



国防科技大学学报

*Journal of National University of Defense Technology*

ISSN 1001-2486, CN 43-1067/T

## 《国防科技大学学报》网络首发论文

题目: GCITEM 模式对超低轨大气密度模拟性能评估: GOCE 观测对比研究  
作者: 任志鹏, 李星, 于婷婷, 李韶阳, 王瑜晗  
收稿日期: 2025-12-09  
网络首发日期: 2026-05-28  
引用格式: 任志鹏, 李星, 于婷婷, 李韶阳, 王瑜晗. GCITEM 模式对超低轨大气密度模拟性能评估: GOCE 观测对比研究[J/OL]. 国防科技大学学报.  
<https://link.cnki.net/urlid/43.1067.T.20260528.1139.002>



**网络首发:** 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认:** 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

doi: 10.11887/j.issn.1001-2486.25120017

# GCITEM 模式对超低轨大气密度模拟性能评估：GOCE 观测对比研究

任志鹏<sup>1,2,3\*</sup>, 李星<sup>4,5</sup>, 于婷婷<sup>1,2,3</sup>, 李韶阳<sup>1,2,3</sup>, 王瑜晗<sup>1,2,3</sup>

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室, 北京 100029; 2. 中国科学院地质与地球物理研究所 北京空间环境国家野外科学观测研究站, 北京 100029; 3. 中国科学院大学 地球与行星科学学院, 北京 100049; 4. 北京航空航天大学 空间与环境学院, 北京 102206; 5. 空间环境监测与信息处理 工业和信息化部重点实验室, 北京 102206)

**摘要:** 空天过渡区大气密度的精确模拟对超低轨航天器的轨道预测与在轨安全至关重要。基于欧空局重力场与稳态洋流探测卫星在超低轨的高精度热层质量密度原位观测, 系统评估国内自主研发的理论模式全球电离层-热层耦合理论模式 (global coupled ionosphere-thermosphere-electrodynamics model, institute of geology and geophysics, chinese academy of sciences, GCITEM) 对超低轨大气环境的模拟性能, 并与热层经验模型 NRLMSISE00 进行对比。结果表明, 地磁宁静时期 GCITEM 模式平均相对偏差近乎为零, 有效消除了经验模型的系统性高估问题; 扰动时期 GCITEM 模式预测不确定度更低, 物理机制能更合理描述能量注入下的热层响应。GCITEM 模式在全季节表现出良好的稳健性与适应能力, 秋季误差尤其小。结果证实了 GCITEM 模式模拟超低轨热层密度性能优越, 凸显了物理数值模式在高精度空间环境建模与航天工程应用的潜力。

**关键词:** 超低轨环境; 热层; 电离层-热层耦合模式

中图分类号: P351

文献标志码: A

## Evaluation of GCITEM's performance in simulating VLEO atmospheric density: a comparative study with GOCE observations

REN Zhipeng<sup>1,2,3\*</sup>, LI Xing<sup>4,5</sup>, YU Tingting<sup>1,2,3</sup>, LI Shaoyang<sup>1,2,3</sup>, WANG Yuhan<sup>1,2,3</sup>

(1. Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 3. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 102206, China; 5. Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Accurate simulation of atmospheric mass density in the aerospace transition region is crucial for the orbit prediction and the on-orbit safety of VLEO (very low Earth orbit) spacecraft. Based on the high-resolution in-situ thermospheric mass density obtained by the European Space Agency's GOCE (gravity field and steady-state ocean circulation explorer) satellite in the VLEO region, a systematic evaluation of the GCITEM (global coupled ionosphere-thermosphere-electrodynamics model, institute of geology and geophysics, chinese academy of sciences) model, an theoretical model independently developed in China, was carried out for VLEO atmospheric environment, and compared it

收稿日期: 2025-12-09

基金项目: 中国科学院前瞻战略科技先导专项资助项目(XDA0470301); 国家重点研发计划资助项目(2022YFF0503900); 中国气象局“电离层预报和预警”青年创新团队资助项目(CMA2024QN09); 风云卫星应用先行计划资助项目(FY-APP)

\*第一作者: 任志鹏 (1982—), 男, 吉林磐石人, 研究员, 博士, 博士生导师, E-mail: zpren@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 任志鹏, 李星, 于婷婷, 等. GCITEM 模式对超低轨大气密度模拟性能评估: GOCE 观测对比研究[J]. 国防科技大学学报

Citation: REN Z P, LI X, YU T T, et al. Evaluation of GCITEM's performance in simulating VLEO atmospheric density: a comparative study with GOCE observations[J]. Journal of National University of Defense Technology

with the empirical thermospheric model (NRLMSISE00). The results show that under geomagnetically quiet conditions, the GCITEM model exhibits a mean relative bias close to zero, effectively eliminating the systematic overestimation in the empirical model. During geomagnetically disturbed periods, GCITEM demonstrates lower prediction uncertainty, and its physical mechanisms more reasonably capture the thermospheric response to energy inputs. GCITEM maintains the robust and adaptive performance across all seasons, with the smallest simulation error in autumn. The results confirm the superior performance of the GCITEM model in simulating VLEO thermospheric density and highlights the potential of physics-based numerical models for high-precision space environment modeling and aerospace engineering applications.

**Keywords:** very low orbit environment; thermosphere; coupled ionosphere-thermosphere mode

空天过渡区, 通常指距地表 50 千米至 250 千米的高度范围, 是从人类主导的航空领域向空间领域过渡的关键区域, 也是当前大气科学与空间物理交叉研究中最为活跃和富有挑战性的前沿阵地之一<sup>[1]</sup>。该区域不仅是从中性大气为主的中层向以等离子体为主导的热层/电离层转换的物理过渡区, 更是在能量和物质上承接着来自下层的重力波、潮汐波等大气波动上传以及来自上层的太阳极紫外辐射、粒子沉降等能量注入的复杂耦合过渡区。其独特的地理位置决定了它在日地系统能量传输链条中扮演着“承上启下”的核心角色。近年来, 随着临近空间开发、超低轨卫星星座、高超声速飞行器等空天技术的迅猛发展, 对空天过渡区环境特性的精确认知与预报已不再是单纯的学术追求, 更成为关乎航天器在轨安全、轨道精确预测、通信链路保障乃至国家安全的重大现实需求, 其战略地位日益凸显<sup>[2, 3]</sup>。

在空天过渡区众多环境参数中, 热层大气质量密度 (也可称为轨道大气质量密度) 是一个具有决定性意义的物理量<sup>[4]</sup>。它直接作用于在该区域飞行的航天器, 产生大气阻力, 是决定该区域卫星 (尤其是超低轨卫星) 轨道衰减速率与寿命的首要环境因素<sup>[5, 6]</sup>。对于轨道高度在 120 km 至 250 km 的空天过渡区的卫星而言, 大气阻力更是其轨道动力学模型中最大的摄动源。因此, 热层密度的精确确定, 是高精度轨道确定、碰撞预警、燃料管理和任务规划不可或缺的基础<sup>[7, 8]</sup>。然而, 热层密度是一个受到太阳极端紫外辐射、地磁活动以及低层大气上传波动等多种因素强烈驱动的、高度动态变化的参数, 其变化的幅度可达数个量级, 其时空变化的精细结构至今仍是认知的薄弱环节, 构成了当前超低轨航天工程面临的主要环境不确定性来源<sup>[9, 10]</sup>。

为满足科学研究与工程应用的需求, 以质谱仪-非相干散射雷达大气模型 (mass spectrometer-incoherent scatter models, MSIS) 系列模型为代表的热层大气经验模型在过去数十年

间得到了长足的发展和广泛的应用<sup>[11]</sup>。这类模型基于大量历史观测数据, 通过复杂的经验函数拟合, 构建了大气参数与太阳、地磁活动等代理参量之间的统计关系, 在提供全球气候学平均状态方面发挥了重要作用<sup>[12]</sup>。MSIS 系列模型作为发展较早、应用最广的经验模型, 在过去数十年中为航天任务提供了重要的环境参考, 其气候学平均状态具有较高的可靠性, 至今仍被广泛使用。然而, 经验模型固有的“后验”和“统计”特性, 决定了其在物理机制表征上存在一定的局限<sup>[13, 14]</sup>。它们本质上是对过去观测条件的平滑, 在精确捕捉由突发性空间天气事件所激发的快速、瞬变响应方面存在局限性<sup>[15, 16]</sup>; 同时, 经验模型无法对低层大气上传波动这些在空天过渡区能量和动量平衡中的过程进行物理描述, 导致其在特定区域和特定时间存在系统性偏差<sup>[17]</sup>。此外, 经验模型依赖于有限的输入参数, 这些参数往往无法完满地表征驱动热层变化的真实能量输入<sup>[18]</sup>。

面对经验模型在物理机制上的瓶颈, 基于第一性原理的电离层-热层耦合数值模式应运而生, 并逐渐成为深化空天过渡区科学认知和提升环境预报能力的重要途径<sup>[19]</sup>。与依赖于统计关系的经验模型不同, 这类数值模式通过求解一组耦合的流体力学、热力学、化学和连续性方程组, 从最基本的物理定律出发, 自洽地模拟大气参数在复杂外部驱动力作用下的动态演化<sup>[20, 21]</sup>。相对于经验模型, 数值模式能够动态地再现从平静期到暴时期间热层结构的完整演化历程, 物理地揭示能量和动量在不同圈层间耦合与传输的具体过程<sup>[20, 22]</sup>, 具备对未来可能出现的极端空间天气场景进行物理一致的“情景预报”能力<sup>[20, 23]</sup>, 为理解和解释观测现象背后的深层物理机制提供了一个强大的“数值实验室”。尽管当前电离层-热层数值模式在计算成本和性能上仍面临挑战, 但其在物理完备性、预报潜力和机理探究方面的巨大价值, 已使其成为该领域毋庸置疑的发展方向<sup>[20, 24]</sup>。

在此背景下, 对数值模式在超低轨这一关键

区域的模拟性能进行系统评估, 显得尤为重要和迫切。本研究旨在利用欧洲空间局重力场与稳态洋流探测卫星 (gravity field and steady-state ocean circulation explorer, GOCE) 所提供的、超低轨高度热层质量密度原位观测数据作为“基准真值”, 对由我国独立研制的全球电离层-热层耦合理论模式 (global coupled ionosphere-thermosphere-electrodynamics model, institute of geology and geophysics, chinese academy of sciences, GCITEM)<sup>[25]</sup>在超低轨区域的模拟能力进行一次全面的检验。本文将重点关注该模式对热层密度日平均变化的再现能力, 并将其表现与国际上广泛应用的 NRLMSISE00 经验模型进行多维度、量化的对比, 揭示两类模型在不同空间天气与季节条件下的表现差异, 定量评估该数值模式在预报精度和物理一致性方面所表现出的特性。本研究不仅旨在验证一个特定模型的性能, 更期望通过这一典型的对比分析, 深化对数值模拟技术在空天过渡区应用价值的认识, 为空天环境高精度建模与预报能力的未来发展提供坚实的依据。

## 1 模式和数据

### 1.1 使用的理论模式

电离层-热层耦合理论模式 GCITEM 能够模拟 90~600 km 之间电离层/热层区域的大气物理和化学过程, 是目前国内唯一自主研发的电离层-热层耦合理论模式<sup>[25]</sup>。该模式通过自洽求解电离层/热层的动量方程、能量方程、质量方程、流体静力学方程和状态方程, 自洽计算 90~600 km 之间电离层/热层区域的主要中性成分 O、O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>, 次要中性成分 N(<sup>4</sup>S)、N(<sup>2</sup>D)、NO、Ar 和 He, 电离成分 O<sup>+</sup>、N<sub>2</sub><sup>+</sup>、O<sub>2</sub><sup>+</sup>、NO<sup>+</sup>、N<sup>+</sup> 离子及电子的数密度, 电子、离子和中性成分的温度以及中性风场的时变三维结构。该模式还能够通过调用 TIDM-IGGCAS-II 模式 (theoretical ionospheric dynamo model, institute of geology and geophysics, chinese academy of sciences, version II) 自洽计算中低纬电离层电场(可直接换算为等离子体电动力学漂移速度)。GCITEM 基于地理坐标系采用有限差分法求解, 其经度-纬度的网格设为 7.5°×5°。GCITEM-IGGCAS 模式基于静力平衡假设构建, 它在垂直方向上没有使用很多电离层/热层耦合模式所通常使用的压力坐标, 而是使用了高度坐

标。该模式在垂直方向上的空间步长会随着高度变化, 低热层高度的空间步长约为 3 km, 而高热层高度的空间步长可达到 30 km。本研究中 GCITEM 模式的设置如下: 本研究中 GCITEM 模式的设置如下: 上边界设在 600 km 高度, 采用扩散平衡边界条件; 下边界设在 90 km 高度, 该处的温度、主要中性成分 (O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>) 数密度主要由 NRLMSISE00 经验模型提供, 但其中的大气潮汐替换为基于 SABER 观测的经验模型结果, 以上都作为随时间变化的输入条件。模式的主要驱动输入包括每日 F10.7 太阳辐射指数、3 小时 Ap 地磁活动指数。模式的初始状态由 NRLMSISE00 和 IRI 等热层和电离层经验模型提供。该模式较好的再现了电离层/热层的基本形态和主要变化特征。

### 1.2 使用的超低轨大气观测数据

GOCE 卫星于 2009 年 3 月 17 日被发射升空, 它运行在近乎圆形且与太阳同步的超低轨道上。该卫星能够提供从南纬 83.5 度到北纬 83.5 度范围内的热层质量密度数据<sup>[26]</sup>。在卫星运行期间, 其轨道位置通常位于黎明 (当地时间 06:15~07:10) 和黄昏时分 (当地时间 18:15~19:10), 其运行高度介于 275 km 至 230 km 之间。与 CHAMP 和 GRACE 卫星不同, GOCE 卫星通过配备可调节推力的离子推进系统来维持其较低的运行高度; 其质量密度数据则是根据卫星在运行过程中因空气阻力而产生的加速度计算得出的<sup>[26]</sup>。观测数据覆盖了 2009 年 11 月 1 日至 2013 年 10 月 20 日的时间段, 数据采样频率为每 10 秒一次, 因此其在沿轨道方向上的空间分辨率为约 75 公里。GOCE 卫星所获取的质量密度数据由欧洲航天局公开提供 (网址: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-missions/goce/goce-thermospheric-data>)。GOCE 卫星通过高精度加速度计反演获得热层质量密度, 其数据质量已被广泛验证。研究表明, 在绝大部分情况下, 该反演密度的典型相对误差在 1% 以内<sup>[26]</sup>, 能够可靠反映热层密度的主要变化。本研究进一步使用日均值进行分析, 有助于平滑随机测量噪声, 因此该数据集可作为评估模型性能的可靠基准。

图 1 展示了 2009 至 2014 年左右 GOCE 卫星运行期间的日均轨道高度、太阳活动指数 F10.7、地磁活动指数 Ap 及日均轨道大气质量密度的变化。图 1 (a) 表明轨道高度随时间呈现前期平稳 (约 270 km), 2012 年 8 月后持续下降至 240 km

左右的趋势；图 1 (b) 表明 F10.7 指数在 2011 年前波动较小，2011 年后显著上升并维持相对较高水平（峰值约 150-180），随后虽有波动但仍处于相对高位；图 1 (c) 表明 Ap 指数整体数值较低，多数时段在 0-50 间波动，偶有小峰值但整体平稳，整个观测周期以地磁宁静期为主；图 1 (d) 表明日均轨道大气质量密度早期（2010 年前后）处于  $0.1 \times 10^{-10}$ - $0.2 \times 10^{-10}$   $\text{kg/m}^3$  左右，2011 年后开始随着太阳活动性增强而持续上升，2012 年 7 月以后随着轨道高度的下降快速下降至 2014 年接近  $0.9 \times 10^{-10}$ - $1.0 \times 10^{-10}$   $\text{kg/m}^3$ 。整体来看，大

气质量密度上升与太阳活动增强（F10.7 升高）和卫星高度下降存在时间关联，特别是轨道高度的变化影响偏大。我们还可以注意到 GOCE 轨道大气质量密度表现出明显的季节变化。为规避轨道高度的影响，在接下来的研究中我们将主要使用轨道高度较为稳定的 2012 年 8 月之前的数据，并主要分析轨道大气密度的日均值。为方便对比，GCITEM 模式模拟整个 GOCE 观测周期的全热层大气质量密度，并点对点地提取了 GOCE 观测数据对应的模拟数据计算了相应的日均值。

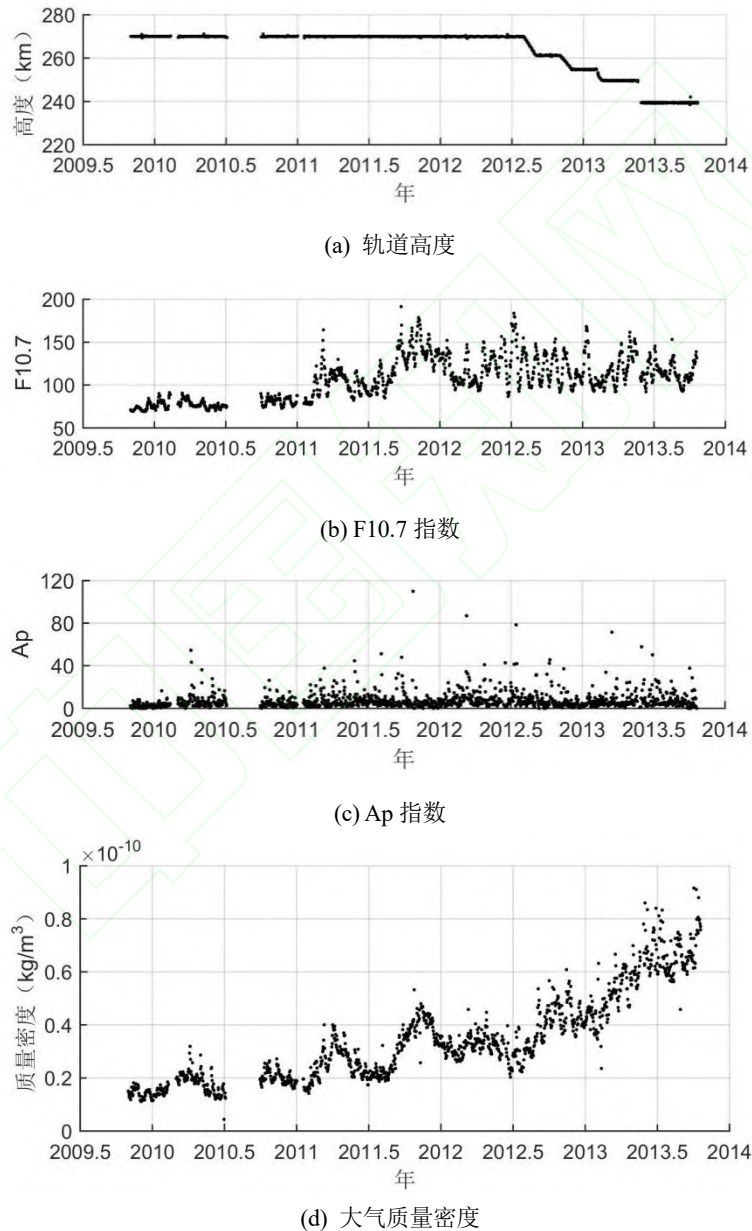


图 1 GOCE 卫星运行期间的日均参数

Fig.1 Daily mean parameters of the GOCE satellite

## 2. 模型性能评估与对比分析

为全面评估国内自主研发的电离层-热层耦合理论模式 GCITEM 在超低轨区域的模拟性能, 本文将其与国际上广泛应用的 NRLMSISE00 经验模型 (以下简称 MSIS 模型) 进行了系统性对比。尽管 MSIS 模型目前已经更新到 2.1 版本, 但考虑到国内外相关的轨道大气保障业务仍广泛 NRLMSISE00 版本, 因此本文仍主要和 NRLMSISE00 版本的结果进行对比。评估基于 GOCE 卫星在超低轨高度获取的高精度热层质量密度原位观测数据的日均值, 该数据具有时空覆盖广、测量精度高的特点, 为模型验证提供了可靠的基准真值。评估所采用的统计指标包括: 线性回归参数 (截距  $a$  和斜率  $b$ )、观测值与模型值的相关系数、相对偏差 (定义为(观测值-模型值)/观测值) 的平均值及其均方根值。其中, 平均值反映模型的平均偏差 (正值为低估, 负值为高估), 均方根值则表征模型预测的不确定性与离散程度。这种多维度的评估方法能够全面揭示模型在不同空间天气条件下的性能特征, 为空天过渡区大气环境的精确建模提供科学依据。

### 2.1 模式整体性能

在地磁宁静条件 ( $A_p \leq 22$ ) 下, GCITEM 模式与 MSIS 模型表现出显著差异。从表 1 的统计结果可以看出, GCITEM 模式的斜率为 1.127 接近于 1, 且平均相对偏差平均值为 0.013 接近于零, 表明该模式在宁静条件下对热层密度的模拟不存在显著的系统性偏差, 预测精度高。这一统计特征在图 2 中得到了直观体现。如图所示, 在地磁宁静日条件下, GCITEM 模型 (图中星号表示) 的数据点更紧密地聚集在理想匹配线 ( $y=x$ ) 附近, 尤其是在  $2 \times 10^{-11} - 3 \times 10^{-11} \text{ kg/m}^3$  的低密度区域表现出更高的精度。相比之下, MSIS 模型的斜率为 0.902, 且平均值为 -0.220, 表明 MSIS 模型在宁静条件下高估了热层密度, 平均高估幅度约 22%。图 2 中 MSIS 模型 (加号表示) 的数据点普遍偏离理想线, 清晰地展示了其系统性高估的特征。MSIS 模型的相关系数 (0.948) 略高于 GCITEM (0.914), 显示其在捕捉宁静期密度变化趋势的能力, 但其系统性偏差限制了其实际精度。这种高估现象可能源于经验模型对历史数据的过度拟合, 未能充分反映 GOCE 数据周期的空间环境状态。

表 1. GCITEM 模式与 MSIS 模型整体性能

Tab.1 Overall performance of the GCITEM model and the MSIS model

条件	模型	截距 $a (\times 10^{-12})$	斜率 $b$	相关系数	平均值	均方根
地磁宁静 ( $A_p \leq 22$ )	GCITEM	-1.92	1.127	0.914	0.013	0.170
	MSIS	-1.86	0.902	0.948	-0.220	0.281
地磁扰动 ( $A_p > 22$ )	GCITEM	8.04	0.919	0.807	0.169	0.198
	MSIS	6.52	0.682	0.825	-0.187	0.232

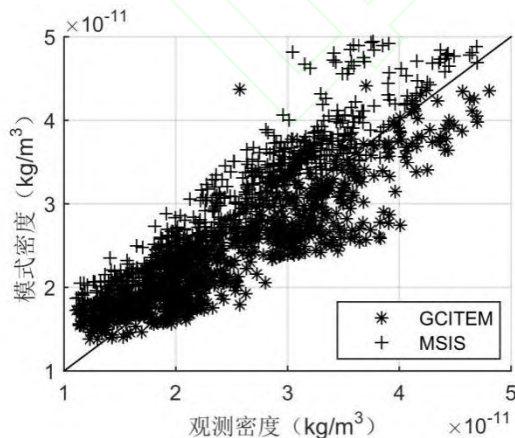


图 2 地磁宁静条件 ( $A_p \leq 22$ ) 下, 模式密度相对于观测密度的变化

Fig.2 Variations of model-derived density relative to the observed density under geomagnetical quiet conditions ( $A_p \leq$

22) 在地磁扰动条件 ( $A_p > 22$ ) 下, 两个模型的性能均发生变化, 但统计结果表明, 在地磁扰动条件下, GCITEM 模式的性能指标仍整体上优于 MSIS 模型, 此处的评估基于所有  $A_p$  指数  $> 22$  的日期构成的整体样本, 旨在检验模式对地磁扰动响应的统计性能。如表 1 所示, GCITEM 相对偏差的平均值变为 0.169, 表明模型在扰动期转为轻微低估密度; 而 MSIS 的平均值仍为显著的负值 (-0.187), 表明模型在扰动期间高估密度。从响应灵敏度看, GCITEM 模式的斜率  $b$  从宁静的 1.127 降至 0.919, 表明其对空间天气扰动有物理上的响应, 但响应强度略低于观测。相比之下, MSIS 模型的斜率降至 0.682, 表明其算法低估了地磁扰动对热层密度的增强效应。图 3 为此

提供了可视化结果。需要说明的是，当前分析主要基于轨道高度相对稳定（约 270 km）时期的数据，以聚焦于大气物理过程的模拟性能。图 3 中，中高密度区间（ $3 \times 10^{-11}$ – $4 \times 10^{-11}$  kg/m<sup>3</sup>）的数据点对应了太阳活动水平较高并伴有地磁扰动的时期。在该背景下，GCITEM 模型（星号）的整体效果优于 MSIS 模型（加号），其数据点更集中于理想线附近，这表明，GCITEM 的物理机制能够比经验模型更合理地刻画由增强的太阳极紫外辐射与地磁能量注入共同驱动的热层密度变化。在预测不确定度方面，GCITEM 模式的方均根(0.198) 小于 MSIS 模型(0.232)，表明即使在更为复杂的扰动条件下，GCITEM 模式预测结果的离散度更小，稳定性更好。GCITEM 模式在扰动期表现出更接近观测的响应行为，提示其物理机制可能更具合理性，而 MSIS 模型作为经验模型，其设计初衷在于提供气候学平均状态，而非精确捕捉瞬变事件。因此，其在扰动期的响应不足在某种程度上是模型类型的固有局限，并不能否认其在长期气候特征表征方面的应用价值。

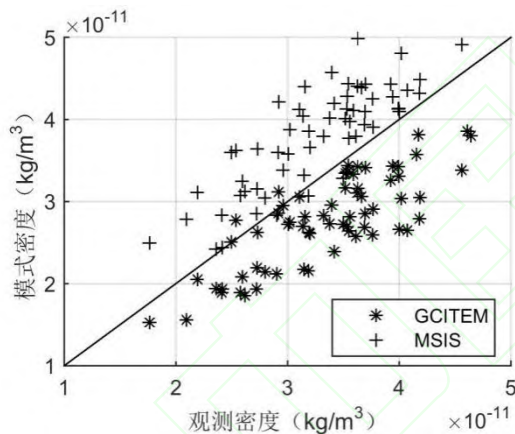


图 3 地磁扰动条件 ( $A_p > 22$ ) 下，模式密度相对于观测密度的变化

Fig.3 Variations of model-derived density relative to the observed density under geomagnetical disturbed conditions ( $A_p > 22$ )

## 2.2 季节变化特征分析

对全年数据的分季节统计进一步揭示了模型性能的季节依赖性。从表 2 可以看出，GCITEM

模式在不同季节均保持了较高的相关系数（0.791~0.964），说明其能可靠地再现热层密度的季节性变化规律。该模式的偏差存在季节性波动：春季和夏季表现为轻微低估（平均值分别为 0.105 和 0.002），而冬季则转为轻微高估（平均值为-0.046）。图 4 的四季对比子图直观地展示了这种密度范围的季节差异：春季和秋季集中于中低密度（ $2 \times 10^{-11}$ – $3 \times 10^{-11}$  kg/m<sup>3</sup>），夏季为中等密度（ $2.5 \times 10^{-11}$ – $3.5 \times 10^{-11}$  kg/m<sup>3</sup>），冬季则为高密度（ $3 \times 10^{-11}$ – $4 \times 10^{-11}$  kg/m<sup>3</sup>）。从图 4 可以看出，GCITEM 模型（星号）在夏、秋、冬三季，以及中低到高密度区域，其数据点分布整体上比 MSIS 模型（加号）更贴近理想线，表现出更好的精度。在春季，两者数据点分布相近，但结合表 2 统计结果，GCITEM 的平均绝对偏差（均方根误差为 0.169）低于 MSIS 模型（0.184）。与 GCITEM 模式不同，MSIS 模型在所有季节均表现出系统性的正向偏差，即其模拟值持续高于 GOCE 观测值（尤其在夏、秋两季更为显著），表明模型存在整体高估热层密度的倾向。如图 4 所示，MSIS 模型（加号）在季节性密度变化中的模拟误差更为显著，其数据点在各季节均表现出系统性偏离理想线的特征，其斜率  $b$  在夏、秋两季低于 1（分别为 0.869 和 0.747）。但是 MSIS 模型在秋、冬季的相关系数极高（ $>0.969$ ），这主要源于其对气候学平均状态的拟合。此外，MSIS 模型的方均根在不同季节间的波动较大，且在夏、秋、冬三季均高于 0.31，预测不确定性显著大于 GCITEM 模式。这种季节性的性能波动反映了经验模型在应对复杂季节变化机制时存在一定的局限性，其固定的函数形式难以准确描述由太阳辐射、大气环流等多因素耦合产生的非线性响应。需要说明的是，GCITEM 模式在春季的相关系数（0.791）低于 MSIS 模型（0.941）。分析表明，这主要是由于模式模拟的密度季节变化在春季存在一个小的相位差。尽管如此，GCITEM 在该季节的均方根误差（0.169）仍低于 MSIS 模型（0.184），表明其绝对预测偏差更小。该春季特有的相位偏差是模式后续校准中需关注的方向。

表 2 GCITEM 模式与 MSIS 模型分季节性能

Tab.2 Seasonal performance of the GCITEM model and the MSIS model

季节	模型	截距 $a (\times 10^{-12})$	斜率 $b$	相关系数	平均值	均方根
春	GCITEM	0.0001	1.137	0.791	0.105	0.169
	MSIS	-4.36	1.018	0.941	-0.154	0.184

夏	GCITEM	-0.0009	1.026	0.916	0.002	0.192
	MSIS	-0.71	0.869	0.936	-0.211	0.312
秋	GCITEM	-0.030	1.032	0.959	0.008	0.107
	MSIS	0.97	0.747	0.969	-0.297	0.316
冬	GCITEM	-5.59	1.248	0.964	-0.046	0.178
	MSIS	-5.15	1.012	0.976	-0.260	0.311

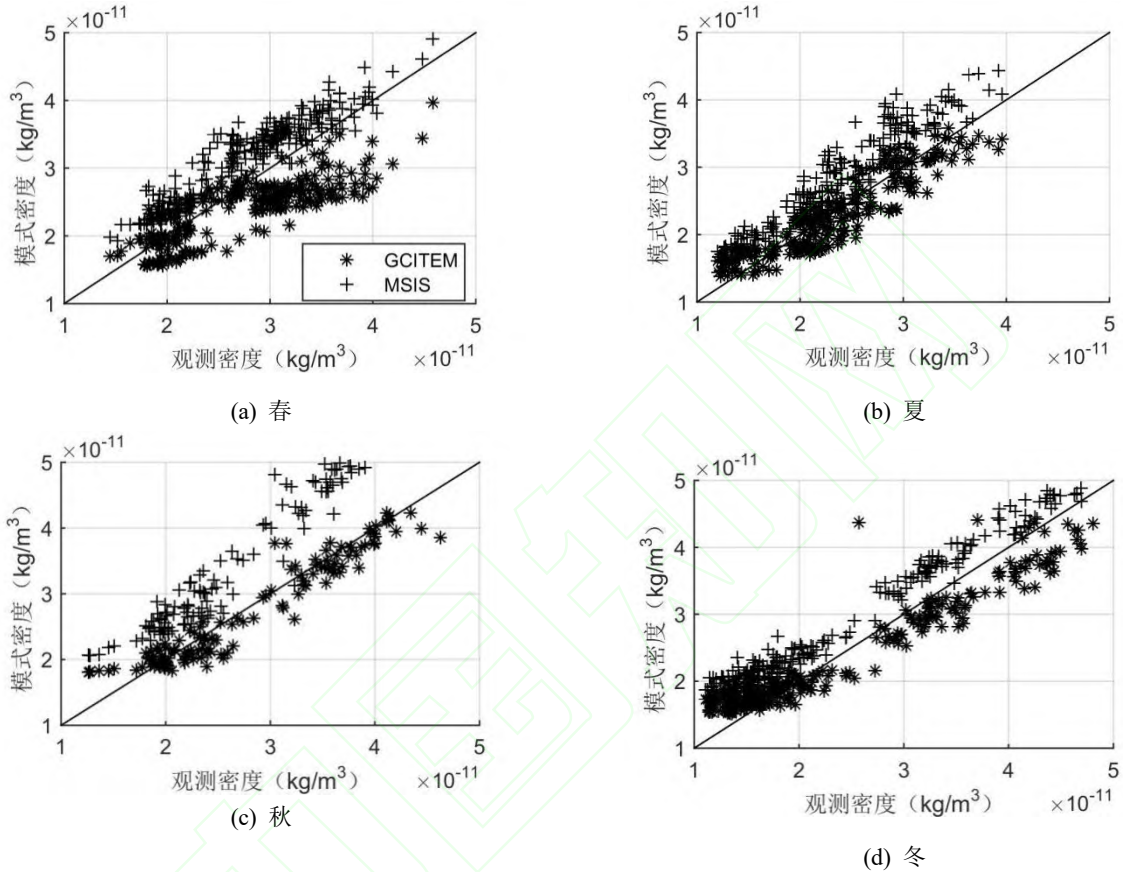


图 4. 不同季节情况下，模式密度相对于观测密度的变化

Fig.4 Variations of model-derived density relative to the observed density for different seasons

### 2.3 综合讨论

本研究通过多角度、多指标的对比分析，揭示了 GCITEM 模式在模拟超低轨热层大气密度方面的性能。首先，该模式在超低轨地磁宁静期无显著系统性偏差（图 2）。这一特性对于航天器的长期轨道预测和燃料预算管理具有重要意义，能够有效避免因模型偏差导致的轨道预测误差累积。其次，在地磁扰动期间，GCITEM 模式能够更准确地反映超低轨热层密度的增强（图 3），这得益于其内置的物理机制能够更为自洽地描述能量从高纬度注入并在全球大气中传输与耗散的过程。这种对空间天气事件的响应能力对于预警和规避极端空间天气对航天器造成的风险具有关

键价值。第三，GCITEM 模式在不同季节均展现出可靠且稳定的模拟能力（图 4），证明了对控制热层季节变化的物理过程具有更好的刻画能力。值得注意的是，GCITEM 模式在秋季表现出最佳的预测性能（方均根为 0.107），这可能与秋季相对稳定的空间环境条件有关，为模式提供了更为理想的验证环境。相比之下，MSIS 模型在夏季和秋季表现出的高估和响应不足问题，可能源于其采用的太阳活动指数和地磁活动指数在表征实际能量输入时存在滞后和不足，特别是在应对突发性空间天气事件时表现更为明显。

经验模型在提供气候学平均状态上具有参考价值，但其统计特性限制了其对瞬时、剧烈变化的空间天气事件的预报能力，并引入了系统性

偏差。结果明确显示,在发展面向未来精准航天任务的热层环境模型中,基于物理的数值模拟是极具潜力和可靠性的技术路线,能够为空天过渡区的高精度环境建模与航天器轨道预测提供更有效的支撑。未来的研究工作应着重于进一步优化 GCITEM 模式中对极端事件响应强度的校准,并考虑引入数据同化技术以提升其初始场精度,从而更好地服务于超低轨航天器的在轨安全运行和轨道精确预测需求。

### 3. 结论

本研究基于 GOCE 卫星在超低轨高度的观测数据,对国内自主研发的电离层热层耦合数值模式 GCITEM 对超低轨大气轨道大气质量密度的预报能力进行了评估。本研究针对超低轨(VLEO)环境,评估结论基于 GOCE 卫星在 2009 年 11 月至 2012 年 7 月期间获取的热层质量密度日均值数据得出。主要结论如下:

1. GCITEM 模式有效消除了系统性偏差。在超低轨地磁宁静条件( $Ap \leq 22$ )下,GCITEM 模式的平均相对偏差近乎为零,表明其在该条件下能够有效避免 NRLMSISE00 经验模型所表现出的系统性高估倾向。

2. GCITEM 模式对地磁扰动具有优秀的响应能力。基于对地磁扰动日( $Ap > 22$ )样本的整体统计,GCITEM 模式的预测不确定度(均方根为 0.198)低于 MSIS 模型(0.232),其物理机制在统计意义上能够更合理地描述热层对能量注入的平均响应。

3. GCITEM 模式表现出良好的季节适应性。全季节预测不确定度(0.107-0.192)较低,展现出良好的稳健性。

本研究证实了 GCITEM 模式在超低轨热层密度模拟方面的优越性能,为空天过渡区高精度环境建模和航天器轨道预测提供了更可靠的工具。后续将重点优化模式对极端事件的响应精度,并探索数据同化技术的应用。

### 参考文献 (References)

[1] 黄劲,常亮,董佰扬,等. 超低轨卫星的空间环境特性及其力学与热学关键问题研究进展[J]. 空间科学学报, 2023, 43(4): 711-723.  
Huang Jin, Chang Liang, Dong Baiyang, et al. Development on space environment and its dynamic and thermal problems of ultra-LEO satellites[J]. Chinese

Journal of Space Science, 2023, 43(4): 711-723. (in Chinese)

[2] Berger T E, Dominique M, Lucas G, et al. The thermosphere is a drag: the 2022 starlink incident and the threat of geomagnetic storms to low earth orbit space operations[J]. Space Weather, 2023, 21(3): e2022SW003330.

[3] Crisp N H, Roberts P C E, Livadiotti S, et al. The benefits of very low earth orbit for earth observation missions[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 117: 100619.

[4] Emmert J T. Thermospheric mass density: a review[J]. Advances in Space Research, 2015, 56(5): 773-824.

[5] Doombos E. Thermospheric density and wind determination from satellite dynamics[M]. Heidelberg: Springer, 2012.

[6] 岳超,朱俊,刘晓佳,等. 基于经验和物理模型对热层大气密度的评估[J]. 中国空间科学技术(中英文), 2025, 45(1): 88-98.  
Yue Chao, Zhu Jun, Liu Xiaojia, et al. Evaluation of modeled thermospheric density by empirical and physical model[J]. Chinese Space Science and Technology, 2025, 45(1): 88-98. (in Chinese)

[7] Bruinsma S, Sutton E, Solomon S C, et al. Space weather modeling capabilities assessment: neutral density for orbit determination at low earth orbit[J]. Space Weather, 2018, 16(11): 1806-1816.

[8] Wang Xin, Wang Ronglan, Wang Kunpeng, et al. Premature reentry of the binar CubeSats due to underestimation of solar and geomagnetic activities and its implication for importance of medium- and long-term space weather forecasts[J]. Space Weather, 2025, 23(12): e2025SW004619.

[9] Blanchfield E J, Carter B A, Currie J L, et al. Thermospheric density disturbances during the 2015 St. Patrick's day geomagnetic storm: model-observation comparisons and analysis of intense polar density spikes[J]. Space Weather, 2025, 23(10): e2025SW004472.

[10] Murphy K, Halford A J, Liu V, et al. Understanding and modeling the dynamics of storm-time atmospheric neutral density using random forests[J]. Space Weather, 2025, 23(1): e2024SW003928.

[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] 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, 2008.

[13] Zhang Yongliang, Dandenault P B, Paxton L J, et al. Variability in the thermospheric neutral mass density: a multiple model comparison[J]. Journal of Atmospheric

- and Solar-Terrestrial Physics, 2025, 277: 106630.
- [14] Zhang Kun, Huang Yanshi, Wei Fengsi, et al. Thermospheric density variations during extreme geomagnetic storms and their potential impact on the orbit of the China space station[J]. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 2025, 12: 1644152.
- [15] Guo Yu, Zhang Xiaohong, Guo Fei, et al. Performance analysis of NRLMSIS 2.1 thermospheric mass density model using GRACE-A and SWARM-C observations[J]. *Advances in Space Research*, 2024, 74(5): 2475-2491.
- [16] Reznichenko M O, Kotov D V, Richards P G, et al. The thermosphere was poorly predictable not only during but also before and after the starlink storm on 3-4 February 2022[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, 52(2): e2024GL112620.
- [17] Bruinsma S, Boniface C, Sutton E K, et al. Thermosphere modeling capabilities assessment: geomagnetic storms[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2021, 11: 12.
- [18] He Changyong, Yang Yang, Carter B, et al. Review and comparison of empirical thermospheric mass density models[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2018, 103: 31-51.
- [19] Qian Liying, Solomon S C. Thermospheric density: an overview of temporal and spatial variations[J]. *Space Science Reviews*, 2012, 168: 147-173.
- [20] 任志鹏. 高层大气建模: 从地球到行星[J]. *科学通报*, 2020, 65(14): 1320-1335.  
Ren Zhipeng. Upper atmosphere modeling: from earth to planet[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(14): 1320-1335. (in Chinese)
- [21] Richmond A D, Ridley E C, Roble R G. A thermosphere/ionosphere general circulation model with coupled electrodynamics[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, 19(6): 601-604.
- [22] Liu Hanli, Bardeen C G, Foster B T, et al. Development and validation of the whole atmosphere community climate model with thermosphere and ionosphere extension (WACCM-X 2.0)[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2018, 10(2): 381-402.
- [23] Marsal S, Richmond A D, Maute A, et al. Forcing the TIEGCM model with birkeland currents from the active magnetosphere and planetary electrodynamics response experiment[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, 117(A6): A06308.
- [24] Fang T W, Kubaryk A, Goldstein D, et al. Space weather environment during the SpaceX starlink satellite loss in February 2022[J]. *Space Weather*, 2022, 20(11): e2022SW003193.
- [25] Ren Zhipeng, Wan Weixing, Liu Libo. GCITEM-IGGCAS: a new global coupled ionosphere-thermosphere-electrodynamics model[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2009, 71(17/18): 2064-2076.
- [26] Doornbos E, Bruinsma S, Fritsche B, et al. Air density and wind retrieval using GOCE data[C]//ESA Living Planet Symposium, 2013.