

基于 GOLD 观测的 2019–2023 年 160 公里高度 DE3 季节变化性研究

吴逸凡^{1,2} 李星^{1,2} 任志鹏^{3,4,5} 邹嘉豪^{1,2} 胡沛石^{1,2} 郑博¹²
赵文强⁶

1(北京航空航天大学空间科学学院 北京 10083)

2(空间环境监测与信息处理工信部重点实验室 北京 10029)

3(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)

4(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)

5(中国科学院大学 地球与行星科学学院 北京 100049)

6(航空工业江西洪都航空工业集团有限责任公司 南昌 330001)

摘要 本文旨在揭示中热层(160 公里)大气潮汐的季节性演变特征,填补 160 公里高度非迁移潮汐 DE3(Diurnal Eastward 3)区域观测分析的空白。基于 NASA GOLD(Global-scale Observations of Limb and Disk)任务 2019–2023 年的地球静止轨道观测数据,本文利用波数谱分析方法和加权最小二乘拟合,从温度场中提取了非迁移日潮(DE3)的振幅与相位时空序列,并结合经验正交函数 EOF(Empirical Orthogonal Function)分解解析其主导模态。研究表明,160 公里高度 DE3 潮汐表现出宏观上延续了中间层和低热层(mesosphere and lower thermosphere, MLT)的季节性特征,其振幅峰值稳定锁定在秋分(9–11 月)之后。2021 年秋季出现的爆发性增强及相位突变,揭示了该高度潮汐动力学过程的非线性与复杂性。EOF 分析进一步证实 DE3 信号并非由单一模态主导,而是由赤道对称模态与半球非对称调节模态共同构建。本文验证了秋季峰值结构是该高度潮汐固有的气候学属性,为理解非迁移潮汐的传播机制提供了关键观测依据。

关键词 大气潮汐; 非迁移潮汐; DE3; GOLD 观测; 季节变化

中图分类号 高层大气物理 P351 高层大气探测 P356

Study on the Seasonal Variability of DE3 at 160 km Altitude during 2019–2023 Based on GOLD Observations

Wu Yifan^{1, 2} Li Xing^{1,2} Ren Zhipeng^{3,4,5} Zou Jiahao^{1,2} Hu
Peishi^{1,2} Zheng Bo^{1,2} Zhao Wenqiang⁶

1(School of Space and Earth Sciences, Beihang University, Beijing 100083)

2(Key Laboratory of Space Environment Monitoring and Information Processing, Ministry of Industry and Information Technology Beijing 100029)

3(Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences Beijing 100029)

4(Beijing National Observatory of Space Environment, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

5(College of Earth and Planetary Sciences, University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049)

* 基金项目: 国家自然科学基金(项目编号: 42274207、42241114)

投稿日期: 2025/12/24

E-mail:lixing@buaa.edu.cn

Abstract This study aims to reveal the seasonal evolution characteristics of atmospheric tides in the middle thermosphere (160km) and fill the observational gap in the 110 – 200 km "thermospheric gap" region. Based on the geostationary orbit observation data from NASA's GOLD mission during 2019 – 2023, the spatio-temporal sequences of amplitude and phase of the non-migrating diurnal tide (DE3) are extracted from the temperature field using the wavenumber spectrum analysis method and weighted least squares fitting, combined with Empirical Orthogonal Function (EOF) decomposition to analyze its dominant modes. The results show that the DE3 tide at 160 km exhibits distinct seasonal characteristics compared with those in the mesosphere and lower thermosphere (MLT), with its amplitude peak stably locked after the autumnal equinox (September – November). The explosive enhancement and phase mutation occurring in the autumn of 2021 reveal the nonlinearity and complexity of tidal dynamic processes at this altitude. EOF analysis further confirms that the DE3 signal is not dominated by a single mode but is jointly constructed by the equatorial symmetric mode and the hemispheric asymmetric regulatory mode. This study verifies that the autumn peak structure is an inherent climatological attribute of the tide at this altitude, providing key observational evidence for understanding the synergistic modulation of lower atmospheric forcing and thermospheric in-situ processes.

Key words Atmospheric tides; Non-migrating tides; DE3; GOLD observations; Seasonal variability

0.引言(Introduction)

地球大气呈现出显著的垂直耦合特征，其中热层（约 80 – 600 公里）作为中性成分与电离层相互作用的关键区域，其动力学过程对空间天气环境具有深远影响[1]。低层大气强迫，特别是向上传播的大气波，被认为是高层大气变率的重要来源[2]。其中，大气热潮汐是中高层大气中普遍存在的全球尺度波动，主要由大气对太阳辐射的周期性吸收所激发[3]。潮汐波作为连接低层大气与热层-电离层系统的动力学纽带，在驱动高层大气环流及能量动量垂直输送中起到关键作用[4]。

根据传播特征，大气潮汐可划分为迁移潮汐与非迁移潮汐。迁移潮汐依赖于地方时，主要由低层大气中水汽和臭氧对太阳辐射的纬向对称吸收激发[5]。数值模拟研究进一步揭示了热带深对流云团与迁移潮汐及电离层形态之间的密切

联系[6]。相比之下，非迁移潮汐依赖于世界时，主要源于对流层潜热释放、海陆分布差异及地形等纬向非均匀性次级热源[7]。早期的 CRISTA(Cryogenic Infrared Spectrometers and Telescopes for the Atmosphere)观测表明，赤道 MLT 区域的非迁移潮汐特征可以通过潜热和波-波相互作用强迫的组合来理解[8]。

在众多非迁移潮汐成分中，向东传播的波数为 3 的日潮（DE3）由热带深对流潜热释放激发，被公认为连接低层大气与热层-电离层系统最重要的耦合介质之一[9]。过去数十年间，基于卫星的观测已对中间层/低热层（MLT）区域（约 80-110 公里）的潮汐特性进行了详尽表征。TIMED(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics)卫星上的 SABER(Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry)仪器通过对温度的长期观测，揭示了非迁移潮汐显著的季节性变化[10]。针对 DE3 潮汐的季节-纬度变化研究指出，其受背景风场和加热分布的显著影响[11]。TIDI(TIMED Doppler Interferometer)仪器的风场观测进一步证实了 DE3 在 MLT 区域表现出显著的“北半球夏秋季强”的特征[12]。CRISTA 任务通过高分辨率的全球温度快照，首次清晰揭示了非迁移潮汐在低热层温度场中显著的纵向波数结构，证实了其在能量收支中的主导地位[13]。MIPAS(Michelson Interferometer for Passive Atmospheric Sounding)观测则进一步构建了这些纵向振荡的长期气候学图谱，详细刻画了潮汐模态在 MLT 区域的垂直结构演变及其对季节的依赖性[14]。这些向上传播的潮汐波能够通过调制 E 层发电机风场[15],直接驱动 F 层等离子体输运[16]，在电离层中产生显著的纵向波数结构（即著名的“四波结构”）[17]。

相比之下，对于潮汐波如何穿越 110 - 200 公里这一热层观测空白（thermospheric gap）区域，目前的观测仍相对匮乏。虽然基于 CHAMP(Challenging Minisatellite Payload)卫星数据，成功识别出了纬向风场中存在的非迁移潮汐信号[18]，以及基于卫星密度观测，可以进一步建立热层中向上传播的日潮和半日潮的全球气候学模型[19]，但是 GOCE(Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)与 TIMED 的联合分析表明，潮汐在穿越热层底部的过渡区时会经历复杂的耗散与模式耦合过程[20]。此前，利用 GUVI(Global Ultraviolet Imager)卫星观测的柱密度比（O/N₂）曾尝试填补这一空白[21]，但受限于 135.6nm 辐射中的电离层污染问题，其反演精度受到一定限制

[22]。特别是在 160 公里左右的中热层高度,潮汐动力学过程可能远比低层复杂。随着高度增加,垂直波长较短的高阶反对称模态因分子扩散和涡流扩散而迅速衰减[23]。更为关键的是,热层内部可能存在显著的“原位激发”(In-situ generation)潮汐成分[24]。经典的理论指出,非线性波-波相互作用是中高层大气中次级波动生成的关键动力学机制;通过这种非线性耦合过程,主导潮汐模态能够与行星波或其他波动发生能量交换,进而激发出一系列具有组合频率和波数特征的新波谱成分[25]。基于 ICON 卫星的观测进一步证实,行星波与潮汐的非线性相互作用是高层大气逐日变率的重要来源[26]。最新的研究结合理论模拟提出,DE3 与半日潮 SW2 的非线性相互作用可能在热层原位激发向西传播的波数 5 的日潮(DW5);根据卫星采样理论,当从地球静止轨道等固定地方时视角观测时,DW5 可能表现为与 DE3 相似的波数结构,从而产生混叠效应[27]。这使得单纯依赖观测来分离和解释 DE3 的季节性演变变得极具挑战性。

NASA 于 2018 年发射的“全球尺度临边和盘面观测”(GOLD)任务,利用其地球静止轨道的独特视角,首次实现了对美洲及大西洋扇区中热层(约 160 公里)温度和成分的连续高频观测[28]。GOLD 搭载的双通道远紫外光谱仪能够对地球盘面和临边进行高分辨率扫描[29]。针对中性温度的反演,最新的算法基于 N₂ Lyman-Birge-Hopfield (LBH)波段旋转结构反演全盘有效温度(TDISK),指出其权重函数峰值位于 160 公里附近,能够有效反映中热层的热力学状态[30]。利用 GOLD 数据的独特优势,已有开创性研究利用地方时差分法成功分离出了 DE3 和 DE2 等主要潮汐分量[31],后续研究还进一步改进了算法以减少电离层污染的影响[32],并将研究扩展到了半日潮领域[33]。

然而,现有研究多局限于特定季节或较短的时间窗口,对于 DE3 潮汐在多年尺度上的连续演变及其复杂的时空模态结构,仍缺乏系统性的深入分析。本文引入经验正交函数(EOF)分析方法,作为一种高效的数据降维工具,EOF 已被成功应用于电离层 TEC 的气候学建模,证明其能有效分离主导模态与次级波动特征[34]。

综上所述,本文旨在利用 GOLD 提供的 2019 - 2023 年长期连续观测数据,聚焦 160 公里这一关键高度,结合波数谱拟合与 EOF 分解方法,系统提取并解析 DE3 潮汐的季节性演变特征与主导时空模态。本文将重点验证该高度 DE3 潮

汐是否延续了 MLT 区域“秋季强”的经典特征，深入探讨热层原位激发过程及混叠效应对潮汐季节性变化的潜在调制作用，从而为完善热层-电离层耦合模型提供关键的观测约束。

本论文的结构安排为第 1 节详细阐述了研究所采用的 GOLD 卫星观测数据、DE3 潮汐的波数谱提取方法以及 EOF 分解等关键数据处理技术；第 2 节呈现了 GOLD 观测到的 DE3 潮汐振幅与相位的时空演变特征，重点分析了其季节性规律、年际差异以及 EOF 主导模态的物理意义，并结合模型模拟与低层观测结果进行了深入的对比讨论；第 3 节对全文的研究发现进行了总结，并对未来中热层潮汐动力学研究提出了展望。

1.数据与分析方法(Data and Method of Data Analysis)

1.1.GOLD 观测数据

GOLD (Global-scale Observations of the Limb and Disk) 仪器是 NASA 于 2018 年发射的地球静止轨道远紫外成像光谱仪，本文采用 GOLD 任务发布的 Level 2 TDISK (Temperature Disk) 数据产品，该产品基于对 N_2 Lyman-Birge-Hopfield 波段远紫外辐射旋转结构的光谱反演，获取约 160 公里高度处的有效中性大气温度。该数据产品已通过与国际通用经验模型（如 NRLMSIS 2.0）及物理模型的对比验证，在表征热层气候学变化与响应空间天气事件等方面表现出良好的可靠性[28]。

在数据使用方面，本文选取 2019 年 1 月至 2023 年 12 月期间的 TDISK 数据，并依据观测几何条件（太阳天顶角 $\leq 80^\circ$ 、发射角 $\leq 75^\circ$ ）进行质量控制。为便于后续潮汐提取与矩阵运算，将原始 NetCDF(Network Common Data Form)格式数据转换为 MATLAB 兼容格式，并保留了完整的温度误差信息，为后续定量评估反演结果的不确定性提供支持。其有效空间覆盖范围为地理纬度 $70^\circ N-70^\circ S$ 及经度 $30^\circ E-127^\circ W$ 。

1.2.DE3 潮汐提取方法

针对 GOLD 探测器仅具备白昼观测覆盖的局限性，本文采用基于波数谱分析的拟合反演策略。依据热层-电离层耦合的物理机制，设定 160 公里高度处的

大气四波纵向结构(Wavenumber-4)主要由与东向传播的非迁移的经向波数为3的日变潮 DE3、东向传播的非迁移的经向波数为2的半日变潮 SE2 及静止行星波 SPW4 线性叠加而成。基于此物理假设, 本文利用 GOLD 在五个固定地方时($t_1=09:00$, $t_2=10:30$, $t_3=12:00$, $t_4=13:30$, $t_5=15:00$)的连续观测数据构建超定方程组, 通过解析不同潮汐成分在固定地方时下的相位特征差异, 利用加权最小二乘法实现对 DE3、SE2 及 SPW4 复数振幅与相位的精确分离, 从而克服单一地方时观测无法区分时空变化的难题。

为了提取非迁移潮汐成分, 首先需将温度场从世界时(UT)坐标系转换至地方时(LT)坐标系。在固定温度和纬度下, 温度场可表示为潮汐函数的叠加

$$T(\lambda, t^*)/T_0 = \sum_{f,s^*} A_{fs^*} e^{i2\pi(ft^* - s^*\lambda)} \quad (2.1)$$

其中, T_0 表示背景温度, A_{fs^*} 指的是潮汐的复数幅度, $f(=0, 1, 2, \dots)$ 是频率(单位: 数量/天), $s^*(= \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots)$ 表示在 UT 坐标(the earth-fixed coordinates)下的经向波数(单位: 数量/圈)。

在 LT 坐标系下, 对于 $s \neq 0$ 的经度波数谱代表的只是非迁移潮汐成分:

$$T(\lambda, t)/T_0 = \sum_{f,s} A_{fs} e^{i2\pi(ft - s\lambda)} \quad (2.2)$$

GOLD 观测得到的经度波数谱, 对于一天选取的五个固定地方时, 假定大气四波结构由三个潮汐组成, 因此可以建立一个超定方程组。之前的研究证明了波数为4的结构可以在电离层和热层中表现出多种物理参数, 本文将这种波动模式 DE3、SE2、SPW4 相关联。假设 160 公里处的四波结构($S=4$)主要是由 DE3、SE2、SPW4 构成。假设 160 公里处的四波结构($S=4$)主要是由 DE3, SE2, SPW4 构成。四波结构可以表示为

$$a_4^1 = A_{DE3} e^{i2\pi t_A} + A_{SE2} e^{i4\pi t_A} + A_{SPW4} \quad (2.3)$$

$$a_4^2 = A_{DE3} e^{i2\pi t_B} + A_{SE2} e^{i4\pi t_B} + A_{SPW4} \quad (2.4)$$

$$a_4^3 = A_{DE3} e^{i2\pi t_C} + A_{SE2} e^{i4\pi t_C} + A_{SPW4} \quad (2.5)$$

$$a_4^4 = A_{DE3} e^{i2\pi t_D} + A_{SE2} e^{i4\pi t_D} + A_{SPW4} \quad (2.6)$$

$$a_4^5 = A_{DE3} e^{i2\pi t_E} + A_{SE2} e^{i4\pi t_E} + A_{SPW4} \quad (2.7)$$

分别表示五个不同地方时时间段下四波的复数形式。通过五个不同的当地时间点拟合每个潮汐的振幅和相位, 可以得到不同潮汐振幅和相位的年变化。在本

文中，温度数据视作经度和时间的函数，通过傅里叶变换将其转换到频域后，可以得到各个波数对应的能量分布。本研究重点关注的 DE3、SE2 与 SPW4 波段，其各自的空间波数与频谱位置较为集中。

1.3.EOF 分解方法

EOF(Empirical Orthogonal Function,经验正交函数)分解方法是一种常用的数据降维与模态识别方法，在大气科学中广泛应用于分析空间场的主要变化模态与其时间演变特征。本部分主要针对基于 GOLD 观测热层大气数据所得到的非迁移潮汐分量 DE3 进行 EOF 分解的主成分分析，通过对空间基函数和主成分时间系数的提取，揭示了潮汐活动随季节和纬度的复杂变化特征。通过对观测数据分解，得到以地理纬度为横轴呈现的空间基函数，以及反映不同季节模态活跃情况的主成分时间系数。关于 DE3 主模态的提取结果：DE3 作为非迁移潮汐关键分量，其 EOF 第一阶空间基函数呈现显著纬度分布特征。在空间维度，EOF1 基函数曲线在此纬度带呈现出显著的对称波峰分布，权重系数值最为集中，受大尺度背景环流调制显著，赤道对称分布特性突出，体现全球尺度大气动力过程的约束。

通过上述分析，共性上，DE3 通过 EOF 分析实现“时空解耦”，提取主导模态（PC1+第一空间基函数）解释最大方差，揭示潮汐对大尺度环境场的响应；次要模态（PC2）补充局地扰动、季节转换期的影响，完善潮汐波动的多元调控机制。

2.结果与讨论(Results and Discussion)

本章重点展示基于 GOLD 卫星 2019 - 2023 年观测数据反演获得的 160 公里高度 DE3 潮汐时空演变特征。首先，通过分析潮汐振幅与相位的时空分布，揭示其独特的季节性规律与年际变化；其次，利用经验正交函数(EOF)分解技术，深入解构 DE3 信号的主导时空模态及其物理内涵；最后，通过与 SABER 低层观测数据的系统对比，验证观测结果的可靠性，并探讨中热层潮汐的垂直耦合与原位激发机制。

图 1 展示了基于 GOLD 长期连续观测反演获得的 2019 - 2023 年 160 公里高度温度微扰（表征 DE3 潮汐成分）振幅的时空演变特征。从纬度分布来看，DE3

潮汐的高振幅区主要集中在赤道及低纬度地带（约 20°S 至 20°N ），并呈现出显著的关于赤道的近似对称结构，这表明在 160 公里的中热层高度，由于分子耗散作用增强，垂直波长较短的反对称模态已大幅衰减，观测信号主要由能够在该高度维持的大尺度对称模态主导。在季节演变规律上，该高度的潮汐能量在宏观上完美延续了中间层和低热层（MLT）“夏秋季强”的整体分布态势；然而，随着潮汐波的向上传播，其季节主峰发生了平滑的自然推移，各年份的强振幅信号并未如低层大气那样集中在夏季至初秋，而是显著向后延迟并稳定锁定在秋分（9 月）及其之后的时间段（如 2019 和 2020 年所示）。此外，该图还揭示了 160 公里高度 DE3 潮汐具有极其显著的年际变化与非线性响应特征，最为引人注目的是 2021 年秋季出现的爆发性增强，其温度振幅峰值远超前后年份，且高值区覆盖了更宽泛的低纬度范围；这种打破常规季节循环的阵发性异常增强进一步证实，中热层潮汐并非低层强迫的简单线性映射，其在向上传播的过程中极易受到热层内部复杂动力学过程（如原位激发、波-波相互作用）或特定大尺度环流环境变化的强烈调制。

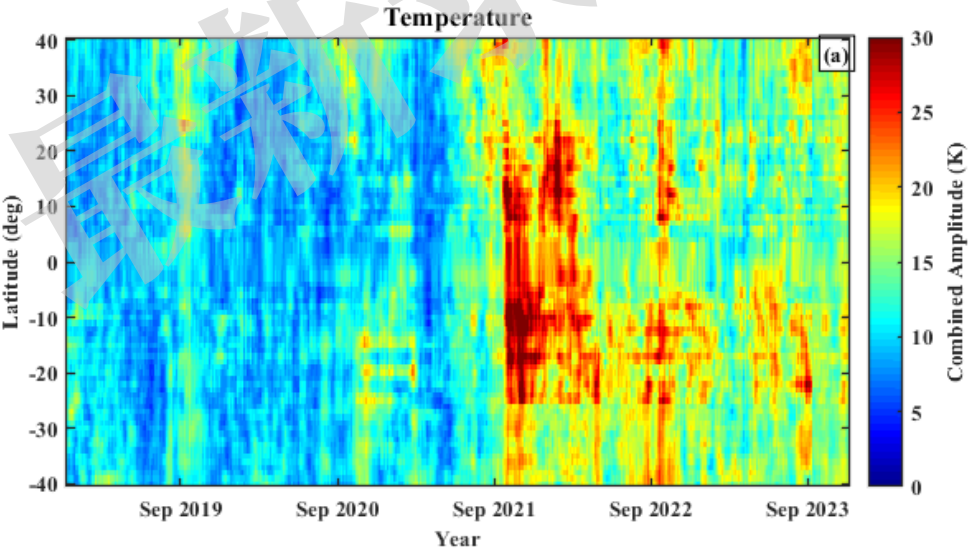


图 1 2019 - 2023 年 GOLD 观测反演获得的 160 公里高度温度的时纬分布

Figure 1. Time-latitude distribution of temperature at 160 km altitude retrieved from GOLD observations from 2019 to 2023.

2.1.DE3 潮汐的季节-纬度分布

图 2 展示了基于 GOLD 长期观测数据反演获得的 2019 - 2023 年 160 公里高度 DE3 潮汐温度振幅时空分布。该高度 DE3 潮汐振幅的演变规律主要表现为显著的年际差异与非典型季节性特征。观测显示，在 2019 年和 2020 年，尽管秋分

（9 月）后存在微弱的振幅增强趋势，但整体强度较弱且无突出峰值。这表明在此期间，源自低层大气的潮汐信号在向上传播至 160 公里的过程中，可能经历了强烈的分子耗散或受到了背景风场的有效抑制。2021 年秋季表现出独特的爆发性增强特征。在此期间，DE3 振幅显著高于前后年份，峰值区域覆盖了赤道至中低纬度的广泛范围。

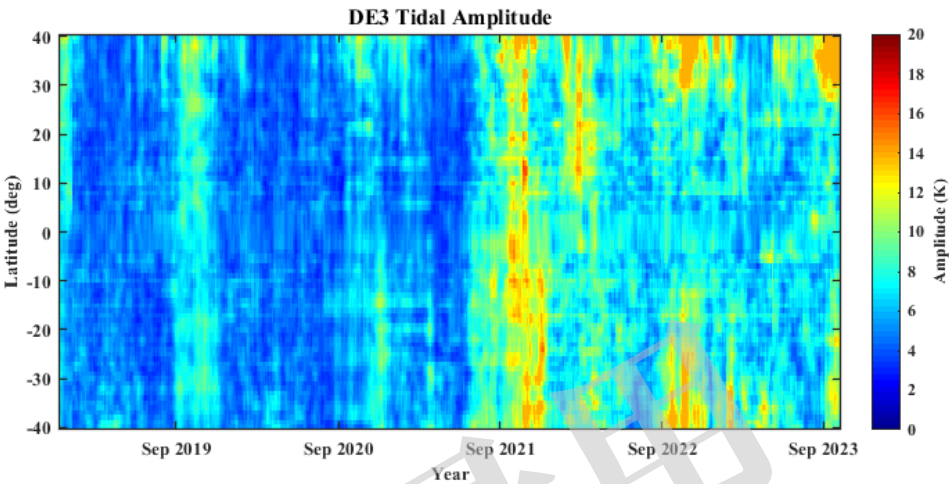


图 2 2019 - 2023 年 GOLD 观测反演获得的 160 公里高度 DE3 潮汐温度振幅的时纬分布

Fig. 2 Spatio-temporal evolution of the DE3 tidal temperature amplitude at 160 km derived from GOLD observations during 2019 - 2023.

这种打破常规季节性循环的异常增强，可能与该年份特定的太阳活动上升期背景、地磁扰动或低层大气强迫的异常变化（如平流层准两年振荡 QBO 相位影响）有关，揭示了中热层潮汐对耦合环境变化具有高度敏感的非线性响应特性。从纬度分布来看，DE3 的高振幅区主要集中在赤道及低纬度区域（约 $\pm 20^\circ$ ），且在强振幅年份（如 2021 年）表现出关于赤道的近似对称结构。在强振幅年份（如 2021 年秋季），DE3 的整体振幅分布依然表现出清晰的关于赤道的宏观对称特征。这表明在 160 公里的中热层高度，由于分子扩散和涡流扩散的耗散作用，具有较短垂直波长的反对称模态（Anti-symmetric modes）衰减较快，观测到的 DE3 信号主要由垂直波长较长、能够在较宽纬度范围内维持的大尺度第一对称模态（First Symmetric Mode）主导。这一宽泛且对称的能量分布特征表明，该高度的 DE3 信号很可能主要受大尺度背景大气环流（如温度场和纬向风场）对称分量调制的全球性波动主导。

图 3 展示了基于 GOLD 长期观测数据反演获得的 2019 - 2023 年 160 公里高度 DE3 潮汐相位（地方时）的时空分布。通过精细化的波数谱提取，相位分布

图清晰揭示了该高度 DE3 潮汐传播模态的高度稳定性及其在特定年份的异常响应特征。从图中可以发现，DE3 相位在 25°S 至 25°N 范围内表现出显著的纬向镜像对称特征。具体而言，赤道南北两侧的相位结构在同一时刻保持高度连贯，未观测到跨越赤道的显著相位反转。

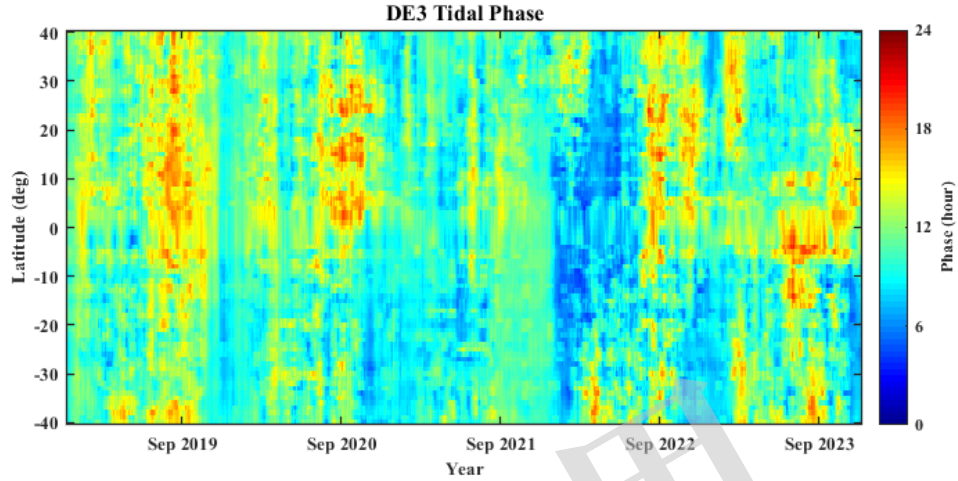


图 3 2019 - 2023 年 GOLD 观测反演获得的 160 公里高度 DE3 潮汐相位（地方时）

Fig. 3 Spatio-temporal evolution of the DE3 tidal phase at 160 km derived from GOLD observations during 2019 - 2023.

具有较短垂直波长的反对称模态（Anti-symmetric modes）在向上传播过程中极易受到分子粘性和热传导的强烈耗散，因此观测到的相位主要反映了受大尺度背景大气环流调制的对称波动。值得注意的是，2021 年秋季的相位分布表现出独特的锁定与突变特征。与振幅的爆发性增强相对应，该时段相位发生了显著偏移，从常规年份（2019、2020 及 2022 年）秋分前后的 12 - 18 小时范围，整体迁移并稳定锁定在 0 - 6 小时区间。这种相位的整体迁移暗示了该年份潮汐激发的源相（Source Phase）或垂直传播条件（如背景风场相位）发生了根本性改变。同时，强振幅时段的相位表现出极高的时空相干性，表明当潮汐能量占主导地位时，其相位结构能够在大范围内保持高度锁定，抗干扰能力显著增强。整体上相位随纬度的变化较小，说明 DE3 潮汐波前的纬向结构相对平坦。

2.2.DE3 潮汐的 EOF 模态分析

2.2.1.方差贡献率

为了评估 EOF 分解对 160 公里高度 DE3 潮汐振幅时空场信息的提取效率，并解析该高度潮汐信号演变的主导机制，本文计算了各阶模态的方差贡献率。如图 4 所示，DE3 潮汐信号的能量谱呈现出显著的“弥散”特征，并未如低层大气

或电离层 TEC 参数那样高度集中于单一主导模态。统计表明，前两阶模态的累积方差贡献率约为 40%，揭示了 160 公里高度作为动力学过渡区，其物理过程具有高度的复杂性与非线性。

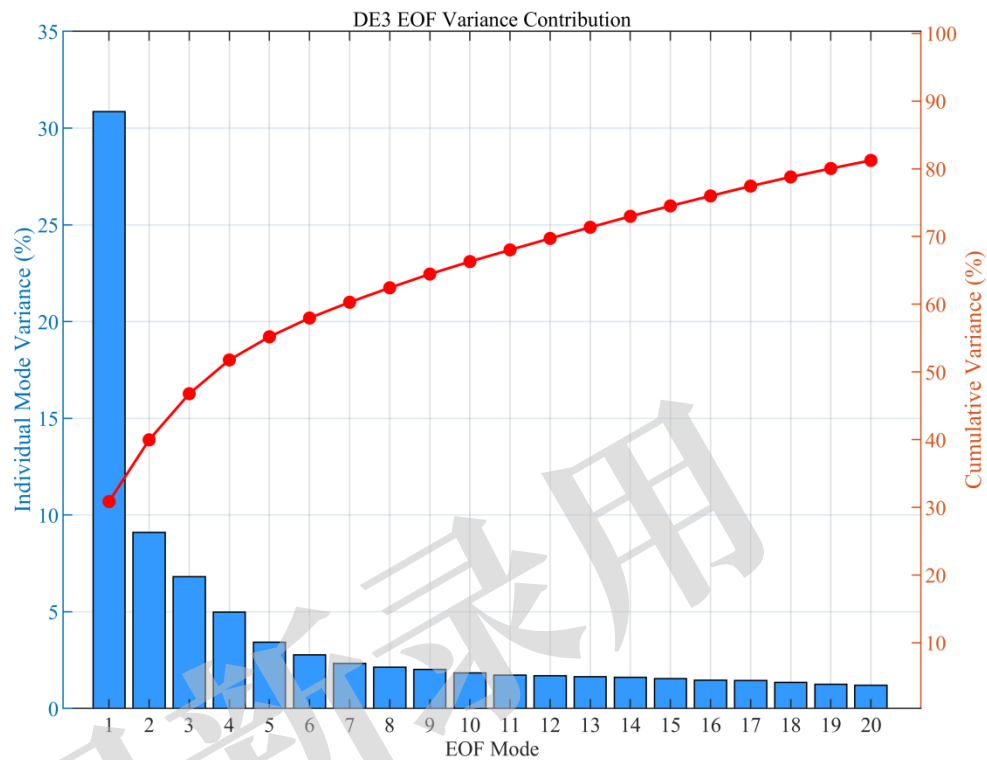


图 4 DE3 潮汐振幅场 EOF 分解所得前 20 阶模态的方差贡献率（蓝色柱状图）及累积方差贡献率（红色折线）

Fig. 4 Statistics of variance contribution for EOF modes obtained from the decomposition of the DE3 tidal amplitude field. (Blue bars indicate the variance contribution of individual modes, and the red line indicates the cumulative variance contribution).

鉴于该高度大气波动存在多尺度耦合特性，本文选取前四阶模态作为分析基准，其累积方差贡献率达到 50%。在中热层强耗散与强扰动的物理环境下，该阈值有效界定了主导气候学信号与高频随机噪声的能量边界，实现了对有效物理信息的最大化提取；前四阶模态已完整涵盖了 DE3 潮汐最核心的季节性振荡、半球不对称性及年际变化等气候学特征，足以构建该高度潮汐演变的主体骨架。这种模态能量的缓变收敛特性进一步暗示，除底层大气的垂直强迫外，热层内部可能存在显著的原位激发过程（如波-波相互作用导致的 DW5 混叠）及背景场的短时标扰动，这些次级过程在总方差中占据了不可忽视的权重，导致能量在多个模态间重新分配。

2.2.2.空间模式(EOF1-4)

前4阶空间模态揭示了DE3潮汐在160公里高度复杂的纬向结构及其主要的能量分布形式。

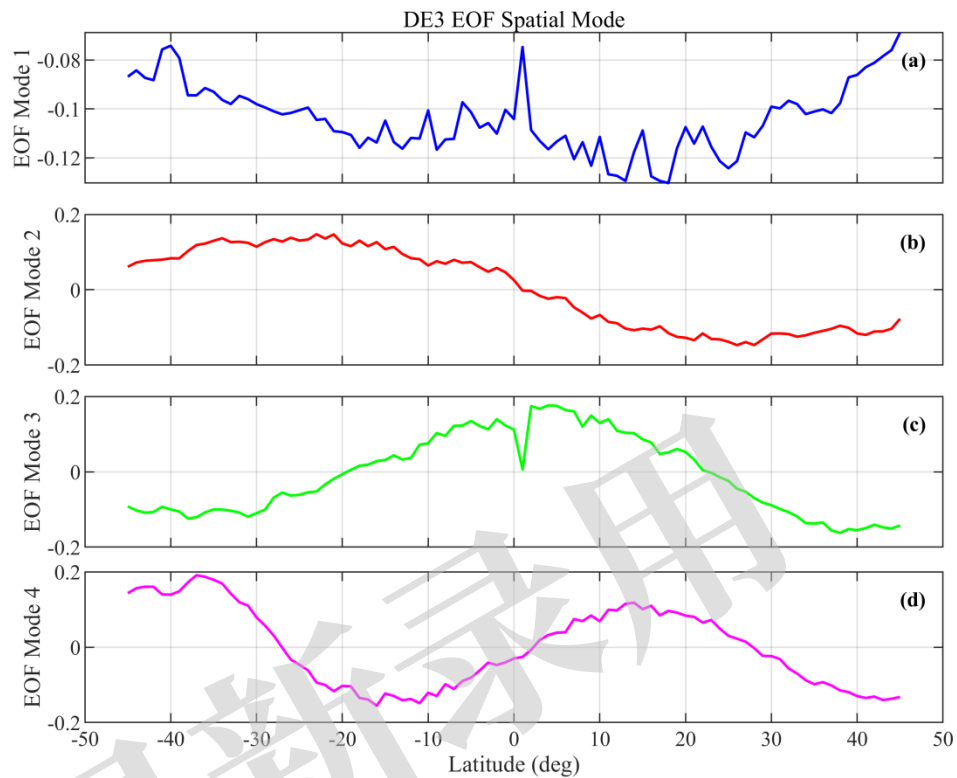


图 5 DE3 潮汐振幅场 EOF 分解所得前四阶空间模态（EOF1 - EOF4）的纬向结构分布

Fig. 5 Latitudinal structural distributions of the first four spatial EOF modes (EOF1–EOF4) obtained from the DE3 tidal amplitude field decomposition

第一阶空间模态（EOF1）作为方差贡献最大的主导模态，其空间基函数在纬度分布上呈现出显著的赤道对称性（Equatorial Symmetry）。从图 5 中可以看出，EOF1 的高值区主要集中在赤道及低纬度区域，且呈现出关于赤道的镜像分布形态。在 160 公里的中热层高度，由于分子耗散作用的增强，具有较短垂直波长的反对称模态在向上传播过程中被有效滤除，因此观测到的 DE3 主导信号主要由垂直波长较长、受耗散影响较小的第一对称模态构成。EOF1 有效捕捉了这一最核心的物理特征，代表了 DE3 潮汐受大尺度背景环境（如太阳辐射加热）控制的最基本纬向形态。

与 EOF1 的对称结构截然不同，第二阶空间模态（EOF2）表现出显著的南北

半球反对称性 (Hemispheric Anti-symmetry)。该模态曲线在南半球为正值 (高值区位于 20°S 附近)，在跨越赤道后迅速转为负值，并在北半球 (约 20°N) 达到负峰值。这种反对称模态反映了 DE3 潮汐在传播过程中受到了半球间差异性的调制作用。尽管 SE2 等潮汐成分通常表现出北半球强于南半球的特征，但此处 DE3 的反对称分量可能捕捉到了由季节性背景风场 (如跨赤道风) 或海陆分布差异引起的热力不对称效应，导致潮汐能量在南北半球之间分配不均。此外，第三阶 (EOF3) 和第四阶 (EOF4) 空间模态呈现出更为复杂的纬向波动结构，具有更多的节点和更窄的波包。一般而言，高阶模态通常用于描述数据中更精细的结构变化。在 160 公里高度，这些模态可能对应于潮汐波理论中的高阶 Hough 模态，或者是对局地小尺度扰动的响应。这可能反映了热层内部复杂的动力学过程 (如原位激发潮汐或非线性相互作用) 对主导潮汐结构的次级修正。综上所述，EOF 空间模式分析表明，160 公里高度的 DE3 潮汐在空间上由一个主导的对称模态 (EOF1) 和一个调节性的非对称模态 (EOF2) 共同构建，高阶模态则进一步丰富了其纬向细节。这种模态分离验证了该高度潮汐动力学的复杂性，即在保持大尺度对称传播特征的同时，受到显著的半球不对称强迫及局地物理过程的影响。

2.2.3. 主成分时间变化

作为连接空间模态与时间演变的纽带，DE3 潮汐振幅 EOF 分解所得的前 4 阶主成分时间系数 (PC1-PC4) 序列的波动轨迹揭示了潮汐信号在不同时间尺度上的振荡规律及特定年份的异常扰动特征。

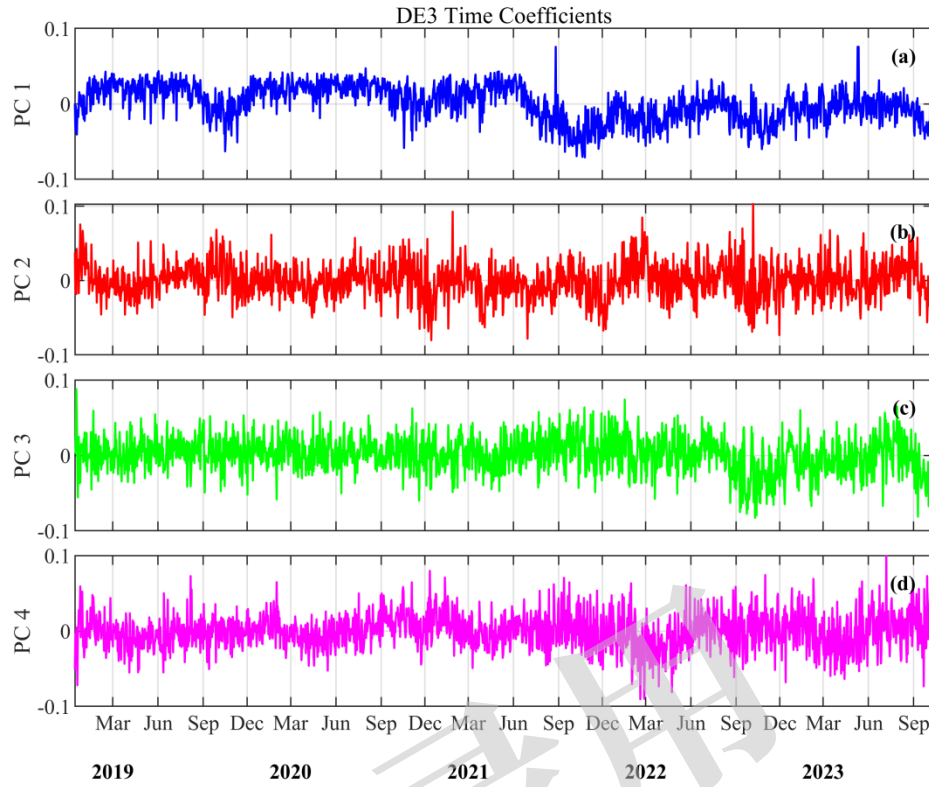


图 6 对应于前四阶空间模态的主成分时间系数（PC1 - PC4）的时间演化序列

Fig. 6 Temporal evolution series of the principal component coefficients (PC1-PC4) corresponding to the first four spatial modes.

第一主成分（PC1）解释了最大的方差贡献，在 2019 年至 2020 年期间，PC1 呈现出围绕零值的准季节性振荡，对应于该时段较弱的潮汐振幅背景。值得注意的是，2021 年的 PC1 演变表现出显著的负向偏移特征：自该年春季起，PC1 数值大幅下降并持续维持在负值区间，且在秋季达到极小值。这种波动与 DE3 潮汐在春秋分活跃的总气候学特征相符，表明 EOF1 模态承载了潮汐季节性变化的主体能量。然而，2021 年的演变轨迹发生了显著的结构突变：年初春季出现极强的正向尖峰后，PC1 在随后的年中至秋季大幅下探并维持在负值区间。结合前文关于 2021 年秋季振幅爆发性增强的观测，这一反常的负值暗示了该时段潮汐的空间结构可能发生了相位翻转或模态重组，即此时主导潮汐形态的 EOF1 贡献为负，意味着潮汐的纬度分布重心发生了显著偏移。

与 PC1 的低频振荡不同，第二主成分（PC2）表现出显著的高频波动特征，尤其在每年的春分和秋分前后振幅显著增大。这种波动反映了季节转换期间大气背景风场（如跨赤道流）调整对非对称模态的激发作用。特别值得注意的是，在 2021 年秋季 PC1 转负的异常时段，PC2 表现出强烈的正向脉冲。这表明非对称

模态在此期间对总潮汐场的贡献显著增加,可能通过能量的重新分配在维持该年份的异常高振幅中起到了关键的补偿作用。此外,高阶模态(PC3和PC4)的时间序列呈现出更高频率的随机波动,且在2021年至2022年期间波动幅度明显增强。这些不规则变化捕捉了热层内部短时间尺度的动力学过程,可能对应于原位激发潮汐(如DW5)与DE3发生非线性相互作用产生的瞬态信号。综上所述,EOF时间序列分析表明,160公里高度DE3潮汐的时间演变是由主导的季节性振荡与季节转换期的非对称扰动共同构成的;而2021年出现的模态反转与高阶模态活跃,有力印证了该年份潮汐动力学的特殊性与复杂性。

2.3.讨论与对比

为了将160公里高度的特征与MLT区域进行直观对比,本文引入了基于TIMED卫星长期观测获取的100公里高度DE3潮汐气候学统计图形(图6)。对比本文160公里高度的温度振幅(图2)与图6中较低高度的纬向风振幅可以发现,尽管两者在宏观上均在赤道区域表现出显著的对称结构,并呈现出“夏秋季强”的整体态势,但其演变规律与物理机制存在本质差异。在110公里的中间层/低热层(MLT)区域,DE3潮汐表现为经典的向上传播特征[35],其振幅在北半球夏季至初秋(6月至9月)达到最强,呈现出以9月为中心的稳定主峰,这主要归因于热带对流层潜热释放的季节性驱动。然而,GOLD在160公里高度观测到的DE3信号虽然保留了秋季(9月至11月)增强的特征,但其峰值出现时间存在显著的年际延迟(如2020年推迟至10月后),且整体季节性变化与观测到的向上传播潮汐并不具备相关性。这种差异表明160公里处的潮汐场并非低层大气潮汐的简单线性延展,而是受到了热层内部复杂动力学过程的调制。

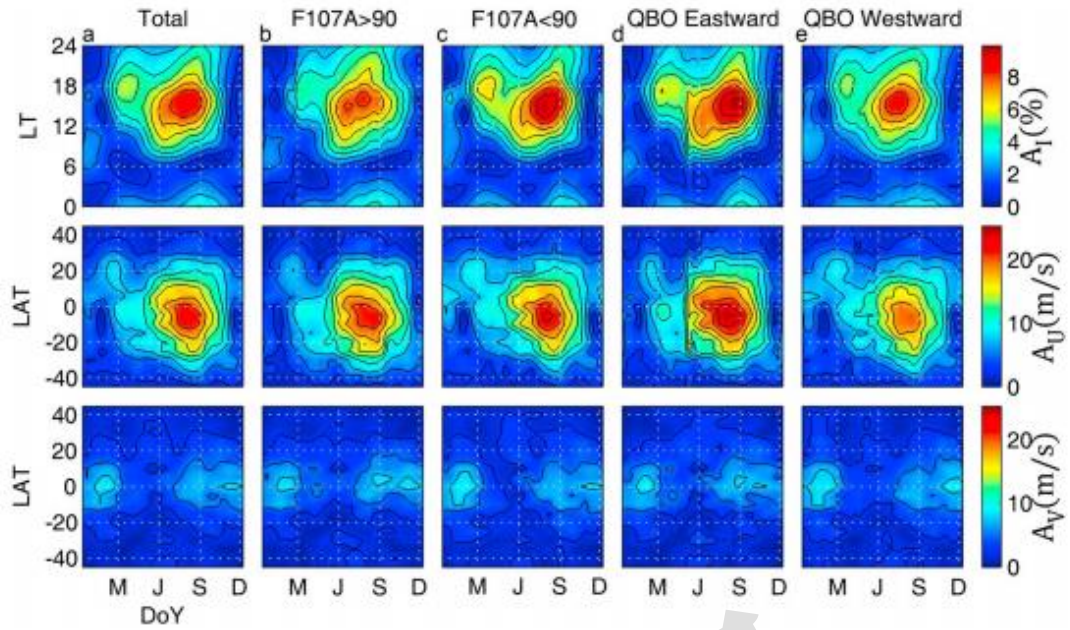


图 7 100 公里高度 DE3 潮汐纬向风 (A_U) 与经向风 (A_V) 振幅的气候学季节-纬度分布[35]

Figure 7. Climatological seasonal-latitudinal amplitude distributions of the 100 km DE3 tidal zonal (A_U) and meridional (A_V) winds

3.总结与结论(Summary and Conclusions)

本文利用 2019 - 2023 年 GOLD 的 TDISK 观测数据，基于“四波结构”物理假设，采用针对地球静止轨道特性的波数谱拟合方法，成功提取并解析了 160 公里高度 DE3 潮汐的时空演变特征。本文突破了对单一现象的描述，通过 EOF 分解深入揭示了该高度潮汐动力学过程的复杂性。主要结论如下：

确认了中热层 DE3 潮汐固有的气候学属性：160 公里高度的 DE3 潮汐表现出显著区别于低热层(MLT)的季节性演变，其振幅峰值并非出现在夏秋交替期，而是稳定锁定在秋分（9 - 11 月）之后。这证明了该高度的潮汐场并非低层大气强迫的简单线性延展，而是经历了复杂的垂直调制。

揭示了异常响应的非线性特征：2021 年秋季 DE3 潮汐出现了爆发性增强，且相位发生了显著的整体迁移（从 12 - 18 小时移至 0 - 6 小时）。这一发现为理解热层大气在特定环境背景下（如太阳活动、地磁扰动）的短时突变和非线性波-波相互作用提供了直接的观测证据。

解构了 DE3 信号的多模态协同机制：EOF 分析证实，160 公里高度的 DE3 信号并非由单一模态主导。第一模态（EOF1）代表受大尺度背景约束的赤道对称传播结构；而第二模态（EOF2）则反映了季节转换期半球不对称强迫的调节

作用。前两阶较低的累积方差贡献率（约 40%）进一步印证了该区域存在显著的热层原位激发和短时标动力学扰动。

本文填补了 160 公里高度非迁移潮汐 DE3 观测分析的空白。研究结果不仅深刻揭示了低层大气潮汐在向上传播穿越热层底部过渡区时的形态演化规律，更为理解中热层复杂的非线性动力学过程（如原位激发、波-波耦合与耗散机制）提供了关键的观测约束，对于完善现有的高层大气潮汐动力学模型以及深化对热层-电离层垂直耦合机制的认识具有重要的科学价值。

致谢

本文使用的数据来源于 NASA 全球尺度临边与盘面观测（Global-scale Observations of the Limb and Disk, GOLD）任务，<https://gold.cs.ucf.edu/data/search/>。公开提供。

本研究由国家自然科学基金（项目编号：42274207、42241114）支持。

参考文献(References)

- [1] LIU H L. Variability and predictability of the space environment as related to lower atmosphere forcing[J]. *Space Weather*, 2016, **14**(9): 634-658. DOI: 10.1002/2016SW001450
- [2] SASSI F, MCCORMACK J P, MCDONALD S E. Whole atmosphere coupling on intraseasonal and interseasonal time scales: a potential source of increased predictive capability[J]. *Radio Science*, 2019, **54**(11): 913-933. DOI: 10.1029/2019RS006847
- [3] CHAPMAN S, LINDZEN R S. Atmospheric Tides: Thermal and Gravitational[M]. Dordrecht: Springer, 1970
- [4] Forbes, J.M. (1995). Tidal and Planetary Waves. In *The Upper Mesosphere and Lower Thermosphere: A Review of Experiment and Theory* (eds R.M. Johnson and T.L. Killeen). <https://doi.org/10.1029/GM087p0067>
- [5] Hines, C. O. (1966), Diurnal tide in the upper atmosphere, *J. Geophys. Res.*,

71(5), 1453 – 1459, doi:10.1029/JZ071i005p01453.

- [6] HAGAN M E, MAUTE A, ROBLE R G, *et al.* Connections between deep tropical clouds and the Earth' s ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(20): L20109. DOI: 10.1029/2007GL030142
- [7] HAGAN M E, FORBES J M. Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D24): 4754. DOI: 10.1029/2001JD001236
- [8] OBERHEIDE J, HAGAN M E, ROBLE R G, *et al.* Sources of nonmigrating tides in the tropical middle atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2002, **107**(D21): 4567. DOI: 10.1029/2002JD002220
- [9] FORBES J M, BRUINSMA S L, ZHANG X L, *et al.* Surface - exosphere coupling due to thermal tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(15): L15812. DOI: 10.1029/2009GL038748
- [10] ZHANG X L, FORBES J M, HAGAN M E, *et al.* Monthly tidal temperatures 20-120 km from TIMED/SABER[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A10): A10S08. DOI: 10.1029/2005JA011504
- [11] ZHANG X L, FORBES J M, HAGAN M E. Seasonal - latitudinal variation of the eastward - propagating diurnal tide with zonal wavenumber 3 in the MLT: Influences of heating and background wind distribution[J]. *Journal of Atmospheric and Solar - Terrestrial Physics*, 2012, **78-79**: 37-43. DOI: 10.1016/j.jastp.2011.03.005
- [12] OBERHEIDE J, WU Q, KILLEEN T L, *et al.* Diurnal nonmigrating tides from TIMED Doppler interferometer wind data: monthly climatologies and seasonal variations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A10): A10S03. DOI: 10.1029/2005JA011491
- [13] WARD W E, OBERHEIDE J, RIESE M, *et al.* Tidal signatures in temperature data from CRISTA 1 mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1999, **104**(D13): 16391-16403. DOI: 10.1029/1998JD100109

- [14] Garc í a-Comas, M., Gonz á lez-Galindo, F., Funke, B., Gardini, A., Jurado-Navarro, A., López-Puertas, M., and Ward, W. E.: MIPAS observations of longitudinal oscillations in the mesosphere and the lower thermosphere: climatology of odd-parity daily frequency modes, *Atmos. Chem. Phys.*, 16, 11019 – 11041, <https://doi.org/10.5194/acp-16-11019-2016>, 2016.
- [15] FORBES J M, ZHANG X, PALO S, *et al.* Tidal variability in the ionospheric dynamo region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A2): A02310. DOI: 10.1029/2007JA012737
- [16] ENGLAND S L. A review of the effects of non-migrating atmospheric tides on the Earth ' s low-latitude ionosphere[J]. *Space Science Reviews*, 2012, **168**(1/2/3/4): 211-236. DOI:
- [17] IMMEL T J, SAGAWA E, ENGLAND S L, *et al.* Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, **33**(15): L15108. DOI: 10.1029/2006GL026161
- [18] HÄUSLER K, LÜHR H, HAGAN M E, *et al.* Comparison of CHAMP and TIME-GCM nonmigrating tidal signals in the thermospheric zonal wind[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D1): D00I08. DOI: 10.1029/2009JD012394
- [19] OBERHEIDE J, FORBES J M, ZHANG X, *et al.* Climatology of upward propagating diurnal and semidiurnal tides in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A11): A11306. DOI: 10.1029/2011JA016784
- [20] GASPERINI F, FORBES J M, DOORNBOS E N, *et al.* Wave coupling between the lower and middle thermosphere as viewed from TIMED and GOCE[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(7): 5788-5804. DOI: 10.1002/2015JA021300
- [21] HE M S, LIU L B, WAN W X, *et al.* Longitudinal modulation of the O/N₂ column density retrieved from TIMED/GUVI measurement[J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, **37**(20): L20108. DOI: 10.1029/2010GL045105
- [22] KIL H, LEE W K, SHIM J, *et al.* The effect of the 135.6 nm emission originated

- from the ionosphere on the TIMED/GUVI O/N₂ ratio[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(2): 859-865. DOI: 10.1029/2012JA018112
- [23] TRUSKOWSKI A O, FORBES J M, ZHANG X L, *et al.* New perspectives on thermosphere tides: . Lower thermosphere spectra and seasonal-latitudinal structures[J]. *Planets and Space*, 2014, **66**(1): 136. DOI: 10.1186/s40623-014-0136-4
- [24] OBERHEIDE J, FORBES J M, HÄUSLER K, *et al.* Tropospheric tides from 80 to 400 km: propagation, interannual variability, and solar cycle effects[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D1): D00I05. DOI: 10.1029/2009JD012388
- [25] TEITELBAUM H, VIAL F. On tidal variability induced by nonlinear interaction with planetary waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1991, **96**
- [26] FORBES J M, ZHANG X L, HEELIS R, *et al.* Atmosphere- ionosphere (A-I) coupling as viewed by ICON: day-to-day variability due to Planetary Wave (PW)-tide interactions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(6): e2020JA028927. DOI: 10.1029/2020JA028927
- [27] KRIER C S, LIU G P, ENGLAND S L. Seasonal variability of the DE3 and DE2 non-migrating tides in middle thermospheric temperature and composition during October 2018-August 2021 as revealed by GOLD[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(8): e2025JA033819. DOI: 10.1029/2025JA033819
- [28] EASTES R W, MCCLINTOCK W E, BURNS A G, *et al.* Initial observations by the GOLD mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(7): e2020JA027823. DOI: 10.1029/2020JA027823
- [29] MCCLINTOCK W E, EASTES R W, HOSKINS A C, *et al.* Global-scale observations of the limb and disk mission implementation: 1. Instrument design and early flight performance[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(5): e2020JA027797. DOI: 10.1029/2020JA027797
- [30] EVANS J S, LUMPE J D, EASTES R W, *et al.* Disk images of neutral

temperature from the Global-scale Observations of the Limb and Disk (GOLD) mission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(6): e2024JA032424. DOI: 10.1029/2024JA032424

- [31] KRIER C S, ENGLAND S L, GREER K R, *et al.* Deducing non-migrating diurnal tides in the middle thermosphere with GOLD observations of the Earth's far ultraviolet dayglow from geostationary orbit[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(10): e2021JA029563. DOI: 10.1029/2021JA029563
- [32] KRIER C S, ENGLAND S L, MEIER R R, *et al.* Reducing the ionospheric contamination effects on the column O/N₂ ratio and its application to the identification of non-migrating tides[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(4): e2022JA031148. DOI: 10.1029/2022JA031148
- [33] KRIER C S, ENGLAND S L. Semidiurnal non-migrating tides in the middle thermosphere from far ultraviolet observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(4): e2023JA032102. DOI: 10.1029/2023JA032102
- [34] CHEN Z W, ZHANG S R, COSTER A J, *et al.* EOF analysis and modeling of GPS TEC climatology over North America[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(4): 3118-3129.
- [35] WAN W, XIONG J, REN Z, *et al.* Correlation between the ionospheric WN4 signature and the upper atmospheric DE3 tide[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A11): A11303. DOI: 10.1029/2010JA015527