甚低频电磁波变态低电离层的数值模拟*

刘立波 吴向阳 涂剑南
(武汉大学空间物理系 430072)
保宗悌
(华南师范大学物理系)

摘 要

利用由波对电离层加热的模型和适合于夜间低电离层的离子化学模型构成的综合模型，对甚低频波射入低电离层时变态电离层的程度受中性成分参数变化及低电离层离子化学反应参数的影响进行了模拟计算．计算结果表明，中性成分的浓度与温度及电离层离子化学反应参数密切地影响着加热的效果．

关键词 甚低频电磁波—低电离层

1 引 言

Inan[1]报道在南极 Palmer 站接收到的 NAA 发射机信号幅度中有设置在 Aguadilla 的 NAU 发射机信号的调制，从而在实验上证实了理论所预言的 VLF 波能显著地改变低电离层中电子的温度和浓度．国外有人在不考虑波连续加热时对电子浓度变化的影响的情况下，研究过加热效果受发射机的功率、频率和所处磁纬等因素的影响[1,3,5]及利用电子温度推算加热后电子浓度的改变[2,4]．

加热过程中电子浓度的变化无疑会影响电子温度变化的程度，因此有必要建立一个反映加热过程真实图象的模型来对这一现象进行研究．我们利用 Rodriguez 等[5]的加热模型，结合 Glukhov 等[6]提出的夜间 D 区离子化学模型组成一个综合模型．在考虑了波连续加热时电子浓度的变化可能会导致的效应，将其应用于 VLF 频段波对电离层连续加热时电离层反应的研究．

低电离层电子与中性成分存在着密切的相互作用．考察中性成分参数及影响离子化学过程的化学反应参数对加热时的影响有重要的意义．本文介绍利用上述综合模型对离子化学反应参数和不同中性成分参数影响低频波变态效果的程度计算得到的初步结果．

* 国家自然科学青年基金资助项目
1996－02－05 收到原稿，1996－12－29 收到修定稿

2　基本原理

2.1　加热模型

低频电波通过低电离层时损失的能量绝大部分被电子吸收，因而对电子的加热主要是电子而不是离子影响电波的折射指数($n=\mu-i\chi$)．可以近似认为电波的两波模(O, X)在介质中损失的能量之和Q，就是在单位空间中被电子吸收的能量．电子获得能量并部分传给离子和中性成分．若在单位时间单位空间的电子从波得到的能量及电子所损失的能量分别为Q和L，则加热所引起的电子温度变化率[3,5]为

$$\frac{\mathrm{d}T_e}{\mathrm{d}t}=\frac{2(Q-L)}{3kN_e}\ . \tag{1}$$

这里k为玻尔兹曼常数，T_e、N_e分别是电子的温度与数密度．

若不考虑波模的反射、散射及模间的耦合等所产生的效应，每个模的Poynting能流密度S可由设置在地面的发射机的频率ω、发射机总功率P_{tot}及方向模式来确定．假设VLF发射机与地面构成一垂直于地面的短偶极子．以发射机为原点，取沿地磁北极方向为极轴，以逆时针方向为φ方向建立坐标系．在电离层下边界(取距地面高度为50 km)的一点(r, θ, φ)处，每一波模的Poynting能流密度S可表示为

$$S_{O,X}(r,\theta)=\frac{3P_{\mathrm{tot}}\sin^2\theta}{8\pi r^2}\ . \tag{2}$$

在WKB解近似下，除源以外的任意一点(r, θ, φ)的Poynting能流密度S可由

$$\frac{\mathrm{d}S_{O,X}}{\mathrm{d}r}=-2\frac{S_{O,X}(r,\theta)}{r}-U_{O,X}(r,\theta) \tag{3}$$

确定．每个波模损失的能量$U(=2\omega\chi S/c)$随即可以给出．由该点的$Q(=U_O+U_X)$及采用文献[5]给出的电子所损失的能量L的表达式，就可以得到电子温度变化率$\mathrm{d}T_e/\mathrm{d}t$.

2.2　夜间D区离子化学模型

本文采用Glukhov等[6]的化学模型．此模型将夜间低电离层中的带电粒子归纳为四类：电子；主要的初次正离子(如NO^+, O_2^+)；所有负离子和水合正离子．各种带电粒子的数密度分别用N_e、N^+、N^-和N_ν^+来表示．各成分数密度的时间变化率由

$$\mathrm{d}N_e/\mathrm{d}t=I_0+\gamma N^- -\beta N_e-\alpha_d N_e N^+-\alpha_d' N_e N_\nu^+\ ; \tag{4}$$

$$\mathrm{d}N^-/\mathrm{d}t=\beta N_e-\gamma N^- -\alpha_i N^-(N^+ +N_\nu^+); \tag{5}$$

$$\mathrm{d}N_\nu^+/\mathrm{d}t=-\alpha_d' N_e N_\nu^+ +BN^+ -\alpha_i N^- N_\nu^+ \tag{6}$$

给出．这里γ是中性粒子与负离子碰撞使电子脱离的分离率；β为电子附着到中性粒子上导致N_e减少的速率；α_d、α_d'分别为电子与初级正离子和水合正离子复合所引起的损失；α_i是负离子和正离子复合的有效复合率；B是初级正离子转化为水合正离子的有效转化率；I_0是夜间电子产生率．反应速率或系数采用文献[4]的表达式．

假设初始时刻各类粒子处于化学平衡，由电中性假设($N^-+N_e=N^+ +N_\nu^+$)及

(4)—(6)式，即可求出初始 N^+，N^-，N_X^+ 和背景电子产生率 I_0. 根据初始参数便可以求出电子的浓度变化率.

3 模式参数选取

地球磁场采用中心偶极子模式

$$B=B_{eq}\left(\frac{R_e}{R_e+h}\right)^3\sqrt{1+3\sin^2\lambda}\ . \tag{10}$$

这里 $B_{eq}=3.085\times10^{-5}$T，$R_e=6371.2$km，$\lambda$ 和 h 分别是磁纬及离地面的高度.

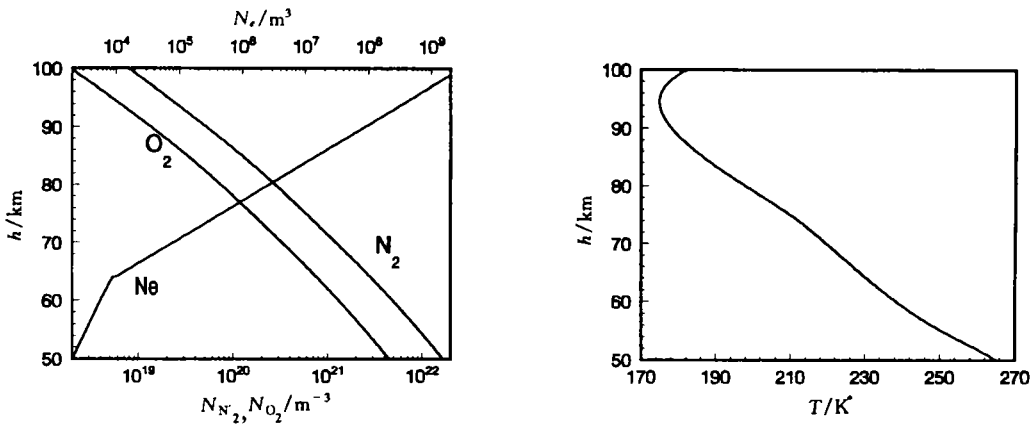


图 1 电子的初始浓度及中性成分参数的高度剖面

Fig.1 The initial profiles of electron concentration and parameters of neutrals

中性大气参数受太阳及地磁活动等许多因素控制，其选取有很大的随意性. 在本文中性大气温度模式 T_n 和主要的中性成分 N_2，O_2 的数密度由大气经验模式 MSISE90[7] 给出(见图 1). 取 $Ap=8$，$F_{10.7}=120$ 单位，等分(第 90 天)0100LT 由 MSISE90 给出参数(大气温度和 N_2，O_2 的数密度的高度剖面分别记以 T90 和 N90)作为代表进行考察. 取电子初始温度等于中性大气温度，而其初始浓度(见图 1)在 h 高度采用

$$N_e=1.43\times10^{13}\exp(ah-b). \tag{11}$$

在 64km 以上，$a=0.35\text{km}^{-1}$，$b=43.5$；而在 64km 以下，$a=0.11\text{km}^{-1}$，$b=28.37$[5].

4 结果与讨论

选取 NAA 发射机参数(24kHz，1000 kW；44°39′ N，67°17′ W)作为计算参数，联合求解电子温度和浓度变化率，便可得到不同时刻的电子温度和浓度. 为明确起见，我们给出的结果是电子参数在通过发射机和加热效果最大点所在的射线随高度变化值.

4.1 中性成分的影响

加热使电子温度和浓度与初始值的比值 T_e/T_{e0}，N_e/N_{e0} 出现双峰，导致在 80—

90km 范围电子浓度的高度梯度变陡. 图 2 所示为中性成分参数对加热的影响(对参数的处理见图 2 的图注). 从图 2 可以看到：① 随所取大气数密度的减小，T_e / T_{e0}，N_e / N_{e0} 双峰增大，T_e / T_{e0} 在 87km 处的最大值由 2、3.6 增大到 5.7；而 N_e / N_{e0} 在 95km 最大由 1.07、1.16 增大到 1.47. 在 90km 以下数密度减少. 大气数密度越大，峰位置上抬越大. ② 随背景温度变大，电子参数变化增大，但对峰位置影响不明显.

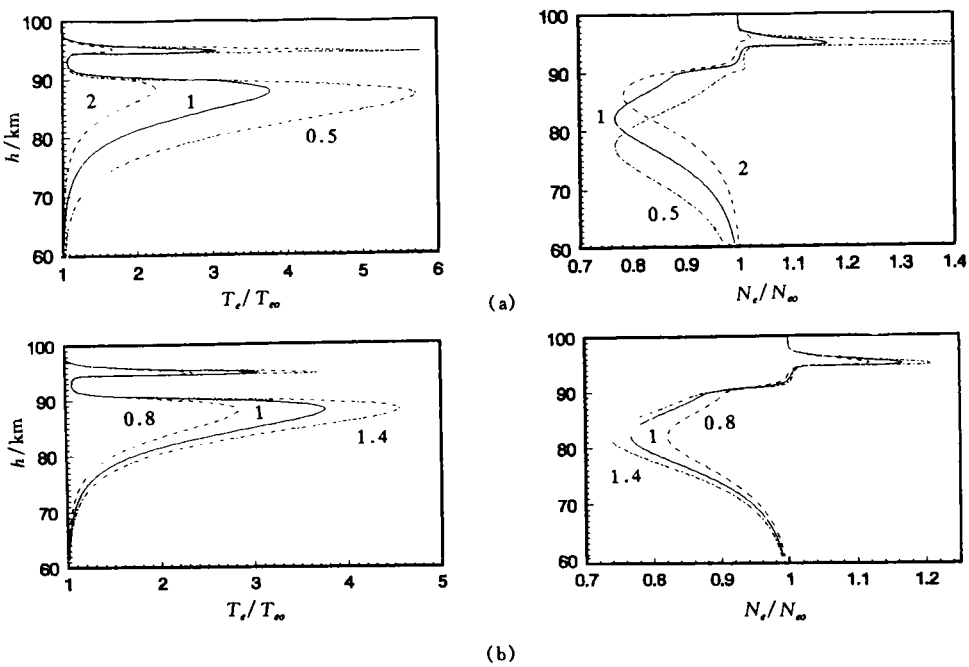


图 2　中性大气参数对加热的影响，(a)改变数密度情形；(b)改变温度情形
所用大气参数是(a)N90和(b)T90乘以曲线旁标的数值，其它取自 MSISE90
Fig.2　Heating effects under different neutral parameters

中性大气参数的选取对加热效果有很大的影响，源于其控制着电子温度变化率的改变. 在同样大的 Q 项下，因 L 项正比于大气数密度[4]，使得大气数密度越低，电子温升越高. 电子升温后，化学反应参数随之被改变，使得电子的浓度如图 2 所示变化. 类似可以分析大气温度作用. 大气浓度在夏至时最大，冬至最小，其他季节居中；而温度的变化则正好相反. 浓度与温度相反的季节变化特征，使得难于推断在哪个季节加热效果会更明显. 鉴于加热效果对中性大气参数的强依赖性，我们在具体条件下研究时需要选用符合实地的参数才能得到可靠的结果.

4.2　低电离层化学反应参数的影响

本文只计算所用模型中目前不大清楚的电子有效碰撞脱离率 γ 及电子与水合正离子复合损失率 α_d^c 对加热的影响. 对 $\gamma=3\times10^{-23}N_n$ 和 $\alpha_d^c=3\times10^{-12}(T_n / T_e)^{0.08}$ 在各自合理值[5]内只改变一个反应参数(处理方法见图 3)，来分别考察它们的作用. 计算结果见图 3.

从图 3 可见到一个以往文献没有报道过的非常有趣的结果：加热时随着电子有效碰

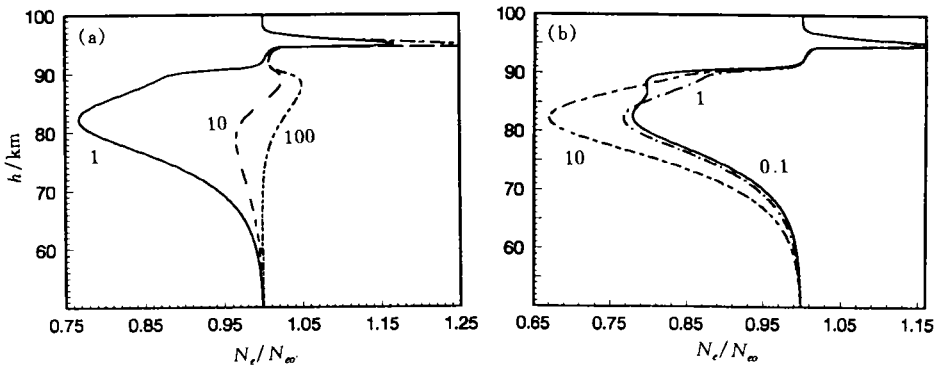


图 3 反应系数 γ 及 α_d^c 对加热的影响，(a)为改变 γ 情形，(b)为改变 α_d^c 情形

所用反应参数(a)γ 和(b)α_d^c 为文献[4]乘以曲线旁所标数值，其它采用文献[4]

Fig.3 N_e / N_{e0} as function of altitude under two reaction rates.

撞脱离率 γ 的增大，90km 以下电子浓度由减少可能变为增大. 出现此结果的原因是电子碰撞脱离使得电子能从负离子上脱离. 因而 γ 越大，附着在负离子上的电荷转化为自由电子的能力就越强，附着在负离子上的电子加热时脱离转化为自由电子就多，使得电子浓度向增大方向变化. 加热时电子浓度增大正是早期理论预言 VLF 发射可能引起低电离层的显著变态时的结果[5].

如图 3(b) 所示，复合损失率 α_d^c 的作用是电子与水合正离子复合将导致电离层电子损失. α_d^c 越大，N_e / N_{e0} 越小. α_d^c 变化所引起的电子浓度改变在 90km 以下明显，而 90km 以上所产生的影响很小. 夜间水合正离子主要分布在 90km 以下，90km 以上相对于其他粒子可以忽略. 这样的高度分布使电子复合损失对电子浓度影响限于 90km 以下.

5 小 结

考虑加热时 N_e 变化的影响，我们研究了低电离层化学反应参数和中性成分对加热的影响. 结果表明，低电离层中性成分参数和化学反应参数密切影响着加热的效果. 因中性大气参数直接控制着 Q 和 L 项，使得中性大气参数对加热效果有很大的影响. 在固定高度，中性大气数密度越低或温度越高，电子参数变化越大. 大气数密度的改变使得 90km 以下电子参数峰值位置移动，而温度变化对峰位置影响不明显.

电子碰撞脱离使电子从负离子上脱离产生电子，而电子与水合正离子复合损失电子. 改变电子有效碰撞脱离率 γ 和复合损失率 α_d^c 的计算结果能反映出加热的效果依赖模型所选取的化学反应参数. 加热效果对参数的强依赖性，使得我们研究具体条件下的加热时需要选用逼近实际的参数才能得到可靠的结果.

参 考 文 献

[1] Inan U S. VLF heating of the lower ionosphere. *Geophys. Res. Lett.*, 1990, **17**(6):729 — 732

[2] Inan U S, Bell T F, Rodriguez J V. Heating and ioniztion of the lower ionosphere by lightning. *Geophys. Res. Lett.*, 1991, **18**(4): 705 — 708

[3] Barr R, Stubbe P. VLF heating of the lower ionosphere: variation with magnetic latitude and electron density profile. *Geophys. Res. Lett.*, 1992, **19**(17): 1747 — 1750

[4] Rodriguez J V, Inan U S, Bell T F. Electron density changes in the nighttime D region due to heating by very-low-frequency transmitters, *Geophys. Res. Lett.*, 1994, **21**(2): 93 — 96

[5] Rodriguez J V, Inan U S, Heating of the nighttime D region by very low frequency transmitters, *J. Geophys. Res.*, 1994, **99**(A12): 23329 — 23338

[6] Glukhov V S, Pasko V P, Inan U S. Relaxation of transient lower ionospheric disturbances caused by lightning-whistler-induced electron precipitation bursts. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**(A11): 16971 — 16979

[7] Hedin A E, Extension of the MSIS thermospheric model into the middle and lower atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1991, **96**(A2): 1159 — 1172

MODELING STUDY OF MODIFICATION OF THE LOWER IONOSPHERE BY VLF ELECTROMAGNETIC WAVES

LIU Libo WU Xiangyang TU Jiannan

(*Department of Space Physics, Wuhan University*, 430072)

BAO Zongti

(*Department of Physics, Huanan Normal University*)

Abstract

Using a complicated model which consists of the lower ionospheric heating by VLF electromagenetic waves a model and a night-time D region chemistry model, this paper studies heating effects under the influence of parameters of neutrals and reaction coefficients of D region chemistry. The results indicate that heating effects are strongly dependent on parameters of neutrals and reaction coefficients of D region chemistry.

Key wrods VLF electromagnetic wave, Lower ionosphere