



新型飞行器的关键空气动力学问题专题·论文

100 km 附近大气密度模型的误差带和置信度



万田, 刘洪伟, 樊菁*

中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190

*联系人, E-mail: jfan@imech.ac.cn

收稿日期: 2015-08-28; 接受日期: 2015-10-10

摘要 利用 TIMED/SABER 卫星观测数据和地面 Rayleigh 散射激光雷达测量数据, 以密度为例, 对 100 km 附近常用大气经验模型 USSA-76, NRLMSISE-00 和数值模型 WACCM 进行了评估, 给出了它们在典型高度(80, 90 和 100 km)的误差带和置信度. 模型和观测数据的比较表明: 相同置信度条件下, USSA-76, NRLMSISE-00 和 WACCM 的误差带均随着高度上升而增大. 高置信度(>95%)条件下, NRLMSISE-00 和 WACCM 的误差带, 在高度 80 和 90 km 约为 $\pm 50\%$ 甚至更小($\pm 30\%$), 优于 USSA-76(约为 $\pm 80\%$); 在高度 100 km, 三者接近, 大约都是 $\pm 80\%$. 进一步分析表明, 由于 USSA-76 是基于北半球中纬度探测数据的经验模型, 故在极地区域, 在相同误差带要求下, 它的置信度不及 NRLMSISE-00 和 WACCM 模型.

关键词 热层底部, 大气密度, 常用模型, 误差带, 置信度

PACS: 21.10.Jx, 46.90.+s, 46.15.-x

doi: 10.1360/SSPMA2015-00438

地球大气按照垂直方向特性, 一般可分为对流层、平流层、中间层、热层和逃逸层. 常用的研究手段包括气球^[1,2]、地基雷达^[3-9]、探空火箭^[10-12]、卫星观测^[13-19]和数值模拟^[20-28]等. 在各种探测手段多年积累数据的基础上, 已形成便于使用的经验模型, 常用的如美国标准大气(USSA-76)模型^[29]和 MSIS 模型^[30-32]等. USSA-76 模型代表了中等太阳活动期间, 中纬度地区由地面到 1000 km 高度范围的大气平均状况. MSIS 模型的最新版本 NRLMSISE-00^[32]是美国海军研究实验室 2000 年发布的, 主要基于卫星和地

基雷达的观测数据, 可预测从地面到高度 1000 km 的大气随时间和空间的变化情况.

大气经验模型的误差带多大? 是实际应用很关心的问题, 在热层底部, 高度 100 km 附近尤为突出, 因为这一区域是以往各种探测手段的薄弱环节. 幸运的是, 最近十年, 大气观测技术有长足进步, 使 100 km 附近的大气模型误差范围评估成为可能. 另一方面, 就需求而言, 如国内外十分关心的临近空间高超声速飞行器, 大气密度、温度、组分等是其气动特性设计的基本输入参数, 不可或缺. 有鉴于此, 本

引用格式: 万田, 刘洪伟, 樊菁. 100 km 附近大气密度模型的误差带和置信度. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 124706

Wan T, Liu H W, Fan J. Error band and confidence coefficient of atmospheric density models around altitude 100 km (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2015, 45: 124706, doi: 10.1360/SSPMA2015-00438

文将以大气密度为例, 利用美国 TIMED/SABER 卫星^[17]观测数据、中国科学院大气物理研究所的地基激光雷达测量数据, 评估常用的经验模型(USSA-76 和 NRLMSISE-00)和数值模型(WACCM^[33]), 给出它们在典型高度(80, 90 和 100 km)的误差带和置信度.

1 常用经验模型

USSA-76 模型^[29]是美国标准大气委员会在 1976 年提出的. 在 50 km 高度以上, 主要基于探空火箭测量数据、卫星观测数据与中间层和热层理论分析结果. USSA-76 是一个平均模型, 只能给出大气沿地表垂直方向的平均分布特点, 不能描述大气特性随时间和经纬度的变化情况.

NRLMSISE-00 模型^[32]主要基于质谱和非相干散射雷达观测数据. 与 USSA-76 相比, 它的突出特点是可描述大气特性的时空变化. 该模型输入参数为

- (1) 当年 1 月 1 日至当天的天数;
- (2) 当天 00:00:00 至求解时刻的秒数;
- (3) 地理经度、纬度;
- (4) 海拔;
- (5) 前一天 10.7 cm 的太阳辐射流量(F10.7);
- (6) 81 d 的平均 F10.7;
- (7) 当天平均地磁指数(Ap).

输出结果包括: 大气密度, 组分 N₂, O₂, He, Ar, NH, O 和 O⁺的数密度, 中性大气温度等.

我们为评估编写的程序, 将 TIMED/SABER 的每个测量点的信息, 作为输入条件赋予 NRLMSISE-00 模型, 即可获得 NRLMSISE-00 预测的大气密度. 评估涵盖了 2002–2014 年, 共计 13 年, 选取了 3 个高度(80, 90 和 100 km), 每个高度包含 6522634 个时空点.

2 WACCM 数值模型

WACCM(Whole Atmosphere Community Climate Model)^[33]是美国大气研究中心(NCAR)近年发展的三维全球大气模型. 它结合了以往的高层大气模型、中层大气模型和对流层模型的特点, 可预测从地面到高度 140 km 的大气时空演化特性.

100 km 附近的热层底部, 受太阳辐射、地磁和重力对流效应等多重因素影响, 接近 WACCM 模型的适用上界, 这方面的数值模拟研究还不多见.

本文 WACCM 计算在中国科学院力学研究所的 Linux 并行计算机上进行, 采用 NCAR 最新发布的 CESM1.2 的有限体积动力框架, 调用 64 个 Intel Xeon E5620 型 CPU, 计算一个工况的时间约为 14 d. 每个工况, 沿垂直方向, 分为 66 个层, 每层的分辨率, 随高度增加逐渐降低, 对流层(高度 0–12 km)约 1.1 km, 平流层(12–50 km)1.1–1.75 km, 中间层下部(50–65 km)1.75–3.5 km, 高度 65 km 以上约 3.5 km. 经纬方向的分辨率分别为 4°和 5°. 化学反应模型 MOZART 来自文献[34], 包含 85 个气态组分, 157 个气态反应步, 39 个光化学反应步. 初始条件采用模型的标准算例 F_2000_WACCM. WACCM 计算中用到的重力波模型、太阳辐射模型和电场模型, 详见文献[35].

3 Rayleigh 散射激光雷达测量

地基高空大气的密度和温度测量, 常用 Rayleigh 散射激光雷达. Rayleigh 散射激光雷达接收到的高度 z 处的大气散射光子数^[36]

$$N(z) = \eta T_A^2 \times \frac{P_L \Delta t}{hc / \lambda} \times \sigma_{\text{eff}} \rho(z) \Delta z \times \frac{A_R}{4\pi z^2} + N_B, \quad (1)$$

其中 η 为系统效率, T_A 为大气单程透过率, P_L 为激光发射功率, Δt 为时间分辨率, h 为普朗克常数, c 为光速, λ 为激光波长, Δz 为高度分辨率, σ_{eff} 为瑞利后向散射截面, $\rho(z)$ 为被测成分的数密度, Δz 为高度分辨率, A_R 为接收望远镜面积, N_B 为背景和系统噪声.

根据方程(1), 大气密度

$$\rho(z) = \frac{4\pi hc}{\eta T_A^2 P_L \Delta t \lambda \sigma_{\text{eff}} \Delta z A_R} \times [N(z) - N_B] z^2, \quad (2)$$

由方程(2), 任一参考高度 z_0 的大气密度

$$\rho(z_0) = \frac{4\pi hc}{\eta T_A^2 P_L \Delta t \lambda \sigma_{\text{eff}} \Delta z A_R} \times [N(z_0) - N_B] z_0^2, \quad (3)$$

方程(2)和(3)左右两端分别相除得到

$$\frac{\rho(z)}{\rho(z_0)} = \frac{z^2 (N(z) - N_B)}{z_0^2 (N(z_0) - N_B)}. \quad (4)$$

本文的 Rayleigh 散射激光雷达数据来自中国科学院大气物理研究所^[36]. 实际测量分别于 2014 年 1 月、7 月和 10 月, 在中国西北地区格尔木(36.25°N, 94.54°E)进行, 测量对象包括大气密度和温度, 从地面到高度 90 km, 共计 40 d. 测量雷达发射波长为

532 nm, 参考高度 z_0 选在 50 km^[36], 背景和系统噪声 N_B 取 115–125 km 回波光子的平均值, 因为此高度大气本身的瑞利散射信号可忽略不计.

4 TIMED/SABER 卫星观测

TIMED(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics)卫星是美国宇航局于 2001 年 7 月发射的. 它的主要探测仪器包括多通道红外辐射计(Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry, SABER). SABER 采用的是临边观测技术, 扫描方向与 TIMED 卫星运动方向成 90° 夹角, 每 58 s 扫描 1 次, 可获取沿线从地表到高度 100 km 大气密度的完整数据. SABER 还可测大气温度, 白天温度通过 2 个 15 μm 和 1 个 4.1 μm 的 CO₂ 通道的辐射测量反演获得; 夜间温度通过 1 个 4.3 μm 的 CO₂ 通道的辐射测量反演获得. SABER 温度测量高度范围约为 14–140 km, 垂直分辨率约为 0.4 km. 在 100, 90 和 80 km 高度, SABER 温度测量的误差分别为 ± 3.6 , ± 1.3 和 ± 0.4 K^[37], 说明卫星数据具有较高可信度.

在国内外学者对 100 km 附近高空大气的研究中, SABER 观测的温度数据被较多采用, 而利用其密度测量数据开展的研究尚未见发表. 在利用 TIMED/SABER 卫星温度数据的研究当中, Xu 等人^[38]比较了 TIMED 卫星遥感探测的全球温度分布与 NRLMSISE-00 大气经验模型进行了比较, 结果表明在中间层顶区域, 经验模型的计算结果与实测结果有较大差异. 陈泽宇等人^[39]利用为期一年的 TIMED 资料重建了 120°E 子午圈内中间层和低热层大气潮汐各主要频率分量. Garcia 等人^[40]利用 TIMED 数据分析了中间层和低热层的大尺度波动现象.

本文采用 Python 和 NCL 语言编程, 从公开的 TIMED 卫星数据服务器下载 SABER 观测数据, 将每条扫描线的数据, 通过距离倒数权重算法, 分别插值到高度 80, 90 和 100 km 关心的时空点, 以便与常用大气模型比较.

5 大气模型的误差带和置信度

本文采取误差带和置信度方法评估大气模型. 以密度为例, 假设样本总数为 N , 给定误差带 ε , 若满足

$$\left| \frac{\rho_m - \rho_e}{\rho_e} \right| \leq \varepsilon \quad (5)$$

的样本总和为 M , 则置信度

$$R = M/N, \quad (6)$$

其中 ρ_m 和 ρ_e 分别为密度的模型预测值和试验观测值.

图 1 给出了 2002–2014 年期间, 高度 80, 90 和 100 km, 3 种模型和 SABER 观测数据随纬度的分布的比较结果. 3 种模型的预测结果, 与 SABER 观测数据大致符合, 但是模型的波动范围总体上要比卫星观测数据的波动范围小. 各高度 NRLMSISE-00 与 SABER 卫星数据相比, NRLMSISE-00 给出的不同纬度的密度最小值均小于 SABER 卫星观测数据, 两者的最大值相对接近. WACCM 计算的密度值在高度 80 km 与 SABER 卫星结果比较接近, 在高度 90 km 和 100 km 与 SABER 数据差别更大.

表 1 给出了不同高度、不同误差带要求下, 3 种模型对比 SABER 数据的置信度.

高度 80 km, 要求误差带不超过 $\pm 30\%$ 时, USSA-76 的置信度较低, 约为 66%, NRLMSISE-00 和 WACCM 模型的置信度较高, 约为 89% 和 97%. 误差带要求 $\pm 50\%$ 时, USSA-76 的置信度约 85%, NRLMSISE-00 和 WACCM 模型的置信度都接近 100%; 误差带要求 $\pm 80\%$, 3 种模型置信度都大于 95%.

高度 90 km, 误差带要求 $\pm 30\%$ 时, USSA-76 和 NRLMSISE-00 模型的置信度较低, 分别为 68.3% 和 76.5%, WACCM 模型的置信度较高为 90.7%. 误差带为 $\pm 80\%$ 时, 3 种模型的置信度都大于 95%.

高度 100 km 时, 3 种模型在一定误差带要求下, 置信度大致相当, 与 80 和 90 km 相比, 总体上明显降低, NRLMSISE-00 模型和 WACCM 模型相比 USSA-76 模型并无显著优势.

从图 1 看, 在 80 km, USSA-76 与卫星观测数据及 NRLMSISE-00 和 WACCM 的结果, 在高纬度地区尤其是极地附近, 差异显著增大, 90 km 仍有此趋势, 100 km 则不明显. 为考察极地以外区域的大气模型的可靠性, 表 2 给出了纬度 $\pm 70^\circ$ 以内区域的置信度结果. 与表 1 相比, USSA-76 模型的置信度, 普遍提高. 因为 USSA-76 是一个北半球中纬度的经验模型, 未考虑极地附近的特殊性. 因此, 在去除极地区域后, USSA-76 模型的置信度提高. 而 NRLMSISE-00 和 WACCM 模型, 均为全球模型, 已考虑极地效应.

表 3 给出了高度 80 和 90 km、不同误差带要求下, 3 种模型对比 Rayleigh 激光雷达数据的置信度.

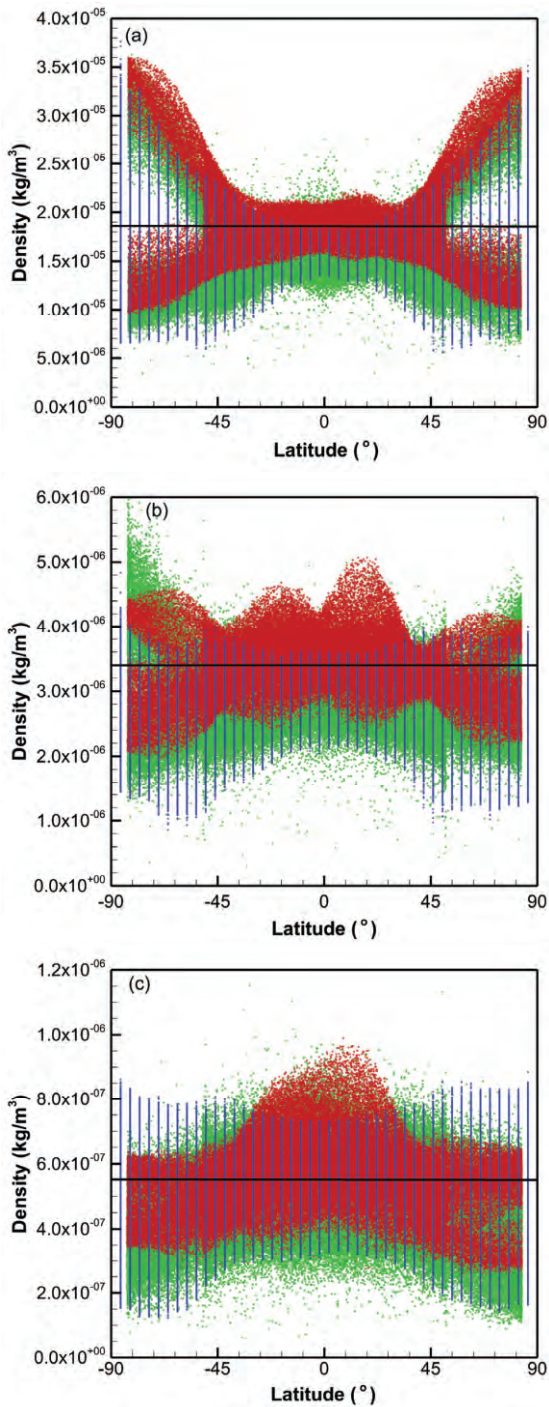


图 1 (网络版彩图)2002–2014 年期间, 高度 80 (a), 90 (b) 和 100 km (c), 3 种密度模型和观测数据比较. 黑线: USSA-76, 红点: NRLMSISE-00; 蓝点: WACCM, 绿点: SABER
 Figure 1 (Color online) Comparison of three atmospheric density models and observed data from 2002 to 2014 at altitudes 80 (a), 90 (b) and 100 km (c). Black line: USSA-76, red symbol: NRLMSISE-00, blue symbol: WACCM, green symbol: SABER.

表 1 高度 80, 90 和 100 km, 3 种大气模型, 在不同误差带要求下, 对比 SABER 数据的置信度

Table 1 At altitudes 80, 90 and 100 km, under different error bands, confidence coefficients of the three atmospheric models compared to SABER data

高度 (km)	误差带	±30%	±50%	±80%
80	USSA-76	66.1%	85.2%	96.5%
80	NRLMSISE-00	88.6%	98.9%	99.9%
80	WACCM	96.5%	99.5%	99.9%
90	USSA-76	68.3%	92.1%	99.1%
90	NRLMSISE-00	76.5%	95.9%	99.7%
90	WACCM	90.7%	98.9%	99.9%
100	USSA-76	73.0%	87.7%	95.2%
100	NRLMSISE-00	75.4%	90.8%	97.7%
100	WACCM	76.1%	92.0%	98.2%

表 2 高度 80, 90 和 100 km, 3 种大气模型, 在不同误差带要求下, 对比 SABER 数据的置信度, 纬度范围±70°以内

Table 2 At altitudes 80, 90 and 100 km, under different error bands, confidence coefficients of the three atmospheric models compared to SABER data

高度 (km)	误差带	±30%	±50%	±80%
80	USSA-76	73.1%	89.4%	98.5%
80	NRLMSISE-00	87.9%	99.0%	99.9%
80	WACCM	97.6%	99.9%	99.9%
90	USSA-76	71.9%	94.6%	99.7%
90	NRLMSISE-00	75.4%	96.0%	99.7%
90	WACCM	90.7%	98.9%	99.9%
100	USSA-76	77.1%	91.0%	97.4%
100	NRLMSISE-00	77.6%	91.8%	98.0%
100	WACCM	77.7%	92.8%	98.4%

表 3 高度 80, 90 和 100 km, 3 种大气模型, 在不同误差带要求下, 对比 Rayleigh 激光雷达数据的置信度

Table 3 At altitudes 80, 90 and 100 km, under different error bands, confidence coefficients of the three atmospheric models compared to LIDAR data

高度 (km)	误差带	±30%	±50%	±80%
80	USSA-76	100%	—	—
80	NRLMSISE-00	100%	—	—
80	WACCM	100%	—	—
90	USSA-76	89.2%	97.3%	100%
90	NRLMSISE-00	94.6%	100%	100%
90	WACCM	93.8%	96.9%	100%

高度 80 km, 误差带要求±30%时, 3 种模型的置信度均为 100%. 高度 90 km, 相比 80 km, 3 种模型的置信度均有下降, 误差带要求±30%时, 置信度都达不到 95%. 总体而言, 相同误差带要求下, 表 3 的置信度优于表 1, 主要因为 USSA-76, NRLMSISE-00 和 WACCM 模型, 都较好地考虑了北半球中纬度气候

特点, 而文献[36]中的激光雷达数据, 也是来自北半球中纬度地区.

6 结论

本文采取误差带和置信度的方法, 以密度为例, 对常用大气模型进行了评估. 考察的大气模型包括 USSA-76, NRLMSISE-00 和 WACCM; 观测数据来自 TIMED/SABER 卫星与地基 Rayleigh 散射激光雷达. SABER 数据涵盖 2002–2014 年, 高度范围 80–100 km; Rayleigh 激光雷达数据涵盖 2014 年冬、夏、秋(1, 7, 10 月), 共计 40 d, 观测地点在格尔木(36.25°N, 94.54°E), 高度范围 80–90 km.

与 SABER 数据的比较表明, USSA-76, NRLMSISE-00 和 WACCM 的误差带, 在高置信度(>95%)条件下, 高度 80 km 分别为 $\pm 80\%$, $\pm 50\%$ 和 $\pm 30\%$, 高

度 90 km 分别为 $\pm 80\%$, $\pm 50\%$ 和 $\pm 50\%$, 高度 100 km 均为 $\pm 80\%$. 也就是说, 高度 80 和 90 km, NRLMSISE-00 和 WACCM 对大气密度的预测明显优于 USSA-76; 高度 100 km, 3 个模型差别不大.

与 Rayleigh 激光雷达数据的比较表明, USSA-76, NRLMSISE-00 和 WACCM 的误差带, 在高置信度(>95%)条件下, 高度 80 km 均为 $\pm 30\%$, 高度 90 km 分别为 $\pm 50\%$, $\pm 30\%$ 和 $\pm 50\%$ 时.

综合以上结果, 在较低高度(80 km), NRLMSISE-00 模型和 WACCM 模型相比 USSA-76 模型优势明显. 但随着高度增加, 这种优势逐渐丧失, 到 100 km 高度时, 相比 SABER 数据, 满足高置信度的误差带要求, 均为 $\pm 80\%$. 从临近空间高超声速飞行器角度看, 这样的误差带, 对于气动性能的准确预测, 是不能满意的. 尚需要进一步的工作, 特别是可靠准确的观测手段和预测方法, 加以改进.

致谢 本文的 Rayleigh 散射激光雷达观测数据, 是在中国科学院大气物理研究所潘蔚林研究员主持下获得的, 中国科学院力学研究所的刘宏立博士、蒋建政副研究员和本文第一作者参与部分试验. 作者感谢中国科学院大气物理研究所的陈泽宇研究员的有益交流和讨论.

参考文献

- Shi G Y, Xu L, Guo J D, et al. Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols (in Chinese). *Sci Atmos Sin*, 1996, 20: 401–407 [石广玉, 许黎, 郭建东, 等. 大气臭氧与气溶胶垂直分布的高空气球探测. *大气科学*, 1996, 20: 401–407]
- Shi G Y, Bai Y B, Yasunobu Iwasaka, et al. A balloon measurement of the ozone vertical distribution over Lahsa (in Chinese). *Adv Earth Sci*, 2000, 15: 522–524 [石广玉, 白宇波, 岩坂泰信, 等. 拉萨上空大气臭氧垂直分布的高空气球探测. *地球科学进展*, 2000, 15: 522–524]
- Li F Q, Hu X, Zhang D Y, et al. Mesospheric mf radar in wuhan and its preliminary observation results (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2002, 22: 65–71 [李凤琴, 胡雄, 张东娅, 等. 武汉中层大气中频雷达及其初步探测结果. *空间科学学报*, 2002, 22: 65–71]
- Xiong J G, Yi F. A case study of wave interactions in the mesopause region (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2001: 318–323 [熊建刚, 易帆. 大气中层顶区域波相互作用的一个观测个例. *空间科学学报*, 2001: 318–323]
- Van Zandt T E. A brief history of the development of wind-profiling of MST radars. *Ann Geophys*, 2000, 18: 740–749
- Fukao S, Sato T, Tsuda T, et al. MU radar: New capabilities and system calibrations. *Radio Sci*, 1990, 25: 477–485
- Lu D R, Wang P C, Qiu J H, et al. An overview on the research progress of atmospheric remote sensing and satellite meteorology in China (in Chinese). *Sci Atmos Sin*, 2003, 27: 552–566 [邱金桓, 郑斯平, 黄其荣, 等. 大气中层顶区域波相互作用的一个观测个例. *空间科学学报*, 2001: 318–323]
- Collins R L, Thorsen D, Franke S J. Comparative MF radar and Na lidar measurements of fluctuating winds in the mesopause region. *J Geophys Res*, 1997, 102: 16583–16592
- Pan W, Chester S G, Raymond G R. The temperature structure of the winter atmosphere at South Pole. *Geophys Res Lett*, 2002, 29: 491–494
- Abe T, Kurihara J, Oyama K, et al. Coordinated rocket and ground-based observations of neutral temperature during the dynamics and energetics of the lower thermosphere in Aurora (DELTA) Campaign. *Amer Geophys Uni Fall meeting*, 2005
- Qin G T, Qiu S Y, He A Q, et al. “SZ-2” atmospheric density detector measurement result (I) change of the thermosphere density in the sunshine and shaded area (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2002, 22: 136–141 [秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. 神舟 2 号大气密度探测器的

- 探测结果(I): 日照和阴影区域热层大气密度变化. 空间科学学报, 2002, 22: 136–141]
- 12 Qin G T, Qiu S Y, He A Q, et al. “SZ-2” atmospheric density detector measurement result (II) change of the thermosphere density during solar and geomagnetic activity (in Chinese). *Chin J Space Sci*, 2003, 23: 135–141 [秦国泰, 邱时彦, 贺爱卿, 等. “神舟二号”大气密度探测器的探测结果(II) 在太阳和地磁扰动期间高层大气密度的变化. 空间科学学报, 2003, 23: 135–141]
 - 13 Rusch D W, Clancy R T, McCormick M P, et al. A comparison of solar mesosphere explorer and stratosphere aerosol and gas experiment II ozone densities near the stratopause. *J Geophys Res*, 1990, 95: 3533–3537
 - 14 Banks P M, Huntress W T, Hudson R D, et al. Upper Atmosphere Research Satellite Program. JPL Publication, 1978. 78–54
 - 15 Reber C A, Trevathan C E, McNeal R J, et al. The upper atmosphere research satellite (UARS) mission. *J Geophys Res*, 1993, 98: 10643–10648
 - 16 Bruinsma S, Tamagnan D, Biancale R. Atmospheric densities derived from CHAMP /STAR accelerometer observations. *Planet Space Sci*, 2004, 52: 297–312
 - 17 Russell III, James M, Mlynczak M G, et al. Overview of the Sounding of the Atmosphere Using Broadband Emission Radiometry (SABER) experiment for the Thermosphere-Ionsphere-Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission. doi:10.1117/12.187579
 - 18 Chen H J, Qin G T, Li Y P, et al. Comparison and analysis between TianGong-1 atmospheric density and thermospheric model (in Chinese). *Manned Spaceflight*. 2013, 19: 34–38 [陈华姣, 秦国泰, 李永平, 等. 天宫一号大气密度探测数据与模式的比较分析. 载人航天, 2013, 19: 34–38]
 - 19 Park J, Moon Y J, Kim K H, et al. Comparison between the KOMPSAT-1 drag derived density and the MSISE model density during strong solar and/or geomagnetic activities. *Earth Planets Space*, 2008, 60: 601–606
 - 20 Dickinson R E, Ridley E C, Roble R G. A three-dimensional, time-dependent general circulation model of the thermosphere. *J Geophys Res*, 1981, 86: 1499–1512
 - 21 Ling C, Chen Z Y. Monthly averaged atmospheric conditions in the transition flow region of China based on the NRLMSISE-00 model (in Chinese). *Space Environ Eng*, 2015, 32: 236–242 [凌超, 陈泽宇. 中国上空过渡流区大气月平均状态的模拟结果. 航天器环境工程, 2015, 32: 236–242]
 - 22 Roble R G, Ridley E C, Richmond A D, et al. A coupled thermosphere/ionosphere general circulation model. *Geophys Res Lett*, 1988, 15: 1325–1328
 - 23 Richmond A D, Ridley E C, Roble R G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics. *Geophys Res Lett*, 1992, 19: 601–604
 - 24 Wang W. A high-resolution, three-dimensional, time-dependent nested grid model of the coupled thermosphere-ionosphere. *J Atmos Terr Phys*, 1999, 61: 385–397
 - 25 Fuller-Rowell T J, Rees D. A three-dimensional, time-dependent, global model of the thermosphere. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 2545–2567
 - 26 Rees D, Fuller-Rowell T J. Understanding the transport of atomic oxygen in the thermosphere using a numerical global thermospheric model. *Planet Space Sci*, 1989, 36: 935–948
 - 27 Harris M J, Arnold N F, Aylward A D. A study into the effect of the diurnal tide on the structure of the background mesosphere and thermosphere using the new coupled middle atmosphere and thermosphere (cmat) general circulation model. *Ann Geophys*, 2002, 20: 225–235
 - 28 Schunk R W. Global assimilation of ionospheric measurements (GAIM), *Radio Sci*, 2004, 39: 794–804
 - 29 National Aeronautics and Space Administration. NASA Technical Memorandum. Washington D C, 1976. 74335
 - 30 Hedin A. MSIS-86 thermospheric model. *J Geophys Res*, 1987, 92: 4649–4662
 - 31 Hedin A. Extension of the MSIS thermosphere model into the middle and lower atmosphere. *J Geophys Res*, 1991, 96: 1159–1172
 - 32 Picone J M, Hedin A E, Drob D P, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J Geophys Res*, 2002, 107: 1468–1483
 - 33 Marsh D R, Mills M J, Kinnison D E, et al. Climate Change from 1850 to 2005 Simulated in CESM1 (WACCM). *J Climate*, 2013, 26: 7372–7391
 - 34 Emmons L K, Walters S, Hess P G, et al. Description and evaluation of the model for ozone and related chemical tracers, version 4 (MOZART-4). *Geosci Model Dev*, 2010, 3: 43–67
 - 35 Collins W D, Rasch P J, Boville B A, et al. Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). doi:10.5065/D63N21CH
 - 36 Qiao S, Pan W L, Lu D. Winter mesosphere thermal structure over Tibetan Plateau. In: *Proceedings of the 27th International Laser Radar Conference*. 2015
 - 37 García-Comas M, López-Puertas M, Marshall B T, et al. Errors in sounding of the atmosphere using broadband emission radiometry

- (SABER) kinetic temperature caused by non-local-thermodynamic-equilibrium model parameters. *J Geophys Res*, 2008, 113: 1143–1156
- 38 Xu J, Ji Q, Yuan W, et al. Comparison between the TIMED observed global temperature distribution and the NRLMSISE-00 empirical atmospheric model. *Chin J Space Sci*, 2006, 26: 177–182
- 39 Chen Z Y, Lv D R. Seasonal variations of the MLT tides in 120°E meridian (in Chinese). *Chin J Geophys*, 2007, 50: 691–700 [陈泽宇, 吕达仁. 东经 120°E 中间层和低热层大气潮汐及其季节变化特征. *地球物理学报*, 2007, 50: 691–700]
- 40 Garcia R R, Lieberman R, Russell J M, et al. Large-scale waves in the mesosphere and lower thermosphere observed by SABER. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 4384–4399

Error band and confidence coefficient of atmospheric density models around altitude 100 km

WAN Tian, LIU HongWei & FAN Jing*

State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

The present work analyzes the prediction accuracy of USSA-76, NRLMSISE-00 and WACCM atmospheric models at around 100 km altitude, by using the TIMED/SABER satellite data and ground Rayleigh observation data. The error band and confidence coefficients of these models at typical altitudes (80, 90, 100 km) are given. The comparison of the density data by the models and the satellite data shows that, under the condition of equal confidence coefficient, the error bands of all three models increase with increasing altitude. For high confidence coefficient (>95%), the error band of NRLMSISE-00 and WACCM at 80 km and 90 km is $\pm 50\%$ or smaller ($\pm 30\%$), better than USSA-76 (around $\pm 80\%$); at 100 km altitude, the error band of all three models are similar, which is around $\pm 80\%$. Further analysis shows that, since USSA-76 is based on the northern hemisphere observation data, in polar region, its confidence coefficients are lower than those of NRLMSISE-00 and WACCM.

lower thermosphere, atmospheric density, global atmosphere model, error-band, confidence coefficient

PACS: 21.10.Jx, 46.90.+s, 46.15.-x

doi: 10.1360/SSPMA2015-00438