0254-6124/2014/34(6)-809–07 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

Li Na, Chen Jinsong, Ding Zonghua, Zhao Zhenwei, Wu Jian. First observation and analysis of seasonal variation of the ionosphere D region electron density at Kunming (in Chinese). *Chin. J. Space Sci.*, 2014, **34**(6): 809-815, doi:10.11728/cjss2014.06.809

昆明上空电离层 D 区电子密度季节变化的首次观测分析*

李 娜[1] 陈金松[1,2,3] 丁宗华[1,4] 赵振维[1] 吴 健[1]

1(中国电波传播研究所 电波环境特性及模化技术重点实验室 青岛 266107)

2(中国科学院空间科学与应用研究中心 北京 100190)

3(中国科学院大学 北京 100049)

4(空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

摘 要 通过分析 2008 年 8 月至 2009 年 7 月昆明站 (25.6°N, 103.8°E) 中频 (MF) 雷达观测数据, 研究了太阳活动低年电离层 D 区电子密度的季节变化特性, 发现 D 区电子密度主要呈现半年变化特征, 即在春秋季电子密度较大, 而在夏冬季则较小, 这与国际参考电离层 (IRI) 预测的年变化趋势不一致, 但与昆明站电离层测高仪的最低回波频率 $f_{\min}$ 的观测结果相符. 同时比较了 D 区电子密度半年变化与纬向风半年变化的关系, 发现二者之间保持了非常一致的变化趋势并对这种一致性的内在原因进行了分析.

关键词 电离层 D 区, 电子密度, 纬向风, 季节变化

中图分类号 P 352

First Observation and Analysis of Seasonal Variation of the Ionosphere D Region Electron Density at Kunming

LI Na[1] CHEN Jinsong[1,2,3] DING Zonghua[1,4] ZHAO Zhenwei[1] WU Jian[1]

1(*National Key Laboratory of Electron Magnetic Environment, China Research Institute of Radio Wave Propagation, Qingdao* 266107)

2(*Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

3(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

4(*State Key Laboratory for Space Weather, Beijing* 100190)

Abstract The observed data by Kunming MF radar (25.6°N, 103.8°E) from August 2008 to July 2009 are employed to investigate the seasonal variation of the ionosphere D region electron density during low solar activity. The obvious characteristics in D region electron density is semiannual

* 国家自然科学基金项目资助 (41104102)

2013-12-20 收到原稿, 2014-04-29 收到修定稿

E-mail: 13884631552@163.com

variation with the observed values larger in spring and autumn, smaller in summer and winter, which is different from the simulated result by International Reference Ionosphere (IRI). The result conforms to that observed by digital ionosonde. Then, comparison with that of zonal wind shows very good correspondence of changing trend between them. Finally the reasons leading to the correspondence are discussed.

Key words Ionosphere D region, Electron density, Zonal wind, Seasonal variation

0 引言

D 区电离层位于高度 60~90 km 之间, 是整个电离层的最低部分, 由于这里存在非常复杂的化学反应, 目前无论是从理论上还是观测手段上对 D 区的研究都存在较大困难, 这个高度对探空气球来说太高, 对卫星探测来说太低 [1], 因而依然是电离层中了解相对较少的部分 [2]. 由于大多通信系统和导航系统都依赖于无线电波在电离层 D 区的反射传播特性, 人们较早就开始了这个区域的观测研究. 早期大部分资料的获取依赖于火箭探测 [3], 虽然火箭探测具有精度高的优点, 但由于经费极高等原因难以实施长时间和大区域的覆盖试验. 还有一些方法, 例如电波交叉调制 [4], 非相干散射雷达和 VLF 长波探测等 [5−7] 也可以进行 D 区电离层的地基观测.

中频 (MF) 雷达是一种功能强大的 D 区电离层地基探测手段, 其利用电离层 D 区的部分反射回波来探测该区域的中性风场, 利用 O 波与 E 波的振幅比或相位差还能获取 D 区的电子密度剖面, 简称分吸收实验 (Differential Absorption Experiment, DAE) 或差分相位吸收 (Differential Phase Experiment, DPE). 虽然这种探测方法的原理提出很早 [8], 但其直到近年来才发展成熟并应用于常规观测 [9].

2000 年武汉建成中国第一台 MF 雷达系统并开展了相关观测研究 [10−13]. 中国电波传播研究所于 2007 年底在昆明电波观测站 (25.6°N, 103.8°E) 建立了最新一代 MF 雷达系统 *, 其目的之一就是用于电离层 D 区电子密度的持续探测. 文献 [14−15] 基于该雷达的 DAE 探测数据研究了 D 区电子密度对太阳耀斑和日食的响应. 本文采用昆明站 MF 雷达 2008 年 8 月至 2009 年 7 月 D 区电子密度数据, 首次分析研究了中国昆明站上空电离层 D 区电子密度的季节变化特征.

*http://www.atrad.com.au/

1 昆明 MF 雷达及数据分析

1.1 昆明 MF 雷达

昆明 MF 雷达引进于澳大利亚, 于 2007 年底建成, 2008 年 8 月正常运行. 该 MF 雷达选择 FCA (Full Correlation Analysis) 与 DAE 交替进行的模式来探测电离层 D 区 50~100 km 高度的大气风场和电子密度, 工作频率为 2.138 MHz, 其中 2 min 用来运行 FCA 试验, 1 min 进行 DAE 试验, 因此 MF 雷达的一个运行周期为 3 min, 即每 3 min 雷达可以提供一组电子密度高度剖面数据, 垂直高度分辨率为 2 km. 有关该雷达的详细参数和 DAE 试验的工作原理可以参考文献 [14−16].

1.2 数据分析

MF 雷达 DAE 和 FCA 试验设置的观测高度范围为 50~100 km, 但通常 80 km 以上很难获得有效的电子密度观测数据, 而 70 km 以下由于电子密度太小也很难获得有效观测结果, 同样白天的电子密度观测质量要比晚上好很多, 因为 D 区电离层在晚上由于电离源的缺少几乎会消失掉, 这也是目前 MF 雷达 DAE 观测方法的主要局限性, 有关局限性问题可以参考文献 [17]. 本文分析的电子密度数据高度范围选为 68~78 km, 风场数据高度范围选为 76~84 km, 数据的高度分辨率为 2 km. 由于本文主要研究电离层 D 区电子密度的季节变化, 这里选择每日雷达电子密度数据质量最好的正午时刻数据作为研究对象, 即选择 11:30 LT−12:30 LT 期间的电子密度均值作为每天的观测数据, 这样每天最多可能存在 20 组有效观测值. 选择风场数据每小时平均值作为每天的观测数据, 研究的时间长度范围为 2008 年 8 月 1 日至 2009 年 7 月 31 日.

2　结果分析

2.1　电子密度观测结果

图 1(a) 给出了 2008 年 8 月至 2009 年 7 月间 68~78 km 高度内电离层 D 区正午电子密度的等值线, 为能更清楚地说明电子密度的季节特性, 对图中数据进行了 30 天的滑动平均, 以消除其中的短周期变化. 从图 1(a) 可以明显观察到, 68~78 km 高度内的电子密度呈现一个半年变化特征, 春秋季电子密度较大, 夏冬季电子密度较小, 而且出现了半年季节变化的不对称性特征, 主要表现为 D 区电子密度在冬季的减小相比夏季较为明显. 为进一步讨论 D 区电子密度的季节特征, 图 1(b) 给出了 72 km 高度处的电子密度观测结果及对观测数据进行 30 天滑动平均后的结果, 同时还给出国际参考电离层 (International Reference Ionosphere, IRI) 在该高度上的模拟结果. 图 1(c) 给出了昆明站测高仪观测到的最低回波频率 $f_{\min}$. 影响电离层电波吸收的主要区域是 D 区, 如果 D 区电子密度增加, 电波通过 D 区时非偏倚型吸收将要增加. 而 $f_{\min}$ 是垂直探测电离层的最低回波频率, D 区的电离程度是最低回波频率 $f_{\min}$ 的主要决定因素, 当然 $f_{\min}$ 还受到其他因素的影响, 例如环境噪声等 [18]. 从图 1(c) 可以看出, $f_{\min}$ 呈现与 D 区电子密度相似的半年变化曲线, 春秋季的值大于夏冬季的值, 这在一定程度上支持了 MF 雷达观测的 D 区电子密度季节变化特性的可靠性. 另外从图 1 还可以发现, 观测结果与 IRI 模型曲线有较大差异, IRI 整体上预测的电子密度大于 MF 雷达的观测结果, 并且 IRI 模型仿真结果显示电子密度最大值在夏季, 最小值在冬季, 春秋季相近, 主要表现出周年

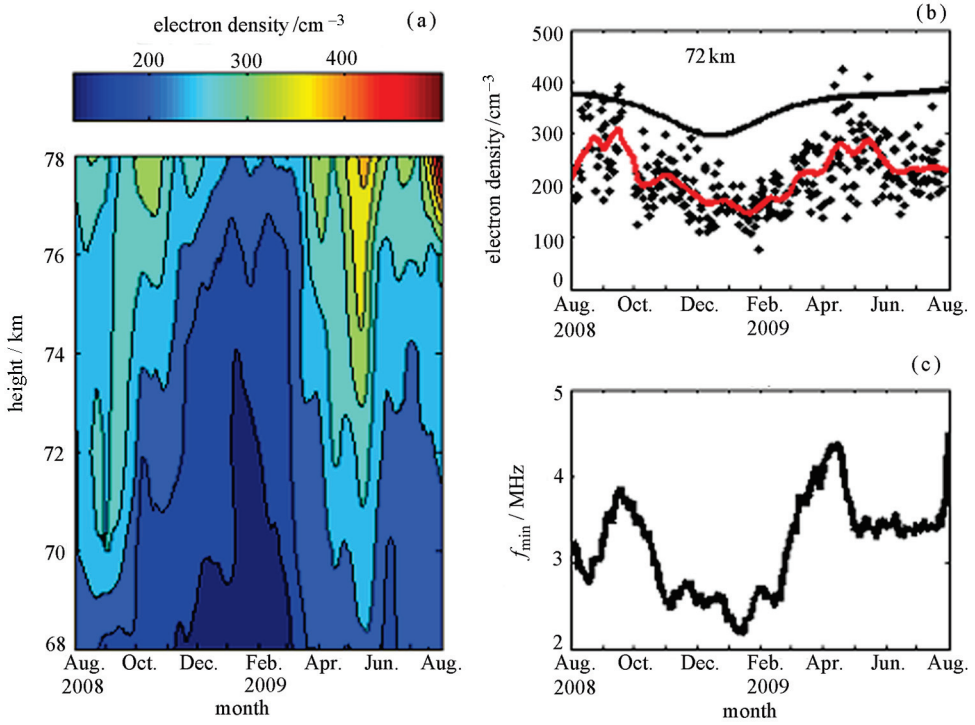


图 1　MF 雷达观测得到的电离层 D 区电子密度变化. (a) 2008 年 8 月至 2009 年 7 月 68~78 km 高度内正午电子密度的等值线; (b) 黑点表示 72 km 高度正午电子密度观测结果, 黑线表示相同高度 IRI 模拟结果, 红线为对观测数据进行 30 天滑动平均后的结果; (c) 测高仪数据 $f_{\min}$ 在 72 km 高度处的观测结果

Fig. 1　Variation of electron density in D region observed by MF radar. (a) D region electron density contour at noon in the range of 68~78 km from August 2008 to July 2009; (b) the black points represent the observations of electron density at noon at the height of 72 km, the black line represents the simulation by IRI at the same height, and the red line shows the smoothed results in a 30-day window to the observations; (c) observation of $f_{\min}$ using ionospheric digital ionosonde at 72 km

变化规律, 这一点可能与 IRI 模型简单采用了电子密度与太阳天顶角的线性关系有关 [19]. 太阳辐射是白天 D 区电子密度的主要电离源, 由于 2008−2009 年太阳活动非常平静, 因此太阳天顶角成为了主要影响参数, 即随着太阳天顶角的减小, D 区电子密度会增大. 从 2008 年 8 月至 2009 年 7 月, 正午时刻所对应的太阳天顶角从最小 6 月的 2.4° 变化到最大 12 月的 48.6°, 而去掉太阳天顶角影响后的结果依然表现出非常相似的半年变化规律 (由于变化很小, 图 1 没有给出结果), 表明太阳天顶角不是季节变化的主要决定因素.

2.2 纬向风观测结果

半年变化特性较早就在平流层和中层的温度及纬向风季节变化中发现, 特别是低纬地区 [20]. 图 2(a) 给出了 MF 雷达在同段时间观测到的 76~84 km 的纬向风等值线, 图中数据为雷达观测的每小时平均风经 16 天滑动平均后的结果. 图 2(b) 为 82 km 的纬向风观测结果. 从图 2(b) 中可以看到, 纬向风表现出明显的半年变化特征, 同时发现存在半年变化的不对称性, 即冬季的东风要比夏季的强很多. 与上面分析的 D 区电子密度比较, 可以发现纬向风与 D 区电子密度季节变化保持同步, 即春秋季出现的西向风正好与电子密度的增大相对应, 东向风与电子密度的减小相对应, 而且还发现电子密度与纬向风之间的相对强度也保持了很好的一致性, 特别是 2009 年初纬向风上出现的强东向风正好伴随电子密度的极大下降, 这即为前面提到的半年变化的不对称性. 由于难以在纬向风与 D 区电子密度之间建立起简单的直接联系,

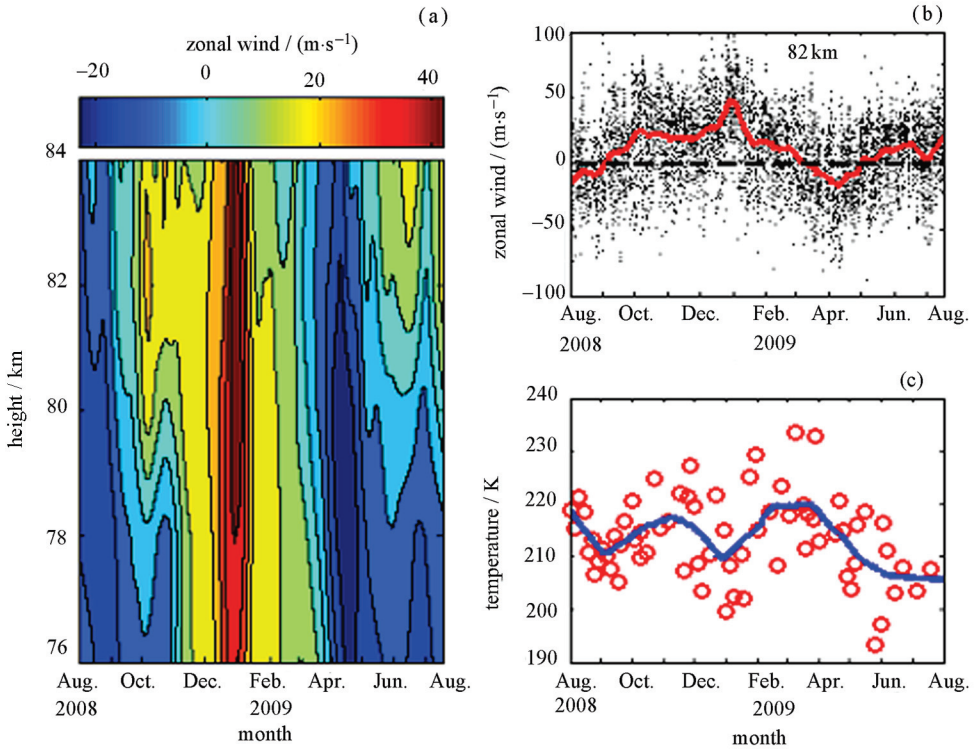


图 2 MF 雷达观测得到的 D 区纬向风变化. (a) 2008 年 8 月至 2009 年 7 月 76~84 km 高度内纬向风等值线; (b) 黑点表示 82 km 高度纬向风观测结果的每小时平均值, 红线表示对小时平均值进行 16 天滑动平均的结果; (c) 红圈表示同时间段内昆明站上空 TIMED 卫星 SABER 的观测温度数据, 蓝线是对卫星观测温度数据的 16 天滑动平均

Fig. 2 Variation of zonal winds in D region observed by MF radar. (a) D region zonal winds contour in the range of 80~90 km from August 2008 to July 2009, which data are the smoothed results in a 16-day window of the hourly mean values; (b) the black points represent the hourly mean values of zonal winds at the height of 82 km, the red line shows the smoothed results in a 16-day window to the values; (c) the red circle represents the temperature values observed by TIMED satellite, and the blue line shows the smoothed results in a 16-day window of the temperature

所以这里发现的季节变化的相关性只是偶然的还是存在某种物理机制, 还需更多的数据来验证分析.

3 结论与讨论

D 区电子密度由光化平衡方程决定, 有关文献已经对此进行过充分阐述 [15]. D 区电子密度受电子产生率和电子的有效复合系数影响. 70~80 km 高度范围内电子产生率主要来自太阳 Lyman-α (1216 Å) 谱线对大气中一氧化氮 (NO) 的电离 [21], 有效复合系数主要与温度有关, 且为负相关关系, 即温度的升高会导致有效复合系数减小, 从而引起电子密度的增大, 反之亦然. 为初步分析其可能的物理机制, 图 2(c) 中给出了同时间内昆明站上空 70~80 km 高度内由 TIMED 卫星 SABER 观测的温度结果, 蓝色曲线为 16 天滑动平均, 有关该卫星的温度观测可以参考相关文献 [22]. 由图可知温度也出现半年变化特征, 西向风对应温度下降, 东向风则对应温度上升, 这与中层大气的平衡环流理论相符 [20]. 温度变化引起的有效复合系数的改变显然不能导致本文给出的 D 区电子密度的季节变化特征. 由此可以判断电子产生率的变化是导致 D 区电子密度季节特性的主要原因, 在本文研究的时间段内, 太阳辐射始终保持较低水平, 一氧化氮密度的变化是导致电子产生率改变的原因.

在 70~80 km 高度一氧化氮存在非常大的垂直梯度 [23], 因此这里的密度变化对于垂直输运很敏感, 而一般认为重力波对于一氧化氮的垂直输运有很大贡献 [24−26]. 以往研究表明, 重力波是导致纬向风半年变化的重要机制 [20], 因此可以认为 D 区电子密度和纬向风的半年变化均与重力波的活动有关, 所以电子密度与纬向风之间才会出现相关的变化特性. 当然这个结论还需要重力波和一氧化氮观测数据的支持. 另外, 也不能确定这里发现的 D 区电子密度的半年变化是否只是一个太阳活动低年才出现的现象, 因为已经有研究表明即使在太阳活动低年, 电离层的半年变化在电离层较低高度依然出现 [27]. 随着数据的积累和太阳活动的增加, 对电子密度随太阳活动的变化分析将会更加深入.

文中只是从温度控制方面分析了有效复合系数, 但电离层 D 区包含丰富的离子成分, 即离子成分的分布也是有效复合系数的影响因素, 如果加入这部分的讨论, 必将涉及到离子成分之间各种复杂的物理化学反应, 目前对这些复杂的物理化学反应的讨论还存在很大困难. 另外, 有关重力波对电子密度和纬向风影响只是在以往研究基础上进行的分析, 而昆明观测站属于中低纬地区, 针对该地区 D 区电离层的讨论还需要有重力波和一氧化氮相应观测数据的支持.

基于昆明观测站 MF 雷达的首次观测结果, 分析了 D 区电离层电子密度的季节变化特征, 并将结果与最低回波频率 $f_{\min}$ 和 IRI 进行比较. 结果显示电子密度具有明显的半年变化, $f_{\min}$ 与 D 区电子密度具有相似的半年变化特征, 但与 IRI 的模拟结果有较大差异. 同时与该雷达观测的风场数据进行比较, 发现电子密度与纬向风之间保持了非常一致的半年变化趋势, 进而提出了可能形成该特征的物理机制. 以上工作将推动 D 区电离层复杂动力学过程研究的不断深入.

参考文献

[1] Sechrist J C. Comparison of techniques for measurement of D region electron densities [J]. *Radio Sci.*, 1974, **9**(1):137-149

[2] Nicolet M, Aikin A C. The formation of the D region of the ionosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1960, **65**:1469-1483

[3] Ishisaka K, Okada T, Hawkins J, *et al.* Investigation of electron density profile in the lower ionosphere by SRP-4 rocket experiment [J]. *Earth Planets Space*, 2005, **57**:879-884

[4] Fejer J A. Radio wave probing of the lower ionosphere by cross-modulation techniques [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1970, **32**:597-607

[5] Kudeki E, Milla M, Friedrich M, *et al.* ALTAIR incoherent scatter observations of the equatorial daytime ionosphere [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 2005, **33**, L08108, doi:10.1029/2005GL025180

[6] Han F, Cummer S A. Midlatitude nighttime D region ionosphere variability on hourly to monthly time scales [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A09323, doi:10.1029/2010JA015437

[7] Thomson N R. Daytime tropical D region parameters from short path VLF phase and amplitude [J]. *J. Geophys. Res.*, 2010, **115**, A09313, doi:10.1029/2010JA015355

[8] Gardner F F, Pawsey J L. A study of the ionospheric D region using partial reflections [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1953, **3**:321-324

[9] Vuthaluru R. Mid-latitude D-region MF Radar Electron Density Observation [D]. Adelaide: Adelaide University, 2003

[10] Hu Xiong, Zeng Zhen, Zhang Dongya, *et al.* Observations of the mesosphere and lower thermosphere angular spectrum with an MF radar at Wuhan [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(4):256-261. In Chinese (胡雄, 曾祯, 张冬娅, 等. 武汉中层、低热层大气角谱中频雷达观测 [J]. 空间科学学报, 2003, **23**(4):256-261)

[11] Zhang Dongya, Hu Xiong, Zhang Xunxie, *et al.* Observations of the mesospheric and lower thermospheric mean winds at 30°N with MF radars [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2005, **25**(4):267-272. In Chinese (张冬娅, 胡雄, 张训械, 等. 北纬 30°N 中间层和低热层大气平均风中频雷达观测 [J]. 空间科学学报, 2005, **25**(4):267-272)

[12] Zhang Shaodong, Yi Fan, Hu Xiong. MF radar observations of tides and their interactions over Wuhan (30°N, 114°E) [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2003, **23**(6):430-435. In Chinese (张绍东, 易帆, 胡雄. 武汉上空 (30°N, 114°E) 潮汐及其相互作用的 MF 雷达观测 [J]. 空间科学学报, 2003, **23**(6): 430-435)

[13] Zhang Xiuchuan, Yi Fan. MF radar observations of mesospheric tides over Wuhan [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2007, **27**(1):29-34. In Chinese (张秀川, 易帆. 武汉上空中层顶区域潮汐的 MF 雷达观测 [J]. 空间科学学报, 2007, **27**(1):29-34)

[14] Zhao L, Chen J S, Ding Z H, *et al.* First observations of tidal oscillations by an MF radar over Kunming (25.6°N, 103.8°E) [J]. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 2012, doi:10.1016/j.jastp.2011.04.016

[15] Li N, Chen J S, Zhao L, *et al.* The study of eclipse effects in D region based on MF radar measurement [J]. *Chin. J. Geophys*, 2011, **54**(4):942-949. In Chinese (李娜, 陈金松, 赵蕾, 等. 基于 MF 雷达观测的 D 区日食效应的研究 [J]. 地球物理学报, 2011, **54**(4):942-949

[16] Zhao Lei, Chen Jinsong, Li Na, *et al.* MF radar in Kunming and its preliminary observation results [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2011, **31**(1):27-33. In Chinese (赵蕾, 陈金松, 李娜, 等. 昆明 MF 雷达及初步探测结果 [J]. 空间科学学报, 2011, **31**(1):27-33)

[17] Murayama Y, Igarashi K, Rice D D, *et al.* Medium frequency radars in Japan and Alaska for upper atmosphere observations [J]. *IEICE Trans. Commun.*, 2000, **E83-B**(9):1996-2003

[18] Fraser G J, Thorps M R. Experimental investigations of ionospheric/strastospheric coupling in southern mid latitudes–1. Spectra and cross-spectra of stratospheric temperatures and the ionospheric $f_{\min}$ parameter [J]. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1976, **38**:1003-1011

[19] Friedrich, M. Torkar K M. FIRI: A semiempirical model of the lower ionosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**:21 409-21 418

[20] Garcia R R, Dunkerton T J, Lieberman R S, *et al.* Climatology of the semiannual oscillation in the tropical middle atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 1997, **102**:26 019-26 032

[21] Xiong Nianlu, Tang Cunchen, Li Xingjian. Introduction of Ionospheric Physics [M]. Wuhan: Wuhan University Publishing Company, 1997. In Chinese (熊年禄, 唐存琛, 李行健. 电离层物理概论 [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1997)

[22] Xu J, Liu H L, Yuan W, *et al.* Mesopause structure from Thermosphere, Ionosphere, Mesosphere, Energetics, and Dynamics (TIMED)/Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry (SABER) observations [J]. *J. Geophys. Res.*, 2006, **112**, D09102, doi:10.1029/ 2006JD007711

[23] McHugh M, Magill B, Walker K A, *et al.* Comparison of atmospheric retrievals from ACE and HALOE [J]. *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15S10, doi:10.1029/2005GL022403

[24] Grygalashvyly M, Becker E, Sonnemann G R . Wave mixing effects on minor chemical constituents in the MLT region: Results from a global CTM driven by high-resolution dynamics [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, D18302, doi:10.1029/ 2010JD015518

[25] Xu J, Smith A K, Brasseur G P. The effects of gravity waves on distributions of chemically active constituents in the mesopause region [J]. *J. Geophys. Res.,* 2000, **105**: 26 593-26 602

[26] Xu J, Smith A K, Ma R. A numerical study of the effect of gravity wave propagation on minor species distributions in the mesopause region [J]. *J. Geophys. Res.*, 2003, **108**(D3), 4119, doi:10.1029/ 2001JD001570

[27] Liu L, Le H, Chen Y, *et al.* Features of the middle and low latitude ionosphere during solar minimum as revealed from COSMIC radio occultation measurements [J]. *J. Geophys. Res.*, 2011, **116**, A09307, doi:10. 1029/2011JA016691