第20卷 第2期 空 间 科 学 学 报 Vol.20, No.2
2000 年 4月 CHINESE JOURNAL OF SPACE SCIENCE Apr., 2000

一种电离层垂直剖面物理模型及其与 IRI-90 模型的比较*

邓 悦 王劲松 萧 佐
(北京大学地球物理系 100871)

摘 要

在 80—500 km 范围内考虑了 3 种中性成份的 4 种离子，从严格的电子和离子密度连续方程出发，对中性风和扩散效应进行了全面、连续的考虑，由此建立了一种电离层的物理模式；在此模式的基础上针对北京地区分别对太阳活动低年 ($F_{10.7}=60$)、高年 ($F_{10.7}=300$) 的春 (DOY=90)、夏 (DOY=180)、秋 (DOY=270)、冬 (DOY=365) 进行计算，并将所得结果与 IRI-90 进行了比较. 结果表明：E 层为典型的 Chapman 层；E-F 谷区深度一般为 0.2—0.5 之间，比 IRI 要深；F_1 缘在太阳活动低年的四季都出现，其中夏天最明显，已形成了一个 F_1 层，冬天最不明显，仅表现为一个轻微的凸缘，在太阳活动高年只有夏天出现了 F_1 凸缘，这与现有理论相符合，而 IRI-90 较少出现明显的 F_1 缘；F_2 层的电子密度是活动高年比低年大，平均冬天比夏天大，这与观测结果也基本符合.

关键词 模式— E-F 谷区— F_1 缘— IRI-90 模式

1 引 言

长期以来，由于电离层物理过程研究以及电离层电波传播预报等方面的要求，许多电离层物理工作者对电离层模式进行了多方面的研究，其中国际参考电离层 (IRI) 是应用最广泛的一个模式 [1]，但 IRI 是一个建立在观测基础上的经验模式，并且由于探测资料在时间分布和地域跨度上的局限，这一模式在不同地区与实际观测资料相比，其符合的程度不尽相同. 特别是一些作者提出 IRI 与中国实际探测资料之间有偏差. 梁尚琪利用我国北京等 5 个台站电离层观测记录 [2]，对各层临界频率的实测值与 IRI-86 的计算值进行分析比较，发现两者之间存在着显著而系统的偏离；罗发根、刘瑞源等将太阳活动峰年期间中国 4 个电离层站垂直探测得到的月平均电子浓度剖面与国际参考电离层 IRI-90 进行系统的比较 [3]，结果表明国际参考电离层所计算的峰下电子含量总体来说偏大. 针对 IRI 与我国观测资料的不同，国内不少专家都提出了自己的模式，刘瑞源等在利用中国电离层台站长期观测资料的基础上 [4]，采用 “亚大地区 F_1 电离层顶测方法” 计算 f_0F_2 和 $M(3000)F_2$，提出国际参考电离层用于中国地区时的修正计算法，苏元智、黄信榆对电离层峰下结构进行了数值模拟 [5]，这些模式对我国电离层形态进行了很好的描述，但都多少基于一定的观测资料或经验数据，而从物理过程的角度考虑 IRI 模型特点的工作则相对较少. 特别要提

* 国家自然科学基金资助项目 49990454, 49874041
1998-05-18 收到原稿，1999-01-25 收到修定稿

出的是， E-F 谷区和 F_1 缘是电离层模式中两个较难解决的问题 [5]，这两个问题对于建立在探测基础上的经验模式更为突出. 这是因为利用电离层探测频高图求 E-F 谷区电离分布时，该区没有相应的反射电波描迹；而 F_1 缘一般仅表现为一个轻微的突起，通常并不明显地形成一个层结 [6]，因此对 E-F 谷区和 F_1 缘的电子浓度的实际变化了解不够，直接用 IRI 模型给出的 E-F 谷区和 F_1 缘的状态很难系统的与实际观测相比较. 本模型从现有理论出发，提出一个易于操作的物理模型，尽可能全面地考虑 E-F 谷区和 F_1 缘的各种过程，包括中性风、扩散和光化作用等，希望对 E-F 谷区、 F_1 缘进行合理的描述，并以这种物理描述来与 IRI-90 进行比较.

2 电离层光化和动力学过程简述

2.1 光化过程

由太阳紫外辐射造成的某种离子的生成率据 Chapman 提出的太阳辐射电离率的基础理论公式表示为 [8]

$$q_j(z) = n_j \sum_{\lambda} F_{\infty\lambda}\sigma_{\lambda i_j}\eta \exp\Big\{-\int_z^{\infty}\sum_j (n_j\sigma_{\lambda i_j})\sec\chi \mathrm{d}z\Big\}.$$

我们考虑 3 种中性成份： O 、 N_2 和 O_2, 4 种离子： O^+ 、 NO^+ 、 N_2^+ 和 O_2^+, 参加下列反应 [1]:

$$\mathrm{O} + \mathrm{N_2} \xrightarrow{k_2} \mathrm{N} + \mathrm{NO^+}; \tag{1}$$

$$\mathrm{NO^+} + \mathrm{e} \xrightarrow{\alpha_{\mathrm{NO^+}}} \mathrm{N} + \mathrm{O}; \tag{2}$$

$$\mathrm{N_2^+} + \mathrm{e} \xrightarrow{\alpha_{\mathrm{N_2^+}}} \mathrm{N} + \mathrm{N}; \tag{3}$$

$$\mathrm{O_2^+} + \mathrm{e} \xrightarrow{\alpha_{\mathrm{O_2^+}}} \mathrm{O} + \mathrm{O}. \tag{4}$$

其中 [7],$k_2 = 1.2\times10^{-12}(T/300)^{-1}\,\mathrm{cm^3\,s^{-1}}$, $\alpha_{\mathrm{NO^+}} = 4.1\times10^{-7}(300/T_\mathrm{e})\,\mathrm{cm^3\,s^{-1}}$,

$$\alpha_{\mathrm{N_2^+}} = 3\times10^{-7}(300/T_\mathrm{e})^{1/3}\,\mathrm{cm^3\,s^{-1}}, \quad \alpha_{\mathrm{O_2^+}} = 2.2\times10^{-7}(300/T_\mathrm{e})\,\mathrm{cm^3 s^{-1}}.$$

一般认为白天电子满足准平衡分布，并且常在整个高度上同时满足，在只讨论光化作用时，电子密度连续方程为

$$Q - L(N_\mathrm{e}) = 0. \tag{5}$$

参加上述光化反应的离子分别满足各自的光化平衡方程，具体表达为

$$q_{\mathrm{O^+}} - k_2[\mathrm{N_2}][\mathrm{O^+}] = 0, \tag{6}$$

$$k_2[\mathrm{N_2}][\mathrm{O^+}] - \alpha_{\mathrm{NO^+}}[\mathrm{NO^+}][\mathrm{e}] = 0, \tag{7}$$

$$q_{\mathrm{N_2^+}} - \alpha_{\mathrm{N_2^+}}[\mathrm{N_2^+}][\mathrm{e}] = 0, \tag{8}$$

$$q_{\mathrm{O_2^+}} - \alpha_{\mathrm{O_2^+}}[\mathrm{O_2^+}][\mathrm{e}] = 0. \tag{9}$$

以及准中性条件：

$$[\mathrm{e}] = [\mathrm{O}^+] + [\mathrm{NO}^+] + [\mathrm{O}_2^+] + [\mathrm{N}_2^+] \tag{10}$$

Q 为总的电子产生率，q_{O^+}, $q_{\mathrm{N}_2^+}$ 和 $q_{\mathrm{O}_2^+}$ 为相应成份的离子产生率. 由 (6)—(10) 式可得：

$$\frac{1}{q_{\mathrm{O}^+}} = \frac{1}{\beta N_\mathrm{e}} + \frac{1}{\alpha' N_\mathrm{e}^2} \tag{11}$$

其中

$$\beta = k_2[\mathrm{N}_2], \quad \alpha' = 1\Big/\Big(\frac{1}{\alpha_{\mathrm{NO}^+}} + \frac{q_{\mathrm{N}_2^+}}{q_{\mathrm{O}^+}}\frac{1}{\alpha_{\mathrm{N}_2^+}} + \frac{q_{\mathrm{O}_2^+}}{q_{\mathrm{O}^+}}\frac{1}{\alpha_{\mathrm{O}_2^+}}\Big). \tag{12}$$

方程 (11) 考虑了原子成份和分子成份同时存在时的复合过程，两种复合过程由其随高度的变化而自然过渡.

由 (11) 式可知，在只考虑光化的情况下电子密度可表示为：

$$N = \frac{Q}{2\beta} + \frac{Q}{2\beta}\sqrt{1 + \frac{4\beta^2}{\alpha Q}}. \tag{13}$$

令

$$G = \frac{\beta^2}{\alpha Q}. \tag{14}$$

对 (13) 式进行两种极端情况的讨论：

(a)　　$4G \ll 1$,　　$N_\mathrm{e} \approx Q/\beta$

(b)　　$4G \gg 1$,　　$N_\mathrm{e} \approx \sqrt{Q/\alpha}$

(a) 为 β 型复合的表达式，(b) 为 α 型复合的表达式，因此通过判断某一高度处参数 $4G$ 与 1 的相对关系就可知在此高度的复合形式 [8].

2.2　扩散过程

等离子体在中性背景下的扩散速度可由运动方程得到：

$$\begin{aligned} m_\mathrm{i}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}_\mathrm{e}}{\mathrm{d}t} =& -m_\mathrm{i}g - N_\mathrm{i}^{-1}\nabla(N_\mathrm{i}kT_\mathrm{i}) + \mathrm{e}(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{V}_\mathrm{i}\times\boldsymbol{B}) - \\ & m_\mathrm{i}\nu_m(\boldsymbol{V}_\mathrm{i} - \boldsymbol{U}) - m_\mathrm{i}\nu_{\mathrm{ie}}(\boldsymbol{V}_\mathrm{i} - \boldsymbol{V}_\mathrm{e}). \end{aligned} \tag{15}$$

$$\begin{aligned} m_\mathrm{e}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}_\mathrm{e}}{\mathrm{d}t} =& -m_\mathrm{e}g - N_\mathrm{e}^{-1}\nabla(N_\mathrm{e}kT_\mathrm{e}) + \mathrm{e}(\boldsymbol{E} + \boldsymbol{V}_\mathrm{i}\times\boldsymbol{B}) - \\ & m_\mathrm{e}\nu_{\mathrm{en}}(\boldsymbol{V}_\mathrm{e} - \boldsymbol{U}) - m_\mathrm{e}\nu_{\mathrm{ei}}(\boldsymbol{V}_\mathrm{e} - \boldsymbol{V}_\mathrm{i}). \end{aligned} \tag{16}$$

当考虑平衡态并且忽略磁场效应时，$\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}_\mathrm{i}}{\mathrm{d}t} = 0$, $\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}_\mathrm{e}}{\mathrm{d}t} = 0$ 由电中性条件可知 $N_\mathrm{i} = N_\mathrm{e}$, 由双极扩散条件可知：$\boldsymbol{V}_\mathrm{e} = \boldsymbol{V}_\mathrm{i} = \boldsymbol{V}$, 在等温的情况下可得：

$$-W_\mathrm{d} = D_\mathrm{p}\Big(\frac{1}{N}\frac{\mathrm{d}N_\mathrm{e}}{\mathrm{d}h} + \frac{1}{H_\mathrm{p}}\Big). \tag{17}$$

其中，$D_\mathrm{p} = \dfrac{2kT_\mathrm{p}}{m_\mathrm{i}\nu_m}$, $T_\mathrm{p} = \dfrac{1}{2}(T_\mathrm{i} + T_\mathrm{e})$, $H_\mathrm{p} = \dfrac{2kT_\mathrm{p}}{m_\mathrm{i}g}$. 因此，由扩散引起的运动项可表达为

$$-\nabla(N_\mathrm{e}W_\mathrm{d}) = D_\mathrm{p}\Big[\frac{\mathrm{d}^2N_\mathrm{e}}{\mathrm{d}h^2} + \Big(\frac{1}{H_\mathrm{p}} + \frac{1}{H}\Big)\frac{\mathrm{d}H}{\mathrm{d}h} + \frac{N_\mathrm{e}}{H\cdot H_\mathrm{p}}\Big]. \tag{18}$$

2.3　中性风的作用

在中性风的影响下离子产生垂直运动的表达式为

$$V_{iz} = \frac{\nu_i \Omega_i}{\nu_i^2 + \Omega_i^2} W_x \cos I + \frac{\Omega_i^2}{\nu_i^2 + \Omega_i^2} W_y \sin I \cos I. \tag{19}$$

其中 W_x, W_y 分别为中性风的东西方向、南北方向的风速，ν_i, Ω_i 分别为离子的碰撞频率、磁回旋频率，I 为磁偏角.

2.4 模型简介

本模型描述平衡态下的电子密度分布，其中的太阳辐射通量、吸收截面和电离截面取自文献 [9]，总共考虑了从 1Å—1125.7Å共 77 种不同的辐射波段，主要针对我国中、低纬 (116°E, 40°N) 地区白天平衡态下的电离层，对光化、扩散和风的效应的考虑是自下而上连续的，而不是如同文献 [7] 那样从中间某个高度开始加入扩散或风的效应. 本模型从连续方程出发：

$$q_i - L(N_i) - \nabla_z(N_i V_i) = 0. \tag{20}$$

将运动速度写为扩散速度与由中性风引起的垂直漂移速度之和：

$$V_i = W_d + V_{iz}. \tag{21}$$

把 (16)、(19) 带入 (18) 式得到 80—500 km 统一的表达式：

$$q_i - L(N_i) + D_i\Big[\frac{\partial^2 N_i}{\partial z^2} + \Big(\frac{1}{H_i} + \frac{1}{H}\Big)\frac{\partial N_i}{\partial z} + \frac{N_i}{H \cdot H_i}\Big] - \nabla_z(V_{iz} N_i) = 0. \tag{22}$$

i 分别为 O^+, NO^+, N_2^+, O_2^+. 再由准中性条件 [e]=[O^+]+[NO^+]+[N_2^+]+[O_2^+] 可得电子密度. 本模型从 MSIS93 得到有关背景中性成份的数据，有关中性风的情况由 HWM90 得到.

3 主要结果

我们主要模拟了北京地区 (116°E, 40°N) 太阳活动低年 ($F_{10.7} = 60$)、高年 ($F_{10.7} = 300$) 的春 (DOY=90)、夏 (DOY=180)、秋 (DOY=270)、冬 (DOY=365) 宁静日不同情况下中午前后 (1200LT) 的电离层垂直剖面的情形，这里 DOY 代表一年中的第几天.

3.1 不同条件下的 Q 分布

由图 1 可知 Q 一般出现两个峰，第一个峰稳定在 110 km 附近，与 E 层所在位置基本重合，且峰值大小是高年比低年大，夏天比冬天大，这与 E 层为 Chapman 层的理论非常符合. 第二个峰值的位置则依赖于具体条件，基本上高年比低年高，峰值大小是高年略大于低年，夏天大于冬天.

3.2 不同条件下 N_e 剖面图及其与 IRI 的比较

(1) 由图 3 可见，E 层电子密度夏天比春、秋天大，春、秋天比冬天大，高度稳定在 110 km 左右，其年变化趋势和太阳天顶角的关系与 Chapman 理论相一致. 本模型在 E 层的结果与 IRI-90 无论在高度和大小上都很符合，这说明模型对光化过程的考虑是合理的. 模型的 E-F 谷区比 IRI-90 要明显深，若谷深定义为 $\delta = (N_{e_{max}} - N_{e_{min}})/N_{e_{max}}$，则模型的谷深一般为 0.2—0.5 之间，而 IRI-90 的谷深为 0.04—0.1 之间.

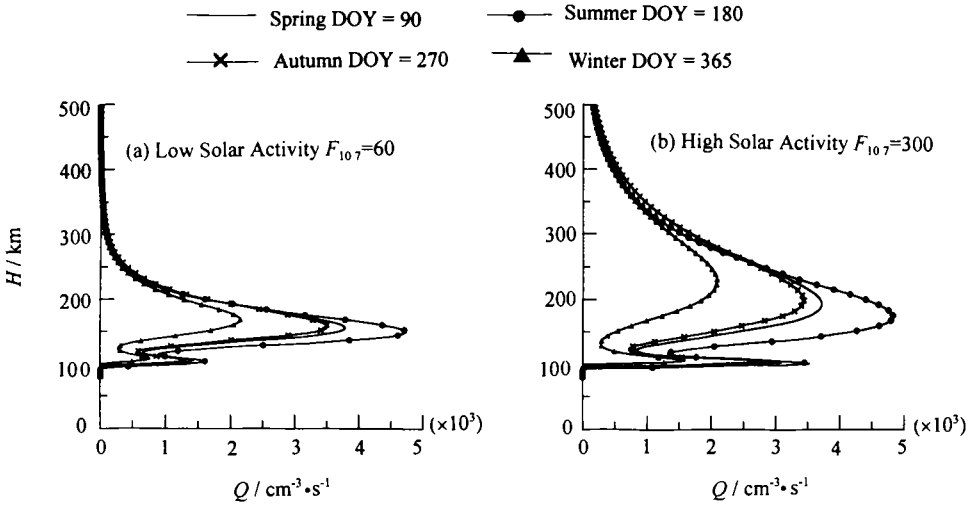


图 1　太阳活动高年及低年不同季节产生率 Q 随高度的变化

Fig.1　Variations of electron production rate Q with altitude for afferent seasons and solar activities

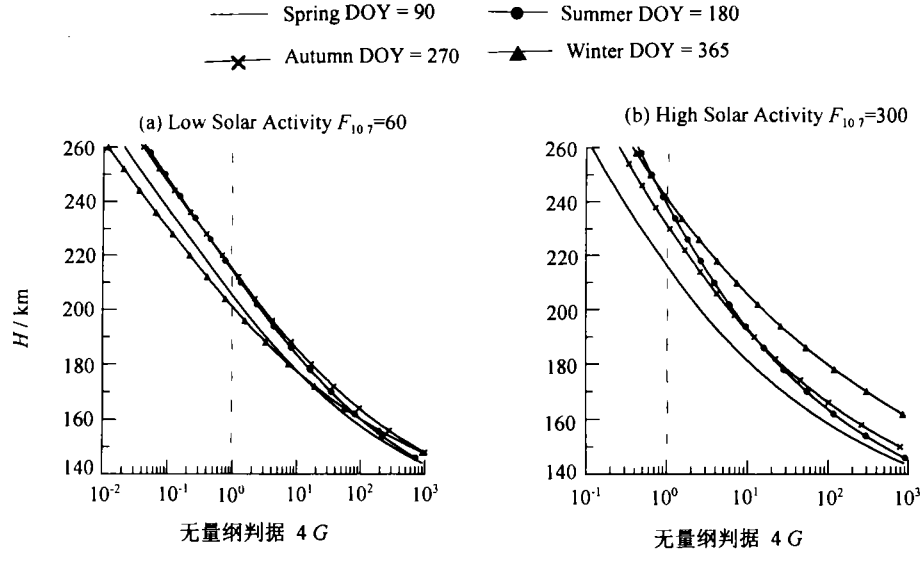


图 2　太阳活动高年及低年不同季节产生率 $4G$ 随高度的变化

Fig.2　Variation of parameter $4G$ with height for different seasons and solar activities

(2) 由本模型所得到的一个重要结果表明：F_1 凸缘在太阳活动低年的四季都出现，其中夏天最明显，已形成了一个 F_1 层，冬天最不明显，仅表现为一个轻微的凸缘；在太阳活动高年只有夏天出现了 F_1 凸缘，而其它情况不出现，这在物理上是合理的. 因为 F_1 区处于 α 型复合与 β 型复合的过渡区，尽管这里有一个明显的产生率 Q 的峰值，却不一定对应电子密度的峰值，Q 所在的高度与 F_1 凸缘的出现有很大关系. 下面我们对图 1 和图 2 进行分析.

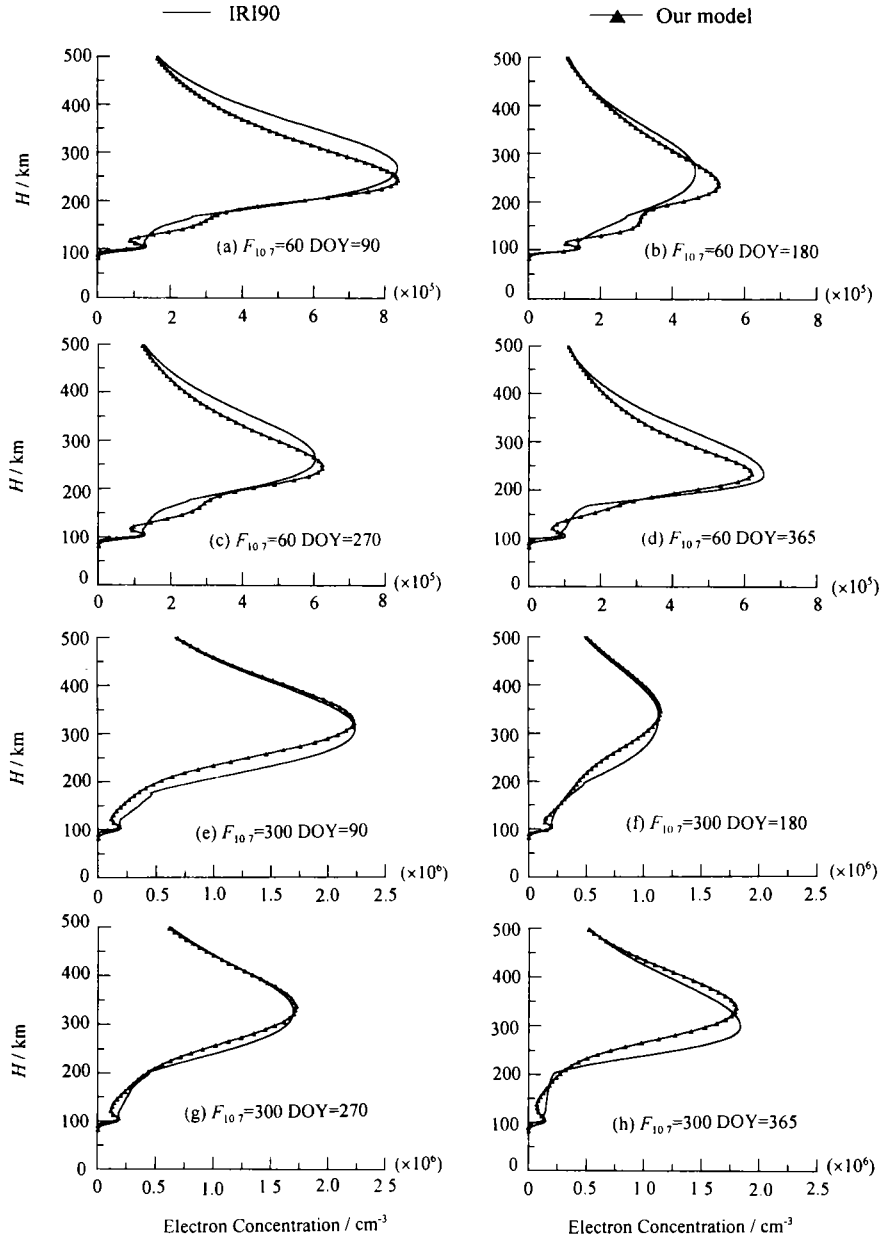


图 3 由本模型所得的电子密度在太阳活动高年及低年不同季节随高度的变化及其与 IRI-90 的比较

Fig.3 Profiles of electron density obtained from model of this paper and IRI-90 for defferent seasons and afferent solar activities

表 1 Q 的第二个峰值所在高度及其对应的 $4G$ 参数

		春	夏	秋	冬			春	夏	秋	冬
低年	H (km)	156	150	158	168	高年	H (km)	196	174	200	230
	$4G$	125	382	276	32		$4G$	4	43	6	2

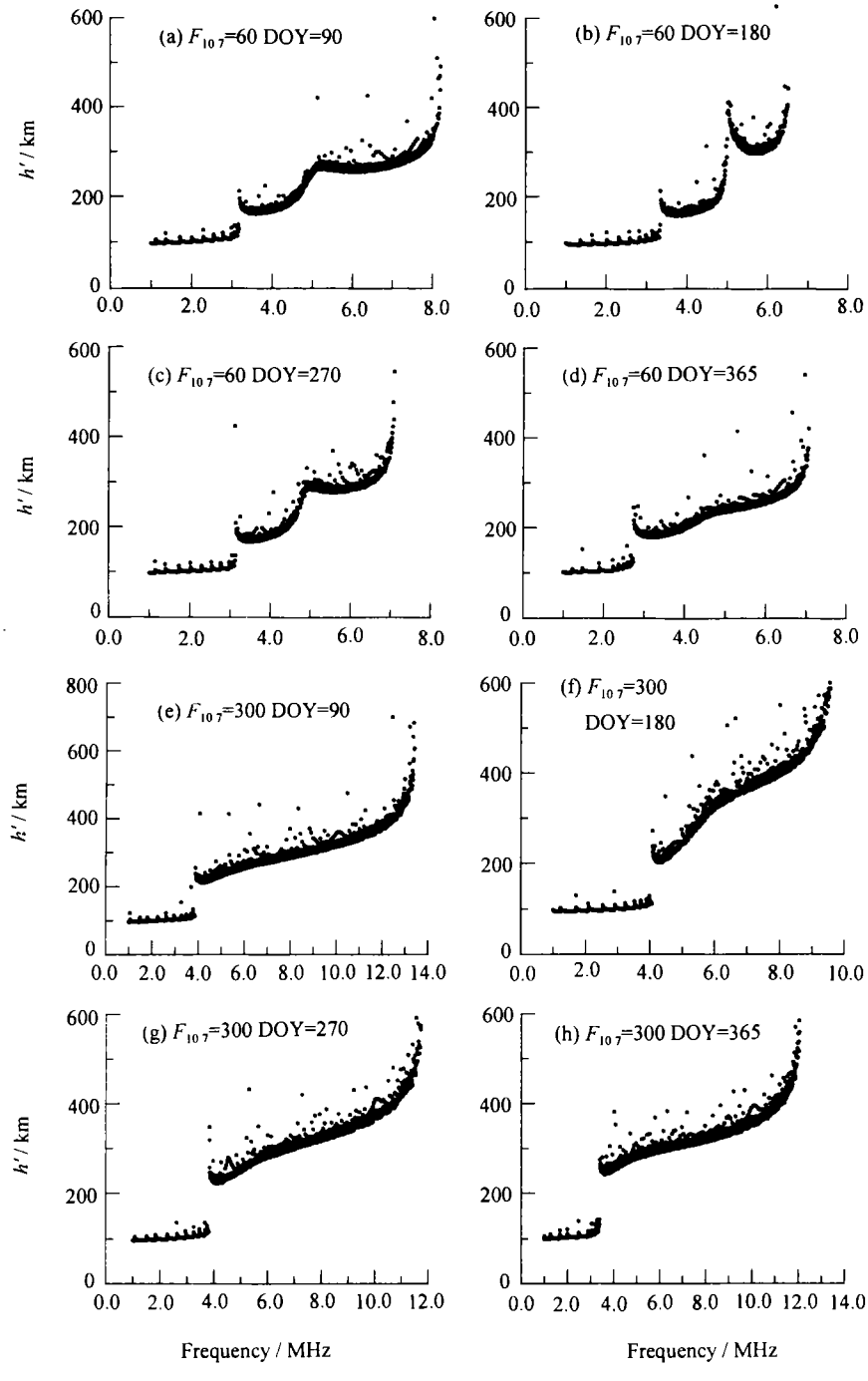


图 4　由本模型电子密度分布转换的频高图

Fig.4　Simulated ionograms converted from electron density profiles based on model of this paper

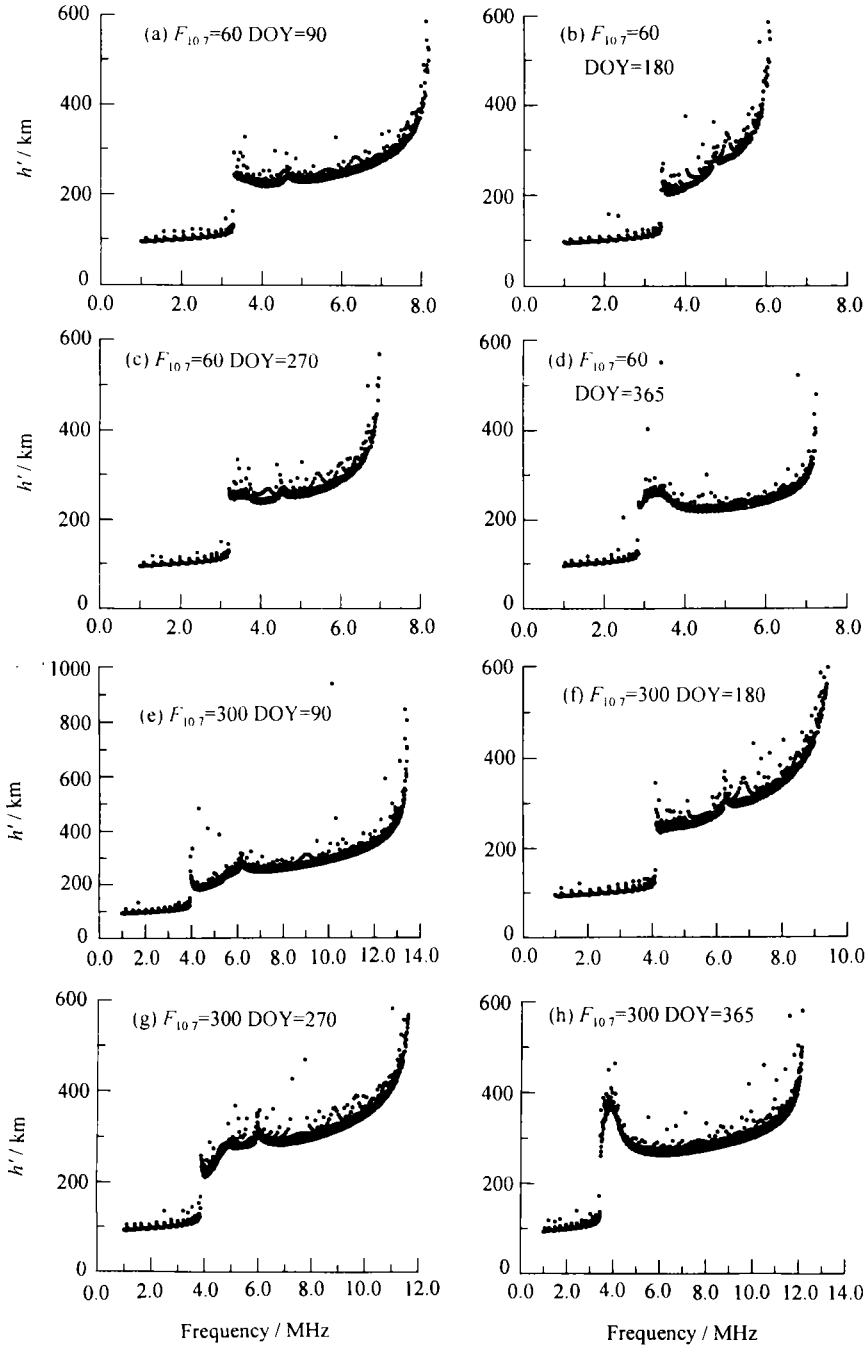


图 5 由 IRI-90 电子密度分布转换的频高图

Fig.5 Simulated ionograms converted from electron density profiels obtained often IRI-90

在太阳活动低年和高年的夏天满足 $4G \gg 1$ 的条件，此时为 α 型复合，而仅在 α 型复合的情况下 Q 的第二个峰值处才会出现一个电子密度的峰值，而这正好与图 3 中电子密

度分布相一致. 而且所得结果与 Rishbeth 在文献 [1] 中提到当 $4G = 16$ 时将出现凸缘，当 $4G = 36$ 时凸缘将较明显的结果也相符合. 在 IRI-90 的电子密度分布图中基本看不出 F_1 凸缘.

(3) 本模型给出的 F_2 层的电子密度变化是冬天最大、夏天最小，活动高年比低年大. 且与 IRI-90 模型基本一致. 虽然模型算出的 Q 在 F_1 以上的高度上高年与低年差别不大，但最终的 F_2 峰值电子密度仍是高年大于低年，这说明主要影响 F_2 层不是光化过程，而是扩散和风的效应.

(4) 从图 3 看出，整体来说本模型给出的电子密度分布曲线比 IRI 模型光滑，在不同电离层区域之间的过渡比较自然，这是由于从 100—500 km 采用了统一的数学模型，而不需要分段连接，这样的模型在对一些物理过程进行数值模拟时连续性显然要好得多.

(5) 为便于进一步与实际观测资料相比较，通过电子密度与等离子体频率的关系 $f_p^2 = 80.6N_e$，我们将已知电子密度的剖面图转换为频高图. 通过对图 4 的分析可知 E 层和 F_2 层在频高图中比较明显，而其位置和大小也与观测基本相符合； F_1 层在低年的春天、夏天和秋天表现为一个层，低年的冬天和高年的夏天仅为一个突起. 而通过对图 5 分析可知由 IRI-90 的电子密度分布转换的频高图上很少出现 F_1 层，只在某些情况下出现了一些小突起，这是由于 IRI-90 在 160—180 km 之间连接不光滑引起的，并不代表一个 F_1 凸缘.

4　结论和讨论

我们研究的模型由连续方程出发，在光化、扩散和中性风都考虑的情况下，对电子垂直剖面加以分析. 计算结果表明 F_1 凸缘在低年和高年夏天出现，且低年夏天最明显，这与现有理论相一致，证明本模型对谷区和 F_1 凸缘的讨论是合理的. 可以说，能够较充分地反映 F_1 缘出现的季节特征，是本模型不同于 IRI-90 的最重要的一方面. 关于 E-F 谷区本模型结果明显比 IRI-90 深，武昌地区反演的结果也支持我们的结论. 由于对谷区的直接探测有一定困难，很大程度上依赖于频高图的反演，因此我们希望本模型从较全面考虑谷区附近物理过程出发，所得结论可以作为研究 IRI-90 模型的一种参考. 当然，由于本模型对这一区域光化过程的讨论还不可能很全面，例如并未考虑亚稳态原子 [6]，因此这个问题仍需进一步讨论. 最后，前面提到本模型采用了一个统一的而不是分段连接的数学表达，给出了光滑的分布数据，这是一个优点，但也带来了一些新的问题. 因为事实上一个物理模型不可能包括所有的过程，因而一些背景参数也就不可能完全取自相应的背景中性数值，例如一些反应系数、离子标高和中性标高等，在数值上均需做小量调整以保证结果连续. 一方面我们应保证这些必要的调整在物理允许的合理范围内，另一方面有关参数的选取确定仍然存在一些应深入探讨的问题，最后，由于本文目前侧重于从理论上与 IRI 模型相比较，因此局限于平衡状态，比较结论适用于中午前后数小时.

参　考　文　献

[1] Bilitza D ed. International Reference Ionosphere 1990. Mayland: NSSDC/WDC-A-R&S. 90—22

[2] 梁尚琪. 我国电离层基本参量与国际参考模式的比较. 空间科学学报， 1990, **10**(2):135—140

[3] 罗发根等. 国际参考电离层 IRI-90 与中国实测电离层月平均电子密度剖面形状的比较. 空间科学学报, 1994, **14**(4):305—311
[4] 刘瑞源等. 国际参考电离层用于中国地区时的修正算法. 地球物理学报, 1994, **37**(4):422—432
[5] 苏元智, 黄信榆. 武昌电离层 E-F 谷区白天变化形态. 地球物理学报, 1987, **30**(6):555—559
[6] 张顺荣等. 用理论模式研究电离层 F_1-Ledge 的变化. 地球物理学报, 1996, **39**(5):601—607
[7] 高铭, 萧佐. 一种电离层物理模型及其在 F_1 谷区形成过程中的应用. 空间科学学报, 1992, **12**(4):287—297
[8] Rishbeth H, Garriot O K. Introduction to Ionospheric Physics. New York: Academic Press, 1969
[9] Torr D G *et al.* An Experimental and Theoretical Study of the Mean Diurnal Variation of O^+, NO^+, O_2^+ and N_2^+ Ions in the Mid-latitude F_1 Layer of the Ionosphere. *J. Geophys. Res.*, 1979, **84**(A7):3 360—3 372
[10] 张顺荣, 黄信榆. 电离层峰下结构的数值模拟. 空间科学学报, 1994, **14**(2):116—123
[11] Taieb C G *et al.* A Dynamical Effect in the Ionospheric F_1 Layer. *Planet. Space Sci.*, 1978, **26**(11):1 007—1 016
[12] Torr M R, Torr D G. The Role of Metastable Species in the Thermosphere. *Rev. Geophys. Space Phys.*, 1982, **20**(1):91—144
[13] Hedin A E. MSIS-86 Thermospheric Model. *J. Geophys. Res.*, 1987, **92**(A5):4 649—4 662
[14] Rawer K, Bilitza D. International Reference Ionosphere-Plasma Densities: Status 1988, **10**(8):5—14
[15] Dieminger W *et al.* The Upper Atmosphere. Berlin: Springer-Verlag, 1996

A PHYSICAL MODEL FOR IONOSPHERIC VERTICAL PROFILE AND COMPARISON BETWEEN IT AND IRI-90

DENG Yue WANG Jingsong XIAO Zuo
(*Department of Geophysics, Peking University, Beijing* 100871)

Abstract

A physical model for ionospheric vertical profile is established, taking into account four species of ions and electrons in the region of 80—500 km. Neutral wind and ions' motion are both involved in the continuity equations for those five species. Ionospheric profiles in different seasons at low and high solar activities are calculated and compared with the results from IRI-90. Results show that E region is a typical Chapman layer and the depth of E-F valley is generally 0.2—0.5 which is deeper than that given by IRI-90. That the F_1 ledge is most obvious in summer at low solar activity is consistent with widely accepted theories, but the F_1 ledge seldom appear in IRI-90. In F_2 region, the electron number density at high solar activity is greater than that at low solar activity, and in winter is greater than that in summer. These all agree with observations rather well.

Key words Ionospheric model, E-F valley, F_1 ledge, IRI-90