

REN Tingling, LUO Bingxian, MIAO Juan, WANG Ronglan, WANG Xin, LIU Siqing. Accuracy Assessment of the TLE-derived Orbital Atmospheric Densities (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(3): 717–728. CSTR:32142.14.cjss.2024-0060. DOI:10.11728/cjss2025.03.2024-0060

TLE 轨道反演大气密度精度评估*

任廷领^{1,2,3} 罗冰显^{1,2,3,4} 苗娟^{1,2,3}
王荣兰^{1,2,3} 王昕^{1,2,3} 刘四清^{1,2,3}

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院国家空间科学中心 空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院大学 北京 101408)

摘要 利用 CHAMP 和 GRACE-A 卫星的 TLE 数据进行轨道大气密度反演, 并以高精度加速度仪密度作为基准计算反演密度误差, 同时与 NRLMSISE-00, JB2008, MSIS2.0 大气模式误差进行对比, 给出了 TLE 反演误差相对大气模式误差改善率的量化结果, 为 TLE 反演密度的准确性及实际应用提供了一定的理论支撑. 选取的 TLE 数据覆盖 2002–2017 年, 分别计算了两类密度反演值: TLE 平均密度和 TLE 修正密度. 前者为时间分辨率为 3 d 的平均轨道大气密度, 该值不依赖于大气模式; 后者则是通过对大气模式进行修正得到的轨道原位处的大气密度. 结果表明, 在所分析的时间范围内, TLE 平均密度的整体平均误差小于 5%, 标准差小于 8%; TLE 修正密度在地磁平静期误差最小, 相对于大气模式的误差改善率超过 80%.

关键词 TLE 反演密度, 误差改善率, 经验大气模式

中图分类号 P351

Accuracy Assessment of the TLE-derived Orbital Atmospheric Densities

REN Tingling^{1,2,3} LUO Bingxian^{1,2,3,4} MIAO Juan^{1,2,3}
WANG Ronglan^{1,2,3} WANG Xin^{1,2,3} LIU Siqing^{1,2,3}

1(State Key Laboratory of Space Weather, National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

2(Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather, National Space Science Center,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

3(Key Laboratory of Science and Technology on Environmental Space Situation Awareness,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

* 中国科学院国防科技重点实验室基金 (CXJJ-22S031) 和中国科学院国家空间科学中心攀登项目 (E1PD40017S) 共同资助

2024-04-18 收到原稿, 2024-08-20 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

4(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101408)

Abstract In this research, we derived TLE-based atmospheric densities along CHAMP and GRACE-A orbits, and the density errors were calculated based on the high-accuracy accelerometer densities, empirical models errors including NRLMSISE-00, JB2008 and MSIS2.0 were also estimated for comparison. Improvement ratios, which defined as the percentage of TLE density errors smaller than that of empirical models, were given in the subsequent contents, and lay a theoretical foundation for the accuracy and application of the TLE-derived densities. TLE data ranged from 2002 to 2017, and two different kinds of densities, including TLE-averaged and TLE-calibrated densities, were derived. The former ones have a temporal resolution of 3 days, and were independent of the empirical models; the latter ones were calibrated values which relies on the empirical models. Results indicate that the TLE-averaged densities have a general average error smaller than 5%, and a standard deviation no bigger than 8%; the TLE-calibrated densities have the minimum errors during geomagnetic quiet conditions, with the improvement ratios bigger than 80%.

Key words TLE-derived densities, Improvement ratios, Empirical atmospheric models

0 引言

TLE (Two Line Element sets) 是记录卫星轨道状态的一组轨道根数, 主要包含六个轨道参量, 即轨道倾角 i 、升交点赤经 Ω 、偏心率 e 、近地点角距 ω 、平近点角 M 、平均运动 n . TLE 数据去除了地球非球形引力摄动的周期项影响, 反映了卫星轨道的长期变化趋势, 其中 n 的物理含义是卫星每天绕地运行的平均角速度. 在没有制动的条件下, 低轨卫星轨道逐渐衰减, n 逐渐增加, 利用 n 与大气密度之间的理论关系式即可反演出轨道处的大气密度^[1].

近地卫星的 TLE 数据需与 SGP4 等轨道外推模式配合使用, 研究表明, 对于低轨卫星 (LEO) 卫星而言, 由于受到大气阻力影响较为明显, 使用 TLE 进行外推的沿迹误差很快发散, 未来 7 d 误差接近 10 km^[2]. TLE 数据从 20 世纪 50 年代开始发布, 北美防空联合司令部 (NORAD) 对每一个进入地球外层空间的目标进行识别和监测并记录其编号和轨道变化, 截至 2023 年已有 5 万多颗空间目标记录在案, 得益于其广泛的时空覆盖范围, 该数据在中高层大气密度研究领域具有巨大的应用价值. 多个大气密度模式都采用了 TLE 反演的密度数据作为基础进行构建, 例如 JB2008^[3], DTM2020^[4], MSIS2.0^[5] 等. 此外, TLE 反演密度还被广泛应用于大气密度反演及修正工作中^[6-8].

一般而言, TLE 反演方法可以在整体上获得精

度高于传统大气模式的密度值, Ren 等^[6] 利用 2004 年的 TLE 数据进行反演, 结果表明, TLE 反演精度整体优于 NRLMSISE-00 模式; Doornbos 等的研究表明, 该方法可以使经验模型误差突破空间环境指数的限制得到改进^[9]. 然而该方法的精度与 TLE 反演过程中采用的积分时间参数有关, Bernstein 等^[10] 的研究表明, 在积分时间大于 8 d 时, 反演密度精度可以有效提升, 与加速度反演密度进一步吻合. 但是当前对 TLE 反演密度优于大气模式的比例缺乏定量化的结果. 本文以经过标校后的星载加速度计密度为基准, 针对 TLE 反演密度误差进行系统性分析和评估, 并与典型大气密度模式 NRLMSISE-00^[11], MSIS2.0, JB2008 的误差进行对比, 定义 TLE 反演误差优于模式误差的比例为误差改善率, 并给出具体的量化结果. 研究可为 TLE 反演密度的实际应用提供理论支撑.

1 理论方法

1.1 反演原理

利用 TLE 数据进行大气密度反演的基本原理具体可参见文献^[1,12]. 在卫星运行过程中, 大气阻力产生的加速度为

$$\dot{\mathbf{v}}_d = -\frac{1}{2}\rho B v_r^2 \mathbf{e}. \quad (1)$$

其中, v_r 为卫星相对大气的运动速度, $\mathbf{e}$ 为相对速度方

向的单位矢量, B 为卫星的弹道系数, ρ 为大气密度. 在大气阻力的作用下, 轨道半长轴 a 逐渐减小, 其变化规律可表示为

$$\frac{da}{dt} = \frac{2a^2 v}{\mu} \dot{\mathbf{v}}_d \cdot \mathbf{e}_v. \quad (2)$$

其中, v 为卫星速度, $\mathbf{e}_v$ 为速度方向的单位矢量. 根据平均运动和半长轴的变化关系 $n = \sqrt{\mu/a^3}$, 卫星轨道的平均平动变化可用如下微分方程表示:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{3}{2} n^{1/3} \mu^{-2/3} \rho B v^3 F. \quad (3)$$

其中, $\mu = GM_E$ 为万有引力常数 G 与地球质量 M_E 的乘积, F 为旋转大气对卫星轨道的影响, 该值可近似表达为

$$F \approx \left(1 - \frac{rw}{v} \cos i\right)^2. \quad (4)$$

其中, r, w, i 分别为卫星的地心距、地球自转角速度和轨道倾角. 与利用平行风场模式 (HWM-93) 计算所得的值相比, 式 (4) 近似计算产生的误差不会大于 3%. 对式 (3) 沿卫星轨道积分, 由于 n 的变化非常小, 积分过程中可将 $n^{1/3}$ 项提到积分号外并用平均值代替. 经过上述处理, 可得积分间隔内的平均密度为

$$\bar{\rho}_{\text{TLE}} = \frac{2\Delta n \mu^{2/3}}{3\bar{n}^{1/3} B \int_{t_0}^{t_1} v^3 F dt}. \quad (5)$$

其中, $\bar{n} = (n_{t_1} + n_{t_0})/2$, $\Delta n = n_{t_1} - n_{t_0}$, t_0 和 t_1 分别为积分的起始和结束时刻.

通常将积分时间间隔设置为 3 d, 以保证轨道衰减幅度大于 TLE 本身的误差, 已有研究表明, 积分间隔为 2 d 时的反演精度与 3 d 大致相同^[13], 但这里仍沿用传统的 3 d 积分间隔设置.

1.2 TLE 反演密度与修正密度

通过式 (5) 可以发现, 在预先确定弹道系数的前提下, 仅利用 TLE 数据本身就可以反演出卫星轨道处的平均大气密度, 该密度不依赖于外部大气密度模式. 为了得到原位大气密度, 可以利用该平均值对同样时空坐标范围内的模式密度进行修正. 计算同样时空范围下模式密度 ρ_M 的平均值, 其表达式为

$$\bar{\rho}_M = \frac{\int_{t_0}^{t_1} \rho_M v^3 F dt}{\int_{t_0}^{t_1} v^3 F dt}. \quad (6)$$

计算 TLE 反演密度和模式密度的比值, 其表达式为

$$\lambda = \bar{\rho}_{\text{TLE}} / \bar{\rho}_M. \quad (7)$$

实现对模式的修正, 有

$$\rho = \lambda \rho_M. \quad (8)$$

显然, 修正密度的获得有赖于已有的大气密度模式. 在本文中, 以常用的 MSIS00 模式为基础计算修正密度. 以下分别称这两种密度为 TLE 反演密度和 TLE 修正密度.

TLE 修正密度仅仅是对原有大气模式施加了一个修正系数 λ , 其目的是得到时间分辨率更高的原位密度, 只能改善积分时间间隔内模式的整体偏差, 而无法降低标准差, 在 TLE 数据本身存在较大误差的情况下, 无法保证修正密度的平均误差优于大气模式. TLE 反演密度相当于对每个积分时间间隔内的密度都进行了平均处理, 由于 TLE 数据反映了大气阻力引起的卫星轨道的真实衰减, 因此在获取每个时间间隔的平均密度之后, 密度总体的平均误差和标准差都将得到改善.

Ren 等^[6]选取 CHAMP 卫星的部分 TLE 数据评估了修正密度和反演密度的误差, 所选事例并不完备. 本文将分别选用 CHAMP 和 GRACE-A 卫星 2002—2017 共 25 年 (其中 CHAMP 卫星为 2002—2010 年, GRACE-A 卫星为 2002—2017 年) 的 TLE 数据对反演密度和修正密度的误差进行统计分析. 其中, 修正密度主要评估 TLE 数据对大气模式精度的整体提升效果, 反演密度分别针对不同地磁扰动条件进行评估, 给出误差改善率的量化结果.

1.3 弹道系数求解

根据式 (6) 可以看出, 在大气密度反演研究中, 弹道系数是非常重要的参量, 由卫星相对大气的迎风面积、卫星质量和阻尼系数三个参量共同决定, 其精度与最终反演的大气密度精度直接相关. 一般而言, 这三个参量都随时间变化. 在具备卫星表面参数和姿态数据的前提下, 迎风面积和质量可以准确计算, 即便如此, 对于结构复杂的卫星而言, 不同表面参数的选择仍然会影响到迎风面积的准确性. 阻尼系数的计算则更为复杂, 有

$$B = C_d \frac{A}{m}. \quad (9)$$

在实际应用中, 通常是直接求出某段时间内的平均弹道系数, 该值可近似认为是真实值, 可以用来反

演密度. Bowman 等^[14]通过计算 31 年的卫星数据, 将所得弹道系数进行平均, 得到一个较为准确的 B 值. 但是该方法需要一个高精度的经验大气模式, 而实际上大气密度随时间做长期变化, 阻力系数 C_d 也会随地点高度的变化而变化, 这就使得 B 值偏离真实值. 本文采用 Emmert 等^[15]的公式, 使用另一种计算方式求 B 的近似值. 以 CHAMP 卫星为例, 阐述利用 TLE 数据计算 B 值的步骤.

假设 B 的真实值在所研究的时间范围内保持不变, 且高度相似的两颗卫星在相同时间段内其 B 值修正量一致. 如果存在一颗参考卫星, 其弹道系数 B_s^T 为已知, 经验大气模式对应的 B^M 计算公式如下:

$$B_{\Delta t}^M(t_{ij}) = \frac{2\Delta n\mu^{2/3}}{3\bar{n}^{1/3} \int_{t_i}^{t_j} \rho_M v^3 F dt}. \quad (10)$$

则所求未知卫星的弹道系数 B_x^T 的计算公式如下:

$$\frac{B_x^M(t_{ij})}{B_s^M(t_{ij})} = \frac{B_x^T}{B_s^T}. \quad (11)$$

其中, t_{ij} 为积分时间. 由于 Starshine 1 卫星外形为球形^[16], 运行过程中具有确定的面质比, 其阻力系数由 Bowman 等^[14]通过分析卫星轨道的衰减给出, 因此该卫星可视为具有确定的 B 值, 大小为 0.00971. 考虑到 Starshine 1 卫星运行时间较短, 这里首先计算了 Explorer 8 卫星的弹道系数. 该星运行时间超过 50 年, 于 2012 年陨落, 可以得出该卫星平均 B 值为 0.0223, 与 Emmert 等^[15]给出的参考值 0.0232 偏差为 -3.88%, 可以认为计算结果准确可靠. 同理可得 CHAMP 卫星弹道系数为 0.00462, GRACE-A 卫星为 0.006873, 这与 Ren 等^[6]和 Lu 等^[17]的计算结果一致.

2 加速仪密度标较

误差计算采用的基准密度来自 CHAMP 和 GRACE-A 卫星的加速仪反演密度 (以下称“加速仪密度”). 加速仪具有极高的探测精度和灵敏度^[18-20], 如 CHAMP 携带的加速仪, 其精度在卫星飞行方向为 $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, GRACE 卫星为 $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$, 等效的大气密度精度可达 $10^{-15} \sim 10^{-14} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 量级, 而在 CHAMP 和 GRACE 的高度, 大气密度为 $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 量级, 因此加速仪密度通常作为基准密度被广泛采用^[21,22]. 由于不同卫星搭载的加速仪之

间具有系统性偏差, 因此在使用之前需要对其进行标校^[23,24]. 这里采用 HASDM 密度数据进行统一标校, 研究表明, HASDM 密度是目前精度最高的数据, 其总体误差 $< 4\%$, 在太阳活动峰年可以达到 2% ^[25].

2.1 HASDM 密度计算

由于无法获取 HASDM 源程序, 为了计算出卫星轨道处的 HASDM 密度, 这里利用经验正交分解法 (EOF) 对 HASDM 模式进行了简化模式构建 (Reduced Order Model, ROM), 记为 ROMH 模式.

EOF 方法的核心思想是对原始数据引入一种能使其简化, 并剔除冗余信息的线性变换. 通过该方法可以将原始数据分解为空间函数与时间函数的乘积, 称为主要分量, 其中前几阶分量占有全部数据的总方差的很大部分, 这就相当于把原有数据的主要信息浓缩在几个主要分量上, 因而研究主要分量随时间变化的规律就可以代替原有数据的时间变化^[23,26,27].

以 NRLMSISE-00 模式为例阐述 ROM 模式的构建过程, 并对 ROM 模式的精度进行分析. 首先将大气密度数据按照时空坐标进行网格化处理, 网格设置见表 1, 采用的公式为

$$\rho(t_i, \varphi_j) = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \cdots & \rho_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{m1} & \cdots & \rho_{mn} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

其中, t_i 和 φ_j 分别表示每个网格点对应的世界时和空间坐标, 角标 n 和 m 分别表示时间和纬度序列, 空间坐标进行了三维转一维的处理. 对大气密度数据而言, EOF 方法能够把随时间变化的变量场 $\rho(t, \varphi)$ 分解为不随时间变化的空间函数和只依赖时间变化的时间系数的乘积, 即 $\rho = \mathbf{VZ}$.

令 $\mathbf{A} = \rho\rho^T = \mathbf{VZZ}^T\mathbf{V}^T$, $\mathbf{A}$ 为实对称矩阵, 根据实对称矩阵分解定理, $\mathbf{A} = \mathbf{V}\mathbf{\Lambda}\mathbf{V}^T$, $\mathbf{\Lambda}$ 是 $\mathbf{A}$ 的特征值组成的对角矩阵. 把 $\mathbf{A}$ 的特征值从大到小排列, 有 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \cdots \geq \lambda_n$, 对应的特征向量 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \cdots, \mathbf{v}_n$ 组成

表 1 ROM 模式网格化设置
Table 1 Gridding settings of ROM model

项目	范围	分辨率
纬度/(°)	[-90, 90]	10
经度/(°)	[-180, 180]	10
高度/km	[200, 600]	20
时间/year	[2002, 2020]	1

V 的列向量, V 求出后, 由 $Z = V^T \rho$ 可以求出 Z .

EOF 方法具有快速收敛的特点, 只要取少数的前几阶空间函数和时间系数, 即可近似重构 ρ , 即 $\rho \approx VZ$.

EOF 阶数对 ROM 模式精度有着直接的影响. 图 1(a) 给出了 2002 年 8 月 10 日 14:00 时 400 km 处的全球大气密度分布, 图 1(b) 为利用前 20 阶 EOF 函数对 MSIS 模式进行的重构, 图 1(c) 展示了二者之间的平均误差. 计算结果表明, 平均误差为 -0.02% , 标准差为 1.39% , 表明二者之间的系统偏差和误差弥散程度非常低. 图 1(d) 给出了采用不同阶数 EOF 对 ROM 模式精度的影响, 红色圆点表示平均误差随阶数的变化, 蓝色圆点表示标准差, 可见对于前 5 阶函数, ROM 模式平均误差和标准差均迅速减小, 更高阶的 EOF 对平均误差并没有明显改进, 但是可以进一步降低标准差, 即改进 ROM 模式的弥散

程度.

为了验证 ROM 模式的普适性, 还进一步研究了 ROM 模式 (20 阶) 误差随高度和时间的变化. 图 1(e) 给出了误差在 200~600 km 高度范围内的变化, 可见平均误差随高度并没有明显的降低, 而标准差随高度逐渐增大. 这可能是因为大气密度随高度逐渐降低, 同样的偏差会导致更高的误差造成的. 需要注意的是, 图 1(e) 还给出了 250, 350, 450, 550 km 高度处的误差, 这些高度的原始模式密度并未参与 ROM 模式构建 (见表 1), 因此属于外符合误差, 其余高度属于内符合误差, 可见 ROM 模式标准差始终小于 3% , 而平均误差始终小于 1% . 图 1(f) 给出了在 400 km 处, ROM 误差在 2002 年全年内的变化, 可见平均误差和标准差始终维持在较低的水平, 计算结果表明, 平均误差最大值为 0.5% , 标准差最大值为 2.9% .

综合以上论述, 可以认为 ROM 模式能够准确表

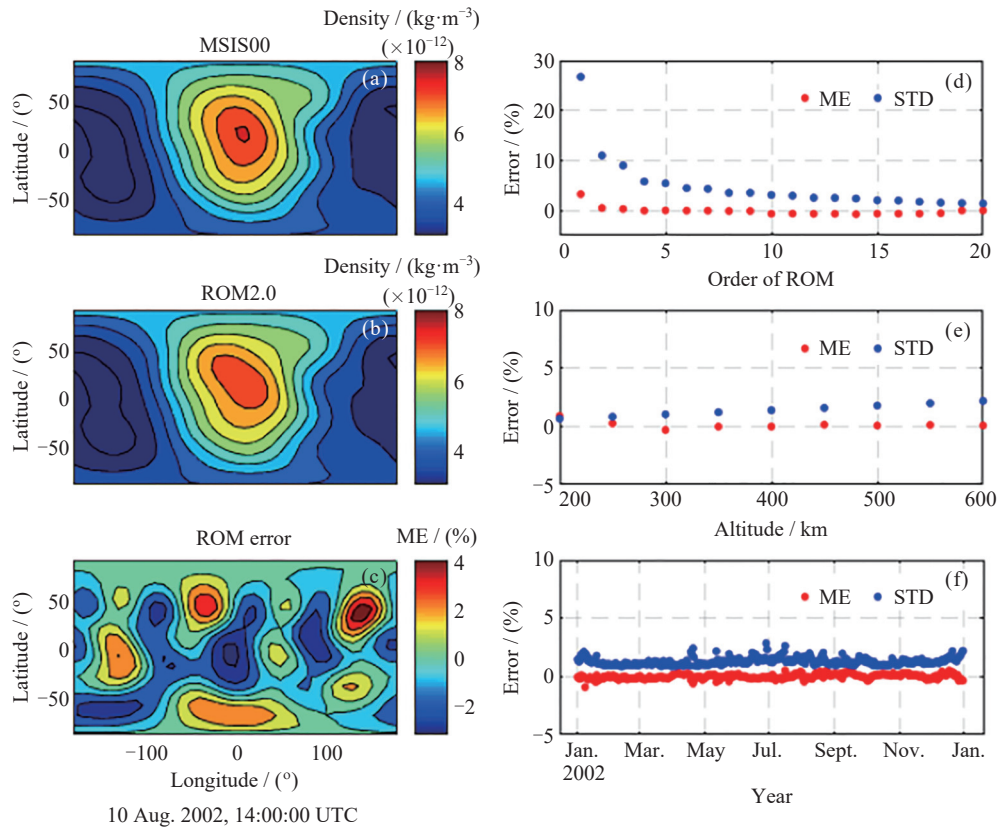


图 1 ROM 模式精度分析. (a) MSIS00 模式的全球分布, (b) 20 阶 ROM 模型的全球密度分布, (c) ROM 误差全球分布, (d)~(f) ROM 误差随阶数、高度和时间的变化

Fig. 1 Accuracy of the Reduced Order Model (ROM). (a) Global distribution of MSIS00 densities, (b) global density distribution of the 20th-order ROM Model, (c) global distribution of ROM error, (d)~(f) variation of errors with orders, altitude and time, respectively

征原始大气密度,为了尽可能降低标准差的影响,本研究采用 20 阶基系数构建 ROM 模式.

2.2 标较结果

利用 ROMH 模式计算出 CHAMP/GRACE-A 卫星轨道处的模式密度,进而计算加速仪密度每日误差 ERR (E_{RR}) 的平均值 ME ($\bar{E}$) 及标准差 STD (σ),即

$$E_{RR} = \frac{\rho_{acc} - \rho_{ROMH}}{\rho_{ROMH}}, \quad (13)$$

$$\bar{E} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{RR_i}, \quad (14)$$

$$\sigma = \left[\sum_{i=1}^N \frac{(E_{RR_i} - \bar{E})^2}{N-1} \right]^{1/2}. \quad (15)$$

其中, ρ_{acc} 为加速仪密度, ρ_{ROMH} 为 ROMH 模式密度, N 为每日密度数据的采样点个数. 在误差计算过程中,对加速仪密度的坏值 (9.99×10^{23})、负值和明显超出合理范围 ($|\rho_{acc} - \rho_{ROMH}| / \min(\rho_{acc}, \rho_{ROMH}) > 2$) 的值进行了剔除.

图 2 给出了两颗卫星加速仪密度平均误差 (蓝色点) 及标准差 (红色点) 的统计结果,全时间段内 ME 和 STD 的平均值列于左上角. 可见 CHAMP 密度与 ROMH 密度之间的差异最小,偏差仅为 -0.3% (见图 2a); GRACE-A 密度偏差并不稳定,在 2002—2009 年偏差有轻微的减小 (ME 和 STD 均值分别为 -4.6% 和 20.7%),而在 2010—2017 年偏差逐渐增大 (ME 和 STD 均值分别为 -9.5% 和 13.8%),这可能与

电池性能下降导致的数据质量变差有关^[4],因此本文采用分段的方式对 GRACE-A 密度进行标较. 综合以上分析,对 CHAMP/GRACE-A 加速仪密度的标较系数分别设定为 1.00 和 1.05/1.11. 经过以上处理,最后得到时间分辨率为 10 s,时间跨度覆盖 2002—2017 年,包含 2 颗卫星共 25 年的加速仪密度数据.

3 误差分析

3.1 TLE 反演密度误差

利用 CHAMP 和 GRACE-A 卫星的 TLE 数据反演轨道平均大气密度,为了得到不依赖于经验大气模式的密度数据,将积分时间间隔设定为 3 d. 将反演密度与经过标较的加速仪密度进行对比,计算 TLE 反演密度的平均误差. 为了评估 TLE 反演方法对密度的改进效果,本文还同时计算了 MSIS00, MSIS2.0, JB2008 的误差,平均误差公式为

$$E_{RR'} = \frac{\rho - \rho_{acc}}{\rho_{acc}}, \quad (16)$$

$$\bar{E}' = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_{RR'_i}. \quad (17)$$

其中, ρ 为模式密度或 TLE 反演密度, ρ_{acc} 为经过标较后的加速仪密度.

图 3(a) 给出了 CHAMP 卫星 TLE 数据反演密度与模式密度误差的分布结果,其中绿色、蓝色、黑色、红色线分别表示 MSIS00, MSIS2.0, JB2008, TLE 反演密度的误差. 由于 TLE 反演密度是 3 d 间

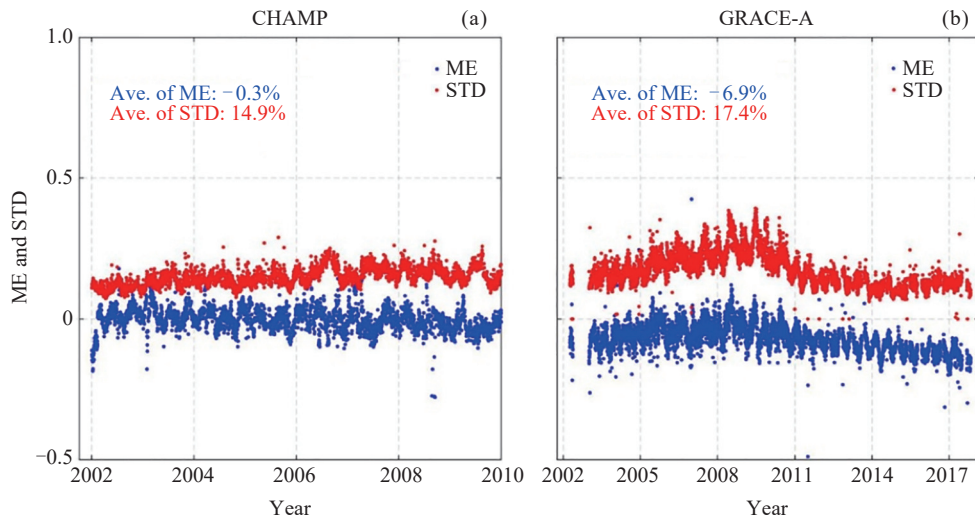


图 2 加速仪密度与 HASDM 密度对比

Fig. 2 Comparison of accelerometer density and HASDM density

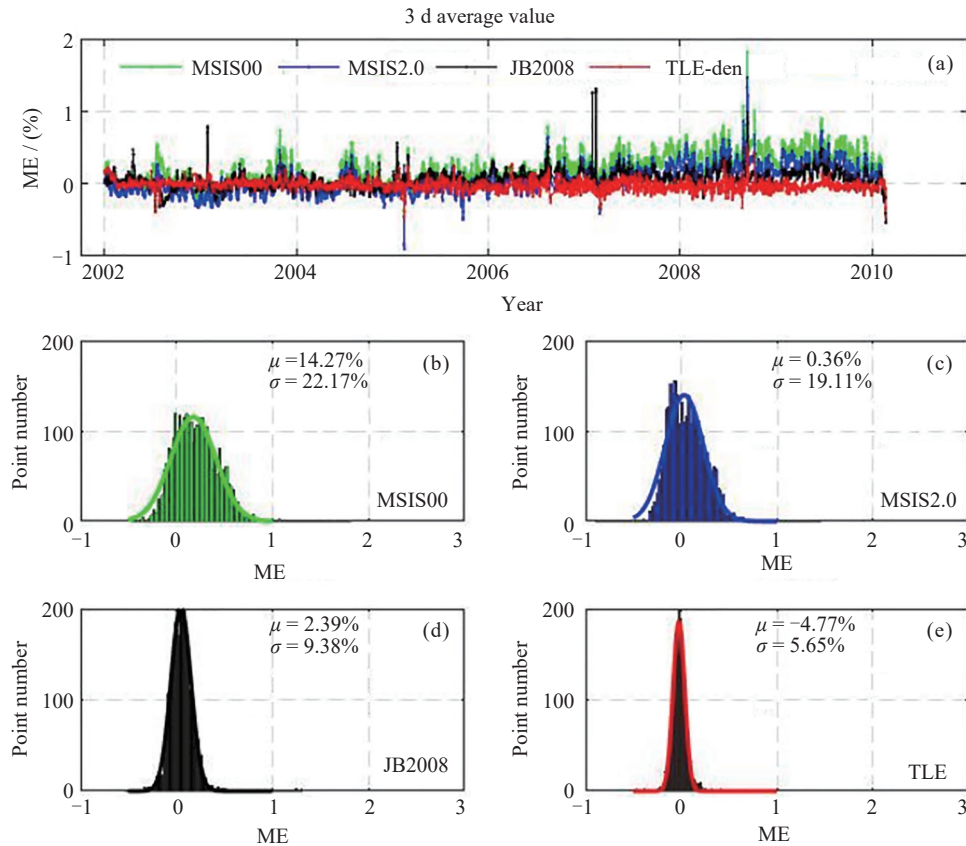


图3 CHAMP 卫星 TLE 数据反演密度与模式密度误差对比

Fig. 3 Comparison between TLE-derived and model density errors for CHAMP

隔下的平均值, 因此分别对三种模式的密度也进行了 3 d 平均处理. 图 3(b)~(e) 分别对误差分布进行了高斯拟合, 平均值和标准差分别列于子图左上角. 通过对比可以看出, MSIS00 模式的平均误差和标准差均为最大, 分别为 14.27% 和 22.17%; MSIS2.0, JB2008, TLE 反演密度的平均误差均小于 5%, 且 TLE 反演密度的标准差最小, 为 5.65%.

图 4 给出了 GRACE-A 卫星的对比结果. 可以看出, 误差分布与 CHAMP 结果相似: MSIS00 的平均误差和标准差均为最大, 分别为 14.56% 和 24.22%; MSIS2.0, JB2008, TLE 反演密度的平均误差均小于 5%, 且 TLE 反演密度的标准差最小.

值得注意的是, 在 MSIS00, MSIS2.0, JB2008, TLE 反演密度中, MSIS2.0 的平均误差最小, CHAMP 卫星为 0.36%, GRACE-A 卫星为 2.76%, 这可能得益于 MSIS2.0 模式采用了更多更新的数据. MSIS2.0 对 2000 年后的大量数据进行了同化处理, 包括中间层、平流层和对流层温度的观测和分析资料, 中间层 O 和 H 的观测结果, 以及轨道反演的平均

密度数据^[5]. 相对而言, 其他几个模型所采用的数据较少. 如 MSIS00 模型缺乏 100 km 以下有关大气成分与结构的卫星观测数据; JB2008 则仅采用了 2007 年之前的数据^[3]. 这可能是决定 MSIS2.0 平均误差最小的主要原因.

以上分析结果表明, 利用 TLE 反演方法可以显著降低密度的平均误差和标准差, 这对于分析大气密度的平均分布、研究大气密度的长期变化规律以及修正大气密度模式均具有重要意义.

3.2 TLE 修正密度误差

与 TLE 反演密度不同的是, TLE 修正密度是卫星轨道处的原位密度. 这里以地磁 A_p 指数为参考依据, 评估 TLE 修正密度在不同地磁扰动条件下对大气密度误差的改进效果. 不同地磁扰动的选取条件设置如下.

(1) 磁静日: $A_p < 15$, 且前后 3 d 的 A_p 值均处于此范围.

(2) 小磁暴日: $15 \leq A_p < 40$, 且前后 3 d 的 A_p 值均处于此范围.

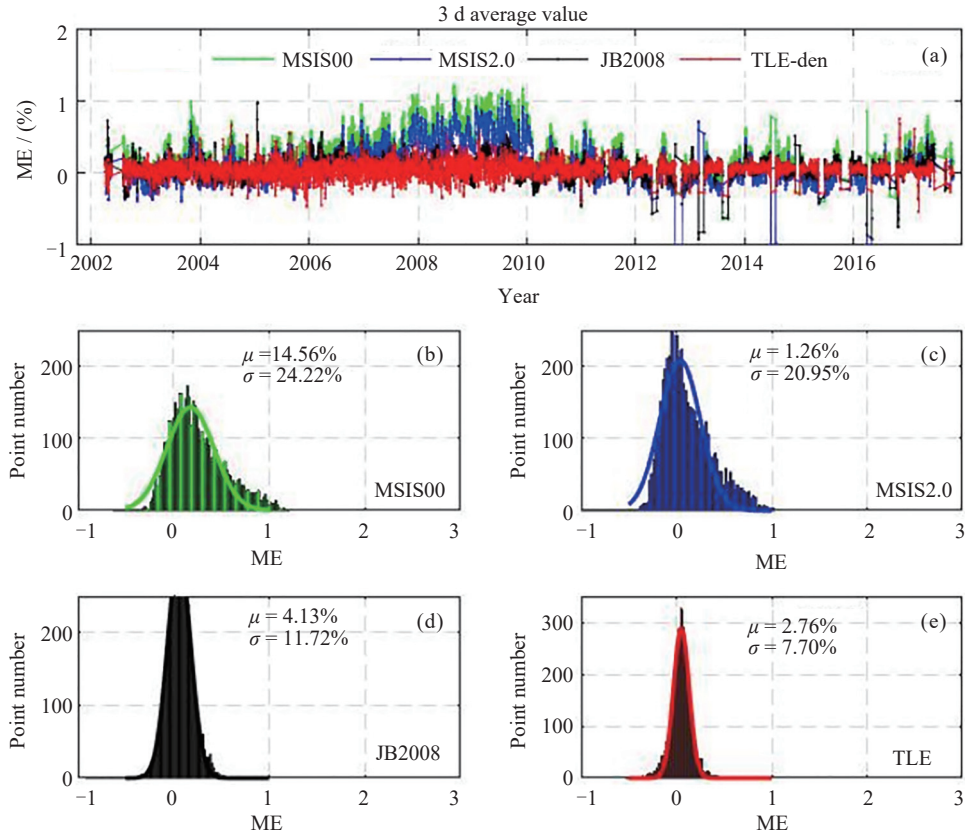


图4 GRACE-A 卫星 TLE 数据反演密度与模式密度误差对比

Fig. 4 Comparison between TLE-derived and model errors for GRACE-A

(3) 中磁暴日: $40 \leq A_p < 100$, 且前后 3 d 的 A_p 值均处于此范围.

(4) 大磁暴日: $A_p \geq 100$, 且前后 3 d 的 A_p 值均处于此范围.

采用以上条件针对 2002—2017 年 A_p 指数进行分类筛选, 共得到 293 个磁静日、364 个小磁暴日、73 个中磁暴日和 10 个大磁暴日 (见图 5). 由于 CHAMP 卫星运行时间为 2002—2010 年, 针对该时间段共筛选出 154 个磁静日、193 个小磁暴日、42 个中磁暴日和 8 个大磁暴日.

图 6 给出了 CHAMP 卫星 TLE 修正密度与模式密度在不同地磁条件下的误差对比. 其中绿色、蓝色、黑色和红色点线分别表示 MSIS00, MSIS2.0, JB2008 模式密度和 TLE 修正密度的日均值误差. 图 6(a)~(d) 分别对应磁静日、小磁暴、中磁暴和大磁暴日. 可以看出, 在所有地磁条件下, MSIS00 误差的总体大小明显高于其余类型密度数据; 在磁静日, 各类型密度误差的比较结果是 $MSIS00 > MSIS2.0 > JB2008 > TLE-den$, 而在磁暴期间, 这一现象并不明

显, 即 JB2008 适合于地磁平静期的密度计算; 从整体来看, TLE 修正密度误差在所有地磁条件下都较为稳定且低于各类模式.

为了量化 TLE 修正密度对误差的改进效果, 分别统计 TLE 修正密度误差小于各模式的百分比, 记为误差改善率 $r(\varepsilon_{tle} < \varepsilon_M) = n(\varepsilon_{tle} < \varepsilon_M) / N$. 其中, $n(\varepsilon_{tle} < \varepsilon_M)$ 为 TLE 修正密度误差小于模式误差的天数, N 为总天数. 表 2 列出了 TLE 修正密度与 MSIS00, MSIS2.0, JB2008 的对比结果. 可以得出两个主要结论. 一是误差改善率在磁静日最高, 说明在地磁平静时, TLE 修正效果最好; 二是总体而言, 误差改善率随地磁扰动的增强呈下降趋势, 但在大磁暴日改善率有所波动, 表明 TLE 修正在大磁暴期间的优化效果并不稳定. 需要注意的是, CHAMP 大磁暴事例只有 8 个, 统计意义不大, 下面利用 GRACE-A 卫星事例进一步验证 TLE 修正的优化效果.

图 7 给出了 GRACE-A 卫星 TLE 修正密度与模式密度在不同地磁条件下的误差对比. 通过对比可以发现, 图 7 中误差曲线与图 6 基本相似, 不同之处在

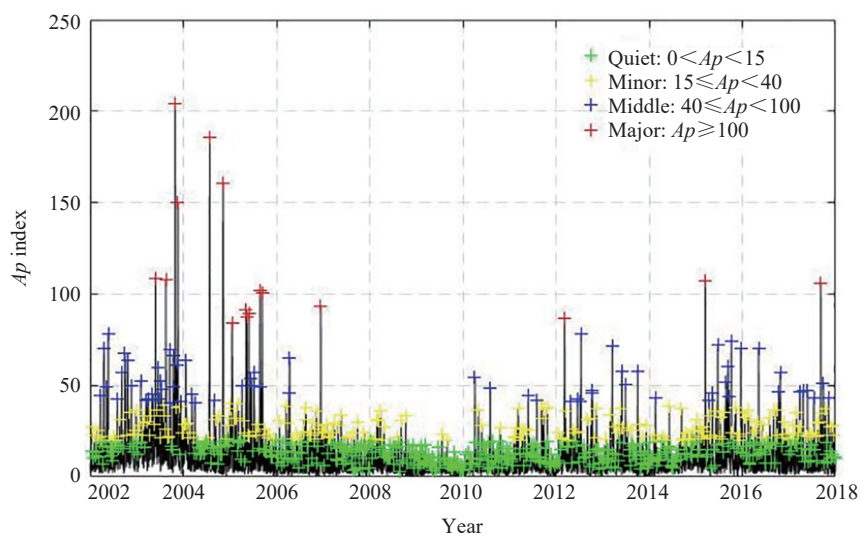


图 5 2002—2017 年不同地磁条件事例筛选. 共筛选 239 个磁静日、364 个小磁暴日、73 个中磁暴日和 10 个大磁暴日

Fig. 5 Selection of cases with different geomagnetic conditions from 2002 to 2017. 239 geomagnetic quiet days, 364 minor storm days, 73 middle storm days and 10 major storm days are selected

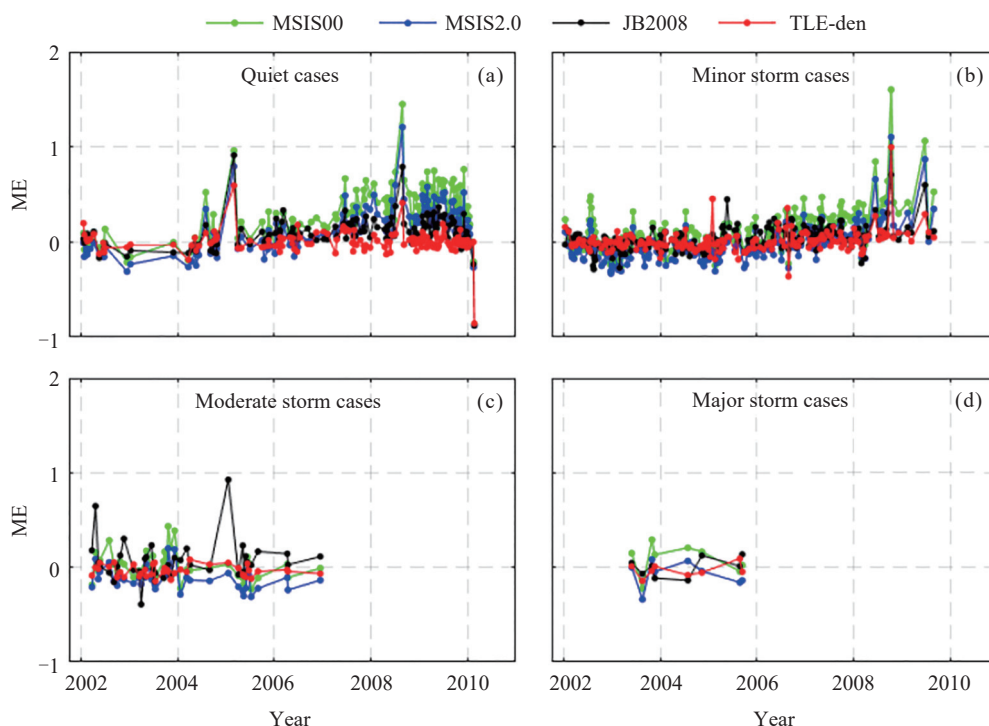


图 6 CHAMP 卫星 TLE 修正密度误差与模式误差的对比

Fig. 6 Comparison between TLE-calibrated and model errors for CHAMP

于, 各密度误差的波幅有所增大, 这可能与 GRACE-A 卫星所处的高度更高受空间环境扰动的影响更大有关. 表 3 给出了 TLE 修正密度误差改善率的量化效果, 同样也可以发现与表 2 基本一致.

4 讨论与结论

采用 CHAMP 和 GRACE-A 卫星共 25 年的加速仪密度分别评估了 TLE 反演密度和修正密度误差.

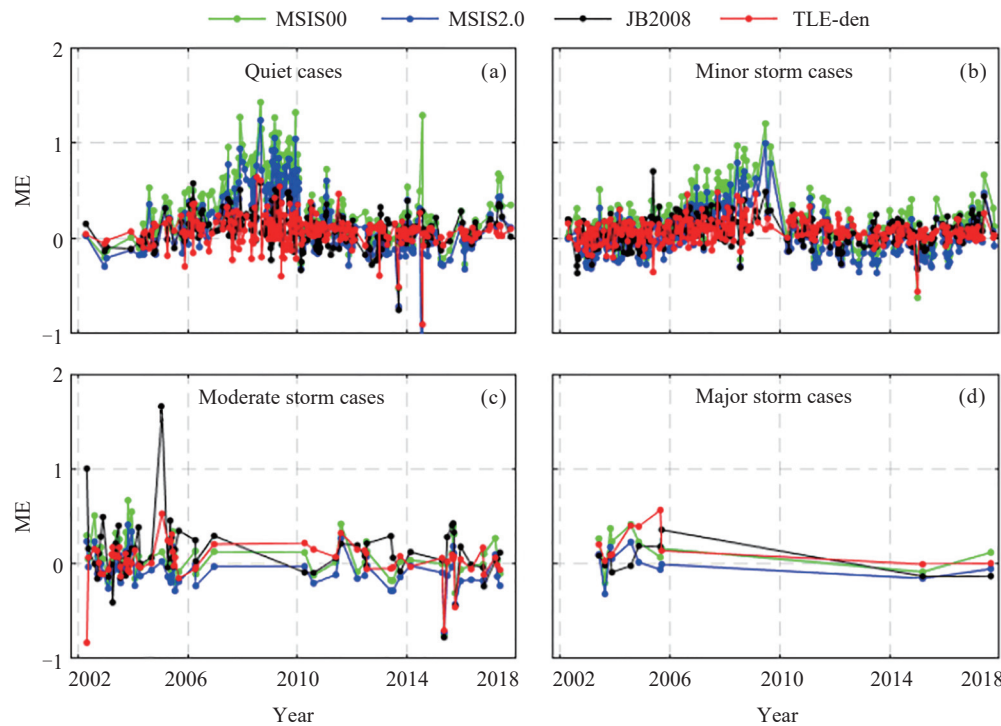


图 7 GRACE-A 卫星 TLE 修正密度误差与模式误差的对比
Fig. 7 Comparison between TLE-calibrated and model errors for GRACE-A

表 2 CHAMP 卫星 TLE 修正密度误差改善率			
Table 2 Ratio of the CHAMP TLE-calibrated density error improvement with that by models			
类型	$r(\varepsilon_{\text{tle}} < \varepsilon_{\text{MSIS00}}) / (\%)$	$r(\varepsilon_{\text{tle}} < \varepsilon_{\text{MSIS2.0}}) / (\%)$	$r(\varepsilon_{\text{tle}} < \varepsilon_{\text{JB2008}}) / (\%)$
磁静日	88.6	83.2	75.6
小磁暴	77.6	75.4	62.3
中磁暴	67.5	87.5	62.5
大磁暴	75.0	62.5	62.5

表 3 GRACE-A 卫星 TLE 修正密度误差改善率			
Table 3 Ratio of the GRACE-A TLE-derived density error improvement with that by models			
类型	$r(\varepsilon_{\text{tle}} < \varepsilon_{\text{MSIS00}}) / (\%)$	$r(\varepsilon_{\text{tle}} < \varepsilon_{\text{MSIS2.0}}) / (\%)$	$r(\varepsilon_{\text{tle}} < \varepsilon_{\text{JB2008}}) / (\%)$
磁静日	80.0	71.3	53.2
小磁暴	76.8	66.3	54.9
中磁暴	57.8	56.3	67.2
大磁暴	80.0	40.0	40.0

虽然加速仪密度具有探测精度高的特点,但计算过程中采用的阻尼系数、面质比等参数都存在一定的误差,导致不同卫星加速仪密度之间存在一定的系统误差.因此采用 HASDM 模式密度对 CHAMP 和 GRACE-A 卫星的加速仪密度进行统一标校处理,最

后得到 CHAMP 加速仪密度的标校系数为 1.0, GRACE-A 加速仪密度的标校系数采用分段方式,其中 2002—2009 年为 1.05, 2010—2017 年为 1.11.

弹道系数是 TLE 反演密度过程中的重要参数.选用 Starshine1 卫星作为参考,该卫星设计为球形,

具有明确的面质比, 结构简单稳定, 且没有轨道制动等人为因素引起的轨道变化干扰, 因此可以通过一定的比值关系计算得到 CHAMP 和 GRACE-A 卫星的弹道系数 (见 1.3 节). 通过与其他研究小组的结果进行对比, 表明该方法可以计算得到较为合理的弹道系数值.

对于 TLE 反演密度, 计算了沿卫星轨道处 3 d 的大气密度平均值, 同时还计算了 NRLMSISE-00, JB2008 和 MSIS2.0 的模式密度均值. 对比结果表明, 在所研究的时间范围内, 反演密度的整体平均误差约为 5%, 标准差约为 8%, 与以上三种经验大气模式相比, 反演密度的精度和稳定性均得到明显提升.

对于 TLE 修正密度而言, 该密度以经验大气模式为基础并施加了修正因子, 为卫星原位处的大气密度值, 时间分辨率相比 TLE 反演密度得到了极大提升. 以地磁扰动指数 A_p 作为分类依据, 针对 2002—2017 年, 分别选取了 293 个磁静日、364 个小磁暴日、73 个中磁暴日和 10 个大磁暴日进行对比研究. 计算结果表明, 在地磁平静期, TLE 修正密度优于经验大气模式的比例超过 80%. 需要注意的是, 在地磁扰动期间, 这种相对于模式的误差改善效果并不显著, 误差改善率稳定性较差, 且可能降低至 40% 左右 (大磁暴). 可见使用 TLE 修正大气密度的方法仅在地磁平静期可以取得较为理想的效果, 可以用于模式修正或建模等任务, 但不能用于改善磁暴期间的大气密度误差.

致谢 研究所使用的 MSIS2.0 模型来源于 <https://map.nrl.navy.mil/map/pub/nrl/NRLMSIS/NRLMSIS2.0>, JB2008 模型来源于 <https://sol.spacenvironment.net/JB2008/code.html>, TLE 数据来源于 <https://www.space-track.org/>. CHAMP 加速仪密度来源于 <http://tinyurl.com/densitysets>, GRACE 加速仪密度来源于 <ftp://swarm-diss.co.esa.int/Multimission/GRACE/DNS/>, HASDM 密度来源于 <https://spacewx.com/hasdm/>.

参考文献

- [1] PICONE J M, EMMERT J T, LEAN J L. Thermospheric densities derived from spacecraft orbits: accurate processing of two-line element sets[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A3): A03301
- [2] XU Xiaoli, XIONG Yongqing. Study on orbit prediction error of space objects based on historical TLE[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2019, **60**(4): 30-1-30-13 (许晓丽, 熊永清. 基于历史 TLE 的空间目标轨道预报误差演化规律研究 [J]. *天文学报*, 2019, **60**(4): 30-1-30-13)
- [3] BOWMAN B R, TOBISKA W K, MARCOS F A, *et al.* A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices[C]//AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit. Honolulu: AIAA, 2008
- [4] BRUINSMA S, BONIFACE C. The operational and research DTM-2020 thermosphere models[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2021, **11**: 47
- [5] EMMERT J T, DROB D P, PICONE J M, *et al.* NRLMSIS 2.0: a whole-atmosphere empirical model of temperature and neutral species densities[J]. *Earth and Space Science*, 2021, **8**(3): e2020EA001321
- [6] REN Tingling, MIAO Juan, LIU Siqing, *et al.* Research on thermospheric densities derived from two-line element sets[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2014, **34**(4): 426-433 (任廷领, 苗娟, 刘四清, 等. 利用卫星两行轨道根数反演热层密度 [J]. *空间科学学报*, 2014, **34**(4): 426-433)
- [7] GONDELACH D J, LINARES R. Real-time thermospheric density estimation via two-line element data assimilation[J]. *Space Weather*, 2020, **18**(2): e2019SW002356
- [8] EMMERT J T, DHADLY M S, SEGERMAN A M. A globally averaged thermospheric density data set derived from two-line orbital element sets and special perturbations state vectors[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): e2021JA029455
- [9] DOORNBOS E, KLINKRAD H, VISSER P. Use of two-line element data for thermosphere neutral density model calibration[J]. *Advances in Space Research*, 2008, **41**(7): 1115-1122
- [10] BERNSTEIN V, PILINSKI M, SUTTON E. Assessing thermospheric densities derived from orbital drag data[C]//31st AAS/AIAA Space Flight Mechanics Meeting. Austin, Texas: AIAA, 2023
- [11] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2002, **107**(A12): SIA 15-1-SIA 15-16
- [12] EMMERT J T, PICONE J M, LEAN J L, *et al.* Global change in the thermosphere: Compelling evidence of a secular decrease in density[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, **109**: A02301
- [13] REN T L, LIU S Q, MIAO J, *et al.* Effects of geomagnetic storms on the accuracy of orbit-derived atmospheric density measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(10): 2818-2829
- [14] BOWMAN B R. True satellite ballistic coefficient determination for HASDM[C]//AIAA/AAS Astrodynamics Spe-

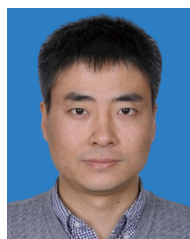
- cialist Conference and Exhibit. Monterey: AIAA, 2002
- [15] EMMERT J T, MEIER R R, PICONE J M, *et al.* Thermospheric density 2002-2004: TIMED/GUVI dayside limb observations and satellite drag[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A10): A10S16
- [16] LEAN J L, PICONE J M, EMMERT J T, *et al.* Thermospheric densities derived from spacecraft orbits: application to the Starshine satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A4): A04301
- [17] LU Z J, HU W D. Estimation of ballistic coefficients of space debris using the ratios between different objects[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2017, **30**(3): 1204-1216
- [18] REIGBER C, LÜHR H, SCHWINTZER P. CHAMP mission status[J]. *Advances in Space Research*, 2002, **30**(2): 129-134
- [19] TAPLEY B D, BETTADPUR S, WATKINS M, *et al.* The gravity recovery and climate experiment: mission overview and early results[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(9): L09607
- [20] ZAGLAUER A. Swarm satellites status[C]//ESA's Second Swarm International Science Meeting. Potsdam, Germany: GFZ, 2009
- [21] BRUINSMA S, FORBES J M, NEREM R S, *et al.* Thermosphere density response to the 20-21 November 2003 solar and geomagnetic storm from CHAMP and GRACE accelerometer data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A6): A06303
- [22] CALABIA A, TANG G S, JIN S G. Assessment of new thermospheric mass density model using NRLMSISE-00 model, GRACE, Swarm-C, and APOD observations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, **199**: 105207
- [23] LEI J H, MATSUO T, DOU X K, *et al.* Annual and semi-annual variations of thermospheric density: EOF analysis of CHAMP and GRACE data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A1): A01310
- [24] BRUINSMA S L, DOORNBOS E, BOWMAN B R. Validation of GOCE densities and evaluation of thermosphere models[J]. *Advances in Space Research*, 2014, **54**(4): 576-585
- [25] TOBISKA W K, BOWMAN B R, BOUWER S D, *et al.* The SET HASDM density database[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(4): e2020SW002682
- [26] MATSUO T, RICHMOND A D, NYCHKA D W. Modes of high-latitude electric field variability derived from DE-2 measurements: empirical Orthogonal Function (EOF) analysis[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, **29**(7): 1107
- [27] MATSUO T, FORBES J M. Principal modes of thermospheric density variability: empirical orthogonal function analysis of CHAMP 2001-2008 data[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A7): A07309

作者简介



任廷领 男, 1990年10月出生于山东省聊城市, 现为中国科学院国家空间科学中心助理研究员, 主要研究方向为热层大气密度反演与模型修正。

E-mail: rentl@nssc.ac.cn



罗冰显 (通信作者) 男, 1981年11月出生, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员、博士生导师, 中国科学院大学岗位教授, 国家青年人才计划获得者, 主要研究方向为空间天气和空间环境的预报与应用。

E-mail: luobx@nssc.ac.cn