0254-6124/2026/46(2)-0290-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

PAN Jianhong, CAI Hongtao, YAN Xu, HU Kun, YANG Lubing, QING Haiyin, ZHANG Shiwei. Case Comparative of Simultaneous Observations of Large-scale Traveling Thermospheric and Ionospheric Disturbances (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(2): 290–299. CSTR:32142.14.cjss.2025–0069. DOI:10.11728/cjss2026.02.2025–0069

大尺度行进式热层与电离层扰动同步观测的事例对比*

潘建宏[1] 蔡红涛[2] 闫 旭[2] 胡 坤[3]
杨璐冰[2] 青海银[1] 张世炜[1]

1(乐山师范学院电子信息与人工智能学院 乐山 614000)

2(武汉大学地球与空间科学技术学院 武汉 430072)

3(山东航空学院信息工程学院 滨州 256600)

摘 要 为了对比热层–电离层中相伴传播的大尺度行进式大气层扰动与大尺度行进式电离层扰动的传播特征差异, 利用 CHAMP 卫星可以同时共体跨纬度观测大气质量密度和电子密度的优势, 研究了 2002 年 3 月 19 日一对远距离相伴传播的 LSTAD 与 LSTID 事件. 在当日 04:00－06:00 UT 期间, 伴随着 *AE* 指数的突然显著增强, CHAMP 卫星随即在北半球观测到了相伴传播的 LSTAD 与 LSTID. 在 04:00 UT 以后大约 6 h 内, 这些大气质量密度与电子密度的扰动一直向南传播, 穿过赤道并进入南半球, 最终在南半球耗散消失. 此外, 地面 GNSS 台链的观测结果也印证了卫星观测到的 LSTID 的真实存在. 经过对比分析表明, 由于电子运动受到洛伦兹力的高度控制, 而中性粒子不受洛伦兹力约束, 所以由同一源区激发且相伴传播的 LSTAD 与 LSTID 沿子午向的水平传播速度表现出明显差异, 导致在同一轨道上同一时刻同一位置二者的相位并不相同甚至差别明显.

关键词 大尺度行进式大气层扰动, 大尺度行进式电离层扰动, 传播特征, 同步观测

中图分类号 P352

Case Comparative of Simultaneous Observations of Large-scale Traveling Thermospheric and Ionospheric Disturbances

PAN Jianhong[1] CAI Hongtao[2] YAN Xu[2] HU Kun[3]
YANG Lubing[2] QING Haiyin[1] ZHANG Shiwei[1]

1(*College of Electronic Information and Artificial Intelligence*, *Leshan Normal University*, *Leshan* 614000)

2(*School of Earth and Space Science and Technology*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072)

* 四川省科技计划项目资助 (2025ZNSFSC0315)

2025-04-24 收到原稿, 2025-08-29 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/)

3(*School of Information Engineering, Shandong University of Aeronautics, Binzhou* 256600)

Abstract To compare the propagation characteristics of Large-Scale Traveling Atmospheric Disturbances (LSTAD) and Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (LSTID) that propagate in tandem in the thermosphere-ionosphere, this paper takes advantage of the CHAMP satellite's ability to simultaneously observe atmospheric mass density and electron density across latitudes, studying a pair of LSTAD and LSTID events that propagated in tandem over long distances on 19 March 2002. Around 04:00－06:00 UT on 19 March, with a sudden and significant increase in the AE index, the CHAMP satellite observed the LSTAD and LSTID propagating in tandem in the Northern Hemisphere. Over the next approximately 6 h after 04:00 UT, these disturbances in atmospheric mass density and electron density propagated southward, crossed the equator, and entered the Southern Hemisphere, eventually dissipating there. On the other hand, the ground-based GNSS chain observations also confirmed the existence of the LSTID observed by the satellite. Through comparative analysis, it was found that due to the highly controlled movement of electrons by the Lorentz force while neutral particles are not constrained by it, the horizontal propagation speeds of LSTAD and LSTID along the meridian direction show significant differences. Therefore, at the same time and position on the same orbit, their phases are not the same and may even differ significantly.

Key words Large-Scale Traveling Atmospheric Disturbances (LSTAD), Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (LSTID), Propagation characteristics, Simultaneous observations

0 引言

热层与电离层之间能量、动量的传输与交换是热层–电离层耦合过程的重要研究内容. 其中大尺度 (波长>1000 km) 行进式大气层扰动 (Large-scale Traveling Atmospheric Disturbance, LSTAD) 是热层–电离层间一种能量与动量交换及输运的重要物理过程[1–4], 在全球大气能量的传输与再分配过程中具有非常重要的作用[5–9]. 而行进式电离层扰动 (Traveling Ionospheric Disturbance, TID) 当前被学术界普遍解释为行进式大气层扰动 (Traveling Atmosphere Disturbance, TAD) 在电离层中引起的物理响应[10].

近百年来, 在这一领域开展了大量的理论研究和实验观测. 早期由于受到观测手段的限制, 首先探测到的是 TID. 最早的观测可追溯到 20 世纪 30 年代. 后来 Munro[11,12] 在近 10 年内通过脉冲式电离层探测仪观测了 14000 余次电离层行进式扰动, 这些工作为证明 TID 的存在提供了大量可信的观测证据. 在接下来的半个世纪里, 对 TID 做了大量的实地观测和数值模拟[8], 针对 TID 从高纬极区向低纬区域的传播特征组织了多次大型国际联合观测[13,14]. 关于 TID 的形成机制, 1950 年 Martyn[15] 提出 TID 与背景中性大气中的涡状波结构有联系, 这向揭示 TID 的物理本质方向跨出了一大步. Hines[10] 提出了大气声重波理论, 认为 TID 是电离层对背景中性大气声重波的动力学响应, 这是迄今为止学术界对 TID 形成的物理机理最为广泛接受的解释.

近 30 年来, 由于大部分观测工作集中于电离层, 因此相关领域的研究主要集中于针对强地磁扰动期间 TID 的全球传播特征及其扰动源区物理机制的研究. Shiokawa 等[16] 利用 MU 雷达及其他观测手段, 分析了 2001 年 3 月 31 日的强磁暴主相期间在日本上空电离层观测到的 TID 的传播特征, 并对扰动激发源进行了理论探讨. Valladares 等[17] 通过全球 GPS TEC 观测数据分析了 2003 年 10 月强地磁暴期间南北半球同时观测到的 TID, 发现南北半球观测到的 TID 在扰动幅度、水平传播速度与水平波长等方面存在明显差异. Ding 等[18] 对 2003－2005 年强磁暴期间 LSTID 在中纬度区域的传播特征做了大量统计分析, 其认为极光和地磁扰动对中纬度观测到的 TID 起着主要的控制作用. Zhou 等[19] 利用电离层多站高频返回式探测系统分析了在地磁平静期中低纬区域日侧观测到的 LSTID 事件. Ding 等[20] 利用 GPS 台网对比分析了亚洲和美洲上空观测到的

LSTID 传播特征的异同. 综上所述, 绝大多数观测分析工作均是试图通过对 TID 的观测分析实现间接了解 TAD 的目的. 近年来, 随着观测数据的日益丰富, 学术界对于 TID 的观测研究越来越多, 但是大多集中于对于观测到的 TID 事例的水平波长、传播周期、水平传播速度、传播方向、波前宽度等传播特征的简要报道[21–23] 以及部分激发原因的简要分析[24], 而对于 TAD 的观测研究相对较少, 更鲜有针对 TAD 与 TID 传播特征差异的对比分析.

20 世纪在热层观测数据相对缺乏的情况下, 数值模拟为深化理解 LSTAD 与 LSTID 的传播特征发挥了重要作用. 例如, Richmond[25]、Millward 等[26]、Fuller-Rowell 等[27]、Fujiwara 等[28] 和 Balthazor 等[29] 通过数值模拟方法研究了 LSTAD/LSTID 在各种强扰动期间的响应特征. Lu 等[30] 将基于真实观测数据驱动的高纬能量输入与电离层–热层动力学模型相结合, 较好地描述了暴时热层扰动和行进式电离层扰动的生成. Fujiwara 和 Miyoshi[31] 利用全球大气环流模型 (GCM) 对强地磁扰动期间的 LSTID 响应特征进行了数值模拟. Qian 等[32] 通过数值模拟研究了 LSTAD/LSTID 对太阳耀斑的响应特征. 但大多数数值模拟聚焦于 LSTAD/LSTID 对极区假设能量输入的物理响应特征, 而不是以获得与实际观测特征相符合的理论计算结果为研究目的.

Shiokawa 等[16] 首次详细对比了数值模拟的 LSTAD/LSTID 与实际观测结果间的异同, 然而研究并未将 LSTAD 数值模拟结果与 LSTID 观测结果加以区分. 这就引出一个关键问题, 在同一个源区激发并相伴传播的过程中, 实际观测到的 LSTAD 与 LSTID 的响应特征与演化规律是否完全相同, 二者传播特征及其背后的物理机制是否存在差异.

本文利用近圆极轨卫星 CHAMP 能够同时共体大跨度探测热层/电离层密度的观测优势, 辅以地面台站对 LSTID 的观测结果, 并且结合相关地磁指数, 对比研究了一次极区激发的同时段相伴传播的 LSTAD 与 LSTID 传播特性的异同, 并且分析了二者传播特征差异的主要物理原因, 对于厘清 LSTAD 与 LSTID 的差异性具有重要的科学意义.

1 观测数据与处理方法

2000 年 7 月 15 日, CHAMP 卫星发射至 470 km 左右高度, 其轨道倾角为 87.3°. 中性大气质量密度数据由 STAR 加速度仪测量算出, 时间分辨率为 10 s; 电子密度由朗缪探针 (PLP) 测量得到, 时间分辨率为 15 s. 为了消除因卫星运行过程中高度变化引起的密度起伏, 本文所用的大气质量密度与电子密度数据已分别根据 MSISE[33] 和 IRI 模型[34] 归一化至 400 km 高度.

对于大气质量密度扰动的提取, 本文利用滑动平均去背景的方法得到[35,36], 分别对 CHAMP 卫星观测到的大气质量密度进行 33/151 个数据的滑动平均, 从而可以得到介于 1300～5600 km 尺度范围的大气密度扰动.

而对于电子密度扰动, 电离层赤道异常结构沿卫星轨道方向的空间尺度与 LSTID 波长可比拟. 以往有研究采用经验正交分解方法 (EOF) 成功地将卫星观测数据的时间/空间变化分离[20], 实际结果也表明, 采用 EOF 系列的前 3 阶分量, 通常可保留原始数据 90% 以上的信息. 但是由于本文所观测的 LSTID 出现在早上 06:50 LT 左右, 而此时赤道异常结构还未开始形成, 因此本文采用了滑动滤波方法去除背景电子密度.

获取每个轨道上的大气与电子密度相对扰动后, 研究根据卫星飞跃赤道附近的地方时, 将观测数据分为日侧/晨侧与夜侧/昏侧两部分; 根据世界时和地理纬度组织数据, 即可分别得到卫星在日侧/晨侧与夜侧/昏侧观测到的大气与电子密度扰动分布图. 若存在 LSTAD/LSTID, 则大气质量/电子密度扰动分布图在连续轨道间会表现为随着纬度逐渐偏移的相似扰动.

2 观测结果

2.1 空间地磁环境

图 1 给出了 2002 年 3 月 18 日 21:00 UT 至 2002 年 3 月 19 日 23:00 UT 的 Kp 指数与 Dst 指数变化情况, 在 19 日 00:00－03:00 UT 时段 Kp 指数为 5, 在 03:00－06:00 UT 时段 Kp 指数为 5^+, 其中 06:00 UT 时, Dst 指数达到了最小值–37 nT, 说明 00:00－06:00 UT 时段出现了一次小规模地磁暴, 而且正好出现在卫星所观察到的 LSTAD 与 LSTID 紧邻的前一时段 (卫星观测到 LSTAD 与 LSTID 出现在 05:00 UT

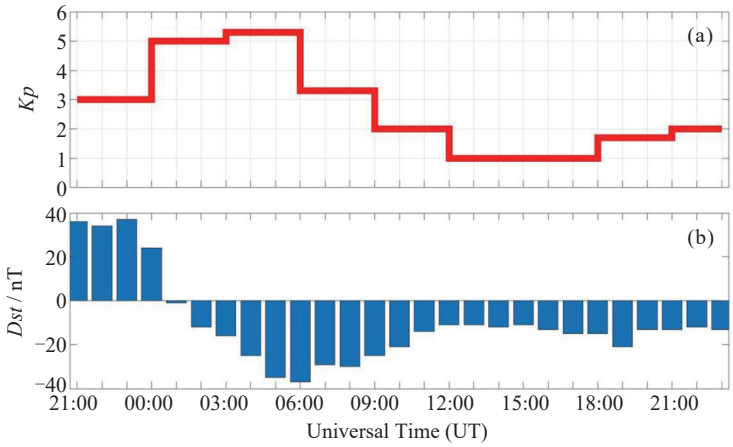

图 1　2002 年 3 月 19 日 *Kp* 与 *Dst* 指数日变化情况

Fig. 1　Diurnal variations of *Kp* and *Dst* index on 19 March 2002

以后), 地磁暴启动与 LSTAD/LSTID 在时序上先后依次出现.

图 2 给出了 19 日极光电集流指数日变化. 其显著特征是 *AE* 指数经历了 2 次快速增强, 其余时段内均不超过 200 nT. *AE* 指数的第一次增强发生在子夜 00:00 UT 以后, 从大约 100 nT 快速上升至 500 nT 左右, 大约持续了 2.5 h; 第二次增强发生在 04:00—06:00 UT 之间, 迅速从 300 nT 上升至 865 nT, 持续了 2 h. *AE* 指数的快速增强, 说明有大量来自磁层的能量进入地球电离层高度, 而且也正好发生在图 3 所示 LSTAD 与 LSTID 传播过程的前一时段.

2.2　CHAMP 卫星观测结果

图 3 给出了 CHAMP 卫星在 2002 年 3 月 19 日观测到的晨侧大气质量密度和电子密度的相对扰动情况. 黑色斜实线表示卫星轨道, 卫星观测到的 LSTAD 与 LSTID 的波峰与波谷沿经线方向 (即子午向) 的传播用黑色虚线箭头标出.

AE 指数在 04:00—06:00 UT 快速增强 (见图 2), 此时 CHAMP 卫星还处于昏侧 (大约 18:50 LT) 南半球. 大约 04:21 UT, CHAMP 越过南极进入了晨侧南半球, 如图 3(a) 第 4 根轨道底部所示, 向北半球飞行 (见图 3a 中第 4 根轨道). 卫星在北半球观测到两个连续分布且显著的大气密度扰动的波峰与波谷, 如图 3(a) 所示; 扰动幅度随着纬度增加, 幅度较大的为波峰, 出现在 75°N 附近. 随后, 卫星越过北极进入昏侧轨道. 大约在 05:55 UT 再次进入晨侧轨道 (见图 3a 第 5 根轨道) 后, CHAMP 卫星再次遇见上述两个大气密度扰动, 只是相遇的纬度与上次相比, 表现

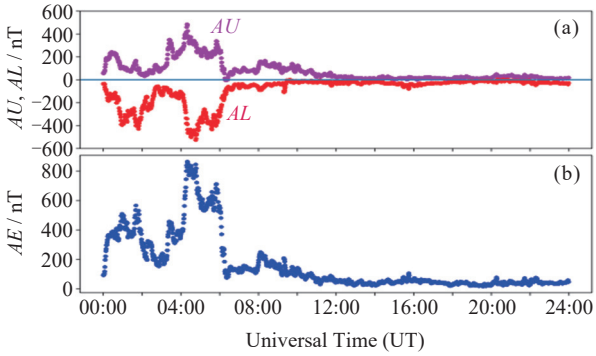

图 2　2002 年 3 月 19 日极光电集流指数日变化

Fig. 2　Diurnal variations of Auroral Electrojet (*AE*) index on 19 March 2002

出明显的南移. 在随后的第 6 根轨道上, 卫星第三次观测到波峰与波谷扰动, 此时波峰与波谷已经全部传播至南半球. 在第 7 次晨侧穿越过程中, 波峰移动到 42°S 左右并且继续传播至 81°S (第 8 根轨道) 附近; 到第 7 根轨道波谷几乎已经耗散消失.

图 3 中已用黑色虚线箭头将上述 CHAMP 卫星在晨侧第 4 根轨道以后飞越过程中观测到的大气密度的波峰与波谷串连起来. 由图 3 可知, 这些大气密度扰动随着时间沿子午向有规律地依次向南传播, 这是一个典型的 LSTAD 事件.

CHAMP 卫星在上述飞行过程中, 其搭载的朗缪尔探针同时也观测到了电子密度类似的扰动特征, 如图 3(b) 所示. 值得注意的是, 与图 3(a) 不同, 图 3(b) 中正负相间的电子密度扰动的向南传播现象是从第 5 根轨道上才开始被观测到; 第 4 根轨道上仅观测到明显的密度增强, 但是从第 4 根到第 5 根轨道, 密度

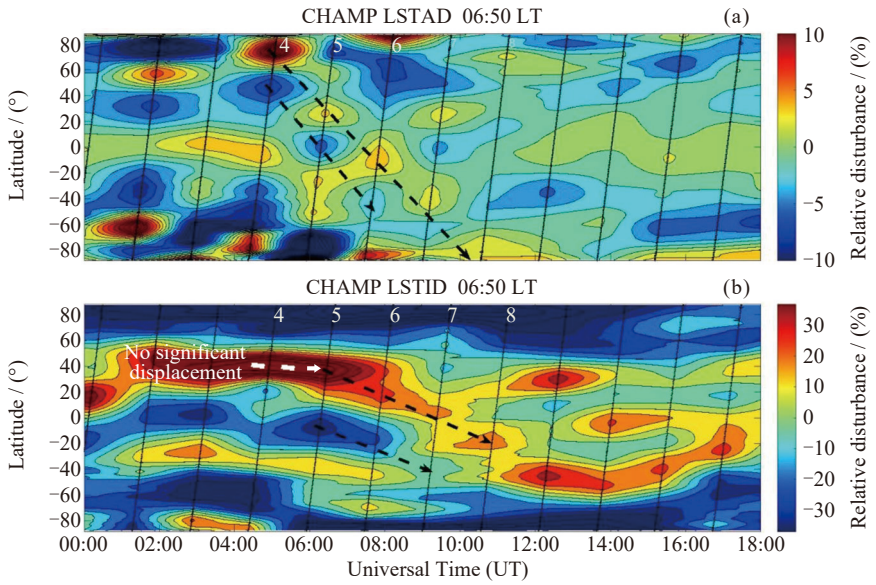

图 3 2002 年 3 月 19 日 CHAMP 卫星观测到的晨侧大气与电子密度扰动 (黑色斜实线表示卫星轨道, 黑色虚线箭头表示 LSTAD 与 LSTID 的波峰和波谷沿纬度方向的传播路径)

Fig. 3 CHAMP satellite observed morning-side perturbations in atmospheric and electron density on 19 March 2002 (The solid black diagonal line represents the satellite orbit, and the dashed black arrows indicate the propagation paths of the wave crests and troughs of LSTAD and LSTID along the latitudinal direction)

增强区并未表现出非常明显的向南传播, 这正是本次事件值得后文详细研究之处. 但在随后的连续 3 根轨道 (图 3b 中第 5 至第 7 根轨道) 上, 这些电子密度扰动也显示出依次规律地向南传播特征, 最终均越过赤道, 耗散在南半球. 黑色虚线也标识出了其在传播过程中被 CHAMP 卫星记录下的纬度轨迹; 同样也表现出明显有规律的向南偏移, 这是典型的 LSTID 传播特征.

综上所述, CHAMP 卫星同时观测到了从北半球向南长距离传播的 LSTAD 与 LSTID 事件. 由此可以根据其密度扰动在卫星连续飞越地球上空期间的位置变化信息, 即图 3(a)(b) 中虚线箭头斜率, 估计出其沿卫星轨道方向的水平传播速度. 经计算, LSTAD 的平均水平传播速度大约为 870 $m\cdot s^{-1}$, 而 LSTID 仅约为 436 $m\cdot s^{-1}$, 二者的平均水平传播速度表现出显著的差异, 其背后的原因值得关注研究.

2.3 LSTID 的地面观测结果

综上 CHMAP 卫星观测到的 LSTID 同时也被地面 GNSS 台链观测到. 地面 GNSS 接收机被广泛用于 LSTID 的监测[37–39]. 利用沿着子午方向分布的 GNSS 台链, 可以对 LSTID 传播特性展开有效监测[6]. 在 CHAMP 卫星 04:00—10:00 UT 期间飞越欧洲大陆上空过程中, 研究选取了若干个沿子午向分布的 GNSS 地面接收站组成观测链. 各台站的位置信息如表 1 所示, 这些 GNSS 接收站沿 0°经线左右排列, 台站间子午向距离 100～400 km 范围内.

图 4(a) 与图 5(a) 分别给出了上述 GNSS 接收台链与 G05 和 G09 卫星间的斜 TEC (sTEC) 扰动 (sTECP), 图 4(b) 与图 5(b) 给出了对应台站的穿刺点轨迹, 其中最北端的台站 Shee 与最南端的台站 Alme, 二者纬度相差 14.75°, 台站间地面南北距离大约为 1638 km, 对应到 400 km 高度的南北距离大约为 1742 km, 这足以观测 LSTID 在一个完整波长范围内的扰动.

从图 4 可知, 正负相间的 sTEC 扰动在从北向南的各台站依次被观测到, 并且表现出波形相似、相位依次延后的周期性变化特征. 仔细对比各台站 sTEC 相位的变化, 不难看出其波峰与波谷均表现出明显的随时间向南移动, 如图 4 和图 5 中黑色虚线所示. 这是典型的 LSTID 传播特征: 电子密度扰动从北半球高纬向赤道方向传播, 其 sTEC 扰动先被位于较高纬度的台站观测到, 然后依次在各台站上空留下了相似的扰动曲线, 并且波峰波谷出现时间依次延后.

利用各台站观测到的 sTEC 扰动的时间差, 可估

算出 LSTID 的平均水平传播速度约为 537 m·s^{-1}, 虽然比 CHAMP 卫星观测估计的结果稍高, 但是仍明显低于 LSTAD. 地面台链观测的 LSTID 的水平传播速度与卫星观测结果的差异, 可归因于探测方法的偏差. 由 GPS 卫星运动引起穿刺点的运动速度, 可达 60～70 m·s^{-1}[16].

地面 GNSS 台链的观测结果一方面印证了 CHAMP 卫星观测到 LSTID 存在的真实性, 同时也弥补了卫星在北半球更高纬度 (Shee 台站纬度约为 51.3°N) 对 LSTID 观测信息的缺失 (见图 3b), 这说明卫星观测到的 LSTID 来自更高的纬度区域. 结合 *Dst* 指数、*AE* 指数在 04:00－06:00 UT 增强与卫星随后在 05:00－09:00 UT 观测到 LSTAD 与 LSTID 的先后顺序, 可以推测在 04:00－06:00 UT 时段, 随着磁层能量进入昏侧极光椭圆区 (*AE* 指数的突然增强), 中性大气/电子密度先后对此次能量输入做出响应. 在极区晨侧或昏侧被激发的 LSTAD 与 LSTID 一部分直接向低纬区域传播, 可能还有一部分向更高纬度方向传播, 最终越过极盖区到达昏侧或晨侧再向低纬区域传播, 总之, 在经过欧洲大陆上空过程中被 CHAMP 卫星和地面 GNSS 台链观测到. Cai 等[5] 分析了夜侧激发的 LSTID 向极区传播, 然后越过夜侧极盖到达日侧中纬度地区的观测事例.

表 1　GNSS 地面台站的位置信息

Table 1　Locations of ground-based GNSS receivers

Site code	Geographic latitude and longitude
Shee	51.264°N, 0.44°E
Hers	50.86°N, 0.33°E
Chiz	46.13°N, 0.41°W
Lliv	42.28°N, 1.58°E
Bell	41.35°N, 1.24°E
Vale	39.48°N, 0.34°W
Alac	38.34°N, 0.48°W
Alme	36.51°N, 2.27°W

3　讨论

综上分析 CHAMP 卫星同时观测到了 LSTAD 与 LSTID 事件, 这些事件是热层与电离层对 04:00－06:00 UT 极区能量输入的物理响应, 在大约 05:00－

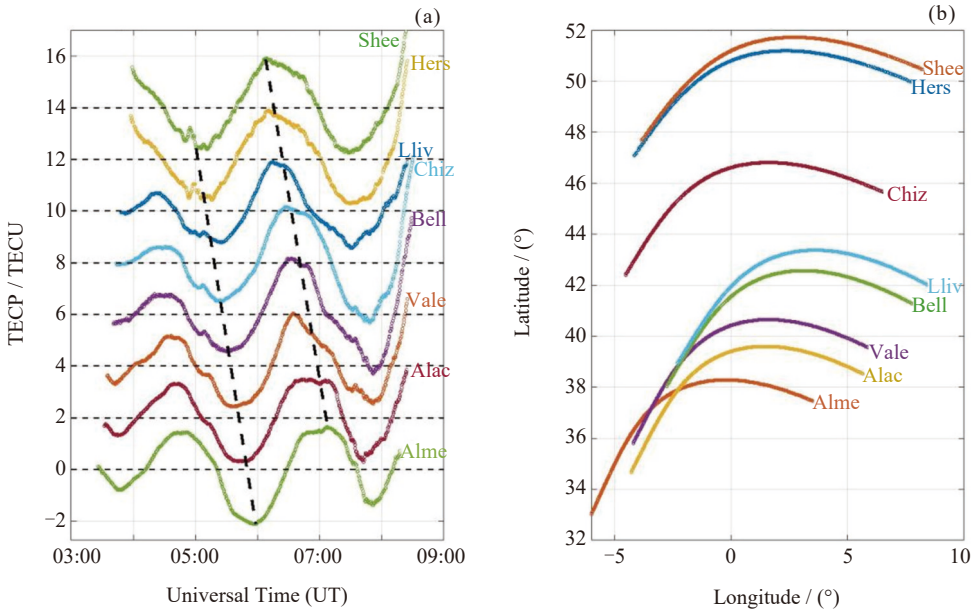

图 4　2002 年 3 月 19 日地面 GNSS 台链与 G05 卫星间的 sTEC 扰动 (a) 及相应台站穿刺点的经纬度变化 (b). 为避免重叠, 各站点 sTEC 扰动依次偏移了 2 TECU. 黑色虚线连接各站点观测到的 sTEC 扰动的波峰与波谷

Fig. 4　Slant TEC (sTEC) fluctuations between the ground GNSS network and satellite G05 (a), and latitude and longitude variations of the piercing points of the corresponding stations (b) on 19 March 2002. To avoid overlap, the sTEC perturbations at each station are sequentially offset by 2 TECU. Black dashed lines connect the peaks and valleys of sTEC perturbations observed at each station

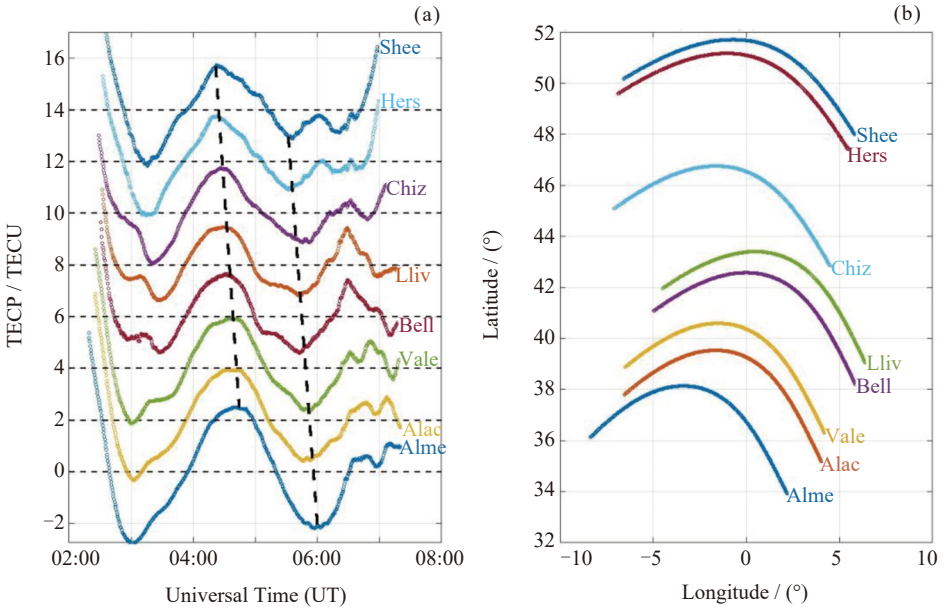

图 5 2002 年 3 月 19 日地面 GNSS 台链与 G09 卫星间的 sTEC 扰动 (a) 及相应台站穿刺点的经纬度变化 (b). 为避免重叠, 各站点 sTEC 扰动依次偏移了 2 TECU. 黑色虚线连接各站点观测到的 sTEC 扰动的波峰与波谷

Fig. 5 Slant TEC (sTEC) fluctuations between the ground GNSS network and satellite G09 (a), and latitude and longitude variations of the piercing points of the corresponding stations (b) on 19 March 2002. To avoid overlap, the sTEC perturbations at each station are sequentially offset by 2 TECU. Black dashed lines connect the peaks and valleys of sTEC perturbations observed at each station

10:00 UT 时段, 卫星观测到大气密度/电子密度扰动, 极区能量注入与热层/电离层扰动在时序上的先后有序说明他们极有可能源自同一个激发过程. 并且由于卫星观测在时间与空间上均是跳跃式的观测, 相邻轨道的时间相差大约 93 min, 经度相差约 23°, 所以 LSTAD 与 LSTID 实际的开始 (结束) 时间可能比卫星观测到的开始 (结束) 时间更早 (更晚); 空间上, 实际波前宽度的经度范围可能比卫星观测到的经度范围向东、向西两侧更宽一些. 此外, 地面的 GNSS 台站在同一时段同一经纬度区域也观测到向南传播的 LSTID (见图 4 和图 5), 这更加印证了图 3 中卫星观测到的 LSTID 是真实存在的.

3.1 LSTAD 与 LSTID 水平传播速度的对比

图 3 结果清晰表明, 随着 *AE* 指数的突然增强, CHAMP 卫星先后在北半球观测到 LSTAD 与 LSTID. 在随后约 6 h 的时间里, 这些大气/电子密度扰动继续向南传播, 穿过赤道进入南半球, 最终在南半球耗散消失. 这次同时间段且同空间范围远距离传播的 LSTAD 与 LSTID 事例, 提供了一次较好的对比二者传播特征的机会.

AE 指数的突然增强说明有磁层能量进入极区电离层高度 (见图 2 和图 3). 随后, 从第 4 根轨道开始 CHAMP 卫星在北半球极区观测到了大气密度增强, 以及后续引发的沿经线方向正负相间的中性密度扰动, 并且在后续轨道依次南移; 在第 4 根轨道高纬区域 CHAMP 卫星也观测到了明显的电子密度正负扰动, 只是从第 4 根轨道至第 5 根轨道未观测到高纬区域电子密度扰动的明显南移, 从第 5 根轨道往后才明显观测到电子密度扰动的依次逐渐南移. 值得注意的是, 电离层此时段 (第 4 根轨道在北半球高纬的时间大约为 04:50 UT) 在高纬区域响应的 LSTID 被地面 GNSS 台链在稍低纬度区间上 (38°N−51°N) 记录下来 (见图 4), 因为从图 4 可以看出早在 04:00 UT 以后, 51.3°N 附近的 Shee 与 Hers 台站已经观测到了北半球的 LSTID.

从图 3 所示虚线箭头的斜率可以明显看出, LSTAD 的水平传播速度明显大于 LSTID 的水平传播速度, 而对于一列单频波在某一时刻、空间某个位置的相位既与时间角频率 (单位时间对应的相位差) 有关, 也与波数 (相当于空间角频率, 即沿着传播

方向单位距离对应的相位差) 有关, 所以观测到的 LSTAD 与 LSTID 水平传播速度 (实际观测值为多频波的群速度) 的明显差异说明二者即便是同一源区激发, 在传播过程中同一时刻同一位置的相位也并不相同, 甚至相差较大, 这从 CHAMP 卫星观测到的同一轨道上 LSTAD 与 LSTID 水平波长的明显差异也可以看出来.

从动力学角度分析, 在 F 层高度, 电子的碰撞频率远远小于其磁回旋频率, 所以电子运动主要受磁力线控制, 满足"磁冻结"近似, 而不能像中性粒子一样自由地横越磁力线, 中性大气粒子的运动却不受磁场约束. 如果假定 LSTAD 与电离层相互作用的结果仅使电离层等离子体发生运动且 LSTAD 受到阻尼的话, 则 LSTAD 引起等离子体的速度方向应沿着当地磁力线. 这样, 当 LSTAD 的播方向与磁力线存在一定夹角时, 观测到的 LSTAD 和 LSTID 的水平传播速度应存在差异[1], 本文卫星的观测结果正好证实了这种猜测. 二者间的详细关系需综合考虑热层–电离层间复杂的非线性耦合过程深入研究.

另外, 从扰动幅度上看, 由于背景电子密度远小于中性粒子密度, 电子密度扰动的相对幅度通常高于同时观测到的中性粒子密度扰动的相对幅度.

3.2 卫星在高纬区域未观测到电子密度扰动明显南移的原因

如图 3 白色箭头所示, 在第 4 根轨道上, CHAMP 卫星观测到了明显的电子密度增强, 纬度约为 43°N, 并且结合地面台站观测数据分析可知, 此纬度处存在 LSTID (图 4 中从空间上看 Shee 台站在 51°N 处均观测到了与低纬度台站相似的扰动波形); 从时间上看, 地面台站在 04:00－06:00 UT 期间也观测到了 LSTID (见图 4 和图 5), 因此可以肯定图 3 中纬度上大约 60°N－40°N 范围内, 时间上大约 04:50－06:30 UT 时间段 (图 3 中白色箭头所示) 存在 LSTID. 由此可见, 本文所述 LSTAD 与 LSTID 所存续的时间区间、空间范围高度吻合. 但是地面台站在 04:00－06:00 UT、北纬 50°高纬区域观测到了电子密度扰动, 而卫星却未观测到 LSTID 在高纬区域明显的水平南移迹象 (如图 3b 白色箭头所示, 第 4 根轨道与第 5 根轨道之间电子密度增强南移不明显). 结合前文分析可知, 带电粒子运动受到磁力线的约束, 而中性成分却不受其约束, 并且在卫星所在高度处 (大约 412 km), 电子的磁回旋频率远远大于中性粒子和电子的碰撞频率, 因此电离层的电子运动受洛伦兹力的高度控制. 在纬度 50°以上的高纬区域, 磁力线近似与地面垂直, 且磁回旋频率远远大于碰撞频率, 电子的运动主要沿磁力线方向, 因此沿水平方向跨纬度的运动 (子午向运动) 并不明显. 而到了中低纬度地区, 磁力线倾斜 40°甚至更低, 水平方向的运动逐渐明显, 开始明显被卫星观察到. 所以图 3 中白色箭头所示无明显南移的观测结果, 进一步印证了前文对于 LSTAD 与 LSTID 水平传播速度差异的解释.

4 结语

2002 年 3 月 19 日, 磁层能量进入极区电离层高度后激发的 LSTAD 与 LSTID 在晨侧被 CHAMP 卫星同步观测到. 地面 GNSS 台链观测结果验证了卫星观测到的 LSTID 真实存在. LSTAD 与 LSTID 在北半球被激发后, 一直向南传播, 最终越过赤道, 耗散于南半球.

通过 CHAMP 的观测数据计算, LSTAD 与 LSTID 被同一源区激发后, 在水平方向上各自独立传播, 并且 LSTAD 的水平传播速度要明显高于 LSTID, 所以二者在同一时刻同一位置的相位并不相同, 甚至差别明显; 由于带电粒子运动受到磁力线约束, 而高纬区域磁力线与水平方向夹角太大, 所以高纬区域卫星观测到的 LSTID 水平移动并不明显.

致谢 CHAMP 卫星大气质量密度与电子密度数据由德国地学中心 (GFZ) 提供. 地面 GNSS 台站观测数据通过网站 http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml 下载, 地磁指数通过网站 http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp 下载.

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突.

参考文献

[1] Ye G J, Liu Z H. The Theory of Ionospheric Wave[M]. Beijing: Science Press, 1983 (叶公节, 刘兆汉. 电离层波理论 [M]. 北京: 科学出版社, 1983)

[2] YEH K C, LIU C H. Acoustic-gravity waves in the upper atmosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 1974, **12**(2): 193-216

[3] Hunsucker R D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: a review. *Rev. Geophys.*, 1982, 20(2): 293-315

[4] HOCKE K, SCHLEGEL K. A review of atmospheric gra-

vity waves and travelling ionospheric disturbances: 1982–1995[J]. *Annales GeophysicAE*, 1996, **14**(9): 917-940

[5] CAI H T, YIN F, MA S Y, *et al.* Observations of AGW/TID propagation across the polar cap: a case study[J]. *Annales GeophysicAE*, 2011, **29**(8): 1355-1363

[6] CAI H T, YIN F, MA S Y, *et al.* Simultaneous observations of large-scale traveling ionospheric disturbances on the nightside and dayside middle latitude[J]. *Annales GeophysicAE*, 2012, **30**(12): 1709-1717

[7] Saito A, Fukao S, Miyazaki S. 1998. High resolution mapping of TEC perturbations with the GSI GPS network over Japan. *Geophys. Res. Lett.*, **25**(16): 3079-3082

[8] Tsugawa T, Saito A, Otsuka Y. 2004. A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances using the GPS network in Japan. *J. Geophys. Res.*, **109**(S6): A06302. DOI: 10.1029/2003JA010302

[9] Pan J H, Cai H T, Gu J, *et al.* Case observation of LS-TAD excited locally near the equator[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2022, **65**(3): 853-861 (潘建宏, 蔡红涛, 谷骏, 等. 赤道附近局地激发 LS-TAD 的事例观测 [J]. 地球物理学报, 2022, **65**(3): 853-861)

[10] HINES C O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1960, **38**(11): 1441-1481

[11] MUNRO E H. Tables on sunspot-frequency for 1749–1948. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 1948, **53**(3): 241-246. DOI: 10.1029/TE053i003p00241

[12] MUNRO G H. Anomalies on ionosonde records due to traveling ionospheric disturbances. *Journal of Geophysical Research*, 1957, **62**(2): 325–326. DOI: 10.1029/JZ062i002p00325

[13] WILLIAMS P J S, CROWLEY G, SCHLEGEL K, *et al.* The generation and propagation of atmospheric gravity waves observed during the Worldwide Atmospheric Gravity-wave Study (WAGS)[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1988, **50**(4/5): 323-338

[14] WILLIAMS P J S, VIRDI T S, LEWIS R V, *et al.* Worldwide atmospheric gravity-wave study in the European sector 1985–1990[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1993, **55**(4/5): 683-696

[15] Martyn D F. Cellular atmospheric waves in the ionosphere and troposphere[J]. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1950, **201**(1065): 216-234

[16] SHIOKAWA K, LU G, OTSUKA Y, *et al.* Ground observation and AMIE-TIEGCM modeling of a storm-time traveling ionospheric disturbance[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A5): A05308

[17] VALLADARES C E, VILLALOBOS J, HEI M A, *et al.* Simultaneous observation of traveling ionospheric disturbances in the Northern and Southern Hemispheres[J]. *Annales Geophysic AE*, 2009, **27**(4): 1501-1508

[18] DING F, WAN W, LIU L, *et al.* A statistical study of large-scale traveling ionospheric disturbances observed by GPS TEC during major magnetic storms over the years 2003-2005[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A3): A00A01

[19] ZHOU C, ZHAO Z Y, YANG G B, *et al.* Evidence of low-latitude daytime large-scale traveling ionospheric disturbances observed by high-frequency multistatic backscatter sounding system during a geomagnetically quiet period[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physic*, 2012, **117**(A6): A06302

[20] DING F, WAN W X, LI Q, *et al.* Comparative climatological study of large-scale traveling ionospheric disturbances over North America and China in 2011–2012[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(1): 519-529

[21] BOSSERT K, PAXTON L J, MATSUO T, *et al.* Large-scale traveling atmospheric and ionospheric disturbances observed in GUVI with multi-instrument validations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(16): e2022GL099901

[22] FRISSELL N A, KAEPPLER S R, SANCHEZ D F, *et al.* First observations of large scale traveling ionospheric disturbances using automated amateur radio receiving networks[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(7): e2022GL097879

[23] THEMENS D R, WATSON C, ŽAGAR N, *et al.* Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption[J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, **49**(7): e2022GL098158

[24] NISHIMURA Y, ZHANG S R, LYONS L R, *et al.* Source region and propagation of dayside large-scale traveling ionospheric disturbances[J]. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(19): e2020GL089451

[25] RICHMOND A D. Gravity wave generation, propagation, and dissipation in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **83**(A9): 4131-4145

[26] MILLWARD G H, MOFFETT R J, QUEGAN S, *et al.* Effects of an atmospheric gravity wave on the midlatitude ionospheric F layer[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A11): 19173-19179

[27] FULLER-ROWELL T J, CODRESCU M V, MOFFETT R J, *et al.* Response of the thermosphere and ionosphere to geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physcs*, 1994, **99**(A3): 3893-3914

[28] FUJIWARA H, MAEDA S, FUKUNISHI H, *et al.* Global variations of thermospheric winds and temperatures caused by substorm energy injection[J]. *Journal of Geophysical Re-*

search: *Space Physics*, 1996, **101**(A1): 225-239

[29] BALTHAZOR R L, MOFFETT R J. Morphology of large-scale traveling atmospheric disturbances in the polar thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 1999, **104**(A1): 15-24

[30] LU G, RICHMOND A D, ROBLE R G, *et al*. Coexistence of ionospheric positive and negative storm phases under northern winter conditions: a case study[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2001, **106**(A11): 24493-24504

[31] FUJIWARA H, MIYOSHI Y. Characteristics of the large-scale travelling atmospheric disturbances during geomagnetically quiet and disturbed periods simulated by a whole atmosphere general circulation model. *Geophysical Research Letters*, 2006, **3**: L20108

[32] QIAN L Y, BURNS A G, LIU H L, *et al*. Effect of a solar flare on a traveling atmospheric disturbance[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2012, **117**(A10): A10319

[33] HERNÁNDEZ-PAJARES M, JUAN J M, SANZ J. High resolution TEC monitoring method using permanent ground GPS receivers[J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, **24**(13): 1643-1646

[34] PICONE J M, HEDIN A E, DROB D P, *et al*. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: statistical comparisons and scientific issues. *Journal of Geophysical Research*, **107**(A12): 1468. DOI: 10.1029/2002JA009430, 2002

[35] Bilitza D, Altadill D, Zhang Y, *et al*. International reference ionosphere 2012 – a model of collaboration[J]. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 2014, **2**: 1-19

[36] BRUINSMA S L, FORBES J M. Global observation of Traveling Atmospheric Disturbances (TADs) in the thermosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(14): L14103

[37] BRUINSMA S L, FORBES J M. Large-Scale Traveling Atmospheric Disturbances (LSTADs) in the thermosphere inferred from CHAMP, GRACE, and SETA accelerometer data[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2010, **72**(13): 1057-1066

[38] JONAH O F, COSTER A, ZHANG S, *et al*. TID observations and source analysis during the 2017 memorial day weekend geomagnetic storm over North America[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2018, **123**(10): 8749-8765

[39] EISENBEIS J, OCCHIPINTI G, ASTAFYEVA E, *et al*. Short-and long-wavelength TIDs generated by the great American eclipse of 21 August 2017[J]. *Journal of Geophysical Research*: *Space Physics*, 2019, **124**(11): 9486-9493. DOI: 10.1029/2019JA026919

作者简介

潘建宏 男, 1992 年 4 月出生, 现为乐山师范学院讲师, 主要从事电离层–热层耦合研究.
E-mail: 727837553@qq.com

蔡红涛（通信作者） 男, 1976 年 2 月出生, 教授, 博士生导师, 主要从事电离层与磁层物理、空间探测与信息处理技术方向的研究.
E-mail: htcai@whu.edu.cn