

LI Ke, ZHANG Donghe, SUN Shuji, YANG Guanglin, YU Shimei, HUANG Weiyan, HAO Yongqiang. Distribution Characteristics of Nighttime MSTIDs over China and Their Connections with Mid-latitude Spread-F (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1194–1209. CSTR:32142.14.cjss.2025–0177. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0177

中国扇区夜间电离层中尺度行扰分布特征 及与中纬度扩展 F 的关联*

李 科¹ 张东和¹ 孙树计² 杨光林³
于世美⁴ 黄为权⁵ 郝永强⁶

1(北京大学地球与空间科学学院 北京 100871)

2(中国电波传播研究所 青岛 266107)

3(国家空间天气预警中心 北京 100081)

4(《中国科学》杂志社 北京 100717)

5(北京应用气象研究所 北京 100101)

6(中山大学大气科学学院 珠海 519082)

摘 要 电离层中尺度行扰 (MSTIDs) 与中纬度扩展 F(MSF) 是中纬度电离层 F 层最常见的两个不同尺度的现象. 利用 CMONOC 的 250 余个 GNSS(Global Navigation Satellite System) 接收站及 4 个 CRIRP (China Research Institute of Radiowave Propagation) 测高仪台站数据, 对 2014–2023 年夏季夜间中 MSTIDs (Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances) 活动的分布规律以及与扩展 F 现象的关联进行了统计分析. 结果揭示了中国扇区 MSTIDs 的太阳活动和季节依赖性——太阳活动低年发生率显著高于高年, 且主要活跃于夏季夜间; 空间分布上, MSTIDs 存在两个机制不同的发生率峰值区域: 东侧峰值符合 Perkins 不稳定性驱动特征, 西侧峰值则与青藏高原东南侧区域频发的重力波活动密切相关. 进一步研究发现, MSTIDs 与 FSF(Frequency Spread-F) 倾向于在同一夜晚出现, 但二者存在稳定的统计时间先后关系, 即 MSTIDs 先于 FSF 发生, 该时序特征为揭示 MSTIDs 对 FSF 的潜在激发作用提供了关键观测依据.

关键词 中尺度电离层行扰, 扩展 F, 中纬度电离层, 电离层扰动

中图分类号 P352

Distribution Characteristics of Nighttime MSTIDs over China and Their Connections with Mid-latitude Spread-F

LI Ke¹ ZHANG Donghe¹ SUN Shuji² YANG Guanglin³

* 国家自然科学基金项目 (42474206), 电波环境特性及模化技术国家重点实验室基金项目 (JCKY2025210C614240301) 和子午工程项目共同资助

2025-10-21 收到原稿, 2026-05-25 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/>)

YU Shimei⁴ HUANG Weiquan⁵ HAO Yongqiang⁶

1(School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871)

2(China Research Institute of Radiowave Propagation, Qingdao 266107)

3(National Center for Space Weather, Beijing 100081)

4(Science China Press, Beijing, 100717)

5(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100101)

6(School of Atmospheric Sciences, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082)

Abstract This study investigates the spatiotemporal characteristics of periodic Total Electron Content (TEC) disturbances associated with Medium-Scale Traveling Ionospheric Disturbances (MSTIDs) over the Chinese sector and examines their statistical relationship with Mid-latitude Spread-F (MSF). MSTIDs and MSF are two common ionospheric phenomena occurring at different spatial and temporal scales in the midlatitude F region, and previous studies have suggested that they may be dynamically connected. To clarify this relationship, we use observations from more than 250 Global Navigation Satellite System (GNSS) stations of the Crustal Movement Observation Network of China (CMONOC), together with ionogram data from four ionosonde stations operated by the China Research Institute of Radiowave Propagation (CRIRP). A statistical analysis is conducted to characterize the occurrence, temporal variability, and spatial distribution of nighttime MSTIDs from 2014 to 2023, with particular attention to summer conditions and their association with spread-F events. The results reveal clear solar-cycle and seasonal dependences of MSTID activity in the Chinese sector. Their occurrence rates are substantially higher during solar minimum years than during solar maximum years, and the disturbances occur most frequently during summer nights. Spatially, two distinct regions of enhanced MSTID occurrence are identified, suggesting the influence of different generation mechanisms. The characteristics presented by the eastern peak are basically consistent with those driven or amplified by the MSTIDs associated with the Perkins instability and its related electrodynamic processes. In contrast, the western peak is closely associated with frequent atmospheric gravity wave activity southeast of the Tibetan Plateau, where complex terrain and active convection may provide strong wave sources. Further analysis shows that MSTIDs and MSF frequently occur on the same night and exhibit a relatively stable temporal sequence, with MSTID activity generally preceding the onset of MSF. This chronological relationship suggests that MSTIDs may create favorable conditions for spread-F development by perturbing plasma density gradients, modifying the bottomside F layer, or enhancing polarization electric fields. Although the statistical results do not by themselves establish direct causality, they provide important observational evidence supporting a possible triggering or preconditioning role of MSTIDs in the generation of MSF. These findings improve our understanding of multiscale coupling processes in the midlatitude ionosphere.

Key words MSTIDs, Spread-F, Mid-latitude ionosphere, Ionospheric disturbances

0 引言

与赤道低纬度和极区电离层相比, 中纬度电离层通常被认为是相对平静的区域. 近几十年来, 随着观测技术的发展, 有研究在中纬度电离层发现了多种具有不同尺度特征的等离子体不规则结构^[1,2]. 这类结构即使在地磁平静时期也会频繁出现, 并表现出显著的

时空相关性. 上述观测特征暗示该区域存在复杂的多尺度变化过程及多源耦合驱动机制^[3,4]. 在中纬度电离层 F 层的各类现象中, 中尺度电离层行扰 (MSTIDs) 与中纬度扩展 F (MSF) 是两类最受关注的典型现象, 其空间分布特征、形成物理机制以及二者间的内在关联, 长期以来都是中纬度电离层物理领域的重要研究

方向^[5-7].

MSTIDs (Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbances) 通常表现为电离层等离子体密度中的准波状扰动, 具有 100~500 km 的水平波长、10~60 min 的周期以及 50~400 m·s⁻¹ 的相速度特征^[8,9]. 早期研究认为, MSTIDs 的形成主要受大气声重波 (AGWs) 驱动^[10]. AGWs (Acoustic Gravity Waves) 通过扰动中性大气, 再借助中性粒子与离子的碰撞作用调制电离层等离子体分布, 最终形成可观测的 MSTIDs. 该机制能有效解释白天时段的 MSTIDs 活动, 以及台风、火山爆发等极端气象事件诱发的 MSTIDs^[11,12], 但无法解释夜间 MSTIDs 的独特特征: 夜间 MSTIDs 多集中于夏季发生, 在北半球常呈现西北—东南走向的波列结构, 且整体向西南方向传播^[13,14]; 同时观测还发现, 夜间 MSTIDs 扰动结构会伴有与其相耦合的极化电场, 这表明其形成过程不仅涉及中性大气扰动, 还包含等离子体电动力学过程的参与^[15]. 目前, Perkins 不稳定性被学界认为是夜间 MSTIDs 的主导形成机制^[16]. 此外, E-F 层耦合效应、南北半球电离层耦合过程, 以及 AGWs 的种子扰动作用, 也被证实可能对夜间 MSTIDs 的产生与发展起到关键调控作用^[2,4,9]. 针对中国扇区的 MSTIDs 研究, 已有成果虽初步揭示了其季节与太阳活动的依赖性, 但研究范围多局限于华中、华北或香港等局部区域^[13,14,17,18], 缺乏覆盖整个中国扇区的大尺度、长时间序列综合分析, 难以完整呈现中国扇区夜间 MSTIDs 的空间分布规律与演化特征.

扩展 F (spread F) 是电离层测高仪频高图中 F 区回波描述展宽的现象, 可以用于表征 F 层等离子体不规则体的存在^[19,20]. 在赤道低纬度地区被称为赤道扩展 F (ESF). 在东亚扇区, ESF 常见于太阳活动高年的春分和秋分两季, 主要认为由瑞利-泰勒不稳定性 (RTI) 引起^[21,22]. 而 MSF (Mid-latitude Spread F) 则主要活跃于夏、冬季夜间, 且与太阳活动呈负相关 (太阳活动低年发生率更高)^[5,23,24], 其形成机制至今尚未完全明晰. 现有研究表明, Perkins 不稳定性、AGWs 以及 TIDs 引发的 F 层大尺度倾斜结构, 均可能参与 MSF 的形成过程^[5,24-29]. Bowman^[5] 在关于 MSF 的综述文章中区分了频高图中扩展描述的形态特征, 指出不同扩展 F 描述的形成与不同尺度的电离层结构有关. 基于电离图上的扩展描述类型, 扩展

F 一般可分为区域扩展 F (RSF) 以及频率扩展 F (FSF). 其中 RSF (Range Spread-F) 的回波特征为沿高度轴弥散, 主要与横跨 F 层底部的多尺度等离子体结构 (例如小型等离子体泡) 相关; FSF (Frequency Spread-F) 的回波则沿频率轴弥散, 其形成与 F 层峰值高度 ($h_m F_2$) 附近的等离子体密度梯度及窄谱不规则体密切相关. 对中低纬度不同扇区的统计对比显示, 两类扩展 F 的发生率存在显著空间差异: 在中国扇区, FSF 占据绝对主导地位, 其发生率远高于集中在更低纬度区域的 RSF^[30]. 值得注意的是, FSF 的活动时段及空间范围, 与夏季夜间频繁出现的 MSTIDs 高度重合, 二者均集中于夏季夜间发生, 且在太阳活动低年时活动水平显著增强, 这一现象强烈暗示 MSTIDs 与 FSF 之间可能存在内在物理关联.

针对中纬度 F 层两种现象的关联, 北京大学肖佐团队^[28,29,31] 开展了一系列探索性的工作. 首先, 通过对乌鲁木齐与长春两地区 MSF 的多年统计, 发现两地区 MSF 发生率存在显著的经度差异. 长春地区发生率明显高于乌鲁木齐, 并提出该差异可能来源于两地区底层大气重力波活动的强度差异^[31]. 后续, 团队进一步结合两地区全球导航卫星系统 (GNSS) 接收机台站数据, 补充分析了 MSTIDs 的分布规律. 结果发现, MSTIDs 与 MSF 的季节变化、太阳活动依赖性高度一致, 且 MSTIDs 的发生率同样呈现出与 MSF 相似的经度差异, 这些发现为二者的关联提供了关键证据^[29]. 然而, 两种现象之间仍然缺乏精确的时间对应关系, 日本扇区的统计研究显示, 全季节范围内 MSTIDs 与 MSF 的共现率不足 10%~15%, 这种低的共现率可归因于二者的尺度差异^[32,33]. 虽然 MSTIDs 可以被等离子体不稳定性激发, 但 MSTIDs 独特的较大尺度周期结构和特定的传播方向, 意味着其不属于严格意义上的小尺度不规则结构; 而扩展 F 的产生主要归因于对高频信号更为敏感的小尺度不规则体. 尽管 MSTIDs 与 FSF 二者之间存在尺度差异, 但二者相似的时空分布特征, 仍暗示可能存在因果关联: MSTIDs 伴随的极化电场、水平等离子体密度梯度以及波扰动的耗散与级联过程, 理论上可进一步激发小尺度等离子体不规则体, 进而为 FSF 的形成提供触发条件^[34-36]. 近期的个案研究也发现, 当 MSTIDs 连续传播经过不同观测台站时, 各台站观测到的 FSF 发生时间呈现出与 MSTIDs 传播方向相一

致的先后次序,这一现象暗示 MSTIDs 会对 FSF 的形成起到种子扰动作用^[24].然而,现有研究多局限于定性个案分析,缺乏覆盖中国扇区、基于长时间序列的定量统计验证,难以系统揭示二者关联的普遍性规律与物理机制.

在肖佐老师的工作基础上,本团队将研究范围扩展至整个中国扇区,利用 2014—2018 年的 GNSS (Global Navigation Satellite System) 以及电离层测高仪数据,初步揭示了 MSTIDs 分布规律与 MSF 相关的统计关联^[37,38].然而,该研究时段未能覆盖完整的太阳活动周,缺少对太阳活动依赖性的分析,难以全面阐明二者的关联特征.因此,在上述工作的基础上,结合 2014—2023 年(共 10 年)的 GNSS 组网数据与电离层测高仪数据,开展两方面核心研究.其一,分析中国扇区夜间 MSTIDs 的时空分布特征,包括其空间形态、时间演化规律,以及对太阳活动与季节的响应特征;其二,结合多站电离层测高仪观测,统计分析 MSTIDs 与 MSF 的关联规律.研究成果有望为深入理解中国扇区夜间中纬度电离层两类特征扰动变化的机制,以及提升中纬度扩展 F 现象的预测能力提供支撑.

1 数据与方法

为实现中国扇区夜间 MSTIDs 时空分布特征分析及与中纬度扩展 F(MSF) 的关联研究,采用两类核心观测数据——中国地壳运动观测网络 (CMONOC) 的 GNSS 数据与中国电波传播研究所 (CRIRP) 的电离层测高仪数据.其中,这里使用的电离层测高仪共涉及 4 个中纬度观测站:兰州站 (36.1°N, 103.9°E)、西安站 (34.2°N, 108.9°E)、新乡站 (35.3°N, 113.9°E) 和青岛站 (36.2°N, 120.4°E).各台站位置在图 1 中以蓝色三角形符号标注.数据的时间跨度为 2014—2023 年,时间分辨率为 1 h.其中,扩展 F 现象按照描述形态划分为 FSF 和 RSF 两类,分别进行统计,而 MSTIDs 相关扰动的处理方法具体如下.

MSTIDs 作为一种典型的电离层波状扰动结构,通常可以通过气辉成像与基于密集 GNSS 观测的二维去趋势 TEC (Detrended Total Electron Content, dTEC) 地图进行识别.本文采用 CMONOC 约 250 个 GNSS 接收台站 2014—2023 年间计算的 TEC 数据,具体分布如图 1 中绿色圆点所示.基于 GNSS 观测文件中的双频载波相位与伪距观测值,可计算视线向积分电子密度获取倾斜总电子含量 (sTEC).通过

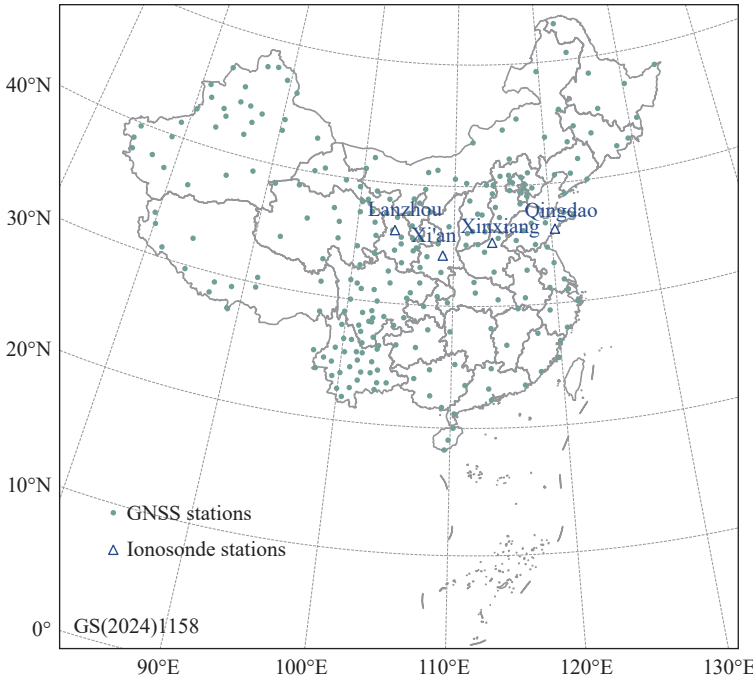


图 1 GNSS 和电离层测高仪台站位置分布

Fig. 1 Distribution of GNSS and ionosonde station locations

薄层近似法, 将 sTEC 投影至垂直方向得到垂直总电子含量 (vTEC). 这里设定电离层薄层高度为 400 km, 卫星截止高度角为 35° , 数据的采样率为 30 s. 具体 TEC 计算流程可参考此前的研究^[12]. 需要指出的是, CMONOC 台站现有分布仍难以满足识别 MSTIDs 结构参数所需的高时空分辨率要求^[17]. 此外, MSTIDs 在传播过程中可能发生演化与相互作用, 其传播方向、振幅和周期等参数存在显著变化, 这给大尺度空间范围内追踪演化中的 MSTIDs 事件带来较大挑战性^[39]. 鉴于上述因素, 这里不针对单个 MSTIDs 事件进行识别, 而是在适宜的时空尺度上聚焦整体 MSTIDs 活动情况开展统计分析. 为量化评估特定区域 MSTIDs 强度, 学界常采用 TEC 扰动值与背景值的比值作为活动水平指标^[33,40]. 该相对强度 (百分比) 更能在较大时空范围 (跨纬度、跨季节、跨太阳活动周期) 的研究中, 有效消除背景 TEC 不均匀性带来的系统偏差. 此外, 相对强度的选取在物理意义上侧重于表征 MSTID 对背景电离层的调制效率, 这也为后续探讨 MSTIDs 与中纬度扩展 F(FSF) 及不规则体之间的物理关联, 揭示其激发机制, 提供了更为合理的切入点. 此外, 研究还表明 MSTIDs 的平均活动水平与发生率在时空分布上具有高度的相似性^[40]. 为了综合评估其整体活跃程度, 首先采用典型 MSTIDs 周期范围 (10~60 min) 的带通滤波器对每个卫星—接收机的原始 vTEC 序列 (δ_{vTEC}) 进行滤波, 提取其中的扰动分量 dTEC (δ_{dTEC}). 其相对扰动振幅对应为 $\delta_{\text{dTEC}}/\delta_{\text{vTEC}}$. 随后, 在特定的时空网格 (空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 15 min) 内计算各扰动序列的平均相对振幅 A_{mean} , 并以此表征该区域 MSTIDs 活动水平, 其表达式为

$$A_{\text{mean}} = \left| \frac{\delta_{\text{dTEC}}}{\delta_{\text{vTEC}}} \right|_{(\text{grid mean: } 1^\circ \times 1^\circ \times 15 \text{ min})} \times 100\%. \quad (1)$$

此外, 为排除地磁暴引起的突发扰动及较低纬度地区受赤道等离子体泡的潜在影响, 选取 $Kp < 3$ 的时段作为研究对象. 图 2 分别给出了 2014 年 2 月 2 日 (图 2a~h) 和 2015 年 7 月 14 日 (图 2i~p) 两天的 dTEC 地图 (第 1, 3 列) 和 MSTIDs 活动水平 A_{mean} 地图 (第 2, 4 列, 图 2 均采用地理坐标). 通过对比可以看出, A_{mean} 与 dTEC 表征的 MSTIDs 的分布基本一致, 能较好地反应 MSTIDs 的扰动强度和影响范围. 此外, 这两天发生的 MSTIDs 扰动基本呈现西北—东

南排列, 并有向西南方向 (垂直波阵面) 传播的特征. 这符合此前描述的东亚扇区夜间 MSTIDs 典型特征, 该类扰动通常被认为与 Perkins 不稳定性有关^[14,17]. 尽管形态有相似性, 但是二者在空间分布和演化上仍存在较大差异. 而且, MSTIDs 在较大空间范围传播过程中, 其振幅、波长和传播方向会发生变化, 多个 MSTIDs 也可能发生相互作用, 这给精确追踪并统计其传播特征参数带来不小的挑战. 因此, 我们只关心其整体活动强度, 并可以界定阈值 (1.5%) 来判断特定区域是否受到 MSTIDs 活动的影响. 当数据网格内的 MSTIDs 活动水平 A_{mean} 超过该阈值时, 即判定为一次 MSTIDs 相关周期性扰动事件, 并据此统计和计算其时空发生率. 这样处理的优势除了能简化问题, 还便于后文开展其与 FSF 的统计关联研究.

2 中国扇区夜间 MSTIDs 的时空分布特征

2.1 太阳活动依赖性

图 3(a)~(c) 给出了 2014—2023 年间中国扇区不同纬度带下与 MSTIDs 周期性扰动发生率经度—时间分布. 图 3(d) 是 27 天平均 $F_{10.7}$ 指数随时间的变化曲线. 由图可见, 太阳活动低年 MSTIDs 相关周期性扰动的发生频率显著高于太阳活动高年. 一般认为, 太阳活动低年时, 中性大气的标高与高度积分中性离子碰撞频率更低, 而这一特性与 Perkins 不稳定性增长率呈负相关, 是导致上述差异的重要原因^[41]. 从季节分布来看, MSTIDs 活动在各太阳活动年均主要发生于夏季 (5 月至 8 月), 且在活动低年的冬季 (11 月至次年 2 月) 也表现出较高活跃度. 对比不同纬度带的发生率可知, 较低纬度带发生率最高, 较高纬度带发生率最低; 同时, 各纬度带的经度分布范围存在明显差异, 其空间分布规律仍需进一步研究. 此外, 夜间 MSTIDs 活动的时间分布并非连续, 而是呈现多个峰值区间, 这一特征也反映出 MSTIDs 活动存在显著的日—日差异性.

2.2 季节与空间分布

图 4 给出了不同季节下中国扇区夜间 (19:00—06:00 LT) MSTIDs 周期性扰动发生率的地理空间分布. 与图 3 结果相似, MSTIDs 相关周期性扰动主要集中于夏季, 其次为冬季与春分、秋分两季, 这一结论

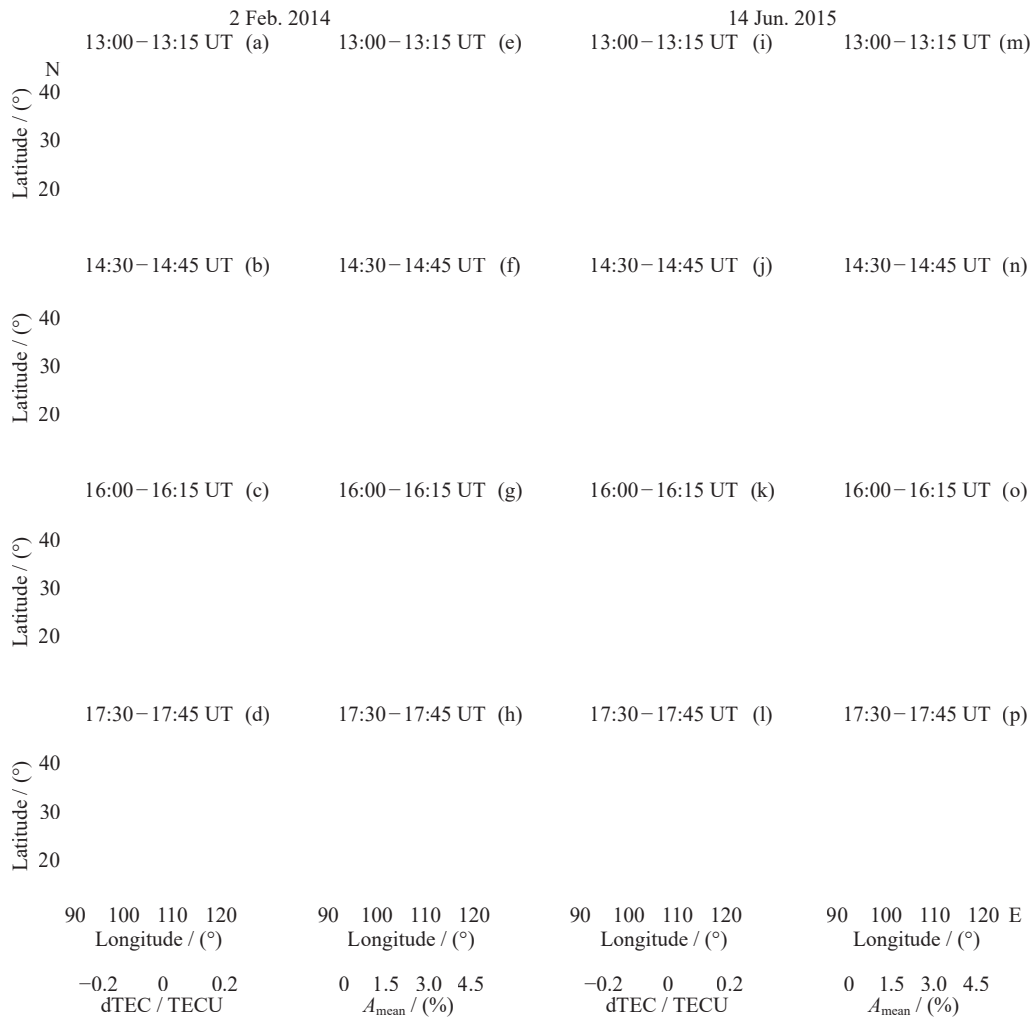


图 2 不同世界时下的扰动分布

Fig. 2 Disturbance distribution maps in geographic coordinates at different UT

与中国扇区已有的其他 MSTIDs 研究结果一致^[13,17]. 具体来看, 夏季扰动集中分布于 20°N – 35°N ; 春分、秋分两季扰动主要活跃于 30°N 以南区域; 冬季高纬度地区 ($>35^{\circ}\text{N}$) 的扰动也表现出显著活跃度. 在低纬度地区内, 各季节扰动发生率的峰值均分布于两个地理区间 (90° – 100°E 与 105°E – 125°E), 且 100°E 附近的扰动显著弱于其两侧的上述两个区间. 这种区域差异很可能是受地形和海陆条件的影响形成的. 中国扇区的地形状况较复杂, 并且太平洋和青藏高原之间, 底层大气的重力波活动也会受到显著调制, 进而影响 MSTIDs 的传播. 值得注意的是, 低纬度地区 ($<25^{\circ}\text{N}$) 的 MSTIDs 发生率仍维持在较高水平, 这表明 MSTIDs 可传播至低纬度地区并对该区域产生影响; 但该区域扰动是由较高纬度 MSTIDs 传播而来, 还是局地起源, 仍需进一步统计研究.

2.3 时空演化特征

考虑到夏季扰动最为频繁和典型, 后文重点研究夏季扰动的传播特征. 图 5 给出 5–8 月周期性扰动发生率在特定世界时下的地理空间分布. 从图中可以看出, 在 $12:00$ – $14:00$ UT 期间, 周期性扰动的发生区域从 $>30^{\circ}\text{N}$, $>120^{\circ}\text{E}$ 的区域发展到 $>20^{\circ}\text{N}$, $>90^{\circ}\text{E}$ 的区域, 活动频繁发生区域在 25° – 40°N , $>110^{\circ}\text{E}$ 的范围内, 扩展的大体方向为西南方向; $15:00$ UT 时, 东边的主要扰动区域继续扩展, 同时在 22°N – 35°N , 90°E – 100°E 区域出现西南–东北条带型扰动活动增强区域, 该区域相对独立于东侧扰动的扩展; $16:00$ UT 时扰动现象几乎扩展到整个中国扇区, 两个发生率峰值区域 (东侧与西侧) 在 30°N 有一定重合; $16:00$ UT 之后东侧的扰动区域逐渐减小, 但西侧的扰动发生率明显增强, 直到 $19:00$ UT 时开始减弱. 需

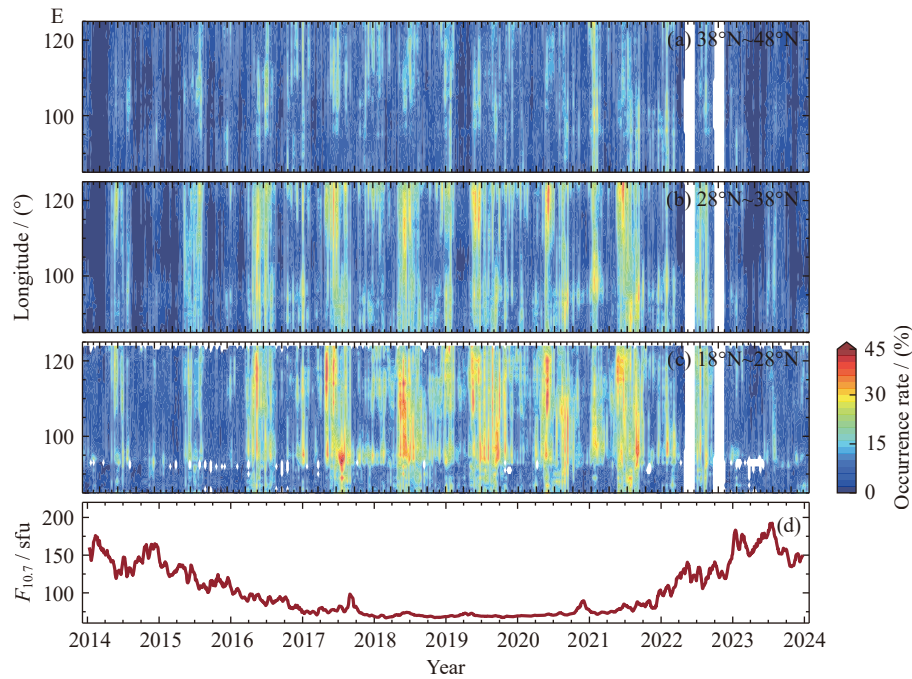


图3 2014—2023年间中国扇区不同纬度带下与MSTIDs周期性扰动发生率的经度-时间分布以及27天平均 $F_{10.7}$ 指数随时间的变化曲线

Fig. 3 Longitude-time distribution of the occurrence rate of periodic MSTID disturbances across different latitudinal bands in China from 2014 to 2023, and temporal variations of the 27-day averaged $F_{10.7}$ index

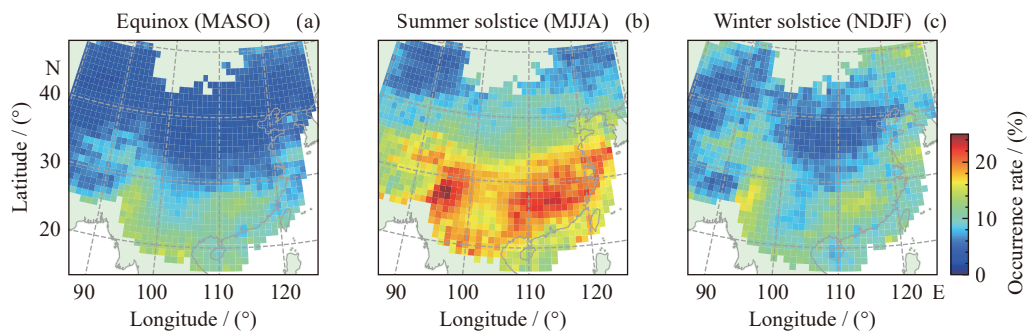


图4 不同季节下中国扇区夜间MSTID周期性扰动发生率的地理空间分布

Fig. 4 Geospatial distribution of the occurrence rate of nighttime MSTID periodic disturbances in the Chinese sector across different seasons

要注意的是,东边的扰动虽然整体呈现东北—西南延伸的结构,但从上边界可以看出,其延伸方向随世界时演化呈现顺时针偏转的趋势,这很可能由地转偏向力所致。

2.4 不同的形成机制

大量理论模拟与观测结果表明,Perkins不稳定性与Es层不稳定性的共同作用可解释东亚扇区夏季夜间出现的、呈西北—东南排列且向西南方向传播的MSTIDs^[4,42]。此类MSTIDs被定义为不稳定性驱

动型MSTIDs(instability-driven MSTIDs)或带电型MSTIDs(EMSTIDs),以区别于直接由AGWs激发的MSTIDs^[43]。从图5所示的扰动发生率时空演化过程可见,东部扰动呈现出由东北向西南延伸的时空演化特征,这一宏观发展趋势在空间上与中纬度EMSTIDs典型的西南向传播特性相契合;而西侧扰动活跃区域的形成时间早于东侧扰动传播至该区域的预期时间,该区域空间形态与东侧扰动存在显著差异,同时扰动发生率高于周边区域。因此,仅基于EM-

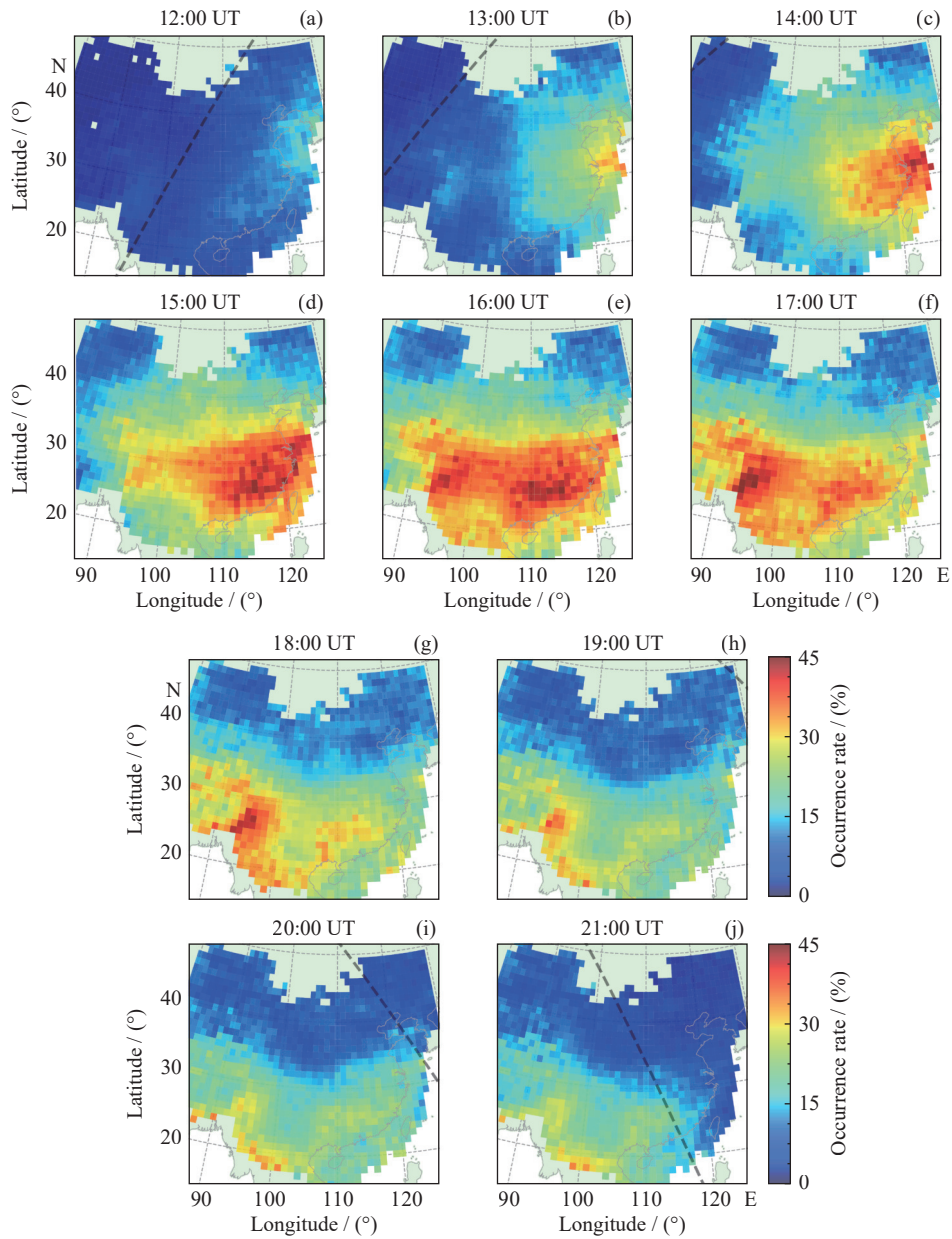


图 5 夏季 MSTIDs 周期性扰动发生率在不同世界时下的地理空间分布

Fig. 5 Geospatial distribution of the occurrence rate of periodic disturbances in MSTIDs with respect to different Universal Time (UT) during summer

STIDs 的形成机制无法完全解释该现象, 还需要考虑 AGWs 的贡献. 前文提到, 从低层传播到热层高度的重力波经常用于解释发生在白天赤道向传播的 MSTIDs. 此外, 底层大气的部分气象事件 (如台风过境、火山爆发) 产生的 AGWs 也会在电离层高度激发 MSTIDs^[12,44]. 其中, 同心圆型行扰 (cTIDs) 的形成, 是 AGWs 上传至电离层并引发扰动的直接证据^[12,45]. Chou 等^[45] 的研究指出, 台风强对流区域激发的 AGWs 可与 Perkins 不稳定性发生耦合作用, 进而促进

MSTIDs 的形成; 然而, 夜间重力波 (GWs) 传播至电离层并长期激发 MSTIDs 的现象尚未被系统记录与研究.

受复杂地形影响, 青藏高原东南区域夏季常出现活跃的低涡对流活动, 而频繁发生对流的区域所激发的重力波活动, 在适宜的背景风场作用下可传播至更高高度, 进而成为激发 MSTIDs 形成的种子波^[46,47]. 已有研究分别利用 AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) 与 SABER/TIMED (Sounding of the Atmo

sphere using Broadband Emission Radiometry/Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) 的多年观测数据, 获取平流层高度 GWs 活动的全球分布特征, 结果显示, 青藏高原东南区域存在显著的 GWs 活动^[48,49]. Liu 等^[50] 系统对比分析了不同纬度带地形分布对 GWs 上传过程的影响, 发现 20°N 纬度带 80°E–100°E 区间的山脉东侧, 在整个平流层高度上均存在显著的 GWs 活动, 且该区域与西南扰动活跃区的位置高度吻合; 这一发现在 Zeng 等^[51] 的经度剖面研究中也得到确认. 因此, 西南 MSTIDs 扰动活跃区的条带分布特征, 很可能是 GWs 在地形与背景风场共同作用下上传至电离层高度所激发的结果^[51]. AIRs 4.3 μm 亮温扰动数据经常用于探测平流层 GWs 的活动, 具体提取扰动的方法已由 Hoffmann 和 Alexander^[52] 给出. 图 6 给出的 2014–2023 年间不同季节的夜间 (19:00–06:00 LT) 亮温扰动数据提取的 GWs 周期成分地理空间分布情况. 从图 6 可以看出, 夏季夜间西南区域存在显著的 GWs 分布, 与图 4 和图 5 中西南扰动峰值区域相对应. 上述研究结果共同表明, GWs 可能对西南区域夜间 MSTIDs 的形成发挥重要作用.

3 MSTIDs 与中纬度扩展 F 的统计关联

3.1 中纬度扩展 F 的分布特征

图 7 分别给出了中国中纬度地区四个测高仪台站 (兰州、西安、新乡和青岛)FSF 和 RSF 发生率随时间的变化情况. 从图 7 可以看出, 中纬度台站两类扩展 F 均在太阳活动低年发生率更高; 季节上, 扩展

F 主要发生在夏季, 在活动低年的冬季也较为常见. 这与图中 MSTIDs 展现的分布特征一致, 进一步暗示了二者之间存在潜在关系. 值得注意的是, 两类扩展 F 中, FSF 的发生率要远高于 RSF. 而且, 两类扩展 F 的发生时段也基本重合, 这说明中国扇区中纬度扩展 F 主要以 FSF 为主. 因此, 后文主要需关注 FSF 的分布以及其与 MSTIDs 的关联.

3.2 MSTIDs 与 FSF 的发生关系

为了进一步研究 MSTIDs 与 FSF 的联系, 对各台站的 MSTIDs 活动水平与 FSF 发生具体时间开展时间匹配分析. 图 8 给出了西安站在 2015 年 (太阳活动高年) 和 2017 年 (太阳活动低年) 的 MSTIDs 活动水平 A_{mean} 与 FSF 发生时间分布. 热力图背景绿色深浅表示 MSTIDs 活动水平高低, 蓝色三角标记则指示 FSF 发生事件. 如图所示, 尽管不同太阳活动条件下 FSF 的分布特征存在显著差异, 但 MSTIDs 活动与 FSF 主要集中发生在夏季. 二者在 2015 年夏季表现出更为显著的关联性, 夜间 MSTIDs 活动增强时, 往往伴随更高频次的 FSF 发生. 而 2017 年的 FSF 在其他季节也较为活跃, 虽整体对应关系不如 2015 年显著, 但其夏季时段的特征与 2015 年具有相似性. 因此, 后续针对 FSF 与 MSTIDs 的相关性分析主要聚焦于夏季时段. 需要指出的是, 这两种现象在夏季夜间通常非同步发生, MSTIDs 扰动往往先于 FSF 事件出现, 而 FSF 可持续至夜间更晚时段. 这种时间先后差异也解释了此前研究中未能观测到二者高共发生率的原因. 此外, 该时间先后规律不仅在西安站表现一致, 在其他台站不同年份的统计结果中均得到验证. 这一延时特征暗示, MSTIDs 可能是激发 FSF 的重要前置因素.

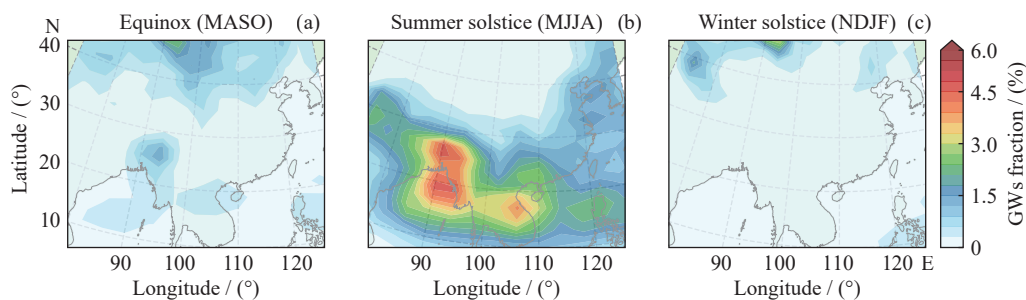
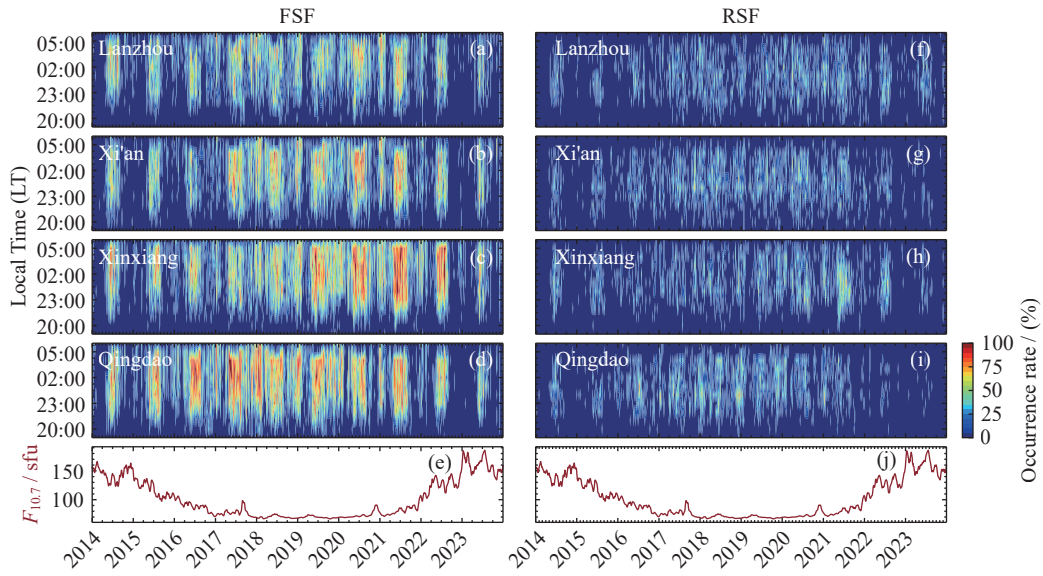
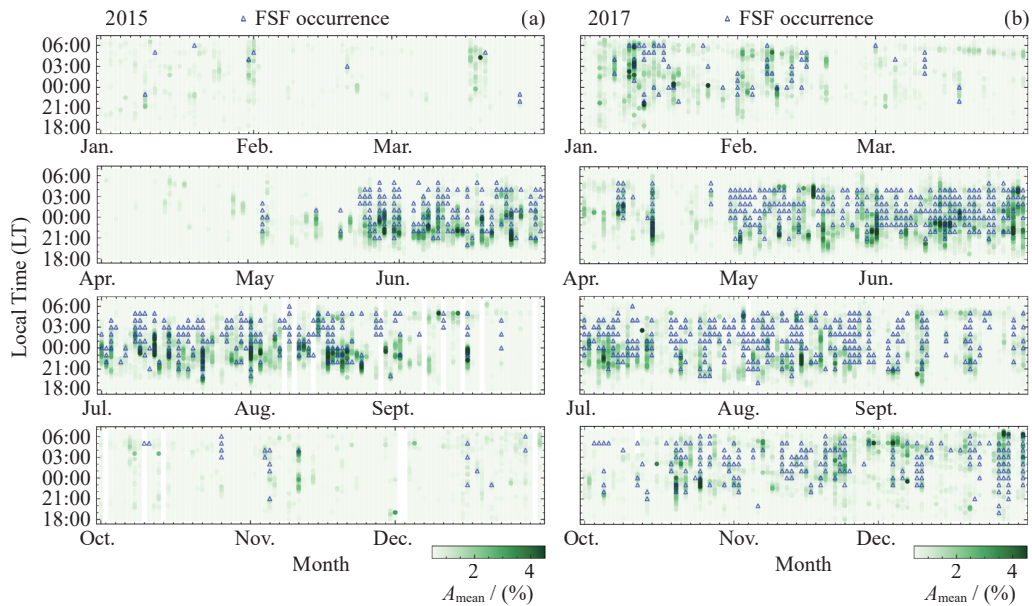


图 6 2014–2023 年间不同季节的夜间亮温扰动数据提取的平流层重力波成分地理空间分布

Fig. 6 Geospatial distribution of stratospheric GWs fraction extracted from nighttime brightness temperature perturbation data of AIRs across different seasons from 2014 to 2023

图 7 FSF 和 RSF 发生率随时间的变化以及 27 天平均 $F_{10.7}$ 指数随时间的变化Fig. 7 Temporal variation in the occurrence rate of FSF and of RSF at four ionosonde stations from 2014 to 2023, and temporal variation of the 27-day average $F_{10.7}$ index图 8 西安站的 MSTIDs 活动水平 A_{mean} 与 FSF 发生时间分布Fig. 8 Time distribution of MSTIDs activity level magnitude A_{mean} and FSF occurrence in Xi'an

3.3 MSTIDs 与 FSF 的统计关联

考虑到 MSTIDs 与 FSF 在每夜的分布时间存在差异, 且二者的记录数据类型不同 (MSTIDs 活动为连续强度值, FSF 为发生/未发生二元值), 为简化统计过程, 这里沿用前文标准: 将 MSTID 活动水平 $A_{\text{mean}} > 1.5\%$ 作为判断“受 MSTIDs 活动影响”的阈值, 进而统计某夜 FSF 的发生情况 (含持续时长) 与

该夜 MSTIDs 活动发生率的关联关系。图 9 给出了 2014—2023 年夏季各台站夜间 (19:00—06:00 LT) 不同 FSF 发生条件下, MSTIDs 活动发生率的分布特征。图 9 中误差棒上下边界为上下四分位数, 中点为中位数。可以看出, 四个台站未发生 FSF 的夏季夜晚, 其 MSTIDs 活动发生率均维持在较低水平, 且太阳活动高年时, 此类夜晚几乎无 MSTIDs 活动; 而发生

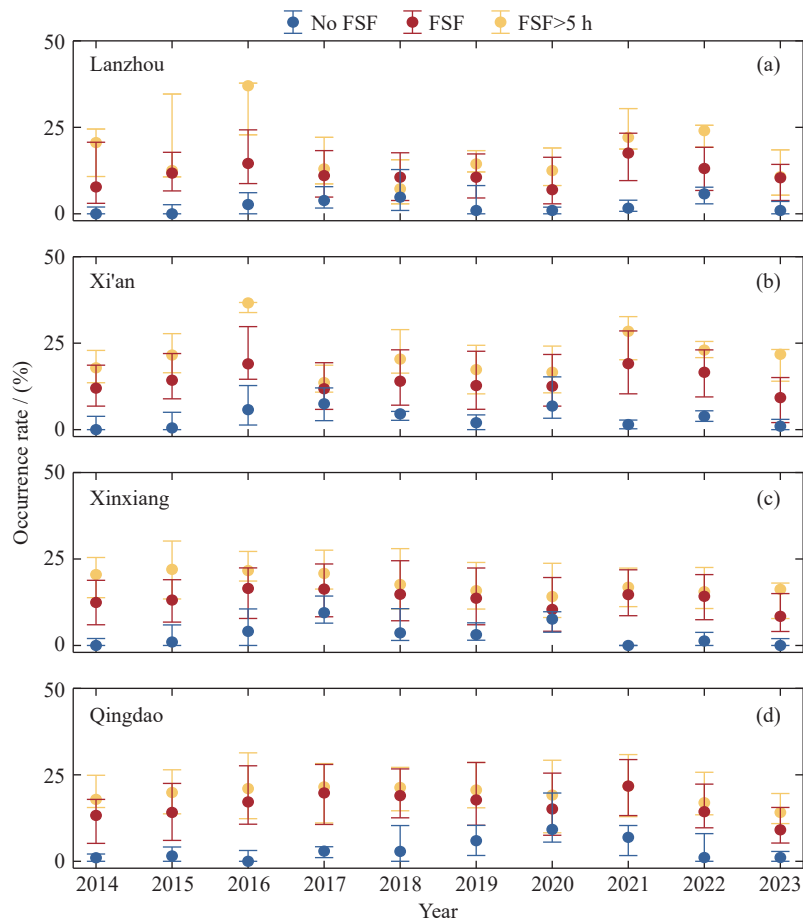


图9 2014—2023年各测高仪台站观测的夏季夜间(19:00—06:00 LT)在不同FSF发生条件下, MSTIDs活动发生率分布

Fig. 9 Distribution of MSTID activity occurrence rates under different FSF conditions during summer nights (19:00—06:00 LT) observed at various ionosonde stations from 2014 to 2023

FSF的夜晚,对应各台站的MSTIDs活动发生率显著更高,其中FSF持续时长>5 h的夜晚,MSTIDs活动发生率达到最高.上述结果表明,FSF的发生与当夜MSTIDs活动水平存在一定的正相关关系.同时,附录给出了采用其他发生阈值下(1%, 2%)得到的统计结果,其展现的规律基本一致.

为进一步解释MSTIDs与FSF二者的时间分布差异,对各台站两类现象的地方时分布进行了细化统计如图10所示.图中“小提琴”图的宽度已进行归一化处理,以便于更清晰地展示不同地方时的发生率差异,中间标识为发生地方时的中位数.统计结果显示,四个台站的MSTIDs与FSF存在显著的时间先后关系:MSTIDs活动集中于午夜前(22:00 LT前后),FSF则主要分布于午夜后,二者的统计中值差异约为1~2 h.这种延时特征结合前文二者同夜间发生率

的关系,进一步证明了MSTIDs可能作为潜在种子激发FSF的推断.

4 MSTIDs活动阈值选取与敏感性检验

为了给识别MSTID事件确立一个科学合理且鲁棒的阈值,本文统计了多年数据库中MSTIDs活动水平 A_{mean} 的概率密度分布.如图11所示,经验分布呈现出典型的正偏态分布(右偏分布)并带有显著的长尾特征.分布中陡峭且狭窄的主峰主要集中于0.2%~0.3%附近,这在物理上反映了电离层背景环境的常态噪声包络,包括卫星/接收机仪器噪声、局地随机热涨落以及无组织的小尺度电离层湍流.相比之下,向右延伸的平缓长尾区域(>1.0%)则对应发展成

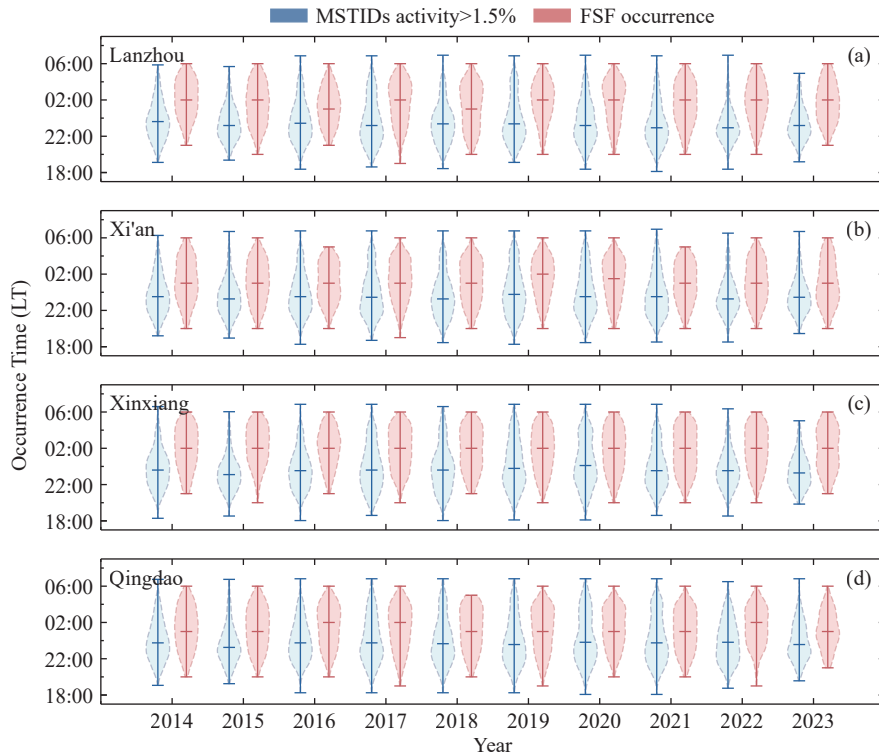
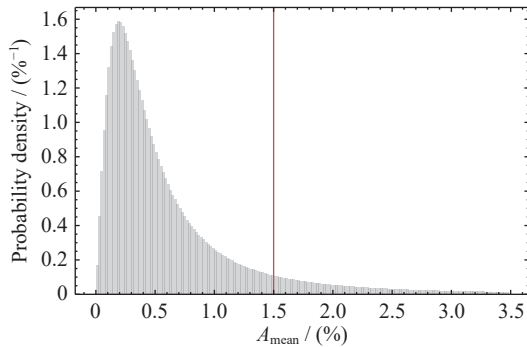


图 10 2014—2023 年各测高仪台站 MSTIDs 活动和 FSF 发生时间分布

Fig. 10 Distribution of MSTIDs activity and FSF occurrence times at different ionosonde stations from 2014 to 2023

图 11 MSTIDs 活动水平 A_{mean} 的统计概率分布Fig. 11 Statistical probability distribution of MSTIDs activity level magnitude A_{mean}

熟、具备相干结构的电离层扰动事件. 本文采用的 1.5% 基准阈值处于该分布的长尾区域内, 且显著高于核心背景噪声包络的上限. 从统计学角度来看, 满足 $>1.5\%$ 条件的扰动信号可被认为具有较高的置信度, 可与背景噪声有效区分.

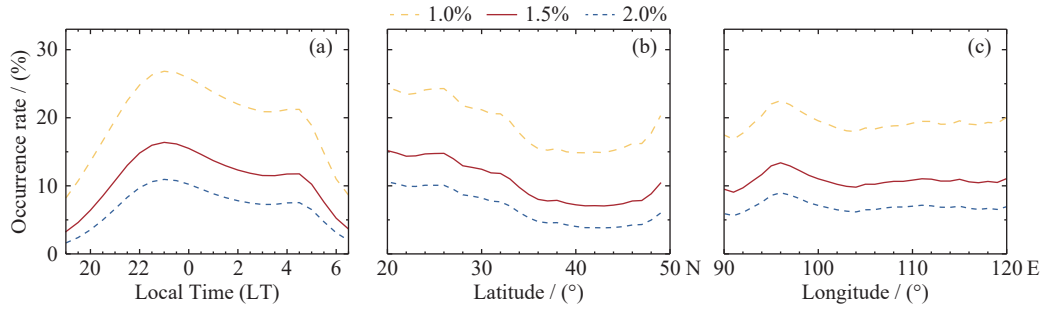
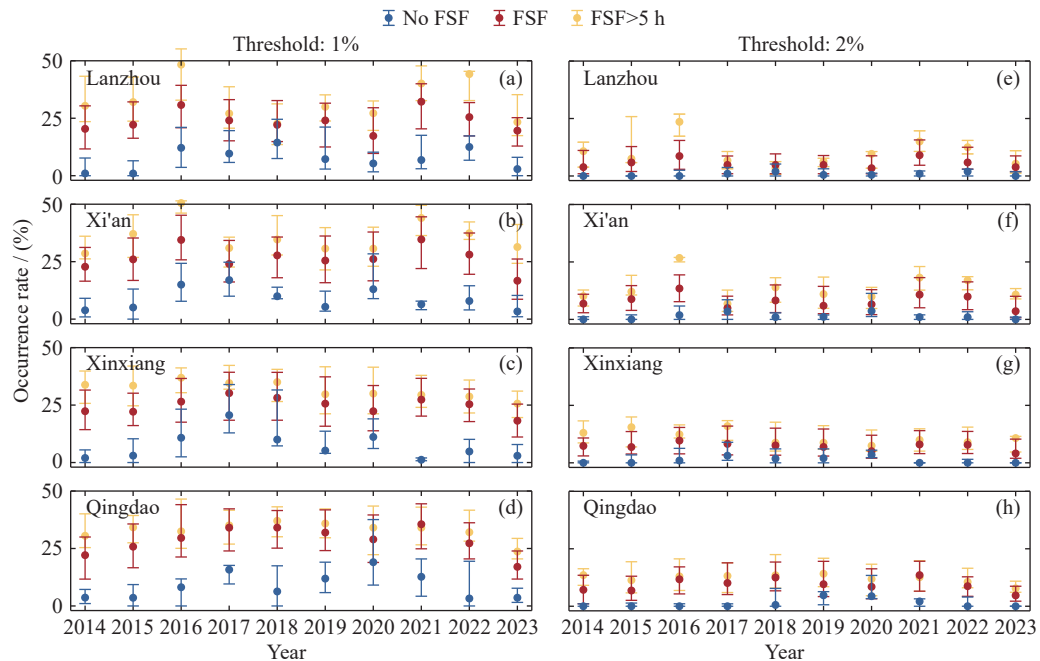
此外, 通过引入另外两个独立阈值场景开展了阈值的敏感性测试. 较宽容门槛 (1.0%) 和较严格门槛

(2.0%). 图 12 对比了在这三种不同阈值条件 (1.0%, 1.5% 和 2.0%) 下算出的 MSTID 发生率时空分布. 结果表明, 所有对照组之间表现较好的一致性. 尽管随着阈值从 1.0% 升高至 2.0%, 发生率的绝对数值反而下降, 但其随时间、纬度和经度的变化趋势表现出相似的轨迹. 图 13 则考虑在另外两个阈值下, 不同台站在不同 FSF 发生条件下的 MSTID 活动发生率分布规律与图 9 一致, 即存在 FSF 时, 对应夜晚 MSTIDs 活动发生率更高.

5 结论

利用 CMONOC 的 250 余个 GNSS 接收站及 CRIRP 电离层测高仪网络的 4 个观测站点数据, 对 2014—2023 年夏季夜间中 MSTIDs 活动的分布规律以及与 FSF 现象的关联进行了统计分析. 主要研究结果如下.

中国扇区 MSTIDs 活动主要发生在夏季夜间, 并与太阳活动呈现反相关. MSTIDs 活动主要集中于中低纬度地区, 经度上存在两个峰值区域 (东侧和西

图 12 不同 A_{mean} 阈值条件下 MSTIDs 活动发生率的时空分布Fig. 12 Temporal and spatial distribution of MSTIDs activity occurrence under different thresholds of A_{mean} 图 13 2014–2023 年各测高仪台站夏季夜间 (19:00–06:00 LT) 在不同 FSF 发生条件和不同 A_{mean} 阈值下 MSTIDs 活动发生率分布Fig. 13 Distribution of MSTIDs activity occurrence rates at each ionosonde station during summer nighttime (19:00–06:00 LT) under different FSF occurrence conditions and different A_{mean} thresholds from 2014 to 2023

侧). 两个峰值区域的形成机制存在差异, 东边的峰值的不稳定性驱动的 MSTIDs 特征, 可能与 Perkins 不稳定性有关, 而西边的峰值则与该区域频发的重力波活动有关.

中国扇区中纬度的扩展 F 以 FSF 为主, 也主要出现在夏季夜间和太阳活动低年, 与 MSTIDs 分布相近. 这两类现象倾向于在同夜出现, 发生过 FSF 的夏季夜晚对应的 MSTIDs 活动发生率要远高于未发生 FSF 的夜晚. 此外, MSTIDs 活动和 FSF 通常并非同步发生, MSTIDs 活动先于 FSF 发生, MSTIDs 活动

的统计峰值集中分布于午夜前, 而 FSF 的峰值则出现在午夜后, 二者发生时间的中位值相差约 1~2 h. 这说明 MSTIDs 传播时产生的密度起伏和极化电场可能提供了初始微扰 (种子), 并进一步触发了潜在的次级不稳定性过程. 同时, 二者的先后顺序也为利用 MSTIDs 开展中纬度扩展 F 及不规则体的短期临近预报提供了重要依据.

致谢 GNSS 观测数据来自于中国地壳运动监测网络 (CMONOC), 网址为 https://data.earthquake.cn/data/share/report.shtml?PAGEID=siteInfo_jizhun. 测高仪数

据来自于中国电波传播研究所。

医学伦理 研究不涉及人体或动物实验。

利益冲突 所有作者均声明不存在利益冲突。

参考文献

- [1] BOWMAN G G, FUKAO S, YAMAMOTO M, *et al.* MU-radar recorded field-aligned irregularities in the F₂ region and associated sporadic-E disturbances[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1994, **46**(10): 873-889
- [2] OTSUKA Y, ONOMA F, SHIOKAWA K, *et al.* Simultaneous observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances and E region field-aligned irregularities at midlatitude[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A6): A06317
- [3] HYSSELL D, LARSEN M, FRITTS D, *et al.* Major upwelling and overturning in the mid-latitude F region ionosphere[J]. *Nature Communications*, 2018, **9**(1): 3326
- [4] LIU Y, ZHOU C, XU T, *et al.* Review of ionospheric irregularities and ionospheric electrodynamic coupling in the middle latitude region[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**(5): 462-482
- [5] BOWMAN G G. A review of some recent work on mid-latitude spread-F occurrence as detected by ionosondes[J]. *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, 1990, **42**(2): 109-138
- [6] HYSSELL D L, LARSEN M, SULZER M. Observational evidence for new instabilities in the midlatitude E and F region[J]. *Annales Geophysicae*, 2016, **34**(11): 927-941
- [7] WATSON C, PEDATELLA N M. Climatology and characteristics of medium-scale F region ionospheric plasma irregularities observed by COSMIC radio occultation receivers[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(10): 8610-8630
- [8] GEORGES T M. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1968, **30**(5): 735-746
- [9] OTSUKA Y. medium-scale traveling ionospheric disturbances[M]//HUANG C S, LU G, ZHANG Y L, *et al.* Ionosphere Dynamics and Applications. Washington: American Geophysical Union (AGU), 2021: 421-437. DOI: [10.1002/9781119815617.ch18](https://doi.org/10.1002/9781119815617.ch18)
- [10] HINES C O. Internal atmospheric gravity waves at ionospheric heights[J]. *Canadian Journal of Physics*, 1960, **38**(11): 1441-1481
- [11] ASTAFYEVA E. Ionospheric detection of natural hazards[J]. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**(4): 1265-1288
- [12] LI K, ZHANG D H, ZENG Y, *et al.* Revisiting the ionospheric disturbances over low latitude region of China during super typhoon Hato[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(5): e2023SW003694
- [13] DING F, WAN W X, XU G R, *et al.* Climatology of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed by a GPS network in central China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A9): A09327
- [14] LAI C, XU J Y, LIN Z S, *et al.* Statistical characteristics of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances from 10-years of airglow observation by the machine learning method[J]. *Space Weather*, 2023, **21**(5): e2023SW003430
- [15] SHIOKAWA K, OTSUKA Y, IHARA C, *et al.* Ground and satellite observations of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbance at midlatitude[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A4): 1145
- [16] PERKINS F. Spread F and ionospheric currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(1): 218-226
- [17] HUANG F Q, DOU X K, LEI J H, *et al.* Statistical analysis of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using airglow images and GPS observations over central China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 8887-8899
- [18] CHEN G Y, ZHOU C, LIU Y, *et al.* A statistical analysis of medium-scale traveling ionospheric disturbances during 2014-2017 using the Hong Kong CORS network[J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, **71**(1): 52
- [19] BOOKER H G, WELLS H W. Scattering of radio waves by the F-region of the ionosphere[J]. *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, 1938, **43**(3): 249-256
- [20] ABDU M A. Outstanding problems in the equatorial ionosphere-thermosphere electrodynamics relevant to spread F[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2001, **63**(9): 869-884
- [21] KELLEY M C, HAERENDEL G, KAPPLER H, *et al.* Evidence for a Rayleigh-Taylor type instability and upwelling of depleted density regions during equatorial spread F[J]. *Geophysical Research Letters*, 1976, **3**(8): 448-450
- [22] GAO H Y, ZHANG D H, ZHANG Y B, *et al.* Case studies of the unseasonal ionospheric irregularities in China's low latitude on July 5 and July 17, 2013[J]. *Science China Technological Sciences*, 2025, **68**(11): 2120601
- [23] HAJKOWICZ L A. Morphology of quantified ionospheric range spread-F over a wide range of midlatitudes in the Australian longitudinal sector[J]. *Annales Geophysicae*, 2007, **25**(5): 1125-1130
- [24] PAUL K S, HARALAMBOUS H, OIKONOMOU C, *et al.* Mid-latitude spread F over an extended European area[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*,

- 2023, **248**: 106093
- [25] BEHNKE R. F layer height bands in the nocturnal ionosphere over Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1979, **84**(A3): 974-978
- [26] KELLEY M C, FUKAO S. Turbulent upwelling of the mid-latitude ionosphere: 2. Theoretical framework[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1991, **96**(A3): 3747-3753
- [27] HUANG C S, MILLER C A, KELLEY M C. Basic properties and gravity wave initiation of the midlatitude F region instability[J]. *Radio Science*, 1994, **29**(1): 395-405
- [28] XIAO S G, XIAO Z, SHI J K, *et al.* Observational facts in revealing a close relation between acoustic-gravity waves and midlatitude spread F[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A1): A01303
- [29] YU S M, XIAO Z, AA E, *et al.* Observational investigation of the possible correlation between medium-scale TIDs and mid-latitude spread F[J]. *Advances in Space Research*, 2016, **58**(3): 349-357
- [30] WANG N, GUO L X, ZHAO Z W, *et al.* A comparative study of ionospheric spread-F and scintillation at low- and mid-latitudes in China during the 24th solar cycle[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **63**(2): 986-998
- [31] HUANG W Q, XIAO Z, XIAO S G, *et al.* Case study of apparent longitudinal differences of spread F occurrence for two midlatitude stations[J]. *Radio Science*, 2011, **46**(1): RS1015
- [32] SHIOKAWA K, IHARA C, OTSUKA Y, *et al.* Statistical study of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using midlatitude airglow images[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A1): 1052
- [33] KOTAKE N, OTSUKA Y, TSUGAWA T, *et al.* Climatological study of GPS total electron content variations caused by medium-scale traveling ionospheric disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A4): A04306
- [34] OLIVER W L, FUKAO S, YAMAMOTO Y, *et al.* Middle and upper atmosphere radar observations of ionospheric density gradients produced by gravity wave packets[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A4): 6321-6329
- [35] SU S Y, TSUNODA R T, LIU C H, *et al.* ROCSAT observations of topside ionospheric undulations and irregularities at low to middle latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2007, **112**(A11): A11309
- [36] LIN F F, WANG C Y, SU C L, *et al.* Coordinated observations of F region 3 m field-aligned plasma irregularities associated with medium-scale traveling ionospheric disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(4): 3750-3766
- [37] LI K, ZHANG D H, ZENG Y, *et al.* Morphology and climatology of nighttime periodic ionospheric TEC disturbances associated with MSTIDs over China[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(11): e2024SW004041
- [38] LI K, ZHANG D H, TIAN Y Y, *et al.* Statistical study on the connections between TEC periodic disturbances associated with MSTIDs and mid-latitude frequency spread F in summer nights over China[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(6): e2025JA033706
- [39] LUO J, XU J Y, WU K, *et al.* Investigation on chasing and interaction of traveling ionospheric disturbances based on multi-instrument[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(8): e2023JA032283
- [40] OTSUKA Y, SHINBORI A, TSUGAWA T, *et al.* Solar activity dependence of medium-scale traveling ionospheric disturbances using GPS receivers in Japan[J]. *Earth, Planets and Space*, 2021, **73**(1): 22
- [41] TSUCHIYA S, SHIOKAWA K, FUJINAMI H, *et al.* Statistical analysis of the phase velocity distribution of mesospheric and ionospheric waves observed in airglow images over a 16-year period: comparison between Rikubetsu and Shigaraki, Japan[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(8): 6930-6947
- [42] TSUNODA R T. On the coupling of layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A11): 11304
- [43] NARAYANAN V L, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al.* On the role of thermospheric winds and sporadic E layers in the formation and evolution of electrified MSTIDs in geomagnetic conjugate regions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(8): 6957-6980
- [44] MATOZA R S, FEE D, ASSINK J D, *et al.* Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga[J]. *Science*, 2022, **377**(6601): 95-100
- [45] CHOU M Y, LIN C C H, YUE J, *et al.* Medium-scale traveling ionospheric disturbances triggered by Super Typhoon Nepartak (2016)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(15): 7569-7577
- [46] WAN W X, YUAN H, NING B Q, *et al.* Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortices around Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geophysical Research Letters*, 1998, **25**(20): 3775-3778
- [47] LI Q Z, XU J Y, LIU X, *et al.* Characteristics of mesospheric gravity waves over the southeastern Tibetan Plateau region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 9204-9221
- [48] HOFFMANN L, XUE X, ALEXANDER M J. A global

- view of stratospheric gravity wave hotspots located with Atmospheric Infrared Sounder observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(2): 416-434
- [49] ZHANG Y, XIONG J, LIU L, *et al.* A global morphology of gravity wave activity in the stratosphere revealed by the 8-year SABER/TIMED data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D21): D21101
- [50] LIU X, XU J Y, YUE J, *et al.* Orographic primary and secondary gravity waves in the middle atmosphere from 16-year SABER observations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(8): 4512-4522
- [51] ZENG X Y, XUE X H, DOU X K, *et al.* COSMIC GPS observations of topographic gravity waves in the stratosphere around the Tibetan Plateau[J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, **60**(1): 188-197
- [52] HOFFMANN L, ALEXANDER M J. Retrieval of stratospheric temperatures from Atmospheric Infrared Sounder radiance measurements for gravity wave studies[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D7): D07105

作者简介



李 科 男, 2000 年 1 月出生于山东省济南市, 现为北京大学地球与空间科学学院博士研究生, 主要研究方向为电离层物理, 目前开展中低纬电离层不均匀结构的演化特征和物理机制等研究.

E-mail: likespace@stu.pku.edu.cn



张东和(通信作者) 男, 北京大学地球与空间科学学院教授, 博士生导师, 主要从事空间物理、空间天气、电离层物理的教学和科研工作, 主要研究方向为基于 GNSS 数据的电离层 TEC 和闪烁数据处理方法、耀斑的电离层效应、电离层闪烁形态与效应、平流层突然增温与电离层全球响应等.

E-mail: zhangdh@pku.edu.cn