0254-6124/2026/46(5)-1078-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

GONG Yun, CHEN Xinkun, MA Zheng, ZHANG Shaodong. Recent Research Progress in Low-latitude Ionospheric Midnight Collapse of Electron Density (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1078–1087. CSTR:32142.14.cjss.2026–0027. DOI:10.11728/cjss2026.05.2026–0027

低纬度电离层电子浓度午夜塌陷研究进展*

龚 韵[1] 陈鑫坤[1] 马 铮[1] 张绍东[1,2]

1(武汉大学地球与空间科学技术学院 武汉 430072)

2(贵州师范大学 贵阳 550025)

摘 要 低纬度电离层午夜塌陷是夜间电离层电子浓度演变中一种典型的结构性变化, 表征了夜间电离层离子垂直输运及其动力学调制作用. 自该现象被观测以来, 围绕其形态特征与物理机制开展了大量研究, 相关工作采用地基雷达观测、卫星观测资料以及数值模拟等多种研究方法. 本文系统回顾了数十年来低纬度电离层午夜塌陷的研究进展, 重点总结其在不同季节、不同地磁活动水平下的主要形态特征; 围绕其物理机制, 着重讨论离子垂直漂移速度在午夜塌陷形成与演化中的主导作用, 并进一步分析影响离子垂直漂移变化的关键因素. 在此基础上, 结合当前观测与理论研究进展, 对午夜塌陷及相关夜间电离层动力学过程的未来研究方向进行展望.

关键词 低纬度电离层午夜塌陷, 非相干散射雷达, 电子浓度峰值高度, 离子垂直漂移

中图分类号 P352

Recent Research Progress in Low-latitude Ionospheric Midnight Collapse of Electron Density

GONG Yun[1] CHEN Xinkun[1] MA Zheng[1] ZHANG Shaodong[1,2]

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

2(*Guizhou Normal University, Guiyang* 550025)

Abstract The low-latitude ionospheric midnight collapse is a typical structural variation in the nighttime evolution of electron density, reflecting vertical ion transport and its dynamical modulation in the nighttime ionosphere. Since the phenomenon was first observed, extensive studies have been conducted by the international scientific community to investigate its morphological characteristics and underlying physical mechanisms, using a variety of approaches including ground-based radar observations, satellite measurements, and numerical model simulations. This paper systematically reviews several decades of research progress on the low-latitude midnight collapse, with particular emphasis on its principal morphological features under different seasonal conditions and levels of geomagnetic activity. Focusing on the physical mechanisms, we highlight the dominant role of vertical ion drift in the formation and evolution of the midnight collapse and further analyze the key factors controlling variations in vertical ion drift.

* 国家自然科学基金项目 (42374192) 和中央高校基本科研业务费专项资金项目 (2042026kf0074) 共同资助

2026-01-31 收到原稿, 2026-05-10 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/)

On this basis, future research directions for the midnight collapse and related nighttime ionospheric dynamical processes are discussed in light of recent observational and theoretical advances.

Key words　Midnight collapse of low-latitude ionosphere, Incoherent scatter radar, Peak height of electron density, Vertical ion drift

0　引言

电离层电子浓度午夜塌陷是低纬度地区夜间F区电离层演化过程中观测到的一类典型现象, 其主要特征表现为当地午夜前后F区电子密度峰值高度(h_mF_2)的快速下降[1]. 该现象直观反映了夜间电离层离子垂直输运过程的变化, 是认识电离层动力学过程以及中高层大气–电离层耦合机制的重要切入点. 阿雷西博 (18.3°N, 66.7°W) 非相干散射雷达于2011年8月16日16:00至17日06:00 LT观测期间, 记录到一次结构完整、特征典型的午夜塌陷事件, 如图1所示[2]. 8月16日约21:30 LT, h_mF_2抬升至466 km, 随后在23:00 LT前迅速下降至254 km, 在约1.5 h内下降幅度达212 km, 表征了一次显著的午夜塌陷过程[2]. 此后, h_mF_2于8月17日00:50 LT再次回升至418 km, 并在03:00 LT前快速下降至265 km, 约2 h 10 min内下降153 km, 呈现典型的二次塌陷特征[2]. 这种多阶段、快速变化的垂直结构演化, 揭示了午夜塌陷并非单一过程触发的简单事件, 而是多种动力学过程共同作用的综合响应.

低纬度午夜塌陷现象最早由Nelson和Cogger[1]基于阿雷西博非相干散射雷达于1965年10月至1969年6月期间获得的130个夜晚的观测数据报道. 此后, 低纬度午夜塌陷现象逐渐引起空间物理学界的持续关注. 过去数十年利用多种观测与分析手段对午夜塌陷开展了系统研究, 包括非相干散射雷达观

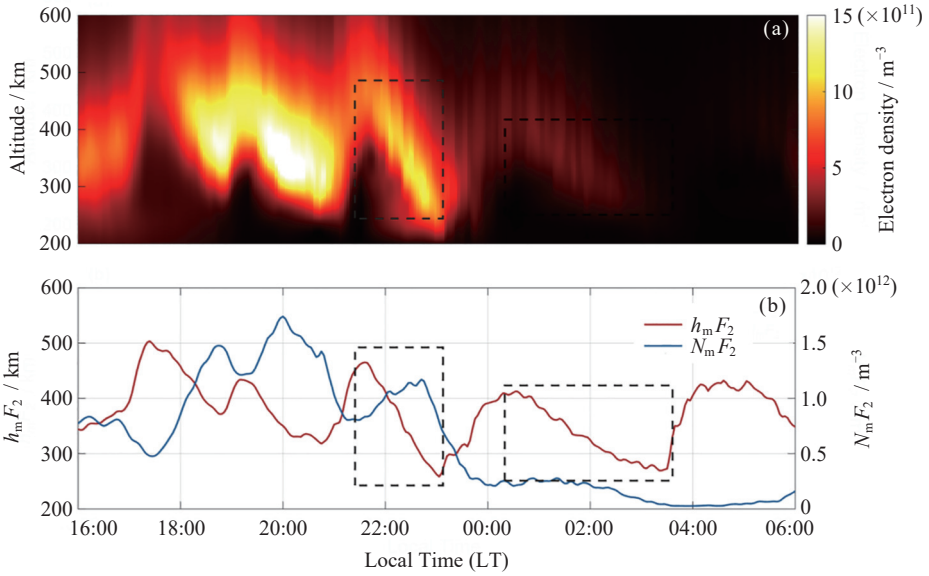


图1　(a) 2011年8月16日16:00 LT至8月17日06:00 LT期间阿雷西博非相干散射雷达观测到的电子密度的高度–时间分布, 虚线框标示夜间出现的两次典型午夜塌陷过程. (b) 同一时段F区峰值电子密度(N_mF_2)及其对应峰值高度(h_mF_2)的时间演变, 虚线框标出与(a)中对应的午夜塌陷阶段 (修改自文献[2])

Fig. 1　(a) Height-time distribution of electron density observed by the Arecibo incoherent scatter radar from 16:00 LT on 16 August to 06:00 LT on 17 August 2011, illustrating two representative midnight collapse events highlighted by dashed boxes. (b) Temporal evolution of the F-region peak electron density (N_mF_2) and the corresponding peak height (h_mF_2) during the same interval, with dashed boxes indicating the corresponding collapse phases shown in panel (a) (modified from Ref. [2])

测[2–12]、气辉成像观测[13–17]、电离层测高仪探测[18–22]以及数值模拟研究[23–25], 逐步形成了对午夜塌陷统计特征及其主要物理机制的认识.

在现有研究中, 阿雷西博非相干散射雷达提供了高质量、长时间序列的电离层等离子体参数观测, 对低纬度电离层午夜塌陷研究发挥了重要支撑作用. 该雷达自 1963 年投入运行, 至 2020 年停止运行, 在其运行期间通过探测等离子体的非相干散射信号, 获取了电子密度、温度及离子速度等关键参数的垂直剖面数据, 为夜间电离层动力学过程的定量研究奠定了坚实的数据基础[26–30]. 围绕午夜塌陷的形成机制, 已有研究逐步形成了较为一致的认识, 其中经向风在午夜前后的减弱与反转被普遍认为是驱动低纬度午夜塌陷发生的主要因素. 早期研究指出, 经向风由赤道向转为极向时, 可通过沿地磁力线的离子输运显著增强向下漂移, 进而触发 h_mF_2 的快速下降[10–13]. 同时, 经向风中的潮汐波动在午夜塌陷中的作用也受到广泛关注. Harper[4] 指出, 半日潮汐波引起的风场剪切效应可能在经向风反转过程中发挥关键作用. 随后的数值模拟研究表明, 经向风中的 24, 12 及 8 h 潮汐分量均可对午夜塌陷的发生与形态演化产生重要影响[23,24]. 磁暴条件下的观测研究再次验证了经向风在午夜塌陷中的主导作用[31]. 此外, Gong 等[9] 的研究发现, 除经向风外, 电场驱动及双极扩散过程亦在午夜塌陷的形成与演化中发挥重要作用.

总体而言, 已有研究在低纬度午夜塌陷的基本形态特征及其主要驱动因素方面取得了重要进展. 然而, 在不同季节背景和地磁活动条件下, 对低纬度午夜塌陷形态差异的系统认识仍有待进一步深化. 更为关键的是, 低纬度午夜塌陷的形成与演化并非由单一动力过程主导, 而是经向风调制、电场扰动、双极扩散以及夜间化学损失等多种过程协同作用的结果. 如何辨明这些过程对离子垂直漂移的相对贡献, 确定其在午夜塌陷不同阶段中的主导机制及转换特征, 仍是当前午夜塌陷研究亟须解决的核心问题. 基于此, 本文系统梳理了近几十年来的相关研究成果, 对低纬度电离层午夜塌陷的研究进展进行综合评述.

1 午夜塌陷的特征现象

针对低纬度午夜塌陷现象, 以往研究以个例观测分析为主, 系统性的统计研究则相对较少. 早期基于阿雷西博非相干散射雷达的统计结果表明, 在该区域的夜间观测中, 约有 85% 的天数可识别到午夜塌陷现象[1]. 随后, Dandenault 与 Richards[23] 利用澳大利亚汤斯维尔 (16°S) 地区 1970—1980 年间 330 个夜晚的电离层测高仪资料, 对午夜塌陷进行统计分析, 发现其发生率约为 89%. 需要指出的是, 这一阶段的研究中对午夜塌陷的界定相对宽泛, 多以午夜前后 h_mF_2 的快速下降作为定性识别依据, 尚未形成统一且明确的判定标准. 同时, 已有研究大多仅关注一次塌陷过程, 对夜间可能出现的二次塌陷现象缺乏独立识别与系统统计. 针对上述问题, Gong 等[2] 提出了一套较为明确的午夜塌陷判定标准: 午夜塌陷发生于 20:00 LT 至次日 04:00 LT 之间, 且 h_mF_2 的下降幅度超过 50 km, 下降时间超过 1 h, 下降速率大于 10 km·h^{-1}. 基于该定义, Gong 等[2,32] 从季节背景和地磁活动水平两个方面, 对阿雷西博地区一次塌陷与二次塌陷的形态特征进行了统计分析.

1.1 低纬度午夜塌陷的季节性特征

基于近期发表的阿雷西博非相干散射雷达长时间观测资料 (1971—2019 年) 的统计研究表明, 午夜塌陷在低纬度夜间电离层中是一种常见现象, 其发生概率在不同季节背景下均保持在较高水平[2]. 从整体特征来看, 夜间 h_mF_2 往往在午夜前后经历一次或多次快速下降, 其中一次午夜塌陷可视为低纬度夜间电离层演化过程中的常态响应, 而二次塌陷则相对少见, 并表现出更明显的季节依赖性[2].

在季节分布方面, 一次午夜塌陷在各季节中的发生概率差异较小, 显示出较为均衡的季节分布特征; 相比之下, 二次塌陷在不同季节的发生频率存在显著差异, 其在冬季较为集中, 呈现出明显的冬季偏好特征[2]. 这一结果表明, 尽管一次塌陷对季节背景的敏感性较弱, 二次塌陷的发生则更容易受到季节性背景条件的调制.

从形态特征来看 (见图 2)[2], 一次午夜塌陷多发生于午夜前后, 持续时间通常为数小时量级, 其起始高度和塌陷幅度均集中分布于相对有限的区间内, 整体表现出较为稳定的统计特征. 季节对比结果 (见图 3) 显示[2], 各季节一次塌陷的起始高度分布整体一致, 而在发生时段和持续时间等方面存在一定差异: 冬季塌陷更倾向于在较早时段发生, 且持续时间相对

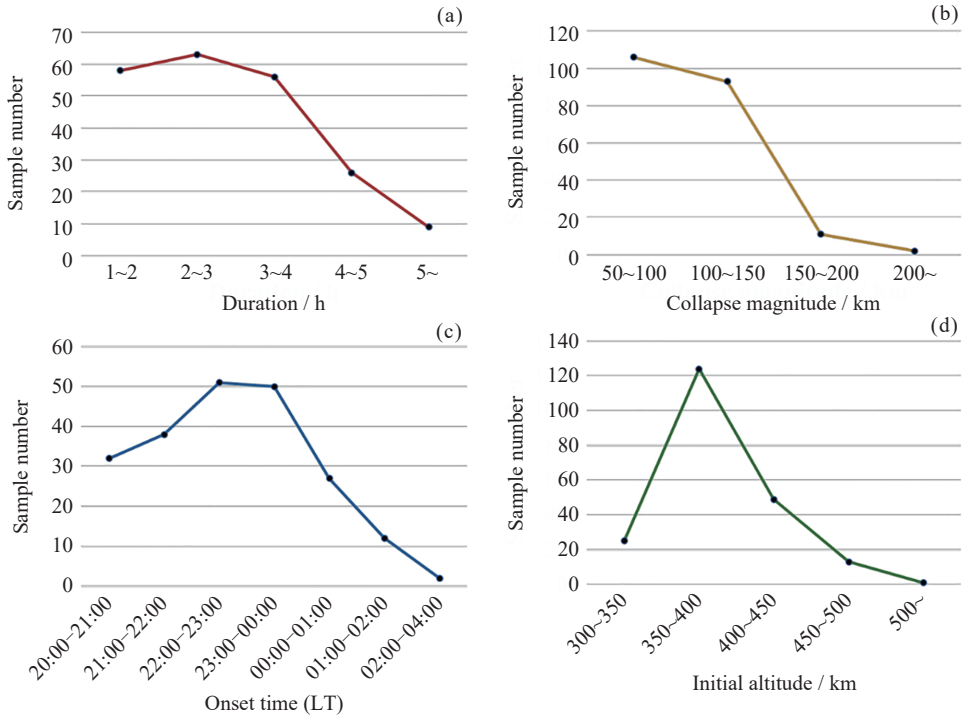


图 2　一次塌陷的统计特征. (a) 持续时间, (b) 塌陷幅度, (c) 起始时间, (d) 起始高度 (修改自文献 [2])

Fig. 2　Statistical distributions characterizing the first midnight collapse. (a) Duration, (b) collapse magnitude, (c) onset time, (d) initial altitude (modified from Ref. [2])

偏短; 春、秋季中较大幅度塌陷事件的占比相对更高.

二次午夜塌陷的统计结果 (图 4 和图 5) 表明[2], 该类事件主要发生于午夜之后, 其持续时间和塌陷幅度与一次塌陷总体相近, 但起始高度整体偏低, 且分布范围更离散. 不同季节条件下, 二次塌陷的发生时间、持续时间及塌陷幅度的分布差异相对有限, 而其起始高度在冬季相比其他季节更低[2].

1.2　地磁扰动条件下低纬度午夜塌陷的特征

地磁暴是地球磁场的全球性扰动过程, 可显著改变电离层—热层系统的动力学与电动力学状态, 对夜间电离层结构演化产生重要影响[33–37]. 近年来, 已有研究开始从统计角度分析不同地磁活动背景下午夜塌陷的响应特征, 通常基于 Kp 指数将观测夜晚划分为地磁扰动期与平静期, 并进一步考虑磁暴效应在时间上的持续性, 将午夜塌陷发生时段及其前一日的地磁活动共同纳入判定标准[32]. 在此基础上, 可对不同地磁条件下低纬度午夜塌陷的统计行为进行对比分析. 统计结果表明, 在是否发生一次午夜塌陷方面, 扰动期与平静期的差异并不显著; 而在二次塌陷的发生特征上, 地磁扰动条件下的事件发生频率更高[32]. 进一步的统计分析显示, 尽管扰动期与平静期下一次午夜塌陷的整体演化形态相似, 但在起始高度和塌陷幅度等关键参数上仍表现出系统性差异[32].

总体而言, 地磁扰动背景下的一次午夜塌陷更倾向于起始于较高的高度层, 且具备更大的塌陷幅度, 其垂直演化特征整体强于平静期; 而塌陷持续时间和基本演化趋势在两类地磁条件下差异相对有限. 相比之下, 二次午夜塌陷在地磁扰动条件下的特征差异更为突出, 其起始高度、塌陷幅度及塌陷速率均表现出更为显著的响应, 而持续时间的变化则相对不敏感. 这些结果表明, 地磁活动主要通过调制午夜塌陷的起始条件和垂直输运强度来调制其形态特征.

2　物理机制分析

已有研究表明, 低纬度电离层午夜塌陷的形成与夜间离子垂直输运过程密切相关, 其中离子垂直漂移速度 V_z 起到主导作用[9]. 离子垂直漂移可表示为垂直于地磁场方向的漂移分量 ($V_{\rm pn}$) 与沿地磁场方向的漂移分量 ($V_{\rm ap}$) 组成, 其关系可写为[9]

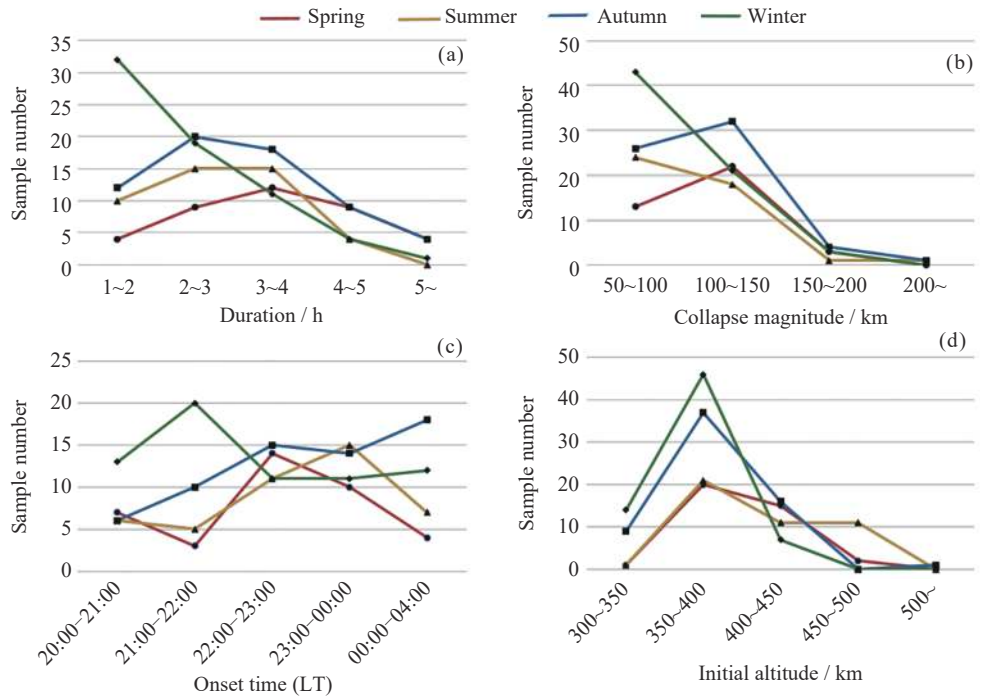


图 3 不同季节条件下一次午夜塌陷统计特征. (a) 持续时间, (b) 塌陷幅度, (c) 起始时间, (d) 起始高度 (修改自文献 [2])

Fig. 3 Comparison of the statistical characteristics of the first midnight collapse under different seasonal conditions.(a) Duration, (b) collapse magnitude, (c) onset time, (d) initial altitude (modified from Ref. [2])

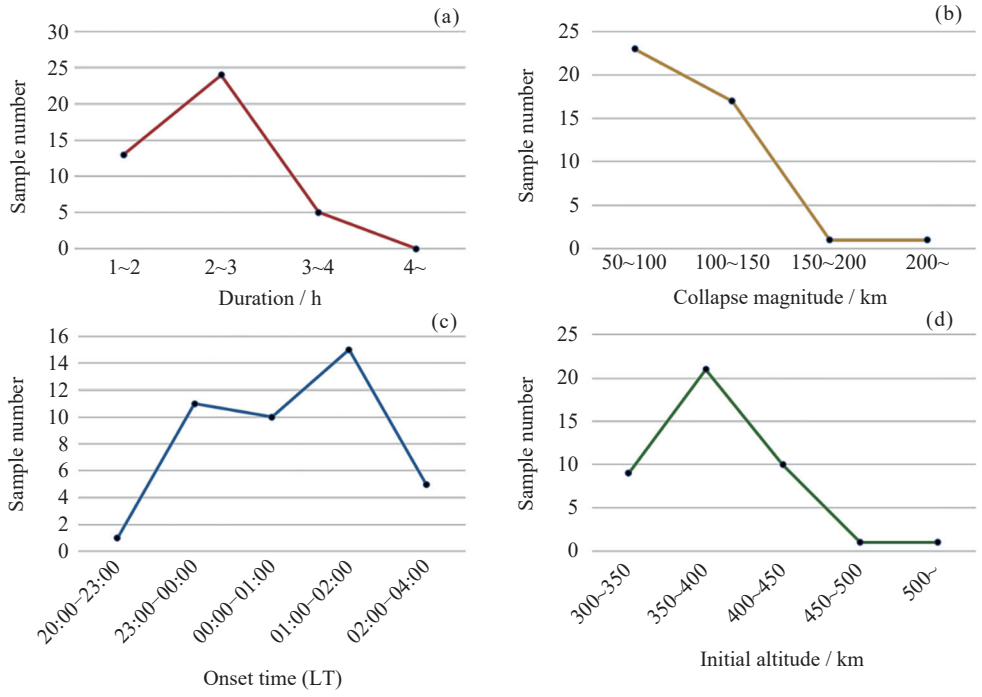


图 4 二次午夜塌陷的统计特征. (a) 持续时间, (b) 塌陷幅度, (c) 起始时间, (d) 起始高度 (修改自文献 [2])

Fig. 4 Statistical properties of the second midnight collapse. (a) Duration, (b) collapse magnitude, (c) onset time, (d) initial altitude (modified from Ref.[2])

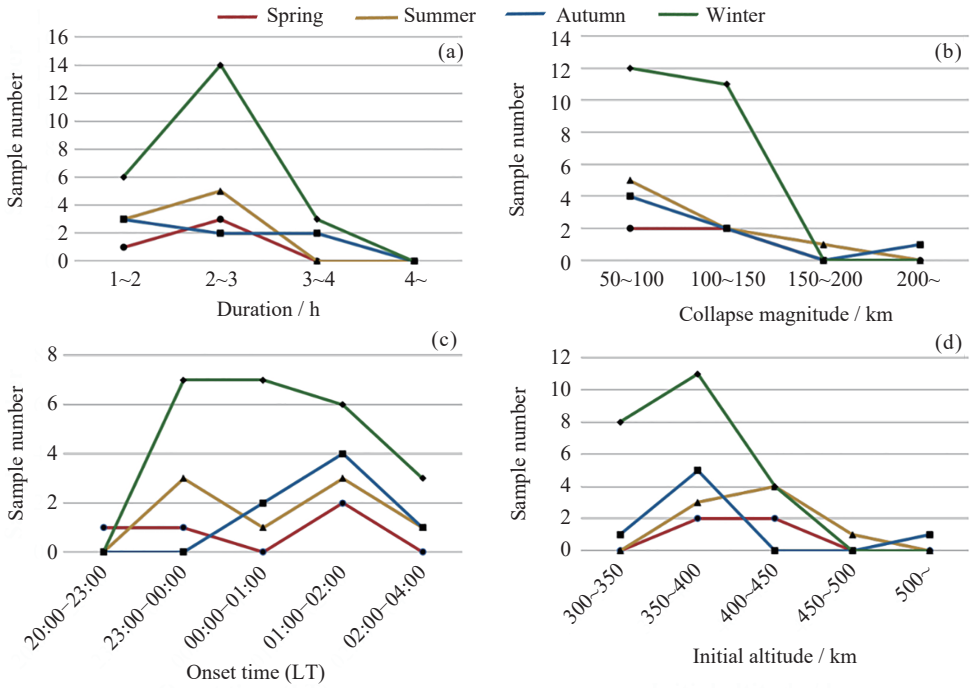


图 5　不同季节条件下二次午夜塌陷统计特征. (a) 持续时间, (b) 塌陷幅度, (c) 起始时间, (d) 起始高度 (修改自文献 [2])

Fig. 5　Seasonal comparison of the statistical characteristics of the second midnight collapse. (a) Duration, (b) collapse magnitude, (c) onset time, (d) initial altitude (modified from Ref. [2])

$$V_z = V_{\rm pn}\cos I + V_{\rm ap}\sin I. \tag{1}$$

其中, I为磁倾角. 在磁倾角接近 45°的低纬度地区, $V_{\rm pn}$与$V_{\rm ap}$对V_z的贡献在量级上相当. 因此, 哪个分量在特定时段内具有更显著的幅值变化, 往往决定了V_z演化的主导特征. 同时, $V_{\rm pn}$主要受到电场的控制, 而$V_{\rm ap}$主要受中性大气经向风$U_{\rm s}$的调制, 其表达式可写为[9]

$$V_{\rm ap} = U_{\rm s}\cos I + V_{\rm d}. \tag{2}$$

其中, $V_{\rm d}$为双极扩散速度, 其物理推导和适用条件已在相关研究中给出[38]. 由此可见, V_z的演化本质上是中性大气动力过程 (通过经向风$U_{\rm s}$)、电场驱动过程 (通过$V_{\rm pn}$) 以及扩散效应 (通过$V_{\rm d}$) 在地磁场几何约束下共同作用的结果, 而地磁扰动能够同时作用于上述关键环节, 从而显著改变低纬度电离层午夜塌陷的动力学特征.

2.1　经向风的动力学作用

大量研究表明, 在低纬度电离层中, 经向风的夜间演变, 尤其是其减弱与反转过程, 是触发午夜塌陷的重要动力学因素之一. 基于阿雷西博非相干散射雷达 2 个白天与 5 个夜间的观测, 通过对离子视线速度矢量反演获得的 F 区中性风场信息显示, 进入夜间后, 经向风表现出显著的时间变化特征, 初期以较强的赤道向风为主, 随后逐渐减弱, 并通常在 02:00 LT 左右转为极向[11]. 日落时段, 较强的经向风可驱动离子沿磁力线快速向下输运, 而午夜塌陷则对应于经向风由赤道方向向极向转变的阶段性结果[11]. 随后, Harper 在阿雷西博地区 F 区高度观测到显著的半日周期经向风振荡[4]. 数值模拟研究同样支持上述结论, Crary 和 Forbes[24] 给出的阿雷西博地区 F 区电离层的数值模拟结果指出, 电离层午夜塌陷受到源自热层下层激发并向上传播的半日潮汐经向风分量的强烈调制.

在阿雷西博地区, V_z对$V_{\rm ap}$的响应尤为显著. 由式 (2) 可知, $V_{\rm ap}$在很大程度上受经向风控制. 最新统计分析进一步揭示了经向风与$V_{\rm ap}$之间随时间变化特征的高度一致性[2]: 在 22:00 LT 之前, 向南的经向风有效推动电离层抬升, 随后其幅值逐渐减小; 而在二次塌陷过程中, 经向风表现出更为明显的振荡特征, 其快速减弱的起始时间也相对滞后. 总体来看, 夜间$V_{\rm ap}$的

变化在很大程度上受经向风演化控制, 而地磁活动可对上述动力学过程产生显著调制作用. 最新基于地磁活动等级分类的统计结果显示[32], 在磁暴期间, 20:00—00:00 LT 内向南的U_s明显增强, 其最大扰动通常出现在 22:00 LT 之后, 幅值较平静期可增大 5 m·s^{-1}以上. 尽管在两类地磁条件下, U_s均在 01:30 LT 左右发生反转, 但磁暴期间更强的经向风通过削弱向下方的V_{ap}, 进而调制V_z的演化过程, 最终改变午夜塌陷的发生时刻及其高度上的形态特征[32].

2.2 经向风中的潮汐调制作用

除太阳活动影响外, 低纬度电离层还持续受到来自下层大气的动力学强迫, 其中大气潮汐是连接热层与电离层的重要耦合媒介. 已有研究表明, 大气潮汐能够显著影响电离层密度分布、风场结构及其经度变化特征[39–42]. 统计结果显示, 当磁暴发生时经向风中各主要潮汐分量的幅值整体呈现增强趋势, 其中以半日潮的增幅最为显著[32]. 平静期时, 经向风主要受周日潮控制, 其平均幅值约为 16 m·s^{-1}. 在扰动期, 半日潮及 8 h 潮的幅值与周日潮相当甚至更强, 均可达到约 18 m·s^{-1}[32]. 相比之下, 6 h 与 4.8 h 等更短周期潮汐分量的平均幅值相对较小, 但其较大的标准差表明, 这类潮汐在特定时段内可能产生显著强迫作用, 尤其是在地磁扰动背景下[31]. 上述结果表明, 经向风并非由单一尺度的动力过程所控制, 而是多尺度潮汐分量与背景风场相互叠加、共同调制的结果, 其演化特征决定了午夜塌陷发生时的动力学背景.

2.3 电场驱动的V_{pn}与双极扩散速度V_d

在阿雷西博地区, 由于磁倾角接近 45°, 电场与经向风对V_z的贡献量级分别约为 $0.7V_{pn}$($V_{z\text{-pn}}$) 与 $0.5U_s$($V_{z\text{-us}}$). 针对一次剧烈的午夜塌陷事件的分析表明(见图 6)[31], 在一次塌陷过程中, $V_{z\text{-us}}$与$V_{z\text{-pn}}$ 的时间变化高度同步, 这种协同变化显著放大了V_z的总体幅度, 进而引发了剧烈塌陷; 而在二次塌陷阶段, 二者的变化不同步, 使塌陷过程相对平缓, 其中 $V_{z\text{-us}}$在驱动过程中占据主导地位[31]. 最新的统计研究进一步表明, 地磁暴可通过调制V_{pn}显著改变V_z的演化特征, 从而导致扰动期与平静期午夜塌陷形态的差异[32]. 尤其在二次塌陷前期 h_mF_2 的抬升阶段, 电场驱动项对垂直输运的贡献尤为关键, 通常决定塌陷能否进入后续发展阶段[32].

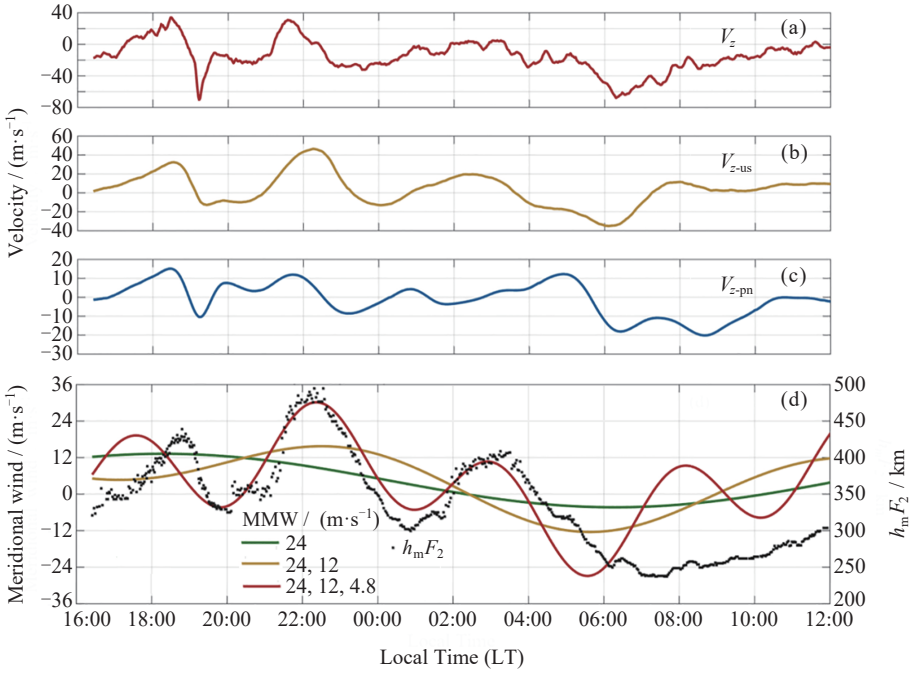


图 6 2015 年 3 月 17 日 16:00 LT 至 3 月 18 日 12:00 LT 期间, 阿雷西博地区 380 km 高度处离子垂直漂移速度及分量随时间的变化情况 (修改自文献 [31])

Fig. 6 Temporal variations in the ion vertical drift velocity and its components at 380 km over the Arecibo region from 16:00 LT on 17 March to 12:00 LT on 18 March 2015 (modified from Ref. [31])

对于双极扩散速度V_{d}, 已有研究指出, 在 F 层电子密度峰值高度处, 电子密度梯度趋近于零, 且电子与离子温度梯度较小, 此时由双极扩散引发的垂直离子速度主要由等离子体标高决定[9]. 在整个夜间, 双极扩散效应持续推动电离层向下运动. 然而在较低高度区域, 强烈的化学复合作用会抑制 $h_{\mathrm{m}}F_2$ 的进一步下降, 使系统趋于扩散—化学平衡状态[9]. 仅当该平衡被经向风或电场扰动打破时, 双极扩散过程才能在午夜塌陷演化中发挥显著作用. 以往的观测研究表明, 双极扩散在午夜塌陷启动阶段对垂直输运具有重要调制作用[9].

综上所述, 低纬度电离层午夜塌陷并非由单一物理过程触发, 而是中性大气动力过程、电场驱动及扩散效应在时间与空间上共同作用的结果. 从动力学角度看, 离子垂直输运是直接控制塌陷发生与演化的核心环节. 经向风在大部分时间内起主导作用, 而电场与双极扩散效应则在不同阶段发挥重要作用. 在更深层面上, 大气潮汐波通过多尺度叠加重构夜间背景风场, 从而调制离子漂移速度. 由此可见, 午夜塌陷本质上是多过程、多尺度耦合下的综合响应.

3　未来展望

随着对低纬度电离层午夜塌陷 (包括一次与二次塌陷) 形态特征的统计不断完善, 以及非相干散射雷达、测高仪等多手段观测资料的持续积累, 午夜塌陷从发生、发展到演化的全过程及其对应的物理机制正逐步清晰. 在此基础上, 围绕午夜塌陷的形成与演化机制, 未来可从以下三个方面开展进一步探索.

(1) 经向风、电场与双极扩散的协同作用机制. 在低纬度电离层中, 现有研究已明确, 经向风 (通过调制 V_{ap}) 与电场 (通过调控V_{pn}) 在午夜塌陷形成过程中发挥关键作用, 但双极扩散的定量贡献及三者之间的协同调控机制仍缺乏系统研究. 未来亟须整合更长时间序列的多源观测数据, 包括更多非相干散射雷达的高精度观测、全球电离层监测网络以及热层经向风连续观测资料, 定量评估三者对离子垂直漂移V_z的相对贡献, 并揭示其在不同地磁活动条件下的变化特征.

(2) 动力学过程与化学过程的融合. 当前对午夜塌陷的研究主要聚焦于风场、电场与潮汐等动力学过程, 未来有必要将化学过程与现有动力学模型进行深度融合, 系统研究化学过程对午夜塌陷形态特征的影响. 后续还需借助数值模型, 进一步厘清经向风中的潮汐波动、电场、双极扩散以及化学过程在塌陷不同阶段的作用.

(3) 午夜塌陷的纬度依赖性及磁倾角调制机制. 现有关于午夜塌陷的研究主要基于低纬度地区 (如阿雷西博) 的观测结果, 而针对纬度差异及磁倾角变化对其形态的调制作用, 尚缺乏系统的跨区域对比分析. 未来应开展多纬度、多台站的协同研究, 选取高纬、中纬及赤道附近具有不同磁倾角特征的观测站点, 对比分析午夜塌陷发生率、形态特征及动力学参数的纬度依赖性. 同时, 需重点探究磁倾角对关键驱动因子的调控机制, 例如磁倾角如何影响V_{ap}与V_{pn}的相对贡献, 不同磁倾角条件下经向风与电场在塌陷驱动中的主导地位是否发生变化. 结合数值模拟, 可进一步量化纬度与磁倾角对离子漂移、经向风结构及潮汐扰动的综合影响.

总体而言, 午夜塌陷并非由单一过程触发的局地现象, 而是多种动力学与化学过程在不同时间尺度上的综合响应, 其系统性认识仍有赖于观测、模型与理论的协同推进.

致谢　本研究所用原始观测数据由阿雷西博天文台历任工作人员采集并整理, 文中所采用的阿雷西博非相干散射雷达公开数据可通过美国高层大气物理研究协作项目 (CEDAR) 官方数据库检索获取, 数据访问链接 https://cedar.openmadrigal.org/list.

值此肖佐教授诞辰 90 周年之际, 谨以本文纪念先生, 致敬其为中国电离层物理与空间科学发展做出的奠基性贡献.

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] NELSON G J, COGGER L L. Dynamical behaviour of the nighttime ionosphere at Arecibo[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1971, **33**(11): 1711-1726

[2] GONG Y, CHEN X K, MA Z, *et al*. Statistical analysis of ionospheric midnight collapse events observed by Arecibo incoherent scatter radar[J]. *Remote Sensing*, 2025, **17**(16): 2897

[3] HYSELL D L, LARSEN M F, SULZER M P. High time and height resolution neutral wind profile measurements

across the mesosphere/Lower thermosphere region using the Arecibo incoherent scatter radar[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(3): 2345-2358

[4] HARPER R M. A semidiurnal tide in the meridional wind at F region heights at low latitudes[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1979, **84**(A2): 411-415

[5] BASU S, BASU S, GANGULY S, *et al*. Generation of kilometer scale irregularities during the midnight collapse at Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1981, **86**(A9): 7607-7616

[6] APONTE N, BRUM C G M, SULZER M P, *et al*. Measurements of the O^+ to H^+ transition height and ion temperatures in the lower topside ionosphere over Arecibo for equinox conditions during the 2008-2009 extreme solar minimum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(7): 4465-4470

[7] YUE X N, CAI Y H, WANG J Y, *et al*. Ionospheric presunrise uplift: comparison of Sanya incoherent scatter radar observations and numerical simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(2): e2022JA031119

[8] SEKER I, LIVNEH D J, MATHEWS J D. A 3-D empirical model of F region medium-scale traveling ionospheric disturbance bands using incoherent scatter radar and all-sky imaging at Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A6): A06302

[9] GONG Y, ZHOU Q, ZHANG S, *et al*. Midnight ionosphere collapse at Arecibo and its relationship to the neutral wind, electric field, and ambipolar diffusion[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A8): A08332

[10] BURNSIDE R G, BEHNKE R A, WALKER J C G. Meridional neutral winds in the thermosphere at Arecibo: simultaneous incoherent scatter and airglow observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1983, **88**(A4): 3181-3189

[11] BEHNKE R A, HARPER R M. Vector measurements of F region ion transport at Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1973, **78**(34): 8222-8234

[12] MACPHERSON B, GONZÁLEZ S A, BAILEY G J, *et al*. The effects of meridional neutral winds on the O^+-H^+ transition altitude over Arecibo[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A12): 29183-29198

[13] VLASOV M N, NICOLLS M J, KELLEY M C, *et al*. Modeling of airglow and ionospheric parameters at Arecibo during quiet and disturbed periods in October 2002[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A7): A07303

[14] HERRERO F A, MERIWETHER JR J W. 6300-Å airglow meridional intensity gradients[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1980, **85**(A8): 4191-4204

[15] HERRERO F A, SPENCER N W, MAYR H G. Thermosphere and F-region plasma dynamics in the equatorial region[J]. *Advances in Space Research*, 1993, **13**(1): 201-220

[16] OTSUKA Y, KADOTA T, SHIOKAWA K, *et al*. Optical and radio measurements of a 630 nm airglow enhancement over Japan on 9 September 1999[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2003, **108**(A6): 1252

[17] SOBRAL J H A, CARLSON H C, FARLEY D T, *et al*. Nighttime dynamics of the F region near Arecibo as mapped by airglow features[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1978, **83**(A6): 2561-2566

[18] FOPPIANO A J, CID L, JARA V. Ionospheric long-term trends for South American mid-latitudes[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1999, **61**(9): 717-723

[19] KALITA B R, BHUYAN P K, YOSHIKAWA A. N_mF_2 and h_mF_2 measurements at 95° E and 127° E around the EIA northern crest during 2010–2014[J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, **67**(1): 186

[20] MORO J, XU J, DENARDINI C M, *et al*. On the sources of the ionospheric variability in the South American magnetic anomaly during solar minimum[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(9): 7638-7653

[21] JIANG C H, TIAN R, LIU T X, *et al*. Observations of strong range spread F and nighttime ionospheric enhancement in the mid-latitude region under geomagnetically quiet conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(11): e2024JA033106

[22] JAKOWSKI N, JUNGSTAND A, LOIS L, *et al*. Nighttime enhancements of the F_2-layer ionization over Havana, Cuba[J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1991, **53**(11/12): 1131-1138

[23] DANDENAULT P B, RICHARDS P G. The collapse of the midnight ionosphere and behavior of meridional neutral winds at townsville over a full solar cycle[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(11): 9826-9838

[24] CRARY D J, FORBES J M. The dynamic ionosphere over Arecibo: a theoretical investigation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1986, **91**(A1): 249-258

[25] LEI J H, LIU L B, WAN W X, *et al*. Modeling the behavior of ionosphere above Millstone Hill during the September 21-27, 1998 storm[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, **66**(12): 1093-1102

[26] GORDON W E. Incoherent scattering of radio waves by free electrons with applications to space exploration by radar[J]. *Proceedings of the IRE*, 1958, **46**(11): 1824-1829

[27] SULZER M P. A phase modulation technique for a sevenfold statistical improvement in incoherent scatter data-taking[J]. *Radio Science*, 1986, **21**(4): 737-744

[28] SULZER M P. A radar technique for high range resolution incoherent scatter autocorrelation function measurements utilizing the full average power of klystron radars[J]. *Radio Science*, 1986, **21**(6): 1033-1040

[29] ZHOU Q H, SULZER M P. Incoherent scatter radar obser-

vations of the F-region ionosphere at Arecibo during January 1993[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, **59**(17): 2213-2229

[30] LI Y L, ZHOU Q H. Measurements of F_1-region ionosphere state variables at Arecibo through quasi height-independent exhaustive fittings of the incoherent scatter ionline spectra[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(11): e2024JA032620

[31] GONG Y, ZHANG S D, ZHOU Q H, *et al*. First observation of a strong thermospheric 4.8-hour tide and its impact on the ionosphere over Arecibo[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(15): e2025GL115315

[32] GONG Y, CHEN X, MA Z, *et al*. Storm-time modulation of ionospheric midnight collapses over Arecibo: role of ion drift components and thermospheric tides[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2026, **131**: e2025JA035011.

[33] GOSLING J T. The solar flare myth[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1993, **98**(A11): 18937-18949

[34] BUONSANTO M J. Ionospheric storms-a review[J]. *Space Science Reviews*, 1999, **88**(3/4): 563-601

[35] IMMEL T J, MANNUCCI A J. Ionospheric redistribution during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(12): 7928-7939

[36] EVANS J S, CORREIRA J, LUMPE J D, *et al*. GOLD observations of the thermospheric response to the 10–12 May 2024 Gannon superstorm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(16): e2024GL110506

[37] 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 Physics*, 1994, **99**(A3): 3893-3914

[38] GONG Y, ZHOU Q H. Incoherent scatter radar study of the terdiurnal tide in the E- and F-region heights at Arecibo[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(15): L15101

[39] 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

[40] 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

[41] 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

[42] GONG Y, MA Z, LV X D, *et al*. A study on the quarter-diurnal tide in the thermosphere at Arecibo during the February 2016 sudden stratospheric warming event[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(23): 13142-13149

作者简介



龚　韵（通信作者）　男，1983 年 12 月出生于湖北省武汉市，现为武汉大学地球与空间科学技术学院教授、博士生导师，主要从事中高层大气与电离层耦合机理、无线电雷达自主研制及应用研究.
E-mail: yun.gong@whu.edu.cn



张绍东（通信作者）　男，1972 年 10 月出生于湖北省黄石市，现为贵州师范大学校长，武汉大学地球与空间科学技术学院教授、博士生导师，主要从事中高层大气探测技术、实验观测和数值模拟研究.
E-mail: zsd@whu.edu.cn