

临近空间大气密度时空扰动规律及建模研究

曾丹丹 万 田 李帅辉¹⁾

(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)

(中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049)

摘要 大气密度是飞行器能源动力设计、飞行控制中的重要输入参数. 近年来, 多项研究发现, 对于临近空间高层大气, 常用经验模型如 USSA-76, NRLMSISE-00 的密度预示值偏大. 另外, 随着飞行器精细化设计趋势, 要求经验模型可预示不同纬度、昼夜和季节条件下的密度特性. 基于此, 本文利用卫星观测数据全面分析了临近空间大气密度随纬度、地方时、日期的变化规律, 包括变化模式和变化幅度. 纬度、日期引起的变化幅度大于地方时引起的变化幅度. 纬度、日期引起的密度变化在不同高度范围表现出不同模式; 变化幅度在 78 km 附近达最大值, 在 22 km 和 92 km 附近达局部极小值. 地方时引起的密度变化随高度递增. 根据大气密度的时空变化特性, 本文提出了临近空间大气密度的时空扰动模型, 该模型能描述临近空间大气密度及其随纬度、地方时、日期的变化规律. 与以往经验模型相比, 时空扰动模型可更好地描述不同高度下密度的时空变化规律. 在相同误差带条件下, 本文模型的置信度明显优于 NRLMSISE-00. 本文建模方法合理, 模型结果对临近空间飞行器设计有应用价值.

关键词 临近空间大气密度, 时空扰动规律, 卫星观测数据, 经验模型

中图分类号: P432⁺.2 文献标识码: A doi: 10.6052/0459-1879-22-231

STUDY OF THE TEMPORAL-SPATIAL FLUCTUATIONS AND EMPIRICAL MODEL OF NEAR SPACE ATMOSPHERIC DENSITY

Zeng Dandan Wan Tian Li Shuaihui¹⁾

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

(School of Engineering Science, University of Chinese Academy Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Atmospheric density is a fundamental parameter for vehicle designing and flight controlling. In recent years, many researchers have discovered that atmospheric densities in the upper mesosphere and lower thermosphere predicted by the empirical model, such as USSA-76 and NRLMSISE-00, are larger than the measured values. On the other hand, vehicle designing is tending to be more detailed, and engineers hope that the empirical models provide densities under variable latitudes, day-night times and seasons. Based on that, the present work analyzes dependences of near-space atmospheric density on latitude, solar local time and date, by using satellite observed data. Emphasizes are put on density fluctuation patterns and amplitudes. The fluctuation patterns caused by latitude and date vary with altitude, and the amplitudes are largest at 78 km and locally smallest at about 22 km and 92 km. The fluctuation amplitude caused by the solar local time increases monotonically with altitude. Based on the temporal-spatial fluctuation law, we proposed the

2022-05-29 收稿, 2022-07-24 录用, 2022-07-25 网络版发表.

1) 李帅辉, 研究员, 主要研究方向: 流体力学. E-mail: lee@imech.ac.cn

引用格式: 曾丹丹, 万田, 李帅辉. 临近空间大气密度时空扰动规律及建模研究. 力学学报, 2022, 54(11): 2984-2993

Zeng Dandan, Wan Tian, Li Shuaihui. Study of the temporal-spatial fluctuations and empirical model of near space atmospheric density. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2022, 54(11): 2984-2993

temporal-spatial fluctuation model for the near-space atmospheric density, which describes the density fluctuations with latitude, local time and date. The present model describes the temporal-spatial fluctuations better than the existed empirical models at variable altitudes. The confidence coefficient of the present model is much better than NRLMSISE-00 under the same error band. The modeling method in this work is reasonable, and the obtained model could be used in near-space vehicle designing.

Key words near space atmospheric density, temporal-spatial fluctuations, satellite observed data, empirical model

引言

临近空间通常是指 20~120 km 高度范围的大气空间, 该区域是高超声速飞行的重要区域. 大气密度是飞行器空气动力分析的输入参数, 研究大气密度及其变化规律对临近空间开发利用和临近空间飞行器能源动力的优化设计具有重要意义.

常用的大气探测手段有气球^[1-2]、地基雷达^[3-5]、探空火箭^[6]和卫星观测^[7-9]等. 不同探测方法具有不同的时空覆盖特性; 相对低空大气, 临近空间高层大气探测难度较高, 探测手段较少. 随着多种卫星遥感探测技术, 如掩星探测技术^[10-11]和临边辐射测量技术的发展^[12], 卫星观测逐渐成为获取全球尺度大气参数的有效途径. 2001 年 12 月 7 日, 美国 NASA 发射的 TIMED 卫星上搭载的 SABER 探测器, 通过临边测量 15 μm 波段和 4.3 μm 波段的 CO_2 红外热辐射, 可以反演获得大气温度及密度廓线, 首次实现了平流层至低热层 (14~108 km) 大气密度的全球连续测量.

通过探测大气特性参数, 掌握并预测大气特性参数分布及其变化规律是大气研究中的重要课题. 在多年积累的数据基础上, 目前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^[13]和 NRLMSISE-00 模型^[14-16]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. NRLMSISE-00 模型^[15]是美国海军研究实验室 2000 年发布的大气经验模型, 主要基于卫星和地基雷达的观测数据. NRLMSISE-00 模型考虑了时空、太阳辐射及湍流输运等因素对温度剖面的影响, 在温度基础上获得密度. 与 USSA-76 模型相比, NRLMSISE-00 模型考虑了时空扰动的影响, 具有更高的预测精度. 然而, 使用 NRLMSISE-00 模型时需要知道太阳活动及地磁活动指数, 这两个参数具有一定的不可预测性, 增加了 NRLMSISE-00 模型工程应用的难度. 随着探测数据的进一步积累,

人们发现常用经验模型与实测数据之间存在较大偏差, 尤其是高层大气^[17-21]. 如在对低纬度大气环境的 219 次掩星扫描测量中发现^[19], 在 70~110 km 范围内, 测量得到的平均密度可比 NRLMSISE-00 模型低 50%. 文献 [22] 综述了热层大气密度模型的修正研究, 但是对临近空间大气模型的修正研究则相对较少. 文献 [23] 以 TIMED/SABER 数据为基准, 对 NRLMSISE-00 模型预测的密度进行线性修正. 文献 [24] 则参考 TIMED/SABER 数据, 对临近空间大气温度廓线进行了建模研究.

本文将基于 TIMED/SABER 的密度数据, 首先评估太阳活动和地磁活动对临近空间大气密度的影响幅度; 其次, 结合工程应用特点, 重点研究临近空间大气密度随时空因素如纬度、地方时和季节的变化规律, 对扰动模式和扰动幅度进行全面的分析. 在此基础上, 根据测量数据对临近空间大气密度的时空变化特性开展建模研究, 以期提高经验模型对大气密度的预测精度, 满足高超声速航天器能源动力设计的精细化要求.

1 数据来源和分析方法

1.1 数据来源

TIMED 卫星轨道高度约 625 km, 轨道倾角为 74.1°, 轨道周期约 1.6 h, 轨道沿纬圈缓慢进动, 每天进动约 12 min. SABER 探测器每天探测剖面约 1400 个. 本文采用 SABER V2.0 版本密度数据, 该版本考虑了 70 km 以上大气非平衡辐射特征. SABER 的直接探测量为大气红外辐射亮度, 而辐射亮度与辐射气体分子数密度及温度有关, 因此可通过辐射亮度反演得到辐射活跃分子的数密度及大气温度. SABER 数据采用了两种方法反演获得大气温度. 第一种方法利用 WACCM 模型获得大气中的 CO_2 体积分数, 在此基础上, 利用 CO_2 的 15 μm 波段辐射亮度数据获得大气温度; 第二种方法利用 CO_2 的 15 μm

和 4.3 μm 辐射波段辐射数据反演得到 CO₂ 体积分数及大气温度. 在 70~110 km 高度, 白天温度数据为两种方法反演的温度平均值; 其他情况, 温度数据由第一种方法获得. 在温度基础上, 通过气体状态方程, 即可得到大气密度. 根据文献结果^[25], SABER V2.0 的温度数据总误差在 80 km 为 2.3 K, 90 km 的总误差为 5.4 K, 100 km 总误差为 8.4 K. 忽略压强误差, 根据理想气体状态方程, 可知密度的相对误差等于温度的相对误差, 即密度的相对误差在 100 km 约为 5%. 有较多文献对比了 SABER 温度剖面与其他测量方法如落球^[26]、掩星^[9, 27]和地面雷达^[28-30]的温度数据结果. 如, 15~55 km 范围内, SABER 数据与 COSMIC 掩星数据, 相对偏差小于 3 K^[9]; 中间层中部, SABER 温度与瑞利散射雷达测量数据低 2 K^[30]. 因其高测量精度和时空覆盖范围上的优势, SABER 数据被广泛用于研究平流层至低热层大气运动的能量交换和动力学过程^[31-35].

本文采用的 SABER 密度数据高度范围为 14~108 km, 纬度范围为主半球的 82°到副半球的 54°, 每 60~63 天交换一次主副半球. 垂直分辨率为 2 km, 水平分辨率为 400 km. 本文分析了从 2002 年 1 月到 2021 年 5 月的所有数据.

1.2 分析方法

根据温度垂直结构, 地球大气层可自下至上分为对流层、平流层、中间层、热层. 对流层顶高度大约为 10~15 km 之间, 平流层顶高度一般为 45~55 km 之间, 中间层高度一般在 80~90 km 之间. 因此, 14~108 km 大气包含平流层、中间层、低热层, 该范围内大气密度受下边界对流层, 上边界热层, 以及外部能量输入如地面辐射、太阳辐射和太阳风的影响. 部分参数本身具有确定性, 如地球自转和公转引起的地方时、日期、纬度和高度因素. 另一些参数则具有相当的不确定性, 如太阳辐射能量的强弱、太阳风的强弱、对流层湍流运动的输运等. 太阳活动整体上以 11 年为周期, 高度越高, 太阳活动对密度影响越大. 表 1 对比了 80~100 km 高度太阳活动对全球平均密度的影响. 2002 和 2008 年分别对应太阳活动强、弱的年份, F10.7 指数的全年平均值分别为 180 和 69. 表中全球密度数据为本文统计结果. 从表 1 可以看出, 80, 90, 100 km 高度, 全球平均密度在太阳活动弱年比太阳活动强年分别小 4.88%, 7.31%, 12.9%. 根据后文分析结果可知, 相对其他因

表 1 80, 90, 100 km 高度, 太阳活动强 (2002)、弱 (2008) 年份的密度

Table 1 At altitudes 80, 90, 100 km, the global mean density for years with higher solar activity (2002) and lower solar activity (2008)

Altitude/km	Global mean density in 2002/(kg·m ⁻³)	Global mean density in 2008/(kg·m ⁻³)
80	1.64 × 10 ⁻⁵	1.56 × 10 ⁻⁵
90	3.01 × 10 ⁻⁶	2.79 × 10 ⁻⁶
100	5.36 × 10 ⁻⁷	4.67 × 10 ⁻⁷

素如纬度等, 太阳活动对本文高度范围内的大气密度影响相对较小. 引起密度扰动的时空因素包括纬度、经度、地方时、日期. 密度随经度的变化体现了行星波的影响^[36-37]. 随着长时间发展, 行星波的影响具有较大不确定性, 因此本文的密度时空变化规律研究仅考虑纬度、日期和地方时因素.

假设密度 ρ 是高度 z 、纬度 ϕ 、地方时 t 和日期 d 的函数, 即 $\rho = \rho(z, \phi, t, d)$. 本文中 $\rho(z, \phi, t, d)$ 是高度 z 上, $\phi \pm 5^\circ$, $t \pm 1 \text{ h}$, $d \pm 5$ 范围内所有密度数据的平均值, 即

$$\rho(z, \phi, t, d) = \frac{1}{N_S} \sum_{i=1}^{N_S} \rho_i(z, \phi_i, t_i, d_i) \quad (1)$$

式中, ρ_i 是满足 $|\phi_i - \phi| \leq 5^\circ$, $|t_i - t| \leq 1 \text{ h}$, $|d_i - d| \leq 5$ 条件的第 i 个密度数据, N_S 为满足该条件的样本总数. 为避免样本数过少造成的不确定性, 删除样本数少于 10 的格点. 样本数大于 10 的格点有 4666 个, 这些格点的平均样本数为 2111. 作者对比了样本数下限为 10 和 50 的时空扰动规律, 结果显示两者差别很小.

为简明起见, 下文书写在不引起歧义时省略自变量 z , 如 $\rho(\phi, t, d)$ 默认指特定高度的密度. 密度随纬度“ a ”的变化用 ρ_a 表示, 在维度“ b ”上的平均则用 $\langle \cdot \rangle_b$ 表示, “ a ”和“ b ”可以是一维或多维空间. 特定高度的全球平均密度

$$\rho = \langle \rho(\phi, t, d) \rangle_{\phi, t, d} \quad (2)$$

密度随纬度的变化关系可写成

$$\rho_\phi = \langle \rho(\phi, t, d) \rangle_{t, d} \quad (3)$$

随地方时及纬度的变化

$$\rho_{\phi, t} = \langle \rho(\phi, t, d) \rangle_d \quad (4)$$

依此类推, 可得到密度随其他一维或二维参数的变化. 考虑到地球的球形特征, 纬度平均特指权重为

cos ϕ 的加权平均. 密度随“a”的变化幅度用标准差 σ_a 衡量, 例如, 纬度引起的变化幅度由以下公式计算

$$\sigma_\phi = \left\langle \left(\rho(\phi, t, d)^2 - \rho_{t,d}^2 \right)_\phi^{0.5} \right\rangle_{t,d} \quad (5)$$

σ_a 可用于衡量不同因素对密度影响的重要性.

2 时空扰动规律

图 1(a)~图 1(c) 依次显示了纬度、地方时和日期对密度影响的基本规律. 从图 1(a) 中可以看出, 除 75~

90 km 范围以外, 纬度越低密度越大; 75~90 km 高度, 极地平均密度最大, 低纬度次之, 中纬度密度最小. 图 1(b) 显示低于 60 km 时, 昼夜变化对密度影响较小; 高于 60 km 时, 密度在 7:00 附近达极小值, 13:00 附近达极大值. 从图 1(c) 可以看出, 低于 90 km 时, 全球平均密度在 6 月和 12 月, 即太阳直射南北回归线时达极大值; 高于 90 km 时, 全天南海北密度在 6~7 月达极小值, 此时, 地球处于远日点附近. 为进一步研究太阳辐射对地球大气密度的影响规律, 图 2(a) 和图 2(b) 分别显示了 70 km 和 100 km 高度, 不同纬度, 大气密度随日期的变化规律. 100 km 高度, 同一日期的密度有较好的南北半球对称性, 南北半球平均密度均在近日点附近达最大值; 70 km 高度, 南北半球随日期的变化存在半年的相位差, 密度均在自身半球的夏至日达最大值, 在自身半球的冬至日达最小值. 结合图 1(c) 说明日地关系对地球大气密度的影响体现在两方面, 即太阳直射纬度和日地距离. 夏季半球的太阳辐照强度大于冬季半球, 近日点全球接收的太阳辐射能量大于远日点. 不同高度下南北半球密度以及全球平均密度随日期变化的差异, 可能与不同高度下大气环流及能量传输方式有关.

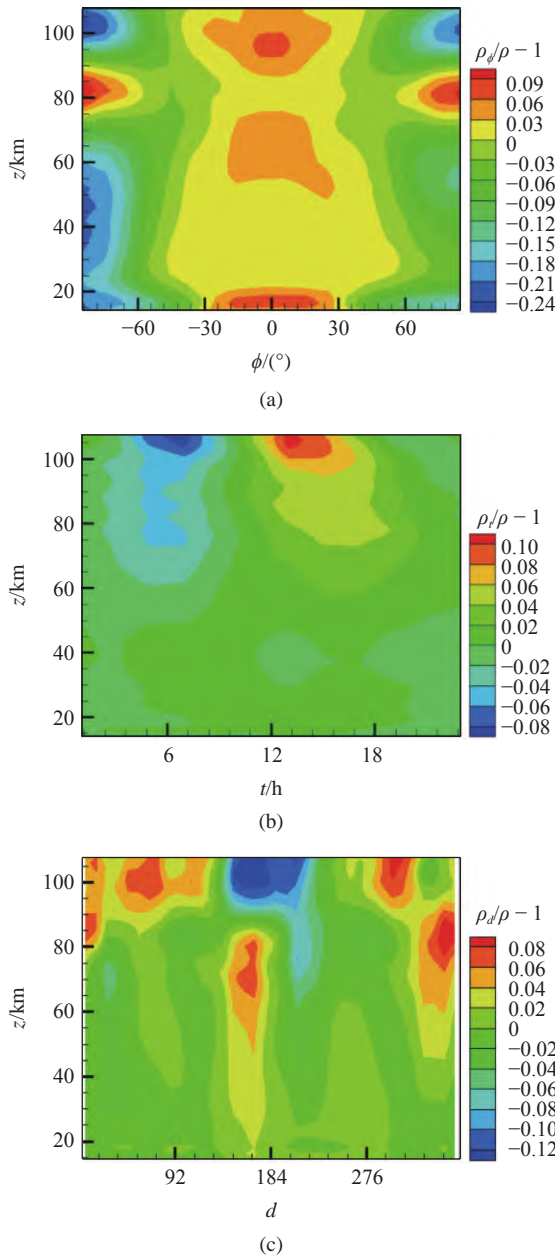


图 1 卫星观测的 14~108 km (a) 纬度、(b) 地方时和 (c) 日期对大气密度的影响规律

Fig. 1 Variations of atmospheric density with (a) latitude, (b) local time and (c) date observed by satellite at altitudes from 14 to 108 km

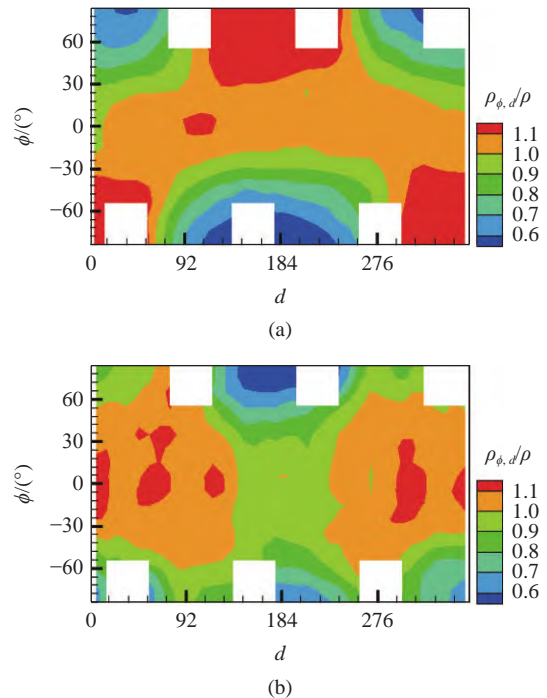


图 2 高度 (a) 70 km 和 (b) 100 km, (φ, d) 平面内的大气密度变化规律

Fig. 2 Variations of atmospheric density with φ and d at altitudes of (a) 70 km and (b) 100 km

为定量比较纬度、日期和地方时对密度影响的重要性,图3显示了纬度、日期和地方时引起的密度扰动幅度随高度的变化.扰动幅度与统计平均获得 $\rho(\phi,t,d)$ 时选择的 ϕ,t,d 区间宽度有关.区间越小,变化幅度计算值越大.当区间小于密度扰动的最小尺度时,计算幅度值趋于收敛.本文使用的区间大小如前文1.2节所述.从图3中可以看出在14~108 km范围内,对密度扰动的影响,纬度>日期>地方时.地方时引起的密度扰动均方值在40 km高度以下区域小于1%,较小的密度变化幅度与图1(b)所示结果一致.高于40 km时,地方时引起的密度扰动幅度随高度单调增加.纬度和日期引起的扰动幅度在78 km附近达最大值;密度扰动幅度在22 km和92 km附近达局部极小值.

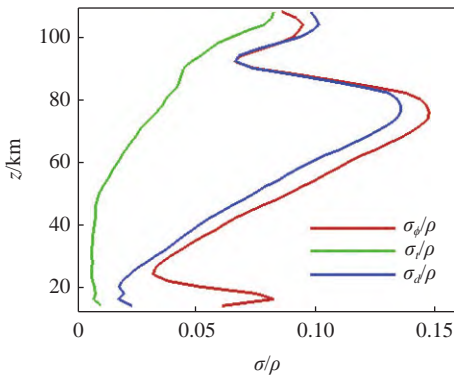


图3 纬度、日期、地方引起的密度扰动幅度随高度的变化规律
Fig. 3 Profiles of variation amplitudes caused by latitude, local time and date

3 临近空间大气密度时空扰动模型

本节将基于卫星测量数据统计得到的 $\rho(z,\phi,t,d)$,研究方便易用且精度更高的大气密度模型.一般地,密度可写成平均量和扰动量的形式,即 $\rho(z,\phi,t,d) = \rho(z)[1 + \Omega(z,\phi,t,d)]$.其中, $\rho(z)$ 是高度 z 处的平均密度, $\Omega(z,\phi,t,d)$ 是扰动函数.

为与卫星测量数据区分,将本文大气密度模型描述的密度和扰动函数添加上标“m”以示区分.图4中红色实线显示了卫星测量的平均密度随高度的变化.根据平均密度随高度的变化特征,本文将 $\rho(z)$ 拟合成以下关系式

$$\left. \begin{aligned} \rho^m(z) &= \rho_{14}^m e^{\kappa(z)} \\ \rho_{14}^m &= 0.2379 \text{ kg/m}^3, \Delta = \frac{z-14}{94} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中, ρ_{14}^m 是14 km的平均密度,表征全球平均密度

随高度的变化规律,由全球平均密度统计结果拟合求得,具体地

$$\begin{aligned} \kappa(\Delta) &= -15.90\Delta + 1.484\sin(\pi\Delta) - 0.6677\cos(\pi\Delta) - \\ &0.1372\sin(2\pi\Delta) + 0.5919\cos(2\pi\Delta) - \\ &0.2313\sin(3\pi\Delta) + 0.0765\cos(3\pi\Delta) \end{aligned} \quad (7)$$

本文模型以及USSA-76描述的平均密度相对卫星测量值的偏差如图4所示.可以看出,卫星测量值相对USSA-76的密度在22 km以下偏大,22 km以上偏小,相对偏差在108 km处达最大值29%;本文模型的平均密度与测量值相对偏差处于(-3.2%, 2.9%),说明模型中平均密度表达式可较好地描述测量结果.

根据大气密度的变化特征,假设密度扰动函数具有以下形式

$$\begin{aligned} \Omega^m(z,\phi,t,d) &= \sum_{i=1}^{N_\phi} a_i \varphi_i(\phi) + \sum_{i=1}^{N_t} b_i \tau_i(t) + \\ &\sum_{i=1}^{N_d} c_i \delta_i(d) + \sum_{i=1}^{N_\phi} \sum_{j=1}^{N_t} d_{ij} \varphi_i(\phi) \tau_j(t) + \\ &\sum_{i=1}^{N_t} \sum_{j=1}^{N_d} e_{ij} \tau_i(t) \delta_j(d) + \\ &\sum_{i=1}^{N_\phi} \sum_{j=1}^{N_d} f_{ij} \varphi_i(\phi) \delta_j(d) + \\ &\sum_{i=1}^{N_\phi} \sum_{j=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_d} g_{ijk} \varphi_i(\phi) \tau_j(t) \delta_k(d) \end{aligned} \quad (8)$$

式中, N_ϕ, N_t, N_d 是常数; $a_i, b_i, c_i, d_{ij}, e_{ij}, f_{ij}, g_{ijk}$ 均是 z 的函数, $\varphi_i(\phi), \tau_i(t), \delta_i(d)$ 分别是关于纬度、地方时和日期的函数.

以往模型如USSA-76, NRLMSISE-00模型均是通过建立温度剖面模型,结合静力平衡方程得到密度分布,而本文则直接以密度为物理量建立模型.USSA-76模型通过平均温度剖面,获得密度平均随

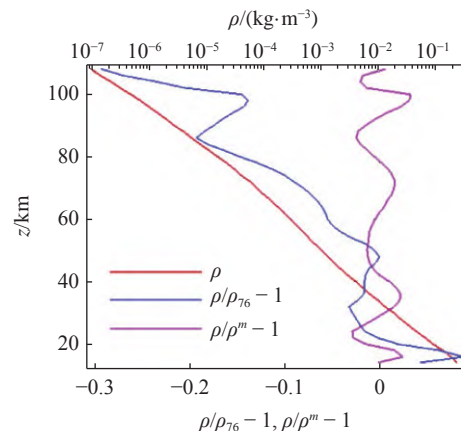


图4 卫星测量平均大气密度及其与USSA-76、本文模型的相对偏差
Fig. 4 Profiles of averaged atmospheric density observed by satellite and its relative deviation from USSA-76 and present model

高度的变化曲线^[13]. MSIS 系列模型如 MSIS-86, NRLMSISE-00 在平均温度剖面基础上, 引入了中间层顶高度、温度、扩散-混合过渡区等随地方时、日期、太阳活动和地磁活动的变化规律, 对不同高度下的变化特性缺乏详细的考虑^[14-15]. 从图 1 可以看出, 大气密度随纬度、日期、地方时的变化幅度及相位均与高度强相关, 而本文中的时空扰动模型描述的扰动幅度与相位均是高度的函数, 因此时空扰动模型对不同高度段范围内的密度变化规律理应具备更好的描述.

扰动函数 $\varphi_i(\phi), \tau_i(t), \delta_i(d)$ 应满足守恒条件, 即

$$\int_{-\pi/2}^{\pi/2} \varphi_i(\phi) \cos\phi d\phi = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_\phi \quad (9a)$$

$$\int_0^{24} \tau_i(t) dt = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_t \quad (9b)$$

$$\int_0^{365} \delta_i(d) dd = 0, \quad i = 1, 2, \dots, N_d \quad (9c)$$

根据图 2 和图 3 显示的密度变化规律, 可假设扰动函数

$$\varphi_i(\phi) = \begin{cases} \sin[(i+1)\phi/2], & i = 1, 3, \dots, N_\phi - 1 \\ \cos(i\phi/2) - C_i, & i = 2, 4, \dots, N_\phi \end{cases} \quad (10a)$$

$$\tau_i(t) = \begin{cases} \sin[(i+1)\pi t/24], & i = 1, 3, \dots, N_t - 1 \\ \cos(i\pi t/24), & i = 2, 4, \dots, N_t \end{cases} \quad (10b)$$

$$\delta_i(d) = \begin{cases} \sin[(i+1)\pi d/365], & i = 1, 3, \dots, N_d - 1 \\ \cos(i\pi d/365), & i = 2, 4, \dots, N_d \end{cases} \quad (10c)$$

式中, C_i 是为了满足式 (9a) 的常数, 例如 $C_2 = \pi/4$, $C_4 = 1/3$.

为体现密度变化的主要特征, 本文设 $N_\phi = 4$, $N_t = 6$, $N_d = 6$, 即着重描述密度随纬度的变化规律, 昼夜变化引起的周日、半周日及 1/3 周日的变化规律, 日期变化引起的周年、半年及 1/3 周年变化的变化规律. 进一步, 通过数据拟合可得到特定高度的 $a_i, b_i, c_i, d_{ij}, e_{ij}, f_{ij}, g_{ijk}$.

图 5 显示了卫星测量值的扰动量随高度的变化规律. 图 6(a) 显示了 $\Omega - \Omega^m$ 随高度的变化. Ω 与 Ω^m 的偏差越小, 说明模型对密度测量值的还原度越高. $\Omega - \Omega^m$ 的值 99% 处于 $(-0.2, 0.2)$. 对比图 5 中 Ω 为 68.3% 和 99% 的分布范围, 可以看出 $\Omega - \Omega^m$ 的幅度明显小于 Ω . 图 6(b) 显示了 (ϕ, t, d) 空间内 $\Omega - \Omega^m$ 的

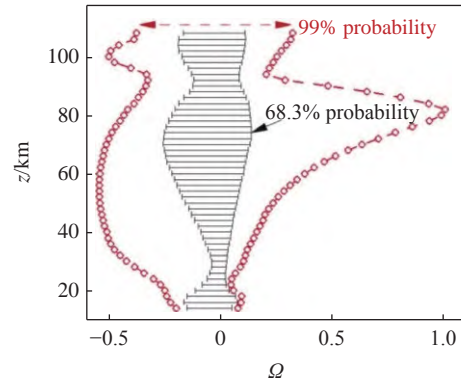


图 5 14~108 km 高度下, 卫星测量的密度时空扰动项的特征分布范围
Fig. 5 Range of temporal-spatial fluctuations of density observed by satellite at altitudes of 14~108 km

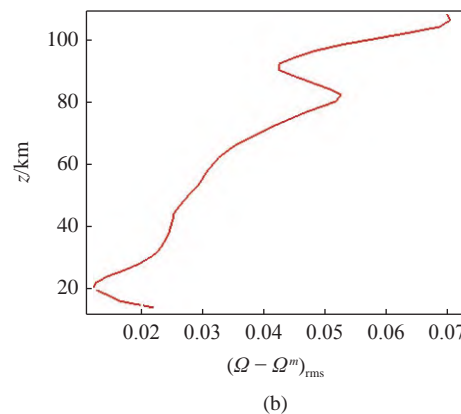
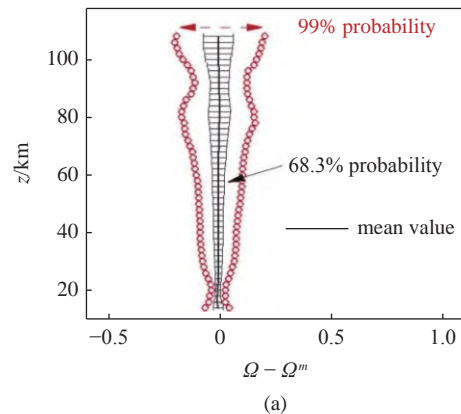


图 6 时空扰动测量值与模型值之差在高度 14~108 km 内的变化.
(a) 均值及特征分布范围和 (b) 均方根
Fig. 6 Difference of temporal-spatial fluctuations of density between observed values and modeled values at altitudes of 14~108 km. (a) Mean value and range (b) root of mean square

均方根随高度的变化. 在研究的高度范围内, $\Omega - \Omega^m$ 的均方根小于 0.07. $\Omega - \Omega^m$ 的均方根在 21 km 和 91 km 附近达局部极小值, 分别为 0.012 和 0.043; 82 km 左右达局部极大值 0.052.

图 7 显示了模型中纬度、日期和地方时引起

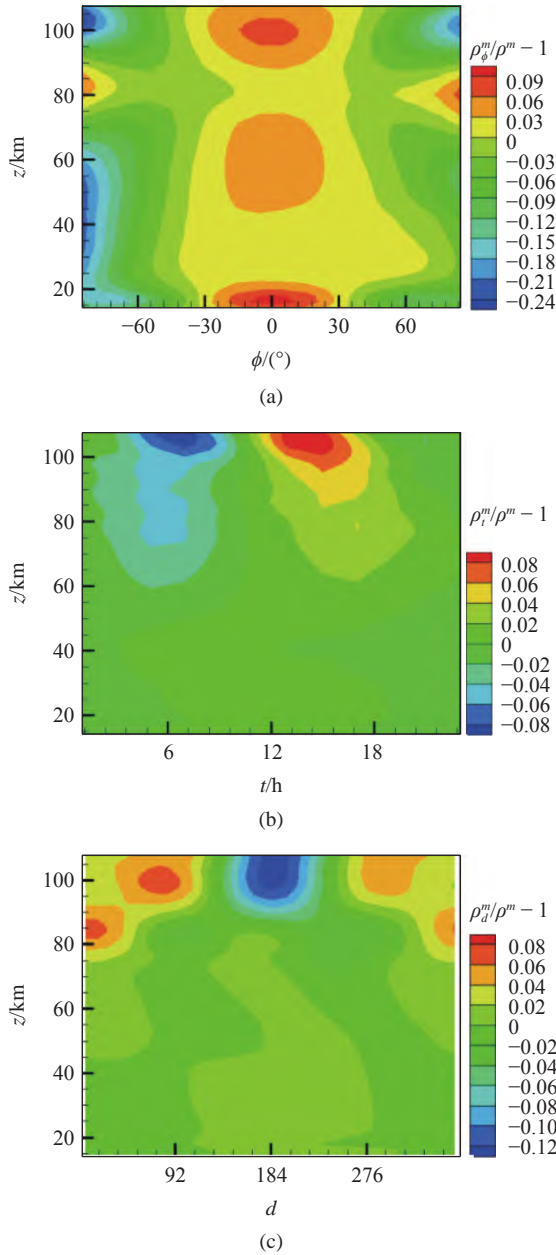


图 7 本文模型描述的 (a) 纬度、(b) 地方时和 (c) 日期对大气密度的影响在高度 14~108 km 内的变化

Fig. 7 Variations of atmospheric density with (a) latitude, (b) local time and (c) date calculated by present model at altitudes from 14 to 108 km

的密度扰动与高度的关系, 对比图 1 可以进一步看出, 本文模型可反映不同高度下密度时空扰动的主要特性.

为进一步分析对比模型与密度测量结果, 图 8 给出了 80, 90, 100 km 高度, NRLMSISE-00, USSA-76 和时空扰动模型与 SABER 观测数据随纬度的分布. 从图中可以看出, USSA-76 模型在 90, 100 km 高度明显高于 SABER 测量数据的平均值, 与图 4 所示结果一致. 时空扰动模型描述的密度数

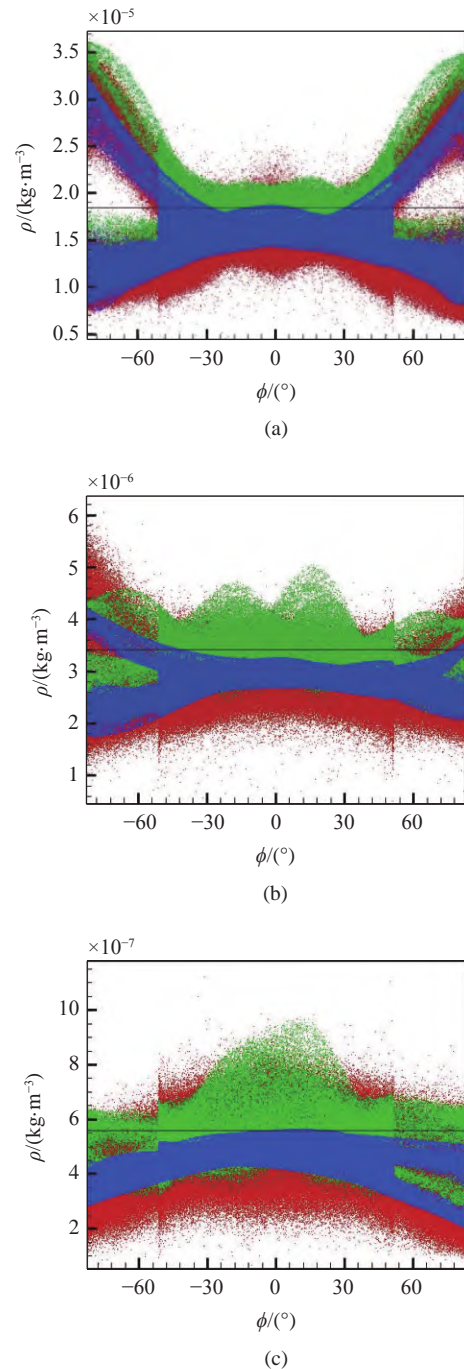


图 8 (a) 80 km, (b) 90 km, (c) 100 km 高度下, SABER 数据与三种模型预测结果对比. 红点: SABER, 绿点: NRLMSISE-00 模型, 蓝点: 时空扰动模型, 黑线: USSA-76 模型

Fig. 8 Comparison of three atmospheric density models and observed data at altitudes (a) 80, (b) 90, (c) 100 km. Red symbol: SABER, green symbol: NRLMSISE-00, blue symbol: temporal-spatial variation model, black line: USSA-76

值点的分散性弱于测量结果, 这是因为时空扰动模型考虑的是大气密度随时空变化规律的平均效果. 图 8 中显示, 时空扰动模型能较好地描述密度的时空分布特征.

4 置信区间

本文模型仅考虑确定性因素即纬度、地方时、日期对密度扰动的影响. 实际大气还受到随机性因素如湍流输运、地磁活动、太阳活动的影响. 本节将采用文献 [38] 中的误差带和置信度方法来评估对比 3 种典型的大气模型即 USSA-76, NRLMSISE-00 和时空扰动模型. 假设样本总数为 N , 给定误差带 ε , 若满足

$$\left| \frac{\rho^m - \rho}{\rho} \right| \leq \varepsilon \tag{11}$$

样本数为 M , 则置信度

$$R = M/N \tag{12}$$

式中, ρ^m 和 ρ 分别是模型预测值和观测值.

表 2 给出了密度变化较大的 3 个典型高度即 80, 90, 100 km 高度, 不同误差带要求下 3 种模型对比 SABER 数据的置信度. 从表中可以看出, 本文模型的置信度在不同高度均明显高于 USSA-76, NRLMSISE-00 模型. 高度 80 km, 误差带 $\pm 30\%$ 时, USSA-76, NRLMSISE-00 模型的置信度分别为 66.1%, 88.6%, 而时空模型的置信度可达 99.0%. 90 km 高度, 误差带 $\pm 30\%$ 时, USSA-76, NRLMSISE-00 模型的置信度分别为 68.3%, 76.5%, 而本文模型的置信度可达 98.7%. 100 km 高度, 误差带 $\pm 30\%$ 时, USSA-76, NRLMSISE-00 模型的置信度分别为 73.0%, 75.4%,

表 2 高度 80, 90, 100 km, 3 种大气模型, 不同误差带要求下, 对比 SABER 数据的置信度

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

Altitude/km	Error band	$\pm 30\%$	$\pm 50\%$	$\pm 80\%$
80	USSA-76	66.1%	85.2%	96.5%
80	NRLMSISE-00	88.6%	98.9%	99.9%
80	present model	99.0%	99.9%	99.99%
90	USSA-76	68.3%	92.1%	99.1%
90	NRLMSISE-00	76.5%	95.9%	99.7%
90	present model	98.7%	99.9%	99.98%
100	USSA-76	73.0%	87.7%	95.2%
100	NRLMSISE-00	75.4%	90.8%	97.7%
100	present model	93.2%	98.5%	99.7%

而时空扰动模型的置信度可达 93.2%.

在不同误差带下, 本文模型相比经典模型均有较高的置信度, 说明形如式 (8) 的时空扰动模型能很好地描述大气密度的时空扰动特性. 与其他模型相比, 时空扰动模型不仅考虑了密度随不同因素的变化规律, 还考虑了不同因素之间的相互耦合作用. 随着探测技术的发展和数据积累, 可进一步优化模型参数, 提高模型的预测精度.

5 结论

本文利用卫星测量数据, 研究了 14~108 km 高度范围的大气密度随纬度、地方时、日期的变化规律. 在研究的高度范围内, 日期和纬度对密度的影响大于地方时的影响. 在 40 km 以下, 地方时引起的密度扰动平均小于 1%, 高于 40 km 时, 地方时引起的密度变化幅度随高度线性递增. 纬度和日期引起的密度变化幅度在 78 km 附近达最大值. 纬度对密度的影响可分为两个区域, 即 75~90 km 高度区域和其他区域. 在 75~90 km 高度, 极区平均密度最大, 中纬度平均密度最低; 其他高度, 低纬度平均密度最大, 极区平均密度最小. 日期对密度的影响由太阳直射纬度和日地距离有关, 低于 90 km 时, 由日期引起的直射纬度的变化影响较大, 高于 90 km 时, 由日期引起的日地距离变化影响较大.

根据密度变化规律, 本文提出了大气密度的时空扰动模型, 考虑了密度随纬度、地方时和日期的变化特征. 与以往经验模型相比, 时空扰动模型能更好地描述不同高度下密度随纬度、地方时和日期的变化规律. 相较 USSA-76 和 NRLMSISE-00 模型, 在相同误差带下, 时空扰动模型的置信度明显更高. 误差带为 $\pm 30\%$ 时, 时空扰动模型在 80, 90, 100 km 高度的置信度达 99.0%, 98.7%, 93.2%, 说明模型能很好地反映密度的时空变化规律.

本文研究增加了对临近空间大气密度及其时空扰动规律的认识, 文中建模方法合理, 模型结果对临近空间高超声速飞行器动力设计有参考意义.

致谢

本文使用的 TIMED/SABER 数据来自美国 TIMED 计划数据中心 (MDC) 科学数据系统 (SDS) 中 SABER 数据发布网页 <http://saber.gats-inc.com>.

参 考 文 献

- 1 石广玉, 黎许, 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(4): 401-407 (Shi Guangyu, Li Xu, Guo Jiandong, et al. Balloon observation of atmospheric ozone and aerosols. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1996, 20(4): 401-407 (in Chinese))
- 2 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 (Shi Guangyu, Bai Yubo, Yasunobu Iwasaka, et al. A balloon measurement of the ozone vertical distribution over LAHSA. *Advance in Earth Sciences*, 2000, 15: 522-524 (in Chinese))
- 3 Zandt TEV. A brief history of the development of wind-profiling or MST radars. *Annales Geophysicae*, 2000, 18: 740-749
- 4 赵一鸣, 李艳华, 商雅楠等. 激光雷达的应用及发展趋势. 遥测遥控, 2014, 35: 4-22 (Zhao Yiming, Li Yanhua, Shang Yanan, et al. Application and development direction of Lidar. *Journal of Telemetry, Tracking and Command*, 2014, 35: 4-22 (in Chinese))
- 5 杨勇, 程学武, 杨国韬等. 高层大气探测激光雷达研究进展. 量子电子学报, 2020, 37: 566-579 (Yang Yong, Cheng Xuewu, Yang Guotao, et al. Research progress of lidar for upper atmosphere. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2020, 37: 566-579 (in Chinese))
- 6 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(2): 136-141 (Qin Guotai, Qiu Shiyan, He Aiqing, et al. "SZ-2" atmospheric density detector measurement result (I) change of the thermosphere density in the sunshine and shaded area. *Chinese Journal of Space Sciences*, 2002, 22(2): 136-141 (in Chinese))
- 7 Reber CA, Trevathan CE, Mcneal RJ, et al. The Upper Atmosphere Research Satellite (UARS) mission. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98: 10643-10647
- 8 Schwartz MJ, Lambert A, Manney GL, et al. Validation of the Aura Microwave Limb Sounder temperature and geopotential height measurements. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D15S11
- 9 宫晓艳, 胡雄, 吴小成等. COSMIC 大气掩星与 SABER/TIMED 探测温度数据比较. *地球物理学报*, 2013, 56(7): 2152-2162 (Gong Xiao-Yan, Hu Xiong, Wu Xiao-cheng, et al. Comparisons of temperature measurement between cosmic atmospheric radio occultation and SABER/TIMED. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, 56(7): 2152-2162 (in Chinese))
- 10 Steinerl AK, Kirchengast G, Foelsche U, et al. GNSS occultation sounding for climate monitoring. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A*, 2001, 26(3): 113-124
- 11 Hajj GA, Kursinski ER, Romans LJ, et al. A technical description of atmospheric sounding by GPS occultation. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2002, 64: 451-469
- 12 Larar AM, Russell Iii JM, Mlynczak MG, et al. Overview of the SABER experiment and preliminary calibration results. *Proceedings of SPIE*, 1999, 3756: 277-288
- 13 NOAA, NASA, USAF. U.S. Standard Atmosphere. Washington D.C.: U.S. Government Printing Office, 1976
- 14 Hedin AE. MSIS86 thermospheric model. *Journal of Geophysical Research*, 1987, 92: 4649-4662
- 15 Picone JM, Hedin AE, Drob DP, et al. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, 107(A12): SIA15
- 16 Emmert JT, Drob DP, Picone JM, et al. NRLMSIS 2.0: A whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities. *Earth and Space Science*, 2021, 8: e2020EA001321
- 17 Vitharana A, Zhu X, Du J, et al. Statistical modeling of tidal weather in the mesosphere and lower thermosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(16): 9011-9027
- 18 Weimer DR, Mehta PM, Tobiska WK, et al. Improving neutral density predictions using exospheric temperatures calculated on a geodesic, polyhedral grid. *Space Weather*, 2020, 18: e2019SW002355
- 19 Katsuda S, Fujiwara H, Ishisaki Y, et al. New measurement of the vertical atmospheric density profile from occultations of the crab nebula with X-ray astronomy satellites Suzaku and Hitomi. *Journal of Geophysical Research-Space Physics*, 2021, 126: e2020JA028886
- 20 Yu D, Li H, Li B, et al. New method for Earth neutral atmospheric density retrieval based on energy spectrum fitting during occultation with LE/Insight-HXMT. *Advances in Space Research*, 2022, 69(9): 3426-3434
- 21 Determan JR, Budzien SA, Kowalski MP, et al. Measuring atmospheric density with X-ray occultation sounding. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, 112: A06323
- 22 Emmert JT. Thermospheric mass density: A review. *Advances in Space Research*, 2015, 56: 773-824
- 23 Cheng X, Yang J, Xiao C, et al. Density correction of NRLMSISE-00 in the middle atmosphere (20-100 km) based on TIMED/SABER density data. *Atmosphere*, 2020, 11(4): 341
- 24 王淼, 基于 TIMED/SABER 数据的临近空间环境建模研究. [硕士学位论文]. 南京: 南京信息工程大学, 2020 (Wang Miao. Research on near space environment modeling based on TIMED/SABER observation. [Master Thesis]. Nanjing: Nan jing University of Information Science and Technology, 2020 (in Chinese))
- 25 Dawkins ECM, Feofilov A, Chu X, et al. Validation of SABER v2.0 operational temperature data with ground-based lidars in the mesosphere-lower thermosphere region (75-105 km). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, 123: 9916-9934
- 26 Mertens CJ. SABER observations of mesospheric temperatures and comparisons with falling sphere measurements taken during the 2002 summer MaCWAVE campaign. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31: L03105
- 27 Wrasse CM, Fehine J, Takahashi H, et al. Temperature comparison between CHAMP radio occultation and TIMED/SABER measurements in the lower stratosphere. *Advances in Space Research*, 2008, 41(9): 1423-1428
- 28 Xu J, She CY, Yuan W, et al. Comparison between the temperature measurements by TIMED/SABER and lidar in the midlatitude. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111: A10S09
- 29 Zou X, Yang G, Chen L, et al. Rayleigh lidar observations and comparisons with TIMED/SABER of typical case studies in Beijing (40.5° N, 116. 2° E), China. *Atmosphere*, 2021, 12(10): 1237

- 30 Remsberg EE, Marshall BT, Garcia-Comas M, et al. Assessment of the quality of the Version 1.07 temperature-versus-pressure profiles of the middle atmosphere from TIMED/SABER. *Journal of Geophysical Research*, 2008, 113: D17101
- 31 Kumari K, Oberheide J, Lu X, The tidal response in the mesosphere/lower thermosphere to the madden - Julian oscillation observed by SABER. *Geophysical Research Letters*, 2020, 47: e2020GL089172
- 32 Zhao XR, Sheng Z, Shi HQ, et al. Long - term trends and solar responses of the mesopause temperatures observed by SABER during the 2002 -2019 period. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, 125: e2020JD032418
- 33 Kawatani Y, Hirooka T, Hamilton K, et al. Representation of the equatorial stratopause semiannual oscillation in global atmospheric reanalyses. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2020, 20(14): 9115-9133
- 34 Alexander P, Torre A, Kaifler N, et al. Temperature profiles from two close lidars and a satellite to infer the structure of a dominant gravity wave. *Earth and Space Science*, 2020, 7: e2020EA001074
- 35 Strelnikova I, Almowafy M, Baumgarten G, et al. Seasonal cycle of gravity wave potential energy densities from lidar and satellite observations at 54° and 69°N. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2021, 78(4): 1359-1386
- 36 Xiao C, Hu X, Tian J. Global temperature stationary planetary waves extending from 20 to 120 km observed by TIMED/SABER. *Journal of Geophysical Research*, 2009, 114: D17101
- 37 肖存英, 胡雄, 王博等. 临近空间大气扰动变化特性的定量研究. *地球物理学报*, 2016, 59: 1211-1221 (Xiao Cunying, Hu Xiong, Wang Bo, et al. Quantitative studies on the variations of near space atmospheric fluctuation. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59: 1211-1221 (in Chinese))
- 38 Wan T, Liu H, Fan J. Error band and confidence coefficient of atmospheric density models around altitude 100 km. *Scientia Sinica: Physica, Mechanica & Astronomica*, 2015, 45(12): 124706