Chin. J. Space Sci., 2005, **25**(6): 504—509

不同上边界条件下的极区电离层数值模拟*

刘顺林[1,2]　张北辰[1]　刘瑞源[1]　徐中华[1]

[1](中国极地研究中心　上海 200136)

[2](武汉大学电子信息学院)

摘　要　利用一维自洽的极区电离层模型，研究了沿磁力线方向不同电离层-磁层耦合条件下极区电离层的响应. 此模型在 110—610 km 的电离层空间区域内，综合求解描述极区电离层的连续性方程、动量方程和能量方程，以得到电离层数值解. 研究发现，上边界条件在 200 km 以上的高度能显著地影响电离层参量的形态. 较高的 O^+ 上行速度对应较低的 F 层峰值和较高的电子温度. 不同边界 O^+ 上行速度对应的温度高度剖面完全不同. 200 km 以上电子温度高度剖面不但由来自磁层的热流通量所控制，同时还受到场向 O^+ 速度的影响. 对利用电离层模型研究电离层内部物理过程提出了建议.

关键词　极区电离层；电离层-磁层耦合；数值模拟

中图法分类号　P 353

The Influence of Upper Boundary Conditions on the Polar Ionosphere

LIU Shunlin[1,2]　ZHANG Beichen[1]　LIU Ruiyuan[1]　XU Zhonghua[1]

[1](*Polar Research Institute of China, Shanghai* 200136)

[2](*Electronic Information School, Wuhan University*)

Abstract　A one-dimensional high-latitude ionospheric model, in which the continuity, momentum and energy equations are solved self-consistently in the altitude range between 110 and 610 km, is used to study the ionospheric responses to different upper boundary conditions. It is found that upper boundary conditions may influence significantly profiles of ionospheric quantities at higher altitudes. A larger upward O^+ velocity at the upper boundary results in lower h_mF_2 and F region electron densities, and consequently higher electron temperatures. The difference in h_mF_2 between an upper boundary velocity of 0.0 m/s and 200 m/s reaches about 76 km. The altitude profiles of temperatures are quite different from each other corresponding to different upward ion velocities and heat fluxes from the magnetosphere. The Coulomb collisions between electrons and ions play an important role in shaping the electron temperature profiles at altitudes higher than the h_mF_2. The simulated electron temperature height profiles are similar to the measurements made in earlier studies. The altitude profile of electron temperature above 200 km is influenced by both downward heat fluxes and field-aligned O^+ velocities, while the ion temperature and the electron density have

* 国家自然科学基金项目 (40474056,40474057) 和科技部社会公益研究专项基金项目 (2003DIB4J135) 共同资助

2004-12-08 收到原稿，　2005-05-25 收到修定稿

their responses at altitudes higher than 250 km. Proposals are given while specifying the upper boundary conditions in the simulation of the high-latitude ionosphere.

Key words Polar ionosphere, Ionosphere-magnetosphere coupling, Numerical simulation

1 引言

电离层与磁层间的耦合是当今空间天气研究的一个重要内容. 极区地球磁力线几乎垂直地存在于电离层. 沿着磁力线, 电离层和磁层通过粒子交换、场向电流和传导热流等耦合在一起. 考虑磁层影响因子对电离层的影响, 具体在极区电离层数值模拟中, 必须仔细考虑电离层上边界离子通量和热流等的特征. 其中热流直接与电子温度梯度和场向电流有关. 然而这些物理量的特征, 特别是热流的特征, 在顶部电离层高度, 通常较难有直接的观测数据. 这对将极区电离层数值模拟结果与实际电离层观测的比较工作带来了一定的难度. 同时极区电离层不同的位置对应着磁层不同的区域, 位于不同地磁纬度上的电离层受到来自磁层的影响也各不相同.

通常电离层模型往往将有限高度区域中的物理过程作为研究对象. 输运过程涉及的通量和热流的大小不但与所研究的空间区域有关, 同时也与沿磁力线往上延伸到研究区域以外高度的物理过程紧密相连. 这使得数值模拟中边界条件给定的不确定性大为增加. 因此有必要对不同的上边界条件对模拟得到的电离层的影响程度有一个较深入的认识. 本文利用一维自洽的极区电离层模型, 详细分析了不同顶部边界条件下电离层的响应, 探讨极区电离层模拟中对边界条件的处理.

2 一维自洽的极区电离层模型

2.1 模型简介

本文采用一维自洽的极区电离层模型开展研究. 该模型最早综合求解电离层各离子连续性方程和动量方程, 曾用来研究极区电子沉降对电离层的影响 [1]. 目前该模型已进一步发展成为综合求解电离层电子、离子能量方程的完全自洽的模型, 并被用来研究场向电流相关的电子温度变化 [2].

模型考虑电离层各离子的基本物理、化学过程, 其中主要离子成分包括 O^+, O_2^+, NO^+ 和 N_2^+. 中性大气模式 MSIS86 给出中性大气成分 O,O_2,NO 和 N_2 及中性大气温度 [3]; 引起光致电离的太阳辐射包括主要的 10 个 EUV 波段 [4]; 主要的光、化学反应由文献 [5] 给出, 各反应式见文献 [1]. 在对方程求解时, 针对不同的高度, 不区分主要与次要的离子成分, 将各离子连续性方程和动量方程耦和求解得到电离层各成分的高度剖面, 自洽地得到分子离子和原子离子在 E 层和 F 层间的自然过渡.

与文献 [1] 不同, 电子、离子温度通过综合求解各自的能量方程得到, 而不是通过经验模型人为给定. 这使得求得的电离层参量在理论上完全自洽. 在电子能量方程中, 光电子加热成为电子的主要热源, 同时考虑了热传导、对流和膨胀/压缩等输运过程. 由非弹性碰撞引起的能量损失包括对 N_2 和 O_2 的振动激发和回旋激发, 以及主要的氧原子 ^3P 能级到 ^1D 能级的跃迁 [6]. 其他的能量损失有电子与离子的弹性碰撞和热传递、与中性粒子 N_2,O_2 和 O 的弹性碰撞等. 离子能量方程中, 输运过程只考虑由温度梯度所引起的热传导作用. 离子通过与电子的库仑碰撞和热交换, 与中性大气的摩擦获得能量. 本文假设各离子具有相同的温度, NO^+,N_2^+ 和 O_2^+ 各离子则分别通过与 O, O_2 和 N_2 的相互作用将能量最终传递给中性大气.

在利用经验模型提供电离层模型所必须的参数时相应的太阳电波辐射流量 $F_{10.7}$ 选为 $100 \times 10^{-22}\,\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot Hz^{-1}}$, 地磁活动 Ap 指数选为 6. 这相对于比较宁静的空间环境状态. 模拟中山站位置 (地理经纬度 76.4°E, 69.4°S) 上空、冬至 (南极夏天) 光致电离最强时的电离层作为考察的背景态, 此时太阳天顶角为 46.5°. 基于背景驱动参数的选取, 光电子对电子的加热率通过模型 [7] 求得.

在模型中进一步假设电离层水平分层. 在中山站地磁纬度, 地球磁力线近似垂直于地面, 因此目前模型中没考虑地磁倾角的因素. 也没考虑实际中性风的可能变化, 虽然在模型中已经假设 5 m/s 的向下的中性风存在. 电子沉降的加热和电离及相关的场向电流的作用在本文中不予考虑, 对流电场的影响也暂忽略. 本文主要从理论上考虑电离层 - 磁层耦合因素中离子通量和热流对电离层的影响, 这是基于典型的准稳态背景电离层基础之上, 上述系

列假设对本文的结论不产生实质性的影响.

2.2 边界条件

计算模拟区域为 110—610 km. 对于各离子成分, 底部边界使其产生率与消失率相等, 即完全达到光化平衡以得到各自的数密度; 电子、离子加热率与消失率平衡以得到各自在底部边界的温度. 对顶部边界而言, 除 O^+ 以外的其他各离子设为输运平衡 [8], 对 O^+ 则给出其上行速度; 离子温度梯度设为零, 与电子能量方程对应的上边界条件为给定电子热流通量. 电子热流通量与场向电流和电子温度梯度有关, 具体表示为

$$q_e = -\beta J_{//} - K_e \frac{\partial T_e}{\partial z}. \quad (1)$$

其中, 第一项 $-\beta J_{//}$ 代表场向电流对电子热流的贡献, β 为热电系数, $J_{//}$ 为场向电流; 第二项为热传导对电子热流的贡献, K_e 为热传导系数, 取决于电子温度、中性成分的密度和电子与中性大气的碰撞, 具体表达式由文献 [6] 给出.

计算步骤为: 首先假设电子、离子具有与中性大气相同的温度, 求得光化平衡解. 以此作为初始试探解, 对各离子密度和电子、离子温度进行综合求解, 反复迭代, 直到所求电子密度达到一定的精度为止. 这里要求 $|n_e^{N+1} - n_e^N|/n_e^N \leqslant 10^{-7}$, 其中 n_e 为电子密度, N 为第 N 次迭代步. O^+ 上行速度和电子热流构成了本文主要考虑的电离层 - 磁层耦合因子. 通过对这两个参量的改变, 探讨电离层在不同高度的响应.

3 模拟结果与讨论

EISCAT 雷达能观测到极隙区纬度电离层, 其观测表明, 在电离层 600 km 高度, 沿磁力线上行 O^+ 速度平均可在 50—200 m/s 变化 [9]. 中山站所处不变磁纬为 74.5°. 卫星观测到的磁层构造在电离层高度的映射分布与中山站位置比较发现, 白天扇区中山站可位于磁层中性片 (CPS)、边界等离子体片 (BPS) 和低纬边界层 (LLBL) 或磁层极隙区的投影之下 [10]. 这意味着即使在白天扇区, 中山站上空电离层顶部边界条件变化极其复杂. 对于边界 O^+ 上行速度 ($v_{i,top}$), 我们分别考虑了速度为 0.0, 10.0, 20.0, 100.0, 200.0 km/s 5 种情况. 虽然通过雷达测量能直接得到相应电子温度, 而电子热流量的大小则没有直接观测. 理论模型和观测的比较发现, 向下热流通量在 2×10^9—2×10^{10} eV·cm^{-2}·s^{-1} 之间变化 [11]. 本文所考虑的热流通量大小选为 1×10^{10} eV·cm^{-2}·s^{-1}. 为便于比较分析, 同时考虑通量为零的情况. 在不考虑场向电流贡献的情况下, 后一种情况实际对应在上边界处电子温度梯度为零.

3.1 热流通量为零情况

图 1 和图 2 所示为上边界附近热流通量为零时不同 O^+ 上行速度情形下电离层参量的高度剖面. 从图 1 的电子密度高度剖面可以看出, 较大的 O^+ 上行速度对应的 F 层电子密度相对较小, 此时 F 层峰值高度 (h_mF_2) 也较低. h_mF_2 变化从 $v_{i,top} = 200.0$ m/s 时的 296 km 到 $v_{i,top} = 200.0$ m/s 时的 372 km, 变化幅度达 76 km. 由此可见上边界处 O^+ 上行速度能影响电离层等离子体输运过程与光化学平衡过程二者相抗衡时的状态, 即影响 F 层峰值高度所在位置, 但对 F 层以下高度电子密度几乎没有影响. 在 F 区及以上高度, 由于 O^+ 是主要的离子成分, 因此 $[O^+]$ 的多少决定了电子密度的高低, 所以不同的 O^+ 上行速度会有不同的电子密度数值. 较低的 F 层峰值高度和较小的电子密度的对应显然与当地的电子消失较快有关. 如果定义 F 层

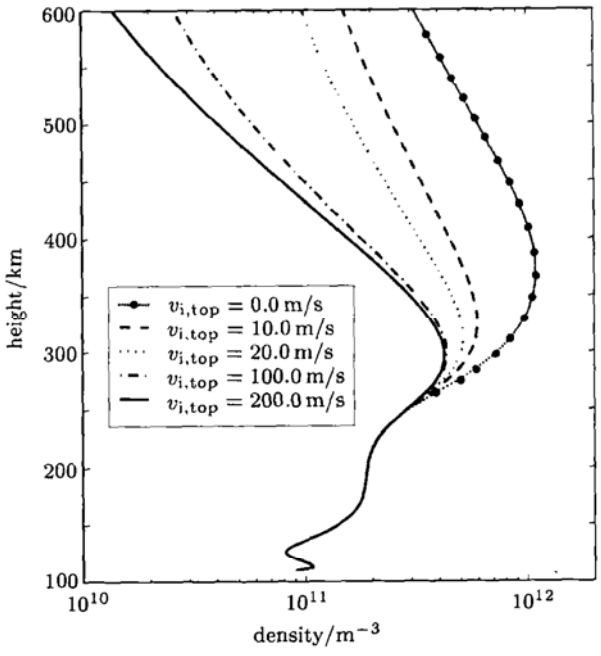

图 1 热流通量为零时上边界处不同 O^+ 上行速度所对应的电子浓度高度剖面

Fig.1 Height profiles of electron density with different O^+ outflow velocities and zero heat flux at the upper boundary

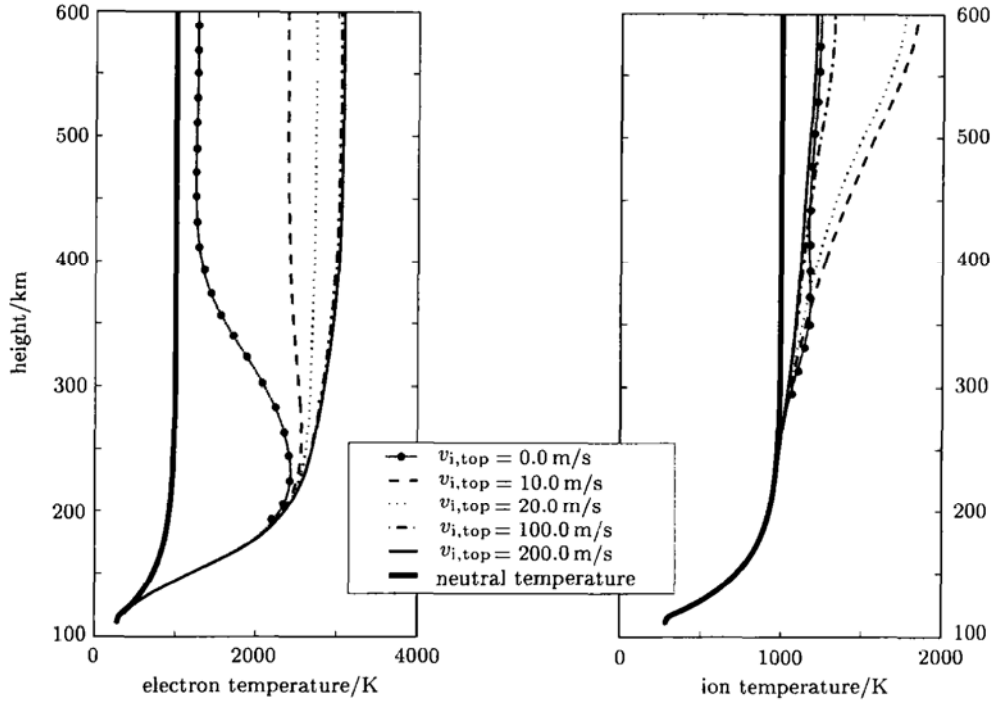

图 2 热流通量为零时上边界处不同 O^+ 上行速度所对应的电子、离子温度高度剖面

Fig.2 Height profiles of ion and electron temperatures with different O^+ outflow velocities and zero heat flux at the upper boundary

峰值高度上下相对于峰值浓度各减小某一百分比的两点间的高度差作为 F 层峰值的厚度，则模拟结果还发现，较小的 O^+ 上行速度得到的 F 层较厚.

图 2 为电子离子温度的高度剖面. 此时上边界热通量为零，显然这点要求上边界温度梯度为零，图中曲线很好地反映了这一特点. 由于本文所用电离层模型的特点之一是将电子、离子能量方程与连续性方程和动量方程联合求解，因此理论上能自洽

3.2 热流通量为 $1 \times 10^{10}\,\mathrm{eV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}$ 情况

热流通量为零的情况显然与实际情况不符，因为在极区场向电流的存在和上千公里高度存在有效的电子加热机制 [12]，使得向下的热流通量不可避免. 图 2 中对应于 O^+ 上行速度为零的情形所得的电子温度剖面较少被观测到 [13]. 图 3 和图 4 所示为上边界附近热流通量为 $1 \times 10^{10}\,\mathrm{eV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}$ 时不同 O^+ 上行速度情形下电离层参量的高度剖面.

终消失在中性大气中，此时电子温度在一定的高度出现峰值.

从图 1 和图 2 中还可以得到一个重要结论，即上边界对模拟电离层不同参量的影响高度各不相同. 电子浓度的变化主要发生在 250 km 以上的高度，离子温度变化所在高度与此相同，电子温度的变化开始于较低的地方.

时的 372 km. 图 4 模拟所得的电子、离子温度均有观测实例与之分别相对应 [13]. 其中电子温度在 200 km 以上高度由磁层来的热流所控制. 模拟结果还发现，当电子密度较大时，电子温度剖面形态还受到上边界 O^+ 上行速度的影响：在约 230 km 出现峰值，较高高度谷的出现与 F 层峰值有关.

针对 O^+ 上行速度为零的情形，我们在上边界

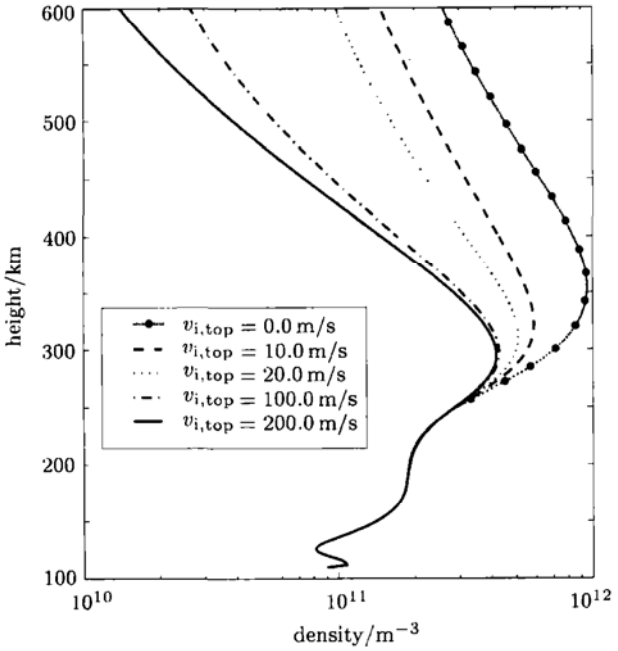

图 3 热流通量为 $1 \times 10^{10}\,\mathrm{eV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}$ 时上边界处不同 O^+ 上行速度所对应的电子浓度高度剖面

Fig.3 Height profiles of electron density with different O^+ outflow velocities and a heat flux of $1 \times 10^{10}\,\mathrm{eV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}$ at the upper boundary

处用给定相应电子温度的条件进行计算，结果表明所得电离层各参量剖面与给定热流通量的结果完全一致. 鉴于以热流通量作为上边界条件虽然物理概念清晰但其缺乏直接的观测作比较，我们认为可以用观测数据，例如，欧洲非相干散射雷达或卫星在顶部电离层中探测电子温度值作为模型的上边界条件. 其实用性主要体现在利用电离层模型探讨电离层内部物理过程，例如，考虑极区中性大气与电离层粒子之间的相互作用和极区对流电场对电离层影响时.

4 总结

利用一维自洽的极区电离层模型，研究了沿磁力线方向不同电离层 - 磁层耦合条件下极区电离层的响应. 此模型在 110—610 km 的电离层空间区域内，综合求解描述极区电离层的连续性方程、动量方程和能量方程，以得到电离层数值解. 研究了不同上边界条件下电离层的变化.

(1) 上边界条件能显著影响模拟电离层较高高度的参量分布. 对电子密度和离子温度的影响主要

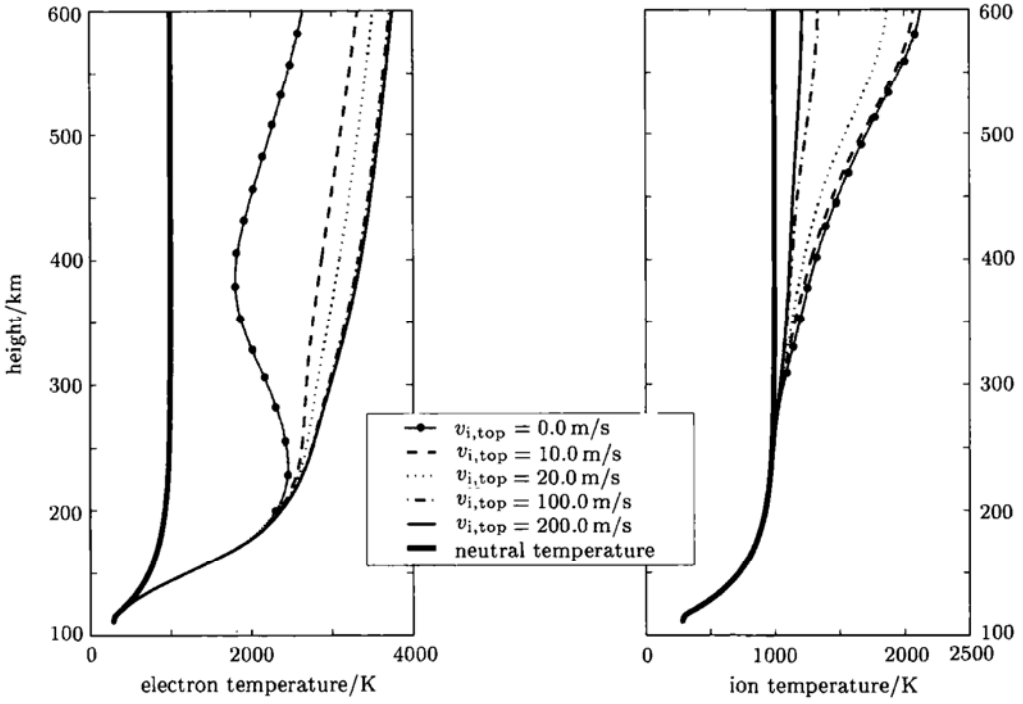

图 4 热流通量为 $1 \times 10^{10}\,\mathrm{eV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}$ 时上边界处不同 O^+ 上行速度所对应的电子、离子温度高度剖面

Fig.4 Height profiles of ion and electron temperatures with different O^+ outflow velocities and a heat flux of $1 \times 10^{10}\,\mathrm{eV \cdot cm^{-2} \cdot s^{-1}}$ at the upper boundary

发生在 250 km 及以上高度，对电子温度的影响则在 200 km 以上的高度.

(2) 较小的 O^+ 上行速度得到的 F 层峰值电子密度较大，此时对应的电子温度较小. 200 km 以上的电子温度主要由来自磁层的热流所控制，然而其高度剖面的形态同时受到 O^+ 上行速度的影响.

(3) 给定顶部边界电子温度和电子热流通量能得到完全一致的电离层参量高度剖面. 建议在利用电离层模型开展电离层内部物理过程研究时，采用观测值作为顶部边界条件.

本文主要考察顶部边界条件对电离层的影响，对模拟和观测资料的分析具有一定的参考价值. 我们选取中山站所在位置的南极夏季电离层作为背景，同时也考虑到中山站日侧可能经过不同的磁层结构区域在电离层中的投影，从而有本文不同上边界条件的假设. 然而实际中山站电离层特性远比本文考察的物理因素的影响要复杂得多，其他的因素包括水平输运过程对日侧电离层的影响、粒子沉降对极区电离层的加热和电离等. 进一步的工作将较全面考虑极区主要的物理过程，与中山站实际观测电离层进行比较研究.

参考文献

[1] Zhang Beichen, Liu Ruiyuan, Liu Shunlin, He Longsong. A simulation study of the influence of soft precipitating electrons on the polar ionosphere. *Chin. J. Polar Sci.*, 1999, **10**(2):117—124

[2] Zhang Beichen, Kamide Y, Liu Ruiyuan. Response of electron temperature to field-aligned current carried by thermal electrons: A model. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(A5):1169

[3] Hedin A E. MSIS-86 thermospheric model. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A5):4649—4662

[4] Taieb C G, Scialom, Kockarts G. A dynamical effect in the ionospheric F1 layer. *Planet. Space Sci.*, 1978, **26**(11):1007—1016

[5] Schunk R W, Walker J C G. Theoretical ion density in the lower ionosphere. *Planet. Space Sci.*, 1973, **21**(11):1875—1896

[6] Banks P M, Kockarts G. Aeronomy. New York: Academic Press, 1973. 267—271

[7] Richards P G, Torr D G. A simple theoretical model for calculating and parameterizing the ionospheric photoelectron flux. *J. Geophys. Res.*, 1983, **88**:2155—2162

[8] Brekke A. Physics of the Upper Polar Atmosphere. Chichester: John Wiley & Sons Ltd in Association with Praxis Publishing Ltd, 1997. 223—225

[9] Buchert S, Ogawa Y, Fujii R, Eyken A. Observations of diverging field-aligned ion flow with the ESR. *Ann. Geophys.*, 2004, **22**(3):889—899

[10] Newell T, Meng C I. Mapping the dayside ionosphere to the magnetosphere according to particle precipitation characteristics. *J. Geophys. Res.*, 1992, **19**(6):609—612

[11] Min Q L, Watkins B J. Determination of auroral heat fluxes and thermal ion outflows using a numerical ionospheric model and incoherent-scatter radar data. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(A1):251—256

[12] Ganguli S B, Palmadesso P J. Plasma transport in the auroral return current region. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A8):8673—8690

[13] Mahajan K K. Extent of thermal non-equilibrium in the ionosphere. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1967, **29**(9):1137—1141