lorentzen A, et al. 2007. On the MLT distribution of F region polar cap patches at night. *Geophys. Res. Lett.*, 34(14): L14113, doi: 10.1029/2007GL029632.
- Rodger A S, Pinnock M, Dudeney J R, et al. 1994. A new mechanism for polar patch formation. *J. Geophys. Res.*, 99 (A4): 6425-6436.
- Sojka J J, Bowline M D, Schunk R W, et al. 1993. Modeling polar cap F-region patches using time varying convection. *Geophys. Res. Lett.*, 20(17): 1783-1786.
- Valladares C E, Decker D T, Sheehan R, et al. 1996. Modeling the formation of polar cap patches using large plasma flows. *Radio Science*, 31(3): 573-593.
- Walker I K, Moen J, Kersley L, et al. 1999. On the possible role of cusp/cleft precipitation in the formation of polar-cap patches. *Ann. Geophys.*, 17: 1298-1305.
- Weber E J, Buchau J, Moore J G, et al. 1984. F layer ionization patches in the polar cap. *J. Geophys. Res.*, 89(A3): 1683-1694.
- Zhang B C, Kamide Y, Liu R Y. 2003. Response of electron temperature to field-aligned current carried by thermal electrons: A model. *J. Geophys. Res.*, 108(A5): 1169, doi: 10.1029/2002JA009532.
- Zhang B C, Kamide Y, Liu R Y, et al. 2004. A modeling study of ionospheric conductivities in the high-latitude electrojet regions. *J. Geophys. Res.*, 109(A4), doi: 10.1029/2003JA010181.
- Zhang B C, Liu R Y, Liu S L. 2001. Simulation study on the influences of the precipitating electrons on the polar ionosphere. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 44(3): 311-319.
- Zhang Q H, Zhang B C, Lockwood M, et al. 2013a. Direct observations of the evolution of polar cap ionization patches. *Science*, 339(6127): 1597-1600.
- Zhang Q H, Zhang B C, Moen J, et al. 2013b. Polar cap patch segmentation of the tongue of ionization in the morning convection cell. *Geophys. Res. Lett.*, 40(12): 2918-2922, doi: 10.1002/grl.50616.

附中文参考文献

- 刘俊明,张北辰,刘瑞源等. 2009. 不同能谱沉降电子对极区电离层的影响. *地球物理学报*, 52(6): 1429-1437.
- 刘顺林,张北辰,刘瑞源等. 2005. 不同上边界条件下的极区电离层数值模拟. *空间科学学报*, 25(4): 504-509.
- 张北辰,刘瑞源,刘顺林. 2001. 极区电子沉降对电离层影响的模拟研究. *地球物理学报*, 44(3): 311-319.

(本文编辑 汪海英)