0254-6124/2024/44(6)-1047-09 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHOU Chensha, LAI Chang, XU Jiyao, WU Kun, YUAN Wei. Traveling Ionospheric Disturbance Events with Special Propagation Direction Based on Double-layer Airglow Observation (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1047–1055. CSTR:32142.14.cjss.2024–0006. DOI:10.11728/cjss2024.06.2024–0006

基于双层气辉观测的特殊传播方向电离层行进式扰动事件*

周尘砂[1] 赖 昌[1,2] 徐寄遥[2]
吴 坤[3] 袁 韦[2]

1(重庆邮电大学理学院 重庆 400065)

2(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

3(长沙理工大学物理与电子科学学院 长沙 410114)

摘 要 2011－2021 年, 位于中国河北省兴隆县的子午工程兴隆台站 (40.4°N, 117.6°E, 30.5°MLAT) 的全天空气辉成像仪记录了 611 次中尺度电离层行进式扰动 (Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbance, MSTID) 事件, 其中 589 次是典型的西南向传播, 22 次是非西南向传播. 为了更好地理解这些非典型传播方向的 MSTID 事件, 采用地基协同观测的 OI 630 nm 和 OH 近红外波段气辉图像对比 MSTID 和大气重力波 (Atmospheric Gravity Wave, AGW) 传播参数、射线追踪和风场数据, 探讨了非西南传播的典型 MSTID 事件的形成机制. 结果表明, 当 MSTID 和 AGW 传播方向相近时, 上游 AGW 激发的 Perkins 不稳定性可能是形成这类 MSTID 的机制, 解释了东北方向和部分西北方向传播的事件; 在黄昏时分, 中性风场向东, AGW 破碎后的波动经过中性风的过滤, 导致西向传播的 MSTID 事件; 孤波 MSTID 不具有周期性结构, 可能源自 E-F 耦合激发.

关键词 电离层行进式扰动, 大气重力波, 全天空气辉成像仪, 非西南向传播

中图分类号 P352

Traveling Ionospheric Disturbance Events with Special Propagation Direction Based on Double-layer Airglow Observation

ZHOU Chensha[1] LAI Chang[1,2] XU Jiyao[2]
WU Kun[3] YUAN Wei[2]

1(*School of Science*, *Chongqing University of Posts and Telecommunications*, *Chongqing* 400065)

2(*State Key Laboratory of Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

* 中国科学技术协会青年人才托举项目 (2021QNRC001) 和空间天气学国家重点实验室开放项目共同资助

2024-01-08 收到原稿, 2024-03-31 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

3(*School of Physics and Electronic Sciences, Changsha University of Science and Technology, Changsha* 410114)

Abstract The all-sky airglow imager at Xinglong Station (40.4°N, 117.6°E, and 30.5°MLAT), has captured 611 Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbance (MSTID) events from 2011 to 2021 in the 630nm wavelength band. Among all events, a notable majority of 589 demonstrate typical southwestward propagation characteristics, while the remaining 22 events propagate in other directions. To delve deeper into the understanding of these atypical MSTID events, a meticulous examination was undertaken utilizing ground-based coordinated observations of OI 630 nm and OH near-infrared airglow images. From each non southwest direction—northeast, northwest, and southeast—one representative event was selected for detailed discussion. The analysis includes comparison of various parameters associated with MSTID and Atmospheric Gravity Waves (AGW), ray tracing algorithm, and wind field data. Based on the analysis and previous references, the possible sources of the MSTIDs were concluded as follow. MSTID events exhibiting congruent propagation with AGW may be attributed to the Perkins instability induced by upstream AGW propagation. This explanation is plausible for events propagating towards the northeast and some northwestward events, since AGWs propagating to the directions similar with the simultaneous above MSTIDs were spotted in these events. The fluctuation from broken AGWs is filtered by the eastward neutral winds during twilight hours. Normally, only the westward components pass through and continue propagating upwards, which leads to the westward MSTID event discussed in this paper. Comprised with the northwestward event, the relative intensity of the westward event is small, also indicating the westward event may be triggered by the broken AGWs. Solitary wave MSTID events, characterized by their absence of periodic structural features, are posited to originate from the coupling between the E and F layers of the ionosphere, rather than being directly influenced by AGW phenomena. This comprehensive analysis not only advances our understanding of the generation of MSTIDs but also underscores the intricate interplay between various atmospheric processes in shaping ionospheric disturbances.

Key words MSTID, AGW, All-sky airglow imager, Non-southwestern propagation

0 引言

电离层行进式扰动是电离层中典型的不规则结构, 其中波长大于 1000 km 的扰动被认为是大尺度扰动[1], 而波长在 100～500 km 的波动被称为中尺度电离层行进式扰动 (Medium-scale Traveling Ionospheric Disturbance, MSTID)[2]. MSTID 能够引起电离层密度、电场、电流等物理量的快速变化, 进而对卫星通信、导航、雷达探测等产生重要影响[3]. 在北 (南) 半球, 夜间 MSTID 的波面主要呈西北–东南 (东北–西南) 向排列, 具有明显的向西南 (西北) 传播的趋势[4,5]. Miller 报道了 1993 年 1 月 26－27 日加勒比海上空两个增强气辉带和相关的减弱气辉区域向西南方向移动的事件[2]. Garcia 统计了 1997 年 1 月 5 日至 1998 年 4 月 10 日位于美国的阿雷西博 (Arecibo 18.3°N, 66.8°W, 28.8° MLAT) 的康奈尔全天空成像仪观测到的 MSTID, 其传播方向绝大部分是西南方向[6]. Shiokawa 等[7] 在日本利用全天空气辉成像仪 1998－2000 年的观测数据研究了 MSTID 传播方向, 发现陆别町 (Rikubetsu 43.5°N, 143.8°E, 34.7°MLAT) 和信乐 (Shigaraki 34.9°N, 136.1°W, 25.4°MLAT) 两地的 MSTID 有明显的西南向传播趋势. 在接近一个太阳周期 (2011－2021 年) 内, Lai 等[8] 借助中国兴隆站点 (40.4°N, 117.6°E, 30.5°MLAT) 的 76 万张 630 nm 波段气辉观测图像进行了统计分析, 共识别到 611 个 MSTID 事件, 其中 589 个事件朝西南传播, 占事件总数的 96.4%.

Perkins 不稳定性[9] 被认为是夜间 MSTID 可能的机制, 其解释了北半球 MSTID 波面从西北到东南延伸, 主要归因于 200～300 km 高度的等离子体密度扰动, 该扰动与方位角有高度的相关性[10]. 但是 Perkins 不稳定性不能解释 MSTID 向西南传播的

特性, 而且存在增长速过低的问题. Kelley 和 Makela[11] 提出了偶极子极化电场模型用于分析西南向传播特性. Cosgrove 和 Tsunoda[12] 发现 Es 层和 F 层耦合可以显著提高 Perkins 不稳定性的增长速率, 从而将 Perkins 不稳定性和 Es 层耦合统一.

由于大气重力波 (Atmospheric Gravity Wave, AGW) 能够使 Perkins 不稳定性增长率变大, 所以 AGW 也被认为是 MSTID 可能的来源[13]. Otsuka 等[14] 报道了在日本使用总电子含量数据观测到的黄昏黎明时的 MSTID 事件, 认为这些 MSTID 可能是 AGW 引发的. 基于形态特征, Figueiredo 等[15] 把 MSTID 分为周期性 MSTID(两个及其以上的波面) 和孤波 MSTID (只有一个波面). Katamzi 等[16] 认为周期性变化的 AGW 可以引发周期性变化的 MSTID.

非西南向的 MSTID 事件也有少量报道, 但并未得到系统的分析. Wu 等[17] 报道了沿着西南和东北方向相向传播并相互作用的 MSTID 事件, 并将其物理机制归因于电离层等离子体运动及 MSTID 内部极化电场. Katamzi 等[14] 统计了南非萨瑟兰 (Sutherland 32.4°S, 20.8°E, –40.7 MLAT) 观测到的夜间 MSTID 事件, 得到 MSTID 大多伴随着突发 E 层和扩展 F 结构的结果, 进一步分析后认为非西南向的 MSTID 可能源于 AGW.

在前期的研究中, 借助兴隆站点 630 nm 波段的地基气辉观测图像, 识别并分析了 611 个 MSTID 事件[8], 其中共有 22 个非西南方向传播的 MSTID 事件. 东北、西北和东南向传播的事件分别为 15, 5, 2 个. 本文将在东北、西北和东南 3 个方向各选取 1 个具有代表性的事件, 并结合 OH 气辉的地基同步观测数据, 分析非西南向传播 MSTID 可能的物理机制.

1 观测

使用的 OH 和 OI 气辉数据来自于中国兴隆站的全天空气辉成像仪. 全天空气辉成像仪主要由一个 180°空间视角的鱼眼镜头、相应波段的滤光片以及 1024 pixel×1024 pixel 的 CCD 等设备组成. OH 气辉观测的波段为 715～930 nm (中间滤除 O_2 气辉的 865.5 nm), 可以捕捉 (87±5) km[18] 高度上 AGW 在 OH 气辉层中产生的扰动. OI 气辉的观测波段为 630 nm (观测波段带宽为 2 nm, 630 nm 为中心波长), 可以捕捉 250 km 高度附近[19] 的 MSTID 引起的 OI 气辉扰动. 全天空气辉成像仪观测数据的主要处理步骤如下: 转码、方位校正、过滤星光, 减去平均基底去除背景噪声和地理坐标投影, 详细处理过程可参考文献 [20]. 由于气辉成像仪边缘部分有畸变, 选取视场中心附近的区域投影, 经过投影后的 OI 气辉和 OH 气辉图像为 1600 pixel×1600 pixel, 像素间的实际空间距离为 1 km.

在前期的统计研究中[8], 基于卷积神经网络和快速区域卷积神经网络分别训练了分类模型和 MSTID 识别模型对 2011－2021 年间的近 75×10^4 张气辉图像进行分析. 首先使用分类模型, 根据拍摄时的环境将适合观测 MSTID 的晴空图像分离出来. 然后再将这些晴空时拍摄的气辉图像进行处理并投影到地理坐标平面, 并用 MSTID 识别模型进行检测. 共识别到 611 个 MSTID 事件, 其中 589 个是向西南方向传播的典型事件, 其余 22 个非典型事件在其他方向传播.

2 非西南方向传播的 MSTID

2012－2021 年中国兴隆站点共观测到 22 个非西南方向传播的 MSTID 事件, 包括 15 个东北向传播事件, 5 个西北向传播事件和 2 个东南向传播事件. 从波的结构分类, 大部分非西南方向的事件为周期性 MSTID, 仅有 1 个西北向和 1 个东南向事件为孤波 MSTID. 值得注意的是, 所有非西南向事件下方的 OH 气辉层中都同时观测到了 AGW. 在西北、东北和东南各选取了 1 个具有代表性的事件进行分析, 这些事件观测过程完整, 图像清晰.

2.1 东北方向传播 MSTID 与 AGW 的关联

15 个朝东北传播的 MSTID 事件都是周期性波动, 并且下方 87 km 的 OH 气辉层都观测到了朝东北方向传播的 AGW, 其中 12 次发生在 4 月至 8 月.

选取当地时间 2021 年 6 月 12 日夜晚观测到的一次事件作为东北方向传播的 MSTID 典型事件, 如图 1(a) 所示. 为方便对比, 在图 1 中仅给出 3 个连续时刻的气辉观测. 同时在下方的 OH 气辉层也观测到了东北方向传播的 AGW, 如图 1(b) 所示, 表 1 给出了提取的波动参数, 其中不确定度来自多次测量值的涨落, 方位角按顺时针方向增加, 以正北向为 0°. 相对强度计算公式为

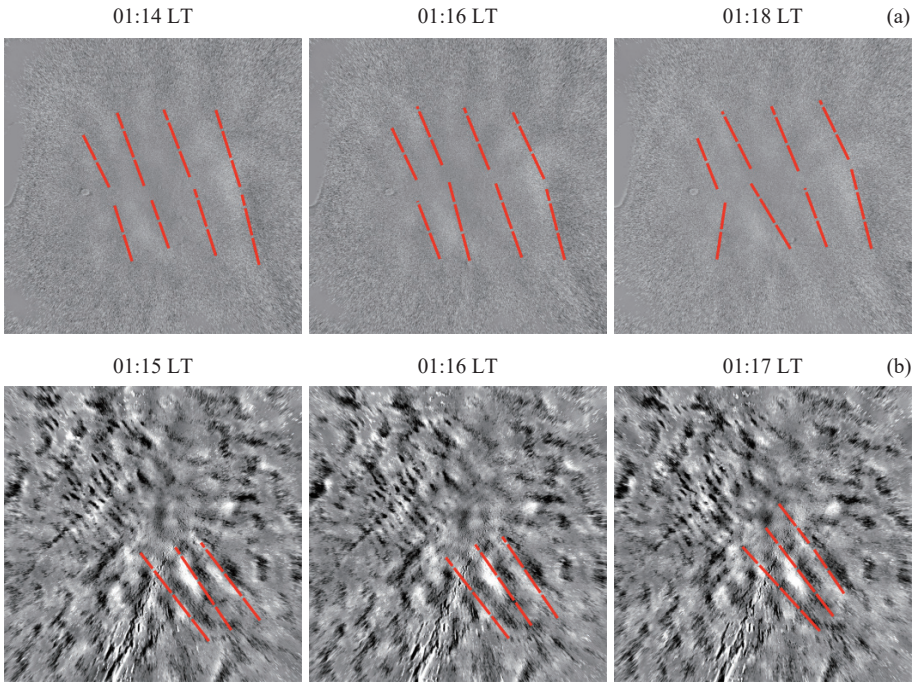


图 1 同时观测到的东北向 MSTID (a) 与 AGW (b) 气辉. 红色虚线为波面

Fig. 1 Simultaneously observed northeastward MSTID (a) and AGW (b). The wave forms are marked by red dashes

表 1 东北向 MSTID 与 AGW 事件参数

Table 1 Parameters of the northeast MSTID and AGW

波动类型	传播速度/(m·s^{-1})	波长/km	周期/s	相对强度	传播方位/(°)
MSTID	150±11	200.7±0.3	1335±11	0.40	57±5
AGW	59±2	55.6±0.6	941±37	0.24	55±3

$$P=\frac{1}{2}(I_{\max}-I_{\min})/I_{\mathrm{mean}}. \tag{1}$$

其中, $I_{\max}$为波峰最强灰度, $I_{\min}$为波谷最弱灰度, I_{mean}为选定波动区域的平均灰度.

本次事件的 MSTID 呈现周期性波动结构, 其激发源也应该具有周期性结构. 同时考虑到相近的传播方向, 可以认为此次事件可能与 AGW 有关. 当台站西南方的 AGW 向东北方向传播时, 上游的一部分波动斜向上传播到电离层引发 Perkins 不稳定性并产生 MSTID, 在 OI 气辉层产生的扰动被 630 nm 波段观测到, 同时 AGW 可以增强 Perkins 不稳定性, 也可导致 MSTID 的周期性变化[16]. 另一部分传播到 OH 层, 产生的扰动被近红外波段捕捉, 也证明了该时段存在东北方向传播的 AGW 事件.

根据 Perkins 不稳定性, 向北的地磁场与向东的电场在电离层所在高度上构成的平面假定是电离层的平衡位置. 如果有一个扰动到达这个平衡位置, 会在电离层产生电导率扰动$\delta\boldsymbol{\Sigma}$、扰动电流$\delta\boldsymbol{J}$以及为了维持电流连续的垂直 MSTID 相平面的极化电场$\delta\boldsymbol{E}$. 在受到扰动后, 被扰动部分运动到原来平衡位置的上方空间, 此时$\boldsymbol{E}\cdot\hat{\boldsymbol{x}}>\boldsymbol{0}$, $\hat{\boldsymbol{x}}>\boldsymbol{0}$ 表示西北向. 扰动电流方向将朝东南方向移动. 同理, 在原平衡位置的下方空间, $\boldsymbol{E}\cdot\hat{\boldsymbol{x}}<\boldsymbol{0}$ 扰动电流朝西北方向移动. 电流受到的磁场力$\delta\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B}$在电离层抬升区域向上, 在电离层降低区域向下, 放大了扰动. 此时电离层就处于不稳定状态, Perkins 不稳定性被触发[21].

反向射线追踪算法被用于回溯波动的传播路径. 该算法基于大气标高H, 空气中取值 0.7 的普朗特数Pr, 大气密度μ, 温度T, 传播周期T_1和风场数据可以在垂直方向上每隔 100 m 高度计算波包经向、纬向和

垂直方向的群速度, 通过群速度可以得到 AGW 传播过程中的反向位移. 从观测到波动的位置向下逐步回溯, 直到垂直波数 $m^2<0$. 垂直波数的色散关系如下:

$$m^2 = m_0^2 - A\cdot B + k_{\rm h}^2 + \frac{1}{4H^2}, \tag{2}$$

$$A = \frac{k_{\rm h}^2\cdot N_{\rm b}^2}{\omega^2\cdot(1+\delta_1+\delta^2/Pr)}\cdot\left(1+\frac{\delta\cdot\nu_0}{H\cdot\omega}+\delta^2/Pr\right)^{-1}, \tag{3}$$

$$B = \left[1+\frac{\nu_0^2}{4\cdot\omega^2}\cdot\left(k^2-\frac{1}{4H^2}\right)^2\cdot\left(1-\frac{1}{Pr}\right)^2\cdot\left(1+\frac{\delta\cdot\nu_0}{2H\cdot\omega}\right)^{-2}\right]^{-1}. \tag{4}$$

其中,

$$\delta = \frac{\nu_0\cdot m_0}{H\cdot\omega}, \tag{5}$$

$$\delta_1 = \delta\cdot(1+Pr^{-1}), \tag{6}$$

$$\nu_0 = \frac{3.34\times10^{-4}\times T^{0.71}}{\mu}, \tag{7}$$

$$\nu_1 = \nu_0\cdot(1+Pr^{-1}), \tag{8}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T_1}. \tag{9}$$

输入初始迭代数据m_0, 对式 (2) 使用牛顿迭代算法求取垂直波数m, 注意m_0的数值要求尽可能地接近垂直波数的真实值, $k_{\rm h}$表示水平波数, k表示波动传播总的波数.

对 MSTID 的反向射线追踪在 170 km 高度截止, 位于兴隆台站西南方的 38.59°N, 111.93°E 附近 (见图 2). 此时垂直波数 $m^2<0$ 结束反向追踪, 因此可能是 AGW 向上传播在 170 km 处破碎或者导管传播到此处触发了 MSTID. 反向射线追踪[22] 使用的风场、温度等数据来自 MERRA-2 再分析数据集、HWM 和 NRLMSISE-00 模型[23–26].

兴隆站点大部分观测到的东北向 MSTID 事件发生在 4—8 月, 同时北半球夏季 (5—8 月) 发生的 AGW 大多数都朝东北传播[27]. 因此这些东北向的 MSTID 事件源于上游向上传播到热层的 AGW 的可能性较大. 为了更直观地展现朝东北方向传播的 MSTID 的特点, 本文将 15 个事件的波长、传播速度统计如图 3 所示.

2.2 西北方向传播 MSTID 可能的物理机制

西北向传播的 MSTID 事件共有 5 个, 其中 3 个事件下方的 OH 层观测到西北向传播的 AGW. 而当地时间 2014 年 4 月 5 日 19:58 LT—20:40 LT 捕捉到的西北向 MSTID 事件如图 4(a) 所示, 下方的 AGW 传播方向为朝西南方, 如图 4(b) 所示. 相关波动参数列于表 2 中. 在发生时间和传播方向上, 该 MSTID 事件都与 Otsuka 等[14] 在日本观察到的黄昏时向西北偏北传播的 MSTID 相符. Otsuka 认为,黄昏时西北向传播的 MSTID 可能源自经过风场过滤的 AGW.

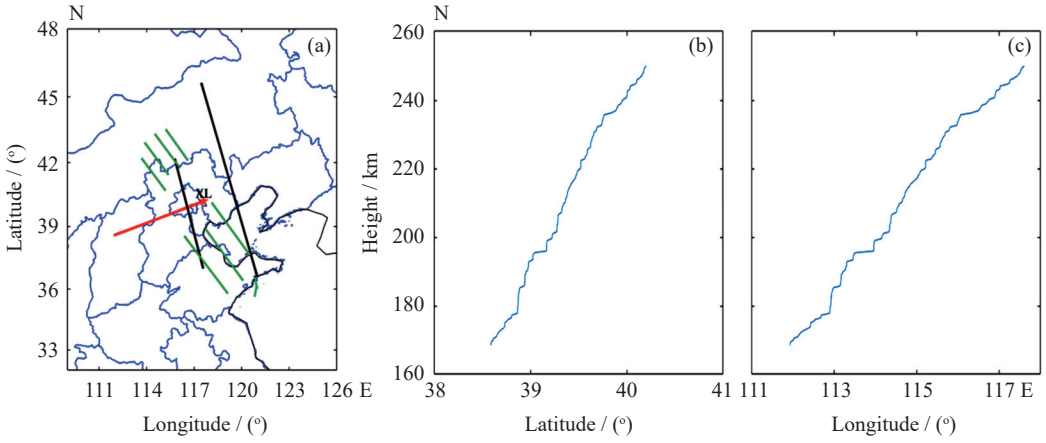


图 2 反向射线追踪结果. (a) 红色五角星表示兴隆台站, 红色实线表示 OI 气辉观测的 MSTID 反向射线追踪路径, 红色线条的末端是追踪结果位置, 黑色和绿色线条分别表示 MSTID 和 AGW 的波面

Fig. 2 Backward ray tracing results. In (a), the red pentagram represents the Xinglong Station, and the red lines depict the backward ray tracing paths of MSTID observed in OI airglow. The end points of the red lines indicate the traced positions. The black and green lines respectively represent the wave fronts of MSTID and AGW

本次事件下方的 AGW 向着西南方向传播, 因此认为是 AGW 破碎后的波动, 经过风场过滤后向上传播并激发了 MSTID. 热层中性风是由中性大气的气压梯度驱动, 在黄昏时分从白昼侧吹向夜晚侧[14]. AGW 在临界高度破碎时, 会在各个方向产生波动. 由于风场过滤机制[28,29], 速度低于风速的东向波动无法向上传播, 传播到热层的波动多为西向. 因此产生了具有西向分量的 MSTID. 与 2.1 节中东北向传播的波动参数相比, 表 2 中 AGW 的相对强度与表 1 中的数值接近, 但 MSTID 的相对强度却从表 1 中的 0.40 降低到了 0.27. MSTID 相对强度减小可以用风场过滤解释, AGW 破碎后产生各个方向的波动, 中性风过滤了其他方向的波动, 只有西北向的波动向上传播并引发了西北向的 MSTID.

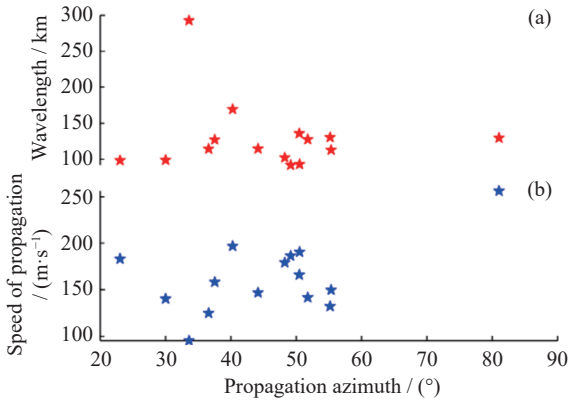


图 3 东北向 MSTID 事件波长和传播速度统计

Fig. 3 Statistics of northeast MSTID event wavelength and propagation velocity

2.3 东南向传播孤波 MSTID 可能的形成原因

东南方向传播的 MSTID 事件仅发现两例, 其中一例发生在 2017 年 4 月 30 日 21:43 LT－22:16 LT 的 MSTID 事件为孤波事件, 如图 5(a) 所示. 尽管该孤波事件下方存在 AGW, 但 AGW 激发的 MSTID 通常呈现出周期性波面, 如图 5(b) 所示, 两个波动的参数差别较大, 如表 3 所示. 因此该次孤波事件不太可能源自 AGW.

Figueiredo 等[15] 认为, E 区的极化电场在孤波 MSTID 的形成中起着重要的作用. Otsuka 等[30] 利用甚高频雷达和全天空气辉成像仪在日本上空同时观测到了 F 层 MSTID 和 Es 层耦合的发生, 证明了 E-F 耦合的存在. 这种耦合效应给出了比 Perkins 不稳定性更大的不稳定性增长率[12,31], 显著提高了 F 层波动结构的增长率. 因此, 这次事件可能是 E-F 耦合通过与 Es 层相关联的极化电场激发[32]. 而另外一例为

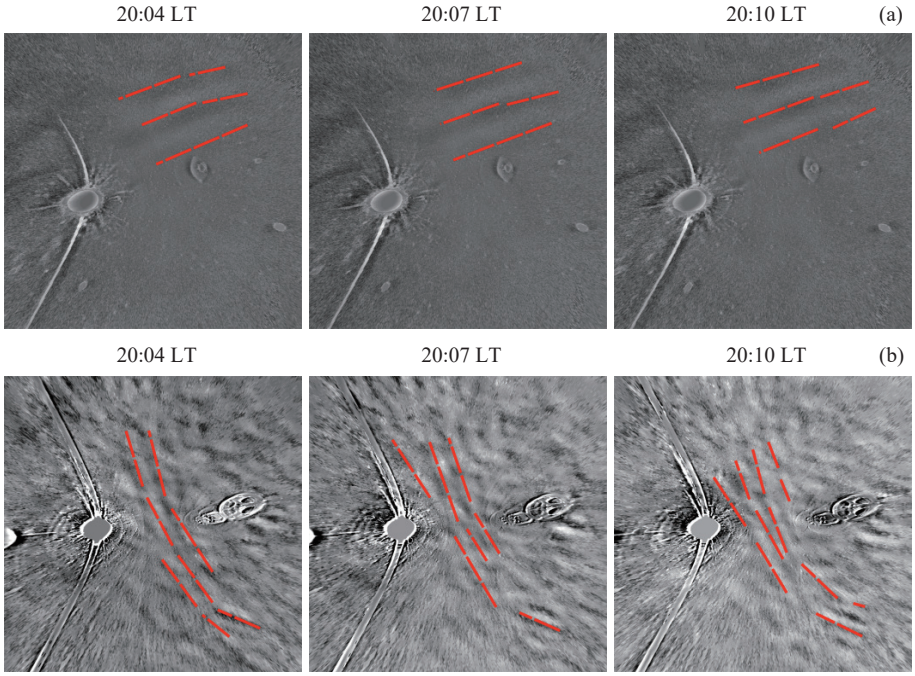


图 4 西北向的 MSTID (a) 与西南向的 AGW (b). 红色虚线为波面

Fig. 4 Northwestward MSTID (a) and southwestward AGW (b) observed simultaneously. The wave forms are marked by red dashes

表 2　西北向 MSTID 与西南向 AGW 事件参数

Table 2　Northwest MSTID and southwest AGW event parameters

波动类型	传播速度/(m·s^{-1})	波长/km	周期/s	相对强度	传播方位/(°)
MSTID	195±26	162.5±2.2	836±12	0.27	333±7
AGW	55±3	35.0±0.6	635±37	0.22	112±1

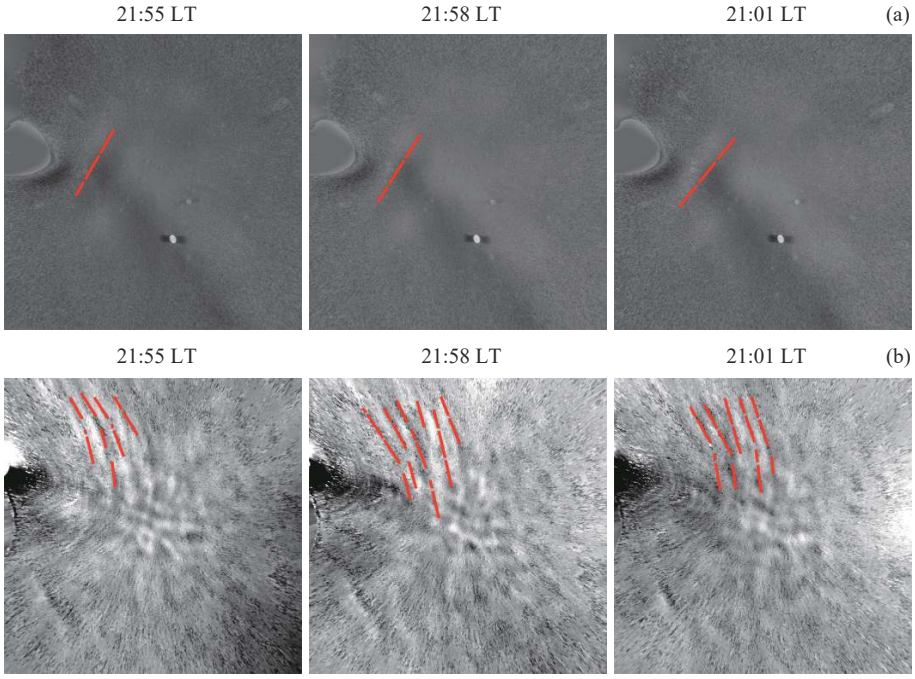


图 5　孤波 MSTID (a) 与下方 OH 气辉中的 AGW (b). 红色虚线为波面. (a) 对角线上的暗色条纹是西南向传播的孤波 MSTID

Fig. 5　Solitary MSTID (a) and AGW in OH airglow below (b). The wave forms are marked by red dashes. The dark stripe in subgraph (a) is a solitary MSTID propagating southwest

表 3　孤波 MSTID 与 AGW 事件参数

Table 3　Solitary MSTID and AGW event parameters

波动类型	传播速度/(m·s^{-1})	波长/km	周期/s	相对强度	传播方向/(°)
MSTID	212±9	—	—	0.37	144±11
AGW	44±4	21.7±0.6	498±37	0.14	76±2

周期性事件, 下方 OH 气辉层同时观测到东南方向传播的 AGW, 很有可能是 AGW 向上传播引发 Perkins 不稳定性而产生.

3　结语

基于中国兴隆站点全天空气辉成像仪 OI 630 nm 和 OH 近红外波段的协同观测, 在前期的统计工作中共识别到 611 个 MSTID 事件, 其中 589 个是向西南方向传播的典型事件. 对非西南向传播的 22 个 MSTID 事件的生成机制进行了探讨, 这些机制包括 AGW 直接向上传播触发 Perkins 不稳定性, E-F 耦合和南北半球间耦合和经过风场过滤效应的二次重力波激发.

结合 OH 气辉观测, 其中 19 个事件下方 OH 气辉层观测到了同方向传播的 AGW, 特别是东北方向

传播的 15 个事件都有东北向传播的 AGW 存在. 华北地区在 4—8 月的 AGW 传播方向多为东北方向, 观测到的东北方向传播的 MSTID 事件也主要发生在 4—8 月. 这些事件表现出的特征符合 MSTID 由上游 AGW 向上传播并激发 Perkins 不稳定性而产生的理论.

2014 年 4 月 5 日 19:58 LT—20:40 LT, 气辉成像仪捕捉到了西北方向的波动, 同时下方 OH 气辉层存在西南向传播的 AGW. 该事件的时间和方向与文献中提及的晨昏波相似. 由于白昼侧温度高于夜间侧温度, 在气压的作用下中性风从白昼侧吹向夜间侧. 在风场过滤作用下, 东向传播的 AGW 无法向上传递. 在 AGW 破碎后的波动中, 西向的波动可以通过中性风的过滤向上传播. 该 MSTID 事件较低的相对强度也对应二次波引发的电离层扰动. 因此黄昏时分西北向的 MSTID 事件可能是 AGW 破碎后的二次波经过风场效应过滤后, 继续向上传播激发 Perkins 不稳定性引起.

非西南向传播的大部分 MSTID 是周期性结构的波动, 孤波相对较少. 在当地时间 2017 年 4 月 30 日观测到东南向 MSTID, AGW 上传触发 MSTID 的机制不适于解释这一孤波事件. 该事件下方虽然存在 AGW, 但从形态和传播方向上分析, 更有可能由 E-F 耦合激发.

结合 AGW 传播理论, 风场过滤效应和 E-F 耦合机制解释了北半球中纬度地区 22 个非西南向传播的 MSTID 的成因, 这有助于进一步理解 MSTID 的物理机制. 但 MSTID 的物理机制是复杂的, 未来还需要更多的观测和模拟来进一步研究 MSTID 的形态结构及传播特征.

致谢 数据来自子午工程兴隆站.

参考文献

[1] PAN Jianhong, CAI Hongtao, GU Jun, *et al*. A case study of large-scale travelling atmospheric disturbances driven by equatorial local source[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)

[2] MILLER C A, SWARTZ W E, KELLEY M C, *et al*. Electrodynamics of midlatitude spread *F*: 1. Observations of unstable, gravity wave-induced ionospheric electric fields at tropical latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A6): 11521-11532

[3] YAO Yibin, GAO Xin. Research progress and prospect of monitoring ionosphere by GNSS technique[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2022, **47**(10): 1728-1739 (姚宜斌, 高鑫. GNSS 电离层监测研究进展与展望 [J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2022, **47**(10): 1728-1739)

[4] RAJESH P K, LIU J Y, LIN C H, *et al*. Space-based imaging of nighttime medium-scale traveling ionospheric disturbances using FORMOSAT-2/ISUAL 630.0 nm airglow observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(5): 4769-4781

[5] MARTINIS C, BAUMGARDNER J, WROTEN J, *et al*. All-sky imaging observations of conjugate medium-scale traveling ionospheric disturbances in the American sector[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A5): A05326

[6] GARCIA F J, KELLEY M C, MAKELA J J, *et al*. Airglow observations of mesoscale low-velocity traveling ionospheric disturbances at midlatitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2000, **105**(A8): 18407-18415

[7] 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

[8] 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

[9] PERKINS F. Spread *F* and ionospheric currents[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(1): 218-226

[10] YOKOYAMA T, OTSUKA Y, OGAWA T, *et al*. First three-dimensional simulation of the Perkins instability in the nighttime midlatitude ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, **35**(3): L03101

[11] KELLEY M C, MAKELA J J. Resolution of the discrepancy between experiment and theory of midlatitude *F*-region structures[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(13): 2589-2592

[12] COSGROVE R B, TSUNODA R T. Instability of the *E-F* coupled nighttime midlatitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2004, **109**(A4): A04305

[13] KELLEY M C. *In situ* ionospheric observations of severe weather-related gravity waves and associated small-scale plasma structure[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1997, **102**(A1): 329-335

[14] OTSUKA Y, KOTAKE N, SHIOKAWA K, *et al*. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances observed with a GPS receiver network in Japan[M]//ABDU M A, PANCHEVA D. Aeronomy of the

Earth's Atmosphere and Ionosphere. Dordrecht: Springer, 2011: 291-299

[15] FIGUEIREDO C A O B, TAKAHASHI H, WRASSE C M, *et al*. Investigation of nighttime MSTIDS observed by optical thermosphere imagers at low latitudes: morphology, propagation direction, and wind filtering[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(9): 7843-7857

[16] Katamzi-JOSEPH Z T, GRAWE M A, MAKELA J J, *et al*. First results on characteristics of nighttime MSTIDs observed over South Africa: Influence of thermospheric wind and sporadic E[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(11): e2022JA030375

[17] WU K, XU J Y, WANG W B, *et al*. Interaction of oppositely traveling medium-scale traveling ionospheric disturbances observed in low latitudes during geomagnetically quiet nighttime[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(2): e2020JA028723

[18] XU J Y, LI Q Z, YUE J, *et al*. Concentric gravity waves over northern China observed by an airglow imager network and satellites[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2015, **120**(21): 11058-11078

[19] SUN L C, XU J Y, ZHU Y J, *et al*. Case study of an Equatorial Plasma Bubble Event investigated by multiple ground-based instruments at low latitudes over China[J]. *Earth and Planetary Physics*, 2021, **5**(5): 435-449

[20] LAI C, YUE J, XU J Y, *et al*. Detection of large-scale concentric gravity waves from a Chinese airglow imager network[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **171**: 269-276

[21] SUN L C, XU J Y, WANG W B, *et al*. Mesoscale field-aligned irregularity structures (FAIs) of airglow associated with medium-scale traveling ionospheric disturbances (MSTIDs)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(11): 9839-9858

[22] JONES W L. Ray tracing for internal gravity waves[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, **74**(8): 2028-2033

[23] RIENECKER M M, SUAREZ M J, GELARO R, *et al*. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications[J]. *Journal of Climate*, 2011, **24**(14): 3624-3648

[24] HEDIN A E, FLEMING E L, MANSON A H, *et al*. Empirical wind model for the upper, middle and lower atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1996, **58**(13): 1421-1447

[25] DROB D P, EMMERT J T, CROWLEY G, *et al*. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A12): A12304

[26] TANG Q, ZHOU Y F, DU Z T, *et al*. A comparison of meteor radar observation over China region with horizontal wind model (HWM14)[J]. *Atmosphere*, 2021, **12**(1): 98

[27] 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

[28] COWLING D H, WEBB H D, YEH K C. Group rays of internal gravity waves in a wind-stratified atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1971, **76**(1): 213-220

[29] WALDOCK J A, JONES T B. The effects of neutral winds on the propagation of medium-scale atmospheric gravity waves at mid-latitudes[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1984, **46**(3): 217-231

[30] 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

[31] TSUNODA R T. On the coupling of layer instabilities in the nighttime midlatitude ionosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A11): A11304

[32] HALDOUPIS C, SCHLEGEL K, FARLEY D T. An explanation for type 1 radar echoes from the midlatitude *E*-region ionosphere[J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(1): 97-100

作者简介



周尘砂 男, 1997 年 8 月出生于重庆市南川区, 现为重庆邮电大学理学院硕士研究生, 物理学专业.
E-mail: s210601020@stu.cqupt.edu.cn



赖 昌(通信作者) 男, 1980 年 1 月出生于四川省内江市, 现为重庆邮电大学理学院教授, 研究生导师, 主要研究方向为中高层大气波动、气辉图像智能识别等.
E-mail: laichang@cqupt.edu.cn