

基于 SWARM-C 卫星数据对 HASDM 模型 的热层大气密度误差分析*

吴 尧 陈俊宇

(昆明理工大学国土资源工程学院 昆明 650093)

摘 要 准确计算大气密度对卫星及空间碎片的精密轨道预报至关重要。基于 2014–2019 年 SWARM-C 卫星加速度计反演的大气密度数据, 分析高精度大气模型 (High Accuracy Satellite Drag Model, HASDM) 的误差特性, 及其在不同空间环境下的性能差异。结果显示, 太阳活动对 HASDM 影响显著, 中高太阳活动年模型平均偏差约为 12.5%, 标准差约为 0.2; 低太阳活动年偏差增大至约 18.7%, 标准差增大至约 0.4; 地磁活动期间, 模型整体偏差稳定在 17% 左右, 标准差约达 0.4; 纬度分布上, 极区偏差最低, 为 5%~10%, 但南极高纬标准差高于北极; 赤道区域偏差最大, 为 20%~30%; 地方时分布上, 03:00–06:00 LST 与 18:00–24:00 LST 的误差峰值达 20%; 磁暴期间, HASDM 在初相易高估密度, 主相误差波动剧烈, 恢复相逐渐趋稳。本研究为改进大气密度模型的太阳活动参数化和区域性校准提供了关键依据。

关键词 HASDM, SWARM, 轨道大气, 误差特征, 模型校正

中图分类号 P228.1

Error Analysis of Thermosphere Atmospheric Density for HASDM Method Based on SWARM-C Satellite Data

WU Yao CHEN Junyu

(Faculty of Land and Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093)

Abstract Accurate thermosphere density modeling is a prerequisite for reliable orbit prediction of satellites and space debris, particularly under the growing demands of modern space traffic management in low Earth orbit. This study systematically evaluates the performance of the High Accuracy Satellite Drag Model (HASDM) using thermosphere density data retrieved from SWARM-C satellite accelerometer measurements spanning the period 2014–2019. The analysis investigates model bias and variability in response to different solar and geomagnetic activity levels, as well as latitude and local time dependen-

* 国家自然科学基金项目 (12303081), 航空科学基金项目 (20240058153001) 和空间目标感知全国重点实验室 2024 年度开放基金项目 (STA2024 ZCA0102, STA2024 ZCA0101) 共同资助

2025-01-09 收到原稿, 2025-05-29 收到修定稿

©The Author(s) 2026. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License
(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

cies. Results indicate that solar activity exerts a marked influence on model performance: during moderate to high solar activity years, HASDM exhibits a mean bias of approximately 12.5% with a standard deviation near 0.2, whereas under low solar activity conditions, the bias increases to 18.7% and the standard deviation rises to 0.4. During geomagnetic disturbances, the model maintains an average bias about 17%, though with an elevated standard deviation, particularly during the main phase of storms. In terms of spatial distribution, polar regions demonstrate the lowest bias (5%~10%), with relatively larger variability in the southern hemisphere; conversely, equatorial regions present the highest biases, ranging between 20% and 30%. The diurnal pattern further reveals peak modeling errors during 03:00–06:00 LST and 18:00–24:00 LST, highlighting limitations in representing nighttime density variations. Additionally, during geomagnetic storms, HASDM tends to overestimate density in the initial phase, displays significant fluctuations in the main phase, and gradually stabilizes during recovery. These findings highlight systematic deficiencies in existing empirical parameterizations and suggest the necessity of incorporating enhanced solar-geophysical proxies and regionally adaptive corrections.

Key words HASDM, SWARM, Orbital atmosphere, Error characteristics, Model correction

0 引言

准确的大气密度计算对于预测卫星和确定空间碎片的位置至关重要. 低地球轨道 (LEO) 的航天器的轨道精度依赖于大气阻力的准确建模, 而大气密度则是影响大气阻力的主要因素. 在航空航天领域, 经验大气模型被广泛应用于大气密度的预报, 从而为航天器轨道的精确预测提供支撑. 目前主要的经验模型有 MSIS 系列、DTM 系列和 Jacchia 系列模型. MSIS 模型是基于质谱仪和非相干散射雷达的观测数据, 利用太阳辐射和地磁指数进行驱动; DTM 模型是使用轨道反演的密度数据进行建模; Jacchia 系列模型严格使用轨道和加速度计反演的密度, 注重于密度和太阳活动之间的动态特性^[1-3].

Jacchia 模型中, JB2008 模型是其最新版本. 该模型引入了新型太阳活动参数和 Dst 地磁指数作为驱动因子. 热层属于动态的系统, 同时受外部作用和内部动力学过程的影响, 而太阳活动指数能够较好地反映这些过程的变化规律. 不过, 在太阳活动极小期时, 热层成分变化与其他物理过程的关联性更强; 此外, 在日冕抛射或太阳耀斑等事件期间, 太阳的能量与磁层作用会引发焦耳热效应及极光粒子沉降至热层^[4,5], 此类情况下, 现有的经验模型采用的驱动指数 (例如 $F_{10.7}$, Dst) 通常无法精准捕捉热层密度的短期且局地化的变化, 进而导致模型预测偏差增大^[6,7].

HASDM 方法 (High Accuracy Satellite Drag Model) 由 Storz 等^[8] 开发, 是 Jacchia 1970 的同化扩

展版本. HASDM 方法采用了动态大气定标 (DCA) 的技术, 使用定标卫星的观测资料对其背景经验密度进行校正. 随着模型的不断完善, 模型参数扩展至 13 个. 2021 年 Tobiska 等^[9] 首次公布了该模型的全球输出, 称之为 HASDM 数据库. 该数据库中包含了从 2000 年初到 2019 年末, 频率为 3 h 的三维网格. 数据库公开以后, Licata 等^[10] 使用了主成分分析的方式, 对 HASDM 方法的数据库进行了精度的评估. 然而在实测数据的评估环节, 主要采用的是 CHAMP 与 GRACE 卫星的数据. Bruinsma 等^[11] 则利用 GOCE 卫星的实测数据对 HASDM 方法进行评估. 不过这些研究主要是针对 2000–2013 年的误差进行评估分析, 尚未对 2014–2019 年的卫星实测数据进行评估分析. 为此, Bruinsma 等^[12] 在弥补这一不足的基础上, 补充引入了 SWARM-A/B 卫星数据, 对 HASDM 方法进行了评估.

尽管 HASDM 方法已通过上述卫星数据得到验证, 但其误差特性仍需进一步研究. 目前, 经验模型的评估工作主要依赖于 CHAMP, GRACE 和 GOCE 等早期卫星的数据, 而较新的卫星观测数据尚未得到充分利用^[13-16]. Bruinsma 等^[12] 的研究引入了 SWARM-A/B 卫星数据, 但仍未覆盖 SWARM-C 卫星, 这可能使模型评估的全面性存在一定局限.

本文基于 SWARM-C 卫星的加速度反演的密度数据, 分析 HASDM 方法的误差特性. 通过比较加速度计观测得到的密度与 HASDM 模型的结果, 构建两者之间的误差序列. 在此基础上, 对误差进行区域划

分, 分析不同太阳活动区、纬度带及地方时间段的误差分布特征和模式. 通过这种分区误差模式分析, 可以揭示 HASDM 模型在不同空间区域和环境条件下的偏差, 为模型进一步改进与精度提升提供依据.

1 数据与方法

1.1 HASDM 方法

HASDM 方法使用与 JB2008 模型相近的模型背景, 使大气模型的误差进一步降低. 相较于传统的经验模型, HASDM 方法通过选定卫星的实时测量数据进行动态修正, 从而提高大气密度估计的准确性. DCA 算法是基于 Nazarenko 等^[17] 和 Marcos 等^[18] 的研究提出的, 通过 13 级球谐函数, 描述密度的全球分布, 并结合多颗卫星的加速度测量数据进行误差修正. HASDM 方法使用了预测滤波器优化 DCA 参数. 滤波器结合了小波变换和傅里叶变化, 通过未来 27 d 的外推序列进行动态大气建模, 从而提供准确的短期大气密度预测. 对于卫星的轨道估计, HASDM 模型使用了一种弹道系数分段求解 (SSB) 的技术, 以自适应的方式调整弹道系数, 增强模型对不同的卫星和环境条件变化的适应能力.

为了描述全球大气密度的变化, HASDM 方法采用生成 3 h 分辨率的全球网格的方式. 空间上, 高度覆盖 175~825 km 的空间区域, 分辨率为 25 km. HASDM 方法的经纬网格分辨率为 $15^\circ \times 10^\circ$. 此外, HASDM 方法的输出参数对应网格点上的大气密度值. 模型驱动主要依靠太阳和地磁参数. 其中, 太阳的驱动参数包括 $F_{10.7}$, $S_{10.7}$, $M_{10.7}$ 和 $Y_{10.7}$ 以及其生成的 81 d 的中心平均值, 该类太阳参数通过 SOLAR2000 算法生成, 用于实现太阳驱动的预测^[19]. 地磁指数选择了时间分辨率为 1 h 的 Dst 指数和分辨率为 3 h 的 A_p 指数, 其中, Dst 的预测由 Anemomilos 算法生成, A_p 的预报由美国国家海洋和大气管理局空间天气预报中心生成^[20].

1.2 SWARM-C 卫星数据

SWARM 任务是欧洲航天局 (ESA) 于 2013 年发射的地球观测计划, 包含 A, B, C 三颗卫星. 该任务卫星运行于低地球轨道, 具备覆盖整个地球表面的能力, 可用于监测空间大气密度. SWARM 任务通过

搭载的高精度加速度计和星载 GPS 系统, 可以获取数据, 并反演得到高分辨率的大气密度数据集.

将测得的加速度去除太阳辐射压力的影响之后, 剩余的部分为大气阻力的加速度 $\mathbf{a}_{\text{drag}}$. 其表达式为

$$\mathbf{a}_{\text{drag}} = -\frac{1}{2} \frac{C_d A}{m} \rho \mathbf{v}_{\text{rel}}^2 \frac{\mathbf{v}_{\text{rel}}}{|\mathbf{v}_{\text{rel}}|}. \quad (1)$$

其中, C_d 为卫星的阻力系数, A/m 为卫星的面质比, $\mathbf{v}_{\text{rel}}$ 为卫星相对于大气的速度矢量, ρ 为大气密度.

加速度计反演的大气密度数据集在评估经验模型中有着重要的作用^[21]. 相较于传统的圆型轨道, SWARM-C 采用非圆形轨道设计, 提高了其在大气上层的观测能力, 消除了观测盲区. 此外, SWARM-C 卫星的星载加速度计测量精度较高, 相对于 SWARM-A/B 具有更好的信噪比, 数据更具有可靠性^[22-24]. SWARM-C 的卫星数据从荷兰代尔夫特理工大学的热层数据开放平台^{*} 获取^[25].

1.3 评价指标

为了使误差的分布可以衡量, 这里使用 HASDM 方法计算的密度同 SWARM-C 反演密度之间的相对误差 P_i 的均值 (Mean Error, ME)、标准差 (Standard Deviation, SD) 以及二者密度间的均方根误差 (Root Mean Square Error, RMSE) 作为评估指标. ME (μ_{ME}) 反映了 HASDM 方法计算的密度对 SWARM-C 反演密度的相对误差的偏差程度; SD (e_{SD}) 用于衡量相对误差的集中性; RMSE (e_{RMSE}) 反映了 HASDM 方法在计算密度时与 SWARM-C 反演密度之间的整体误差. P_i , μ_{ME} , e_{SD} , e_{RMSE} 的表达式为

$$P_i = \frac{\rho_{\text{HASDM},i} - \rho_{\text{ACC},i}}{\rho_{\text{ACC}}}, \quad (2)$$

$$\mu_{\text{ME}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_i, \quad (3)$$

$$e_{\text{SD}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_i - \bar{P})^2}{N}}, \quad (4)$$

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\rho_{\text{HASDM},i} - \rho_{\text{ACC},i})^2}. \quad (5)$$

其中, $\rho_{\text{HASDM},i}$ 为 HASDM 方法于第 i 时刻计算的密度值, $\rho_{\text{ACC},i}$ 为卫星于第 i 时刻的加速度计的反演密度,

* <http://thermosphere.tudelft.nl/>

N 为数据总数.

1.4 数据预处理

在数据分析之前, 数据预处理是确保数据可靠性的关键步骤. 本文主要采用 3σ 原则对数据进行处理, 并检查数据中是否存在负值, 以提高数据质量, 减少异常数据对模型训练和分析的影响. 3σ 原则是一种常用于数据清洗的统计方法. 假设数据服从正态分布, 根据统计学理论, 约 99.73% 的数据点应落在均值 $\pm 3\sigma$ 的范围内. 对于超出该范围的数据, 将其认定为异常值并剔除. 另外, 密度应始终为非负值. 因此, 对数据进行负值检查, 并剔除不符合要求的数据.

2 误差分析

采用 SWARM-C 卫星 (2014 年 2 月 1 日至 2019 年 12 月 31 日) 的加速度计反演大气密度作为标准值, 统计并分析了 HASDM 方法的误差^[26]. 为统一叙述, 将 HASDM 方法计算的密度简称为 HASDM, 将 SWARM-C 的卫星加速度计反演的密度简称为 SWARM-C, HASDM 方法计算密度与 SWARM-C 反演密度相对误差的 ME 和 SD 以及 RMSE 分别简称为 ME, SD 和 RMSE.

2.1 太阳活动与地磁活动

在大气密度评估中, 最常用的太阳活动指标是 $F_{10.7}$. Tobiska 等^[27] 的研究表明, $F_{10.7}$ 可作为太阳活动的有效替代指标. 在太阳活动高年, 强烈太阳活动对高层大气进行加热, 卫星轨道附近的大气密度增加; 而在太阳活动低年, 太阳辐射减弱, 高层大气冷却收缩, 大气密度降低. 为进一步分析太阳活动对 HASDM 方法的影响, 表 1 列出了不同太阳活动条件下 HASDM 与 SWARM-C 的 ME, SD 和 RMSE. 在不同的太阳活动水平下, HASDM 相对 SWARM-C 的

误差特性存在差异. 在 ME 方面, 在低太阳活动下, 远高于中高太阳活动水平, 这说明在太阳平静时期, 更容易对大气密度产生高估; 在 SD 方面, SD 随着太阳活动的增大而降低, 在高太阳水平下, 其误差更加集中, 而在低太阳活动水平下的误差波动更大; 在 RMSE 方面, 符合密度在不同时期的增大规律: 大气密度随着太阳活动的增大而增大. 尽管如此, 也不可以直接断定太阳活动平静期的性能一定劣于太阳活跃期的性能. 主要归因于耀斑事件比较有限, 且其时空分布不均匀, 将导致统计结果会有偏差.

地磁活动直接影响高层大气的动力学过程, 进而对卫星的轨道环境产生影响. A_p 指数作为衡量地磁活动强弱的重要指标, 其反映了地磁场短期扰动程度. 在地磁活动较弱时, 大气密度变化相对平稳; 而在地磁活动增强时, 发生磁暴, 导致大气密度变化剧烈. 表 2 给出了不同地磁活动下的 HASDM 相对于 SWARM-C 的 ME, SD 和 RMSE 的统计结果.

在 ME 方面, 随着地磁活动的强度的增大逐渐增大, 总体误差变化并不明显. 说明在不同地磁环境下, 误差的偏差较为稳定. SD 在随着地磁活动的增强而降低, 说明在高地磁活动下, 模型的误差更加集中, 但三者的差异性并不大. 在中等地磁活动下, RMSE 值却大于高地磁活动下 RMSE 值. 这可能是因为在低地磁活动时, 大气密度变化较为平缓, 受扰动较少; 在高地磁活动时, 尽管大气密度变化剧烈, 但其波动往往表现出一定的规律性, 容易通过模型捕捉到. 然而, 在中等地磁活动下, 地磁场的扰动强度适中, 大气的反应既没有低地磁活动时那么平稳, 又没有高地磁活动时那么规律, 导致大气密度的变化更加随机, 从而使 RMSE 值高于高地磁活动时的情况. 而在高地磁活动下的 RMSE 与低地磁活动下的值相近, 表明模型在高地磁活动期间具有更好的表现.

表 1 不同太阳活动水平下 HASDM 与 SWARM-C 的 ME, SD 和 RMSE
Table 1 ME, SD and RMSE of HASDM relative to SWARM-C under different solar activity levels

$F_{10.7}$	太阳活动水平	ME/(%)	SD	RMSE($\times 10^{-13}$)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
$F_{10.7} < 100$	低水平	18.72	0.434	0.711
$100 \leq F_{10.7} < 150$	中水平	12.19	0.197	1.593
$150 \leq F_{10.7}$	高水平	12.83	0.177	1.951

表 2 不同地磁活动水平下 HASDM 与 SWARM-C 的 ME, SD 和 RMSE
Table 2 ME, SD and RMSE of HASDM relative to SWARM-C under different geomagnetic activity levels

A_p	地磁活动水平	ME/(%)	SD	RMSE ($\times 10^{-13}$)/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
$A_p < 20$	低水平	16.64	0.375	1.114
$20 \leq A_p < 50$	中水平	16.83	0.377	1.956
$50 \leq A_p$	高水平	17.55	0.344	1.136

2.2 纬度

将纬度按 3° 的间隔进行划分, 图 1 给出了 HASDM 与 SWARM-C 在 -90°S – 90°N 纬度范围内的密度区域分布与误差. 从整体趋势来看, SWARM-C 与 HASDM 具有较强的相关性, 然而在不同纬度区域, 模型的表现存在一定差异. ME 由两级向赤道方向逐渐增大, 增大幅度约为 25%. 在中高纬度地区, HASDM 的计算结果较为稳定; 在赤道地区, HASDM 容易产生高估. SD 在南北纬高纬度带较小, 向赤道方向逐渐增大, 在 51°S – 54°S 出现峰值. RMSE 呈现出两端较小、赤道附近较大的分布特征.

图 2 给出了在不同太阳活动条件下 HASDM 与 SWARM-C 的纬度误差分布情况. 整体而言, HASDM 与 SWARM-C 在不同的太阳活动下均具有一致

的峰谷结构. 在极地地区, 二者密度差异相对较小. 随着纬度向赤道方向, 相对于 SWARM-C, HASDM 总是倾向于高估大气密度, 且这种现象在中高太阳活动下尤为明显. 低太阳活动下, 偏差整体大于中高太阳活动下的相应值, 并且误差分布更为分散. 尤其是在赤道附近, 其偏差远大于两极, 其误差的集中性为南纬低于北纬. 在中高太阳活动下, 误差的分布相对更加集中. 在高太阳活动下, 南极处容易对密度产生低估.

低太阳活动下的 RMSE 整体低于中高太阳活动下的相应值. 然而, 对比中高太阳活动水平下, 在 45°S – 90°S 区域内, 二者的 RMSE 结果较为接近, 表明该区域在中等太阳活动时的密度估计精度相对较低. 与此同时, 随着纬度从两极向赤道方向, RMSE 呈现大幅度的上升趋势, 在赤道附近达到较高值.

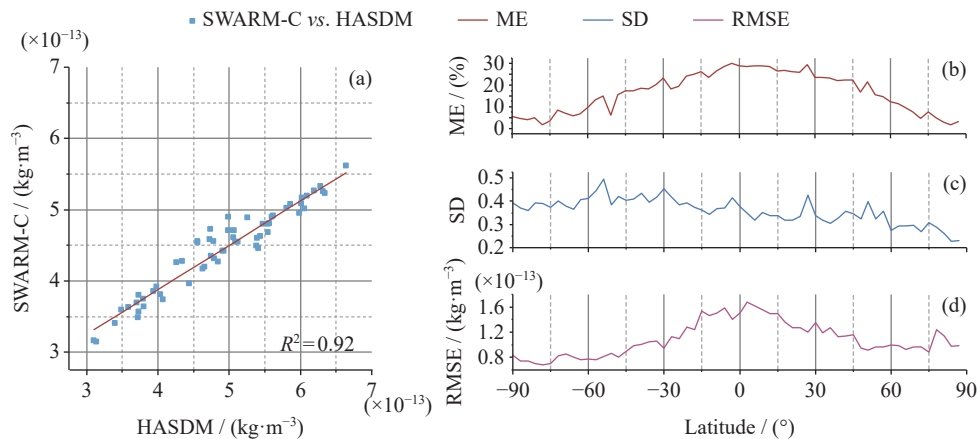


图 1 HASDM 与 SWARM-C 在不同纬度的大气密度特征与误差

Fig. 1 Atmospheric density characteristics and errors of HASDM and SWARM-C in different latitudes

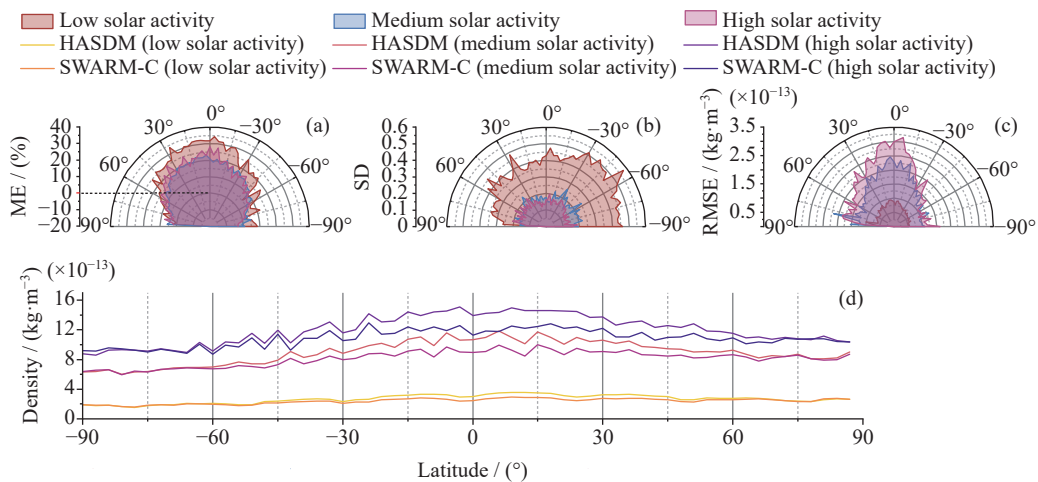


图 2 不同太阳活动条件下 HASDM 与 SWARM-C 的纬度误差与大气密度

Fig. 2 Latitude error and atmospheric density between HASDM and SWARM-C under different solar activity levels

RMSE 的分布特征进一步表明, HASDM 在赤道地区附近存在对大气密度高估的倾向.

图 3 给出了在不同地磁活动条件下 HASDM 与 SWARM-C 的纬度误差分布. 从总体趋势来看, HASDM 和 SWARM-C 有着相同的峰谷结构. 从 ME 和 SD 的统计结果来看, HASDM 在不同地磁活动下具有相近的误差特性. 但在高地磁活动下, 在两极容易产生低估, 且在南极具有较高的误差的不稳定性, 在赤道容易产生高估, 稳定性较好. 在中低太阳活动水平中, 误差整体上呈现出两极较小、低纬度偏差较大的趋势, 分布相对稳定.

在赤道地区, HASDM 对密度估计存在高估. 而在两极地区, 尽管 HASDM 在高地磁活动条件下能够

在整体上较准确地反映局部加热和不稳定风场的影响, 但其对特定区域的异常扰动的响应仍然存在一定偏差. 从 RMSE 结果来看, 在任何太阳活动下, HASDM 在高纬度地区的稳定性优于低纬度地区. 然而, 在中等太阳活动时, HASDM 的 RMSE 高于高太阳活动水平, 这表明其在中等地磁活动下计算的精度相对较差.

2.3 地方时

将 HASDM 与 SWARM-C 按照 1 h 的时间步长进行分组. 图 4 中给出了 HASDM 与 SWARM-C 在 00:00—24:00 LST 范围的大气密度分布特征. HASDM 相对于 SWARM-C 在地方时的表现稳定, 能够清晰展现出地方时特征, 与卫星实测数据具有强相关性.

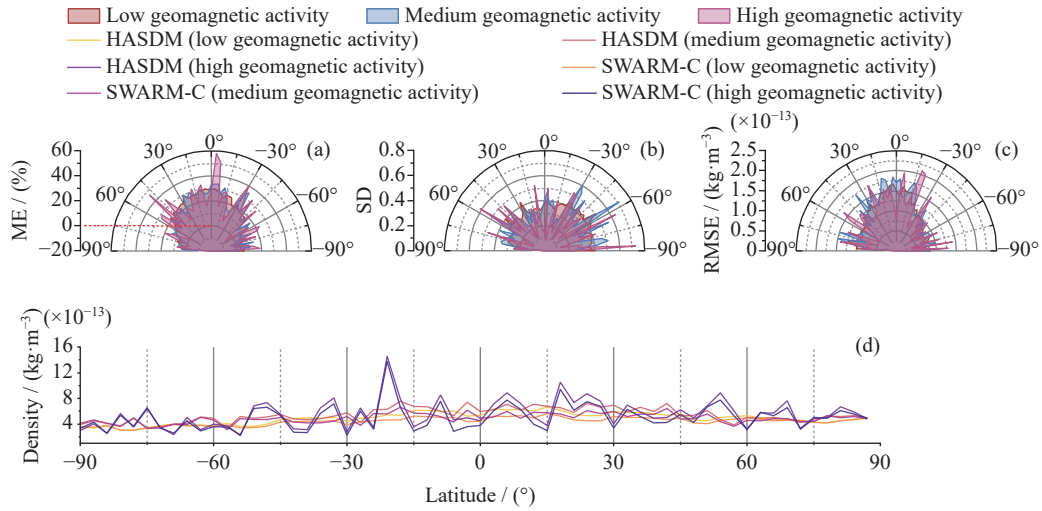


图 3 不同地磁活动条件下 HASDM 与 SWARM-C 的纬度误差与大气密度

Fig. 3 Latitude error and atmospheric density between HASDM and SWARM-C under different geomagnetic activity levels

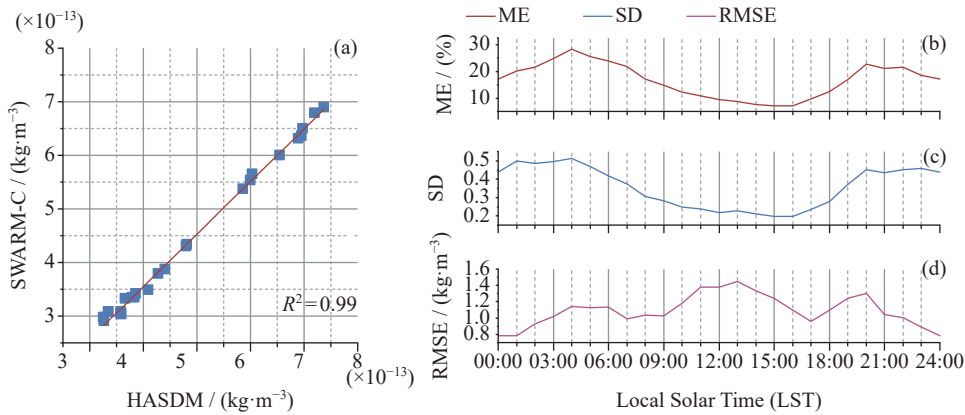


图 4 HASDM 与 SWARM-C 在 00:00—24:00 LST 的大气密度分布与误差

Fig. 4 Atmospheric density distribution and error of HASDM and SWARM-C during 00:00—24:00 LST

从 ME 和 SD 的统计结果来看, 在 03:00—06:00 LST 和 18:00—24:00 LST, HASDM 相对于 SWARM-C 的偏差较大, 分别约为 25% 和 18%, 且误差不集中, 分别约为 0.498 和 0.407. 这两个时段正处于晨昏交替阶段, 大气密度受太阳辐射加热的快速变化影响显著. 在正午时段, ME 和 SD 均较小, 表明偏差小, 并且误差稳定. RMSE 的分布显示, 在 17:00—20:00 LST, HASDM 估计的密度出现了上升. 然而, 此时正处于晨昏交替阶段, 大气应处于冷却过程, 理论上大气密度应呈下降趋势. 这表明 HASDM 在捕捉大气冷却过程时存在一定的响应延迟.

图 5 给出了 HASDM 与 SWARM-C 在不同太阳活动条件下不同 LST 的误差情况. 从总体趋势来看, HASDM 与 SWARM-C 的峰谷变化模式均保持一致, 显示出相似的时段特征. 在 ME 方面, HASDM 有着相近的偏差特性, 即夜间的偏差容易大于日间的偏差, 特别是 03:00—06:00 LST 和 20:00—24:00 LST. 在低太阳活动下, HASDM 容易产生较大的误差. 从 SD 方面看, 低太阳活动的误差集中性低于中高太阳活动的误差集中性. 在中高太阳活动条件下, 误差分布的集中性增强, 表现出较为稳定的模式. 从 RMSE 的结果结合总体走势可以看出, 在高太阳活动下, HASDM 较好地反映了夜间密度较低、日间密度

较高的变化趋势. 而在低太阳活动时, 密度变化相对平缓, RMSE 的波动较小. 但对于中太阳活动, HASDM 在 17:00—19:00 LST 容易有较大的误差.

图 6 给出了 HASDM 与 SWARM-C 在不同地磁活动条件下的 LST 误差分布特征. 结合 RMSE 结果可以看出, 在中等地磁活动水平下, 03:00—06:00 LST 和 12:00—14:00 LST 段的密度误差较为显著; 而在高地磁活动条件下, 同一时间段的误差反而减小. 从 ME 和 SD 的表现来看, 虽然不同地磁活动水平下的误差偏差总体接近, 但误差的集中程度存在明显差异, 高地磁活动条件下的误差集中性优于中低地磁活动条件下的误差集中性. 这一现象可能与地磁活动增强导致热层整体抬升, 并趋于均匀化有关, 使密度变化更为平缓.

总体而言, 夜间的误差普遍比日间大. 不同地磁活动水平下, 模型对日间密度变化的估计能力较强, 而夜间的误差相对较大, 尤其在中等地磁活动条件下.

2.4 磁暴时刻的 HASDM 与 SWARM-C

模型对地磁暴的响应特性一直是密度建模领域的研究重点之一. 为进一步评估 HASDM 方法在地磁暴期间的精度, 选取两个典型的地磁暴事件, 并采用 Dst 指数对地磁暴强度进行量化. 通过对比磁暴时刻 HASDM 相对 SWARM-C 的差异, 分析模型在不同

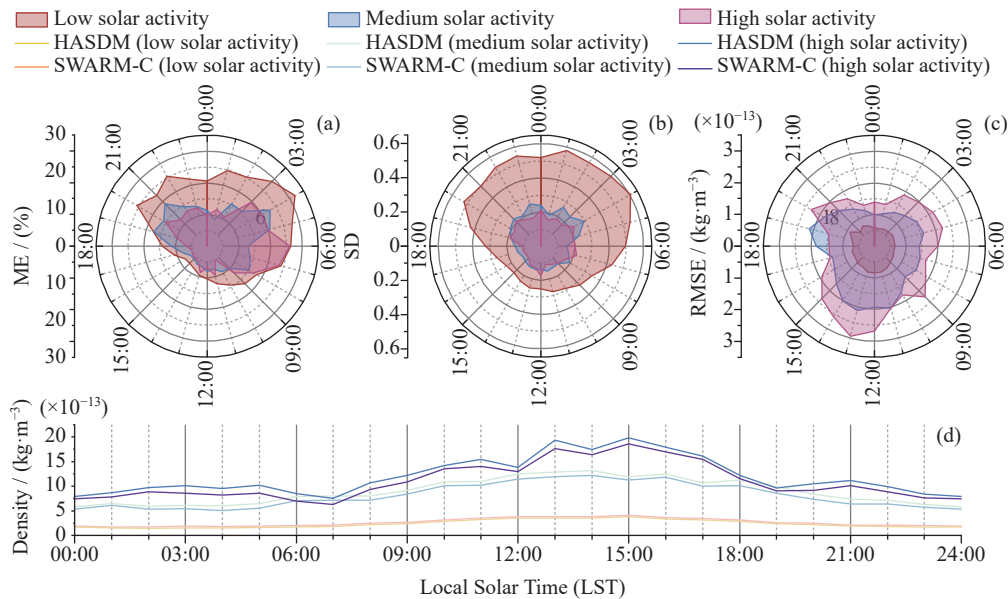


图 5 不同太阳活动条件下 HASDM 与 SWARM-C 不同 LST 的大气密度与误差

Fig. 5 Atmospheric density and error of HASDM and SWARM-C at different LST under different solar activity levels

磁暴阶段的误差特征,以揭示地磁活动对模型精度的影响. 磁暴阶段划分依据 Hutchinson 等^[28]的定义,将其分为初始相、主相和恢复相三个阶段; Dst 指数与磁暴等级分类采用 Yokoyama 等^[29]的方法. 本文主要探讨强磁暴条件下的误差特性,即 Dst 低于 -100 nT 时的模型表现.

选取 SWARM-C 在 2015 年观测到的两个典型磁暴事件进行分析,其中一个发生在第 76 至 83 日 (DOY 76–83),另一个发生在第 173 至 178 日 (DOY 173–178). 如图 7 所示,图 7(a) 对应第一个磁暴事件,图 7(b) 给出了第二个磁暴事件的情况,并标注了磁暴的三个阶段(初相阶段、主相阶段、恢复相阶段).

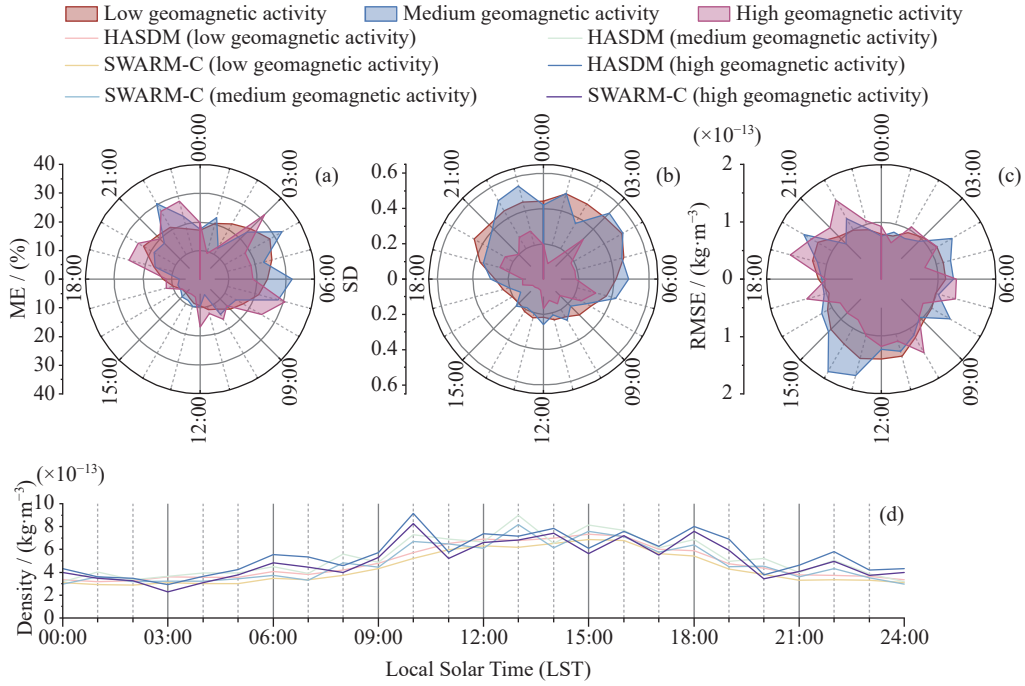


图 6 不同地磁活动条件下 HASDM 与 SWARM-C 在不同 LST 的大气密度与误差

Fig. 6 Atmospheric density and error of HASDM and SWARM-C at different LST under different geomagnetic activity levels

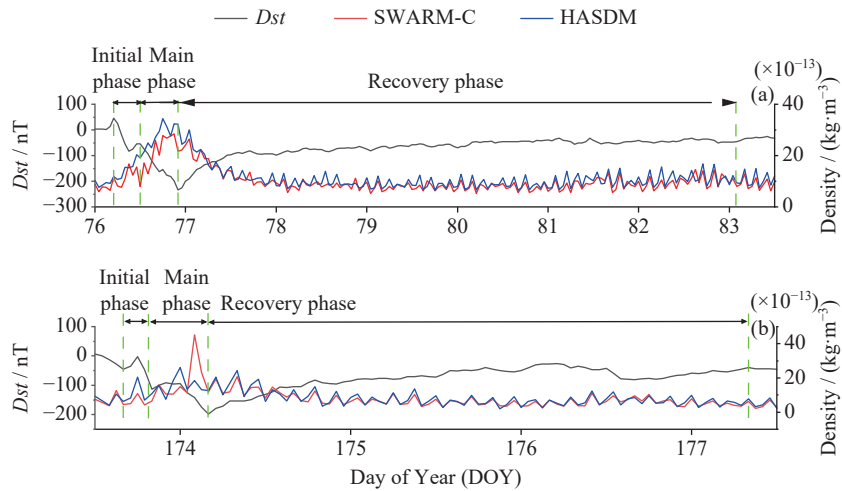


图 7 2015 年观测到的两个典型磁暴事件 Dst 指数与大气密度随时间的变化

Fig. 7 Variation of the Dst index and atmospheric density with DOY for the two typical geomagnetic storm events observed in 2015

表 3 HASDM 与 SWARM-C 在磁暴不同时期下的 ME, SD 和 RMSE
Table 3 ME, SD and RMSE of HASDM relative to SWARM-C during different phases of geomagnetic storm

2015年 (DOY)	磁暴时期	ME/(%)	SD	RMSE($\times 10^{-13}$)/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
76—83	初相	38.9	0.448	5.024
	主相	30.7	0.270	6.901
	恢复相	12.0	0.145	1.864
173—178	初相	53.7	0.310	4.699
	主相	5.9	0.372	8.206
	恢复相	9.7	0.312	1.424

从图 7 可见,在主相阶段, HASDM 和 SWARM-C 均表现出不同程度的时延效应,相较于 Dst 变化存在一定的滞后性.在磁暴初相阶段, HASDM 普遍高估了密度.在主相阶段,误差表现与卫星纬度密切相关:由于 Dst 指数主要表征赤道附近的地磁活动状态,因此在图 7(a) 对应的时刻, SWARM-C 位于约 -81°S 的区域,在高度磁活动下, HASDM 相对 SWARM-C 提前对 Dst 进行响应,但在密度极大值处出现了高估的情况.而在图 7(b) 中, SWARM-C 处于低纬度区域(约 10°N), HASDM 模型在高度磁活动条件下, 10° 左右的纬度容易对密度产生低估.因此,在图 7(b) 所示磁暴事件中, HASDM 模拟密度在 Dst 峰值时刻出现了较大程度的低估.在磁暴恢复相阶段, HASDM 与 SWARM-C 的峰谷位置较为一致.

表 3 给出了这两个磁暴在不同阶段的 ME, SD 和 RMSE 统计结果. HASDM 在初相阶段普遍存在密度高估现象,尤其是在 DOY 173—178 期间, ME 高达 53.7%.然而在主相阶段,尽管 DOY 173—178 的 ME (5.9%) 相较于 DOY 76—83 (30.7%) 更小,但结合 SD 值 (0.372) 和图 7 可见,其误差分布较为分散,波动较大.此外, RMSE 的数值在该阶段较大,模拟精度较低.进入恢复相后,两个磁暴的 ME 和 SD 显著降低, RMSE 也降至低水平.

3 结论

利用 2014—2019 年 SWARM-C 卫星加速度计反演的大气密度数据,系统分析了 HASDM 模型在多种空间环境条件下的误差特性,考察了太阳活动水

平、地磁活动强度、纬度分布、地方时结构及磁暴事件对模型性能的影响,得出以下主要结论.

在太阳活动方面, HASDM 方法的误差特性表现出明显的太阳活动依赖性.模型在中高太阳活动年出现较小的偏差,偏差约为 12.5%,误差的集中性约为 0.2,而在低太阳活动年偏差较大,集中性较差,偏差约为 18.72%,误差集中性约为 0.4.在地磁活动方面,模型整体表现相对稳定,差异较小.随着地磁活动的增加,偏差略微增大,误差集中性较为一致.平均偏差约为 17%,误差集中性约为 0.363.纬度方向的误差特性显示, HASDM 方法在高纬度地区偏差相对较小,约为 5%~10%,在南高纬度地区的误差集中性低于在北高纬度地区的误差集中性.在低纬度地区偏差明显增大,达到 20%~30%,误差的集中性约为 0.37.地方时误差分布在夜侧的误差较大,偏差约为 20%,误差分布较不集中,集中性约为 0.4,不稳定主要集中时段在 03:00—06:00 LST 和 18:00—24:00 LST;日侧的偏差较小,约为 12.4%,误差集中性较好,约为 0.3.纬度和地方时的分析下误差更多集中于中太阳活动和中地磁活动下.磁暴时期, HASDM 方法容易在初相阶段产生高估,偏差约为 34%,容易在主相阶段有较小的偏差,但是也有更不稳定的误差集中,在恢复相阶段中, HASDM 具有良好的表现.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

- [1] BOWMAN B, TOBISKA W K, MARCOS F, *et al.* A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices[C]//AIAA/AAS Astrodynamic Specialist Conference and Exhibit. Honolulu: AIAA, 2008
- [2] BRUINSMA S, BONIFACE C. The operational and research DTM-2020 thermosphere models[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2021, **11**: 47
- [3] 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
- [4] DENG Y, FULLER-ROWELL T J, RIDLEY A J, *et al.* Theoretical study: influence of different energy sources on the cusp neutral density enhancement[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(5): 2340-2349
- [5] FEDRIZZI M, FULLER-ROWELL T J, CODRESCU M V. Global joule heating index derived from thermospheric density physics-based modeling and observations[J]. *Space Weather*, 2012, **10**(3): S03001
- [6] BRUINSMA S L, FORBES J M. Anomalous behavior of

- the thermosphere during solar minimum observed by CHAMP and GRACE[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A11): A11323
- [7] SOLOMON S C, WOODS T N, DIDKOVSKY L V, *et al.* Anomalously low solar extreme-ultraviolet irradiance and thermospheric density during solar minimum[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(16): L16103
- [8] STORZ M F, BOWMAN B R, BRANSON M J I, *et al.* High Accuracy Satellite Drag Model (HASDM)[J]. *Advances in Space Research*, 2005, **36**(12): 2497-2505
- [9] TOBISKA W K, BOWMAN B R, BOUWER S D, *et al.* The SET HASDM density database[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(4): e2020SW002682
- [10] LICATA R J, MEHTA P M, TOBISKA W K, *et al.* Qualitative and quantitative assessment of the SET HASDM database[J]. *Space Weather*, 2021, **19**(8): e2021SW002798
- [11] 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
- [12] BRUINSMA S, SIEMES C, EMMERT J T, *et al.* Description and comparison of 21st century thermosphere data[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **72**(12): 5476-5489
- [13] MIAO Juan, LIU Siqing, LI Zhitao, *et al.* Correlation of thermosphere density variation with different solar and geomagnetic indices[J]. *Manned Spaceflight*, 2012, **18**(5): 24-30 (苗娟, 刘四清, 李志涛, 等. 热层大气密度变化特征与太阳辐射和地磁指数的相关性分析 [J]. *载人航天*, 2012, **18**(5): 24-30)
- [14] WENG Libin, FANG Hanxian, JI Chunhua, *et al.* Comparison between the CHAMP/STAR derived thermospheric density and the NRLMSISE-00 model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2012, **32**(5): 713-719 (翁利斌, 方涵先, 季春华, 等. 基于卫星加速度数据反演的热层大气密度与 NRLMSISE-00 模式结果的比较研究 [J]. *空间科学学报*, 2012, **32**(5): 713-719)
- [15] CHEN Xuxing, HU Xiong, XIAO Cunying, *et al.* Comparison of the thermospheric densities between GRACE/CHAMP satellites data and NRLMSISE-00 model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2013, **33**(5): 509-517 (陈旭杏, 胡雄, 肖存英, 等. NRLMSISE-00 大气模型与 GRACE 和 CHAMP 卫星大气密度数据的对比分析 [J]. *空间科学学报*, 2013, **33**(5): 509-517)
- [16] LIU Wei, WANG Ronglan, LIU Siqing, *et al.* Error analysis of typical atmospheric density model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2017, **37**(5): 538-546 (刘卫, 王荣兰, 刘四清, 等. 典型热层密度模式误差分析 [J]. *空间科学学报*, 2017, **37**(5): 538-546)
- [17] NAZARENKO A I, CEFOLA P J, YURASOV V. Estimating atmosphere density variations to improve LEO orbit prediction accuracy[J]. *Advances in the Astronautical Sciences*, 1998, **99**(2): 1235-1256
- [18] MARCOS F A, RENDRA M J, GRIFFIN J M, *et al.* Precision low earth orbit determination using atmospheric density calibration[J]. *The Journal of the Astronautical Sciences*, 1998, **46**(4): 395-409
- [19] TOBISKA W K, WOODS T, EPARVIER F, *et al.* The SOLAR2000 empirical solar irradiance model and forecast tool[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(14): 1233-1250
- [20] TOBISKA W K, KNIPP D, BURKE W J, *et al.* The *anemomilos* prediction methodology for Dst[J]. *Space Weather*, 2013, **11**(9): 490-508
- [21] OLSEN N, FRIIS-CHRISTENSEN E, FLOBERGHAGEN R, *et al.* The swarm Satellite Constellation Application and Research Facility (SCARF) and swarm data products[J]. *Earth, Planets and Space*, 2013, **65**(11): 1189-1200
- [22] YIN L R, WANG L, TIAN J W, *et al.* Atmospheric density inversion based on Swarm-C satellite accelerometer[J]. *Applied Sciences*, 2023, **13**(6): 3610-3622
- [23] IORFIDA E, DARAS I, HAAGMANS R, *et al.* Swarm A and C accelerometers: data validation and scientific interpretation[J]. *Earth and Space Science*, 2023, **10**(2): e2022EA002458
- [24] YIN L R, WANG L, ZHENG W F, *et al.* Evaluation of empirical atmospheric models using Swarm-C satellite data[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(2): 294-308
- [25] SIEMES C, BORRIES C, BRUINSMA S, *et al.* New thermosphere neutral mass density and crosswind datasets from CHAMP, GRACE, and GRACE-FO[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2023, **13**: 16
- [26] WANG Hongbo. The application of satellite borne accelerometer data to the study of upper atmosphere[J]. *Acta Astronomica Sinica*, 2010, **51**(4): 435-436
- [27] TOBISKA W K, BOUWER S D, BOWMAN B R. The development of new solar indices for use in thermospheric density modeling[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2008, **70**(5): 803-819
- [28] HUTCHINSON J A, WRIGHT D M, MILAN S E. Geomagnetic storms over the last solar cycle: a superposed epoch analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A9): A09211
- [29] YOKOYAMA N, KAMIDE Y. Statistical nature of geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A7): 14215-14222

作者简介



吴 尧 男, 2001 年 1 月出生于福建省福州市, 现为昆明理工大学国土资源工程学院硕士研究生, 主要研究方向为高层大气密度的建模和修正。
E-mail: wuyao@kust.stu.edu.cn



陈俊宇 (通信作者) 男, 1989 年 1 月出生于云南省大理市, 现为昆明理工大学国土资源工程学院讲师, 硕士研究生导师, 主要研究方向为空间态势感知。
E-mail: jychen@kust.edu.cn