0254-6124/2026/46(5)-1009-13 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Libo, ZHAO Biqiang, ZHANG Ruilong, SUN Wenjie, YU Tingting. New Progress in Research on Mid-and-low-latitude Ionospheric Storms (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1009–1021. CSTR:32142.14.cjss.2025–0205. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0205

中低纬电离层暴研究新进展*

刘立波[1,2,4] 赵必强[1,3,4] 张瑞龙[1,2,4]
孙文杰[1,3,4] 于婷婷[1,3,4]

1(中国科学院地质与地球物理研究所 行星科学与前沿技术重点实验室 北京 100029)

2(中国科学院地质与地球物理研究所 黑龙江漠河地球物理国家野外科学观测研究站 北京 100029)

3(中国科学院地质与地球物理研究所 北京空间环境国家野外科学观测研究站 北京 100029)

4(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

摘 要 本文梳理了中国科学院地质与地球物理研究所电离层研究团队近年来在电离层暴研究领域取得的主要研究进展. 重点介绍以下五个方面: 中低纬电离层暴响应的大尺度特性与经度依赖性; 暴时电离层–热层系统的耦合过程; 暴时低纬电离层电动力学与动力学响应过程及机理; 暴时中低纬电离层不均匀体的演化与机制; 电离层暴时参数的建模与预报研究. 相关研究综合利用全球与区域多源观测数据、数值模拟、统计分析及深度学习方法, 系统揭示了中低纬电离层暴的时间演化规律与空间分布特征, 并进一步阐释了其物理机制.

关键词 电离层, 磁暴, 电离层暴, 电离层不均匀体

中图分类号 P352

New Progress in Research on Mid-and-low-latitude Ionospheric Storms

LIU Libo[1,2,4] ZHAO Biqiang[1,3,4] ZHANG Ruilong[1,2,4]
SUN Wenjie[1,3,4] YU Tingting[1,3,4]

1(*Key Laboratory of Planetary Science and Frontier Technology, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

2(*Heilongjiang Mohe National Observatory of Geophysics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029)

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

4(*College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

Abstract This article reviews the studies conducted by the team from the Institute of Geology and

* 国家重点研发计划项目 (2025YFF0512302) 和国家自然科学基金项目 (42530201, 42574234) 共同资助

2026-02-02 收到原稿, 2026-04-09 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/)

Geophysics, Chinese Academy of Sciences in the field of ionospheric storms in recent years. The following five aspects will be outlined: the large-scale characteristics and longitude dependence of ionospheric responses to geomagnetic storms in the middle and low latitudes; the coupling process of the ionosphere-thermosphere system during storms; electrodynamics and dynamical response processes and mechanisms of the ionosphere at low latitudes during storms; evolution and mechanism of ionospheric irregularities in the middle and low latitudes during storms; modeling and prediction of parameters during ionospheric storms. These studies, by leveraging global and regional multi-source observations, numerical simulations, statistical analyses, and deep learning, systematically reveal the complicated multi-scale temporal evolution characteristics and spatial dependence of mid-low latitude ionospheric storms, and also explore their underlying physical mechanisms.

Key words Ionosphere, Geomagnetic storms, Ionospheric storms, Ionospheric irregularity

0 引言

电离层作为日地空间环境复杂系统中承上启下的关键区域, 其状态受到太阳辐射、太阳风扰动和低层大气活动的共同支配, 对卫星导航、通信、航天器定轨、空间对地观测以及超视距雷达探测等现代人类技术系统具有至关重要的影响. 电离层暴, 即地球电离层对地磁暴剧烈活动的响应, 是空间天气领域最受关注的现象之一.

在物理机理层面, 中低纬电离层暴是多种物理过程非线性耦合的结果. 其主要驱动因素包括: 磁层和电离层电场的变化、中性大气参数 (例如密度、温度、成分与环流) 的改变、大气波动和等离子体输运过程的调制. 在不同太阳活动水平与地磁活动条件、不同季节、地方时和不同空间位置条件下, 各类驱动因子的相对重要性、耦合方式及演化路径, 仍是当前的研究焦点. 为定量理解这些复杂现象, 数值模型和深度学习算法已成为不可或缺的研究工具. 随着模拟能力不断提升, 模型在重现大尺度暴时电离层与热层特征方面取得显著成功, 但在精确捕捉中低纬地区电离层区域特性与多尺度扰动结构方面仍面临巨大挑战[1].

当前, 电离层暴的研究重心正从全球尺度过程解析, 转向区域性精细结构驱动机制的揭示, 重点聚焦于多物理过程的耦合机制与协同效应, 并致力于推动观测–建模–应用业务化体系的构建. 研究重点涵盖从极区至赤道的跨纬度电离层暴行为差异, 重点揭示电离层暴驱动过程与响应的经度依赖性和半球依赖性[2,3]. 随着第 25 太阳活动周高峰年的到来, 前沿工作正致力于融合多源观测数据, 精细刻画 (超) 强磁暴期间电离层暴与电离层不均匀体的区域演化特征, 分析电离层不均匀体触发的闪烁效应, 系统揭示磁层–电离层–大气层多圈层耦合的动态过程与非线性反馈机理[4,5]. 为提高数值模式预报能力, 研究正推动观测约束的磁层–电离层–热层 (MIT) 耦合数值模型的发展, 并注重在观测薄弱地区加强国际合作与能力建设, 以构建更完善的全球空间天气监测预警体系.

过去数十年, 得益于以中国子午工程为代表的地基综合探测[6] 建设, 全球导航卫星系统 (GNSS, 特别是中国北斗系统) 应用迅速发展, 以及系列卫星的原位与掩星等多平台电离层探测, 人类对中低纬电离层暴的认知取得长足的进展. 研究表明, 中低纬电离层暴不仅表现为电子密度与总电子含量 (TEC) 相对于地磁平静平均状态发生显著的增强 (即电离层正暴) 或减少 (电离层负暴), 还伴随有诸多复杂的电离层扰动结构, 例如赤道异常的变化、大尺度行进式电离层扰动、电离层水平陡变/跃变、电离层高度分层结构、电离层涡旋结构以及多尺度的电离层不均匀体等. 地磁暴期间上述各类电离层现象的时空分布与演化规律, 为理解驱动电离层变化的物理机制, 尤其针对东亚地区, 提供了关键线索.

本文系统梳理了中国科学院地质与地球物理研究所电离层研究团队近年来在中低纬电离层暴研究领域取得的重要进展. 主要包括: 电离层暴响应的大尺度特性与经度依赖性, 包括不同经度扇区的暴时演化差异、经度扇区内区域电离层扰动差异的形成机理, 以及暴时亚极光带极化流演化机制及其对中纬电离层密度增强结构的调制、暴时不同高度电离层的响应差异; 暴时电离层–热层系统的耦合过程, 主要阐述行进式扰动 (TADs/TIDs) 的传播与半球不对称性,

以及区域强扰动 (例如舌状结构) 的热层驱动机制; 暴时低纬电离层电动力学与动力学响应过程及机理, 系统揭示磁暴与耀斑期间低纬扰动电场的新特征及其对电离层垂直结构与日落增强现象的调控作用; 暴时中低纬电离层不均匀体的演化与机制, 重点分析超级赤道等离子体泡 (EPB) 的产生、扩展以及中纬电离层斑块结构的形成过程; 电离层暴时参数的建模与预报研究, 评述从经验统计模型到深度学习算法捕捉全球与区域电离层暴时特征的性能表现, 以及该方向的发展趋势. 以上工作通过融合多源观测、数值模拟和物理诊断, 系统揭示了中低纬电离层暴的内在机理与演化规律, 为发展精确的空间天气预警模型奠定了关键的理论基础.

1 电离层暴响应的空间不均匀性与经度依赖性

1.1 大磁暴期间不同经度扇区电离层的响应差异与主导机制

Kuai 等[7] 针对 2015 年圣帕特里克节地磁暴的研究指出, 穿透电场和扰动发电机电场是调控低纬电离层暴效应的关键因素. 该研究揭示, 此两种电场具有显著的地方时依赖性, 导致响应特征存在显著的经度扇区差异. 亚洲–澳大利亚扇区主要受持续时间较长的扰动发电机电场控制, 表现出强烈的负暴效应; 而美洲扇区在多次强穿透电场作用下, 出现了电离层 F 层峰高 (h_mF_2) 的反复抬升、赤道电离异常增强以及暴时 F3 层等特征.

Kuai 等[8] 对 2012 年 7 月强磁暴的观测揭示了扇区内电离层响应的复杂区域特征 (见图 1). 图中蓝色点表示 7 月 13 日值, 为磁平静参考; 红色为 7 月 15 日值, 黑色为 7 月 16 日值[8]. 在亚洲–澳大利亚扇区, 7 月 16 日在东经 120°附近出现强烈负暴, 顶部与底部电子含量对 TEC 衰减的贡献相当; 7 月 15 日, 正暴效应在东部强于西部, 且顶部 TEC 是该增强效应的主要来源, 显示了赤道向中性风的关键作用. 美洲扇区电离层赤道异常峰区的增强幅度西部高于东部, 在西经 110°附近最为突出. 这些现象归因于扰动电场、成分变化与中性风的多因素耦合, 而显著的半球不对称性则源于中性风与成分扰动本身的空间非对称分布.

Li 等[9] 揭示了 2018 年 8 月地磁暴期间亚洲–澳大利亚、美洲、非洲等三个经度扇区电离层响应的独特特征. 在通常以等离子体耗空为主要特征的恢复相阶段 (2018 年 8 月 27−29 日), 所有扇区白天 TEC 均出现超过 10 TECU 的显著增强. 分析表明, 在主

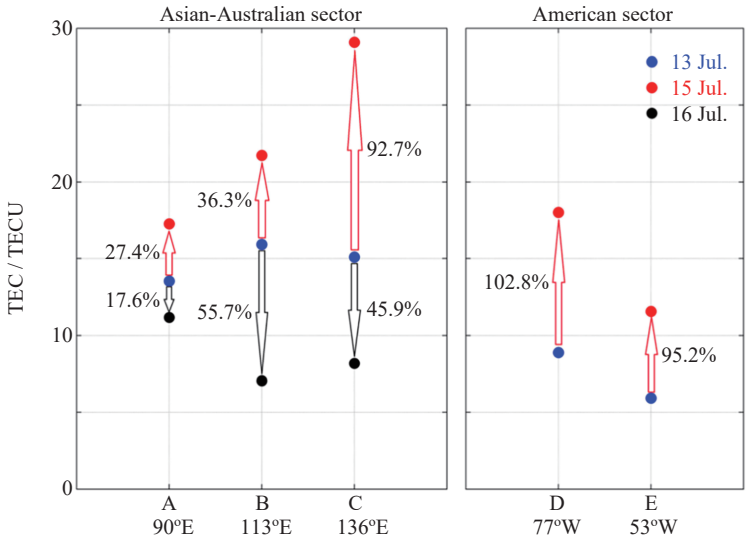


图 1 2012 年 7 月强磁暴期间 GRACE 卫星向上观测的 TEC(南北 30°平均值) 在亚洲–澳大利亚和美洲扇区的暴时变化及其经度差异[8]

Fig. 1 Storm-time variations of TEC (averaged over ±30°) observed by GRACE satellite in the upward-looking geometry during the intense geomagnetic storm in July 2012, showing the longitudinal differences between the Asian-Australian and American sectors[8]

相和早期恢复相阶段 (2018 年 8 月 26 日), 太阳风–磁层–电离层耦合与扰动中性成分共同作用, 是导致各经度扇区白天 TEC 响应的主要原因. 在恢复相后续阶段, 增强的东向赤道电急流, 以及全球紫外成像仪 (GUVI) 观测到的高于宁静值的 [O]/[N_2] 柱含量比 (∑[O]/[N_2]) 表明, 增强的向上垂直等离子体漂移与高∑[O]/[N_2] 共同维持了白天的正暴效应; 但该垂直漂移无法由此次磁暴相关的太阳风–磁层–电离层耦合或电离层扰动发电机机理解释, 其驱动源仍待进一步探索.

Zhang 等[10] 对 2024 年 5 月 10 日超级磁暴的分析, 揭示了电离层关键参量在磁暴不同阶段的动态演化规律. 磁暴初相阶段, 穿透电场导致美洲扇区 ΔH 出现正扰动, 并引发持续约 9 h (50°S−40°N) 的 TEC 增强, 而亚洲扇区则出现负扰动及持续约 3 h (10°S−25°N) 的 TEC 衰减, 后者随后被快速抵达的赤道向扰动风抑制. 恢复相期间, 行星际磁场 B_z 多次发生南北极性翻转, 引发穿透电场, 导致两扇区 h_mF_2 反复抬升; 随后美洲扇区受西向扰动发电机电场作用产生低纬负暴, 亚洲–澳大利亚扇区则形成北半球负暴、南半球正暴的半球不对称分布. 特别值得注意的是, 当亚洲扇区观测到正暴时, 与其磁共轭的澳大利亚扇区正暴同步增强, 表明等离子体层填充过程可能在暴时能量与物质输运中具有重要作用. 综合上述研究, 磁暴期间电离层响应呈现高度复杂的时空演化特征, 受扰动电场、中性风与成分扰动等多种机制协同调控, 并受经度、地方时和暴时阶段的显著影响.

Tariq 等[11] 利用位于美洲与亚洲扇区中低纬度 (约 20°N−30°N) 的 10 个 GNSS 接收站数据, 基于 TEC 观测研究了 2023 年 2 月与 4 月两次地磁暴期间的电离层响应. 在磁暴恢复相期间, 两个扇区均观测到显著的电离层暴变化, 其主要归因于穿透电场和扰动发电机电场以及热层中性成分的变化 (例如 GUVI ∑[O]/[N_2] 下降). 在 2023 年 4 月磁暴主相期间, 美洲与亚洲扇区均观测到主要由穿透电场引起的 TEC 增强现象; 而在恢复相期间, 还观测到扰动发电机电场与∑[O]/[N_2] 变化造成的 TEC 负相扰动. 值得关注的是, 在 2023 年 4 月磁暴主相期间, 亚洲扇区内的巴基斯坦与中国区域分别记录到正、负 TEC 变化. 这些变化源于磁层–电离层–热层耦合作用造成的∑[O]/[N_2] 比值的区域差异.

1.2 超强磁暴期间经度扇区内区域电离层扰动差异与形成机理

最近的研究表明, 不仅不同经度扇区间的电离层暴时演化差异极大, 经度扇区内相差仅 1～2 个时区的电离层也存在极大的电离层演化差异, 例如东亚扇区电离层参量在超级磁暴恢复相期间往往会产生显著的强纬向梯度结构. 一般认为, 在超强磁暴恢复相期间, 全球大部分地区以长时间的负相暴为主. 然而, Zhao 等[12] 重新对 1989 年 3 月超级磁暴事件进行了研究, 通过收集和处理东亚地区 30 年前的电离层资料, 发现日本和中国东部地区在磁暴恢复相期间表现为白天 F_2 层峰值电子密度长时间的大幅下降 (接近夜间水平), 而中国中西部地区峰值电子密度几乎不受影响. 这种水平结构可能与跨赤道暴时大气环流有关, 南半球高纬驱动的暴时大气环流会跨过磁赤道在中国中西部地区形成沉降流 (大气下沉), 并在强暴时西向环流的影响下向西移动. TIEGCM 模式的∑[O]/[N_2] 在中国上空形成拱形突起分布结构, 表明暴时大尺度环流导致的化学成分变化可能是导致这一纬向梯度变化的主要原因. 在 2003 年 11 月和 2024 年 5 月超强磁暴恢复相期间, 同样出现了相似的强电子密度纬向梯度变化和∑[O]/[N_2] 结构[13,14]. 研究还发现, 采用国际参考地磁场模型的热层–电离层电动力学通用环流模式 (TIEGCM) 模拟得到的中性成分扰动∑[O]/[N_2] 分布, 呈现向北隆起的拱形结构, 该结构特征相较于偏心偶极场条件下的模式结果更为显著. 然而, ∑[O]/[N_2] 作为可直接探测的热层参数, 在研究热层对电离层影响方面存在一定局限性; 磁暴期间 O 和 N_2 在不同高度的变化十分复杂, 表明细致研究热层成分 (O 和 N_2 以及不同高度的 [O]/[N_2]) 对电离层暴时变化的影响具有重要意义[15–17].

Guo 等[18] 利用 GUVI ∑[O]/[N_2]、总电子含量及电离层峰值高度 (h_mF_2) 与峰值电子密度 (N_mF_2) 等参数, 结合 TIEGCM 模拟, 分析了 2003 年 11 月 20−21 日地磁暴恢复相期间东亚地区电离层中持续 3～4 h 的非连续负暴演化过程. 该事件观测到的涡旋结构, 可能是第 23 太阳活动周期以来, 首次在热层和电离层中同时观测到的涡旋结构 (见图 2), 图中每个轨道的平均 UT 用黑色字体沿着轨道方向标记[18]. 研究结果表明, 该涡旋结构可能与南半球热层风在压力

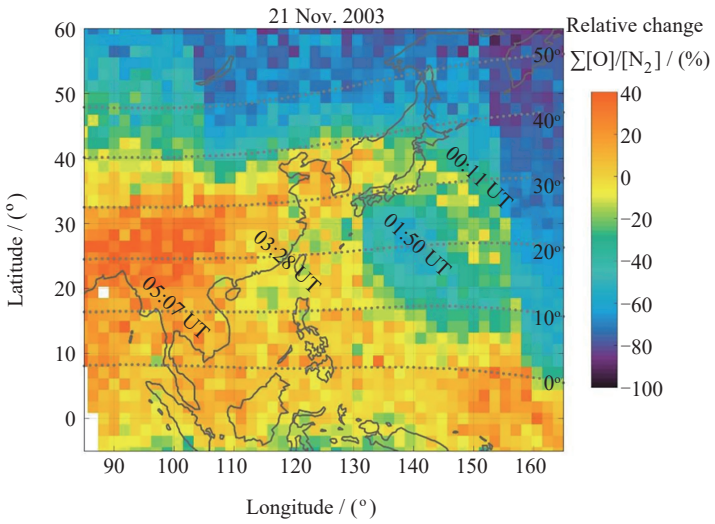


图 2 2003 年 11 月 21 日磁暴期间观测到的热层成分涡旋结构[18]

Fig. 2 Thermospheric composition vortex structures observed during the geomagnetic storm on 21 November 2003[18]

梯度力和科里奥利力共同作用下形成的热层成分涡旋结构密切相关. Yu 等[19] 进一步利用数值模拟对该结构的物理机制进行深入研究. 研究表明, 电离层峰值高度以下的电离层涡旋结构主要由化学效应 ($[O]/[N_2]$ 增强) 和中性风输运作用共同主导, 而 h_mF_2 以上的电离层涡旋结构则直接由中性风输运作用控制. 控制模拟实验表明, 磁暴强度不是此种结构形成的唯一触发机制, 不对称的盛行大气环流更有利于这种涡旋状结构的形成. 不对称的盛行大气环流结构易出现在美国和东亚地区近磁极地区.

1.3 暴时亚极光带极化流演化机制及对电离层密度增强结构的调制

He 等[20] 通过多卫星联合观测, 揭示了 2001 年 3 月强地磁暴主相期间亚极光区极化流的动态演化规律. 研究表明, 亚极光区极化流最初在黄昏扇区生成, 随着磁暴相的发展向午夜扩展并逐步南移, 其流速、宽度及空间跨度均呈现出强动态变化. 该现象与低电子密度导致的电离层低电导率区域密切相关, 进一步证实亚极光区极化流的大尺度结构主要由环电流的压力梯度驱动、并与二区场向电流结构紧密耦合. He 等[21] 进一步研究了 2003 年强磁暴主相期间 IMF B_y 分量由正转负触发了亚极光区极化流振荡现象. 该扰动始于午夜前扇区并向黄昏侧传播, 其形成机制与等离子体片离子的注入和沉降直接相关, 揭示了热等离子体片与冷等离子体层在特定条件下的相互作用可能是产生亚极光区极化流振荡的根源, 同时观测到的亚极光区极化流通道半球的不对称性反映了不同半球电离层条件和对流模式的差异.

Yang 等[22] 揭示了 2023 年 4 月强磁暴恢复相初期出现了一个持久的中纬度等离子体密度峰值. 中纬度等离子体密度峰值的形成与演化, 主要由强赤道向热层风引起的等离子体抬升, 进而造成密度增强. 该观点得到漠河 FPI 测风与 F 层峰高抬升观测结果的支持. 该峰值结构的成分以 O^+离子为主, 排除了等离子层外部来源的可能性; 其结构陡峭的赤道向边界可能与磁暴期 $[O]/[N_2]$ 的下降有关, 而其极向边界则可能由亚极光区极化流的动力学过程导致. 持久且大范围存在的中纬度等离子体密度峰值还出现在 2024 年 5 月超级地磁暴恢复相期间. Yang 等[23] 通过多源观测数据揭示在磁纬±40°持续存在的等离子体密度峰值带主要源于亚极光区极化流对暴时密度增强区 (SED) 残余体的西向拉伸驱动, 受到 EPB 极化电场与等离子体漂移共同作用出现了次级增强结构, 最终形成向西迁移的对称球形结构.

1.4 暴时电离层高度响应差异及机制

Zhao 等[24] 利用地基 GPS 总电子含量与沿西经 80°布设的测高仪链数据, 分析了 2003 年 11 月 20 日超强磁暴期间发生的电离层正暴效应. 观测结果显示, 在主相期间, 该经度带中低纬度区域电离层参数出现显著增强. 测高仪数据进一步表明, 顶部电离层电子含量增幅远超底部, 其最大值可达底部含量的 3.2～7.7 倍. 同时, 南美地区中低纬度的峰值高度突

破 400 km, 较宁静日抬升约 100 km, 该现象被归因于持续东向穿透电场与磁暴激发赤道向风场的共同作用.

Liu 等[25] 基于 2002 年 10 月 4 日至 11 月 4 日在美国 Millstone Hill (42.6°N, 71.5°W) 非相干散射雷达获取的连续 30 天观测资料, 系统分析了地磁扰动期间电离层的响应特征. 研究发现, 在磁扰期间, 尽管 N_mF_2 与 TEC 均显著偏离宁静值, 但雷达观测结果揭示出电子密度在电离层不同高度上的变化存在明显差异: 电子密度在低高度显著衰减, 而在顶部变化较小, 甚至在某些时段出现增强. 在地磁活跃条件下, 约 600 km 高度处垂直尺度增大, 表明顶部电子密度剖面趋于陡峭; 同时, h_mF_2 的抬升反映了磁暴驱动的动力学过程所引起的等离子体向上运动. TEC 在 Millstone Hill 与西经 100°存在显著的经度差异. 电离层响应的高度差异, 进一步揭示了动力过程与扰动成分在中纬度电离层暴时变化中的竞争机制.

Zhang 等[26] 基于 DMSP 与 SWARM 卫星原位观测, 发现 2016 年 10 月磁暴恢复相期间, 电子温度在低纬度下午扇区出现剧烈升温现象, 该升温在 100°−150°E 经度范围内最为显著, 在 840 km 和 450 km 高度电子温度分别超过 2000 K 和 1500 K. 仅由电子密度减少引起的电子–离子碰撞冷却率下降, 无法合理解释该升温现象. 在该经度带赤道异常峰区, 电子密度显著降低, 削弱了沿磁力线向低高度的热传导效应, 造成顶部电离层温度升高. 进一步分析表明, 此次顶部电离层电子温度升高的主要驱动因素是白天西向扰动发电机电场.

Kuai 等[27] 利用多源观测数据, 发现了 2021 年 5 月地磁暴期间低纬电离层的一个关键现象. 不同高度上的电离层参数 (以 GNSS TEC 和低地球轨道卫星顶部 TEC 为代表) 会呈现相反的变化. 其核心机制是暴时电场与场向传输共同作用, 导致 F_2 层峰值高度与密度反向变化, 而热层成分变化的影响相对较小. 该项工作深化了对电离层暴时垂直结构分异现象及物理机制的理解.

2 暴时电离层–热层系统的耦合过程

2.1 TADs 与 TIDs 的耦合机制及半球不对称性

Liu 等[28] 通过模型模拟了地磁暴期间行进式大气扰动与电离层扰动之间的耦合过程. 研究表明, 中性风输运是连接 TADs 与 TIDs 的核心过程, 而双极扩散和光化学过程起耗散作用. 研究发现, TIDs 的关键参数 h_mF_2 与 N_mF_2 扰动呈反相关, 该现象由等离子体密度梯度驱动中性风所致. 此外, 研究首次阐明, 大气成分 $[O]/[N_2]$ 的半球不对称性直接导致了 TIDs 响应的半球差异. Han 等[29] 通过分析 2024 年 5 月特大地磁暴期间两个扇区的 TEC 数据, 发现南半球的大尺度 TIDs 振幅和传播速度均大于北半球. 这种半球不对称性与能量注入的差异、中性风场的调制作用 (南半球促进、北半球抑制) 以及不同扇区 $[O]/[N_2]$ 比值的变化密切相关, 揭示了地磁活动与全球电离层之间的复杂耦合机制. Sun 等[30] 重点分析了这次磁暴期间东亚和东南亚地区电离层的复杂响应. 在跨度达 35°经度范围的相同纬度上, TEC 出现振幅达 10 TECU 的同步多重振荡. 低纬度地区存在两种主要波动——源自磁赤道并向极区扩展的振荡, 以及来自高纬度向赤道传播的 TIDs. 研究指出, 行星际电场作用与极光能量输入分别提供了驱动上述两种波动的主要能量来源. 这些工作深化了对热层–电离层系统通过波动进行能量与动量交换的认识.

2.2 磁暴造成的区域强电离层–热层扰动相关物理过程及机理

作为紧密耦合的电离层–热层系统, 电离层 F 层电子密度受光化学过程和输运过程共同调控, 但其主导过程随高度变化. 在白天, 低高度电离层 (约 150～200 km) 光化学过程占主导地位, 输运过程的影响较弱, 可近似视为处于光化学平衡状态. 因此, 该高度范围内的电子密度主要受中性大气控制, 其变化自然携带热层成分与温度等物理信息. Li 等[31] 提出了一种方法, 基于低高度电离层观测反演热层参数, 通过数值模拟, 构建了电子密度变化与逃逸层温度变化间的函数关系, 从实测电子密度剖面可以反演逃逸层温度及相关中性成分参数. 与独立热层观测的对比表明, 该方法获得逃逸层温度误差小于 2%, 中性密度误差小于 10%, 显著优于经验模型结果, 尤其在扰动条件下仍具可靠性. 该方法突破了热层观测稀疏与连续性不足的限制, 为研究理解电离层–热层间耦合过程提供了新视角, 对深化电离层–热层耦合机制的理解, 以及提升空间天气预报能力具有重要科学意义.

热层变化可通过调制中性温度、成分与风场等过

程显著影响电离层垂直结构. 在某些条件下, F_2 层电子密度可能低于 F_1 层电子密度. 此类情形下, 测高仪测不到 F_2 层回波描迹, 称为 G 现象. G 现象作为电离层对热层扰动的敏感响应, 是探究热层–电离层耦合机制的重要窗口. Li 等[32] 选取 2023 年 4 月 24 日发生的 G 现象事件 (图 3), 利用上述热层参数反演方法, 从漠河和北京台站的电子密度剖面中提取逃逸层温度, 结合改进后的 NRLMSISE-00 模型, 定量分析热层温度与成分变化对电离层的影响. 结果显示, G 现象期间热层温度显著升高, 导致热层膨胀与中性成分重新分布, 引起 $[O]/[N_2]$ 的显著下降. $[O]/[N_2]$ 成分的降低减弱了 F_2 层电子产生效率, 而热层温度的升高进一步增强了离子–分子反应速率, 加剧了电子损失, 最终导致 F_2 层电子密度大幅降低. 当 F_2 层电子密度低于 F_1 层时, G 现象随之发生. 该研究揭示了热层温度与成分变化可显著改变电离层垂直结构, 为深入理解电离层–热层耦合机制提供了重要依据.

Li 等[33] 基于中纬度漠河观测站的高分辨率、连续的 FPI 干涉仪和测高仪观测, 分析了 2023 年 4 月地磁暴期间该电离层–热层系统的响应. 在系统多个关键参数中, 均识别出大尺度特征和短周期振荡. 热层风场在磁暴的主相阶段和恢复相阶段均出现了类似的受扰模式, 然而, 系统诸多参数中的振荡特征仅在主相期间被观测到. 同步观测的结果表明, 热层风场、温度、电离层 F_2 层峰值高度、峰值电子密度及 TEC 存在的振荡现象 (见图 4). 这些发现揭示了风场散度对热层温度扰动的重要影响, 以及其对电离层扰动的调制作用.

在磁暴恢复期中, 纬度区域存在一种新型的、由热层成分驱动的电离层舌状结构. Yu 等[34] 利用 GOLD 天底观测的$\sum[O]/[N_2]$ 数据和数值模拟, 通过研究多个中小强度磁暴事件, 发现在磁暴主相期间往往存在长时间的大尺度$\sum[O]/[N_2]$ 降低结构, 持续时间超过 16 h[35], 预期会对日间电离层电子密度的降低产生贡献. 在某些特定情况下, 当这种$\sum[O]/[N_2]$ 降低结构持续到磁暴恢复相期间, 会形成从低纬延伸至中高纬区域狭长的$\sum[O]/[N_2]$ 增强结构[36]. Yu 等[37] 利用 GNSS 和 GOLD 观测分析了中小尺度热层结构对电离层的影响, 发现在 2021 年 5 月 12 日磁暴恢复期间存在一种日间热层–电离层耦合舌状结构. 该舌状结构表现为 TEC 和$\sum[O]/[N_2]$ 在狭窄纬度范围内的同步增强, 中性温度却在该区域内降低. 研究发现, 通过 TIEGCM 模型对该结构定性再现, 虽然该结构在形态上与电离层舌状结构 (TOI) 类似, 但与以往由 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移主导的极区 TOI 结构存在差异. 该结构形成于较低地磁纬度 (约 30°−65°), 增强幅度较小, 主要受化学过程 (增强的$\sum[O]/[N_2]$) 控制, 中性风对该结构的形成也有一定贡献, 而 $E\times B$ 漂移的作用较小.

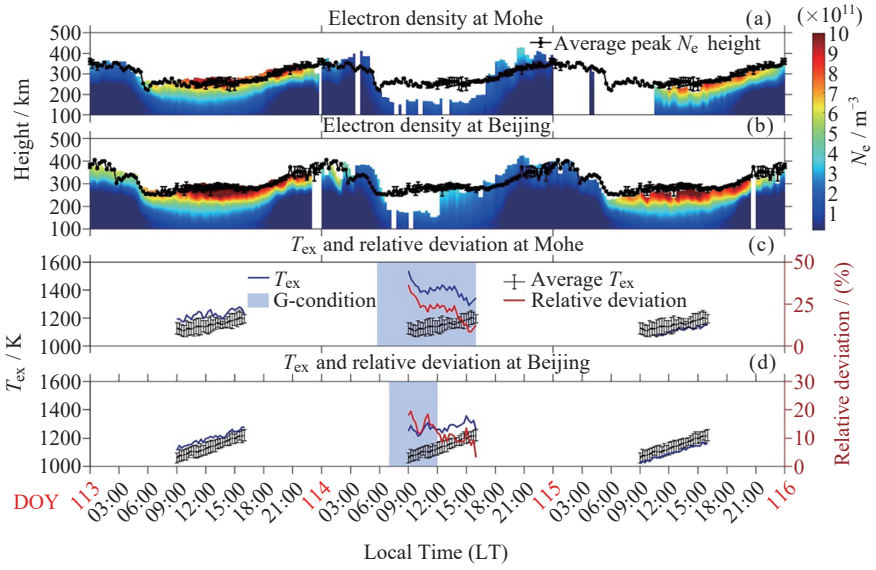


图 3 2023 年 4 月磁暴期间漠河站和北京站 G 现象事件以及从电子密度剖面中提取的逃逸层温度[32]

Fig. 3 G-condition events observed at Mohe and Beijing stations during the geomagnetic storm in April 2023, along with the exospheric temperatures derived from electron density profiles[32]

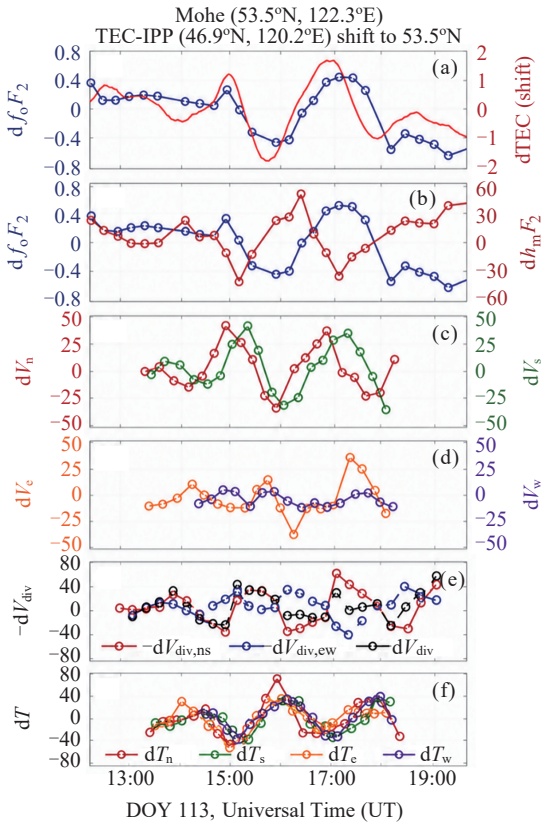


图 4 2023 年 4 月地磁暴期间漠河站观测到的电离层 TEC 和 F_2 层临界频率 f_oF_2 和峰高 h_mF_2 以及 FP 干涉仪观测的温度和四个方向风场 V_e, V_w, V_s 和 V_n 等参数及风场散度的振荡现象[33]

Fig. 4 Oscillations of ionospheric TEC, F_2 layer critical frequency f_oF_2 and peak height h_mF_2 observed at Mohe station, as well as temperatures and four-directional wind fields (V_e, V_w, V_s, and V_n) and wind field divergence observed by the FPI during the geomagnetic storm in April 2023[33]

3 暴时中低纬电离层电动力学与动力学响应过程及机理

3.1 磁暴与耀斑期间低纬电离层扰动电场的特征

Zhang 等[38] 联合分析了多卫星数据, 揭示了持续南向 IMF B_z 条件下地磁暴期间扰动等离子体漂移的演化规律: 在扰动发电机主导阶段, 漂移场呈现夜间向上/西向、白天向下/东向的稳定模式, 随着磁暴的发展产生系统性局部时偏移. 该现象主要由持续共转的扰动风驱动, 通过调制 F 区发电机过程改变极化电场分布, 最终导致漂移场西向分量在日侧增强、影响范围在夜侧得到扩展.

Zhang 等[39] 基于 Jicamarca 台站观测数据, 发现了太阳耀斑期间赤道电集流增强与赤道电场减弱的反常现象. 提出耀斑通过 Cowling 电导率调制发电机过程, 以及增强 2 区场向电流引发类似屏蔽效应的双重机制, 最终削弱赤道喷泉效应, 抑制低纬度电子密度.

Zhang 等[40] 分析了 2017 年 9 月多次空间天气事件, 揭示了太阳耀斑与地磁暴对赤道电离层电动力学的耦合影响. 三次 X 级耀斑均激发西向扰动电场, 并调制电集流强度, 其中 7 日观测事件中, 耀斑期间东向电集流呈现先增强后减弱的特征; 磁暴恢复期表现为扰动发电机电场主导的局部时依赖特征, 其西向分量具有从高层向低层传播且随高度增强的垂直分布结构, 同时 F 区电子密度响应展现出显著的空间分层特性.

Zhang 等[41] 对 2024 年 5 月超级磁暴事件的研究发现了穿透电场“完美屏蔽”这一现象. 利用三亚和 Jicamarca 非相干散射雷达观测, 分析发现, 电场穿透效率在夜间约为白天的两倍. 在 IMF 南向翻转事件中, 电场在后半夜时段被快速抵消并反向, 而下午时段则无显著变化. 其物理机制是增强的 2 区场向电流和向日对流使屏蔽层更靠近地球, 从而能够对太阳风驱动做出迅速响应, 并快速完成重构, 实现了这种罕见的近乎完美的屏蔽效果. 这一现象表明, 穿透电场与屏蔽电场异常迅速且彻底抵消, 挑战了传统的认知.

3.2 暴时低纬电离层电动力学/动力学效应

Kuai 等[42] 基于 Jicamarca 台站数据的统计分析, 发现赤道区长持续正暴事件的发生率在地磁暴主相结束后呈指数衰减, 且与季节和太阳活动水平无显著关联. 研究揭示, 日间事件主要由西向扰动电场主导, 而夜间事件则与东向电场引起的 F_2 层抬升密切相关, 表明扰动电场是形成该现象的关键因素.

在低纬地区, Jin 等[43] 基于三亚测高仪和 TIEGCM 模式揭示了夏季弱磁暴活动期间低纬电离层发生显著变化的规律. 其表现为磁暴恢复相期间 F_2 层变低变薄和日间 F_3 层消失. 借鉴 DMSP 卫星漂移数据, 证认与西向扰动风场发电机电场有密切关系. Hao 等[44] 基于三亚非相干散射雷达及测高仪等多源观测, 对 2021 年 5 月 26−27 日磁暴的研究, 发现了东亚地区日落后电离层增强的复杂动力学过程. 研

究发现, 日落后等离子体密度增强, 其峰值出现时间存在显著的纬度延迟效应. 该增强伴随 h_mF_2 在 N_mF_2 峰值前下降, 这有利于 16°N−30°N 带内低空电子密度增加, 但 TEC 变化不大; 而在 30°N−50°N 内, 磁暴引发的赤道向风场与向下的场向漂移之间的竞争可能抑制了 h_mF_2 下降, 并共同促进了 N_mF_2 和 TEC 的积累. ICON 卫星观测进一步证实, 子午风在此次事件中调制了日落附近的等离子体输运方向, 对从中低纬度日落后等离子体密度增强起主导作用. 这些结果为理解东亚中低纬度日落增强的电动力学机制及电离层–热层系统对小磁暴的复杂响应提供了新的见解.

4 暴时中低纬电离层不均匀体演化特性及机制

4.1 暴时超级赤道等离子体泡

磁暴发生时, 背景电场与风场发生变化, EPB 可能会发展至数千 km 的高度, 可沿磁力线映射至中纬地区, 一般称为超级 EPB. Sun 等[45] 发现在日落和日出附近可产生延展至中纬的超级 EPB. 如 2023 年 2 月 27 日强磁暴期间, 中国扇区在日落后和日出附近均观测到新产生的超级 EPB, 延展至 35°N 附近. 对该事件分析发现, 不同时段超级 EPB 的特性存在共性和差异. 其相似性体现在可导致 GNSS 闪烁、TEC 耗空、总电子含量变化率指数 (ROTI) 增强、距离扩展 F 和甚高频 (VHF) 雷达的后向散射回波, 其差异性体现在, 日落超级 EPB 造成的闪烁强度、耗空深度、导航定位误差等均比日出超级 EPB 更加显著, 这主要归因于日落附近背景电子密度较高. 在物理机制方面, 日落后的超级 EPB 主要由暴时穿透电场增强背景日落反转增强 (PRE) 电场所驱动, 而日出附近赤道向的风场对超级 EPB 的产生也有一定的贡献.

Sun 等[46] 发现暴时超级 EPB 的发生具有区域性, 例如 2023 年 12 月 1 日强磁暴期间, 中国扇区观测到延展至北纬 40°N 的超级 EPB. 利用大覆盖范围的观测数据发现, 该事件中超级 EPB 仅在 95°E−130°E 有限的经度范围内产生. 由于日落后超级 EPB 主要由暴时东向穿透电场叠加增强 PRE 驱动产生, 因此超级 EPB 的空间特性受到暴时穿透电场的调制. 东向穿透电场的强度可通过增强磁赤道上空等离子体垂直漂移速度影响 EPB 发展的高度和映射的纬度; 东向穿透电场发生时间可决定暴时超级 EPB 产生的经度区位置, 一方面, 超级 EPB 主要产生于暴时东向电场发生时对应地方时为日落附近的经度, 另一方面, 东向穿透电场的持续时间在一定程度上控制超级 EPB 可能发生的经度范围. 2023 年 12 月 1 日强磁暴主相期间行星际磁场 B_z 南向反转时, 恰好对应中国扇区日落, 因此超级 EPB 在中国扇区产生, 而此次行星际磁场 B_z 南向反转引发的东向穿透电场持续时间约 3.5 h, 对应时段内经度范围经历日落, 较好地对应于超级 EPB 在 95°E−130°E 约 45°的经度范围.

4.2 伴随超级赤道等离子体泡的中纬斑块结构

EPB 作为一种等离子体密度耗空结构, 其发生时通常会伴随产生等离子体密度增强的斑块结构, 一般出现于 EPB 耗空结构南北两侧 (即极侧) 的低纬地区. 一般情况下, EPB 很难延展至中纬地区, 因此极少在中纬观测到该斑块结构. Sun 等[47] 观测到 2024 年 5 月超级磁暴恢复相期间, 超级 EPB 延展至磁纬 40°. 伴随该超级 EPB, 也观测到大尺度的等离子体密度增强结构 (见图 5), 图中 A 为延展至磁纬 40°的超级 EPB 结构, X 为 EPB 极侧的等离子体斑块结构, Y 为 EPB 西侧的等离子体斑块结构, 黑色虚线为地磁纬度, 红色虚线为日出线[47]. 类似于之前研究中伴随的 EPB 产生的等离子体斑块结构, 该等离子体密度增强结构内部的 TEC 超出周边背景值达 50 TECU, 在卫星穿过该结构时, 原位探测到大范围的电子密度隆起, 同时嵌入 EPB 不均匀体引起的剧烈密度起伏. 该事件中的等离子体密度增强结构由低纬一直延展至中纬, 并在某些时刻 (例如 20:00 UT, 图 5) 呈现独特的壳状形态包裹 EPB 结构, 即同时出现在 EPB 结构的极侧和西侧. 因此, 该大尺度等离子体密度增强结构, 可能是伴随超级 EPB 出现的超级等离子体斑块结构.

上述研究认为, 暴时电场和风场的共同作用导致的背景电子密度增强, 提供了产生该等离子体斑块结构的必要粒子来源, 而 EPB 的产生及演化调制了等离子体斑块结构的形态; EPB 极侧的等离子体斑块结构可能伴随超级 EPB 结构的极向扩展而产生, 即 EPB 在磁赤道上空产生后, 等离子体向上生长而被

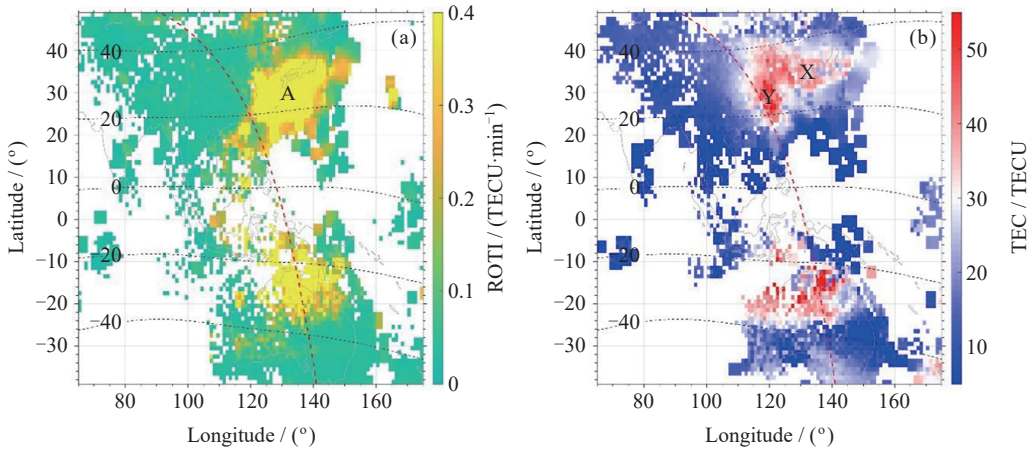


图 5 2024 年 5 月 11 日 20:00 UT ROTI 地图表征的超级 EPB (a) 与 TEC 地图表征的等离子体斑块结构 (b)[47]

Fig. 5 Super EPB structures characterized by ROTI maps (a) and plasma patch structures characterized by TEC maps (b) at 20:00 UT on 11 May 2024[47]

顶到更高高度, 继而由于 EPB 沿着磁力线向更高纬度映射, 等离子体被场向输运至 EPB 结构的南北两侧, 堆积形成斑块结构; EPB 西侧的等离子体斑块结构可能由 EPB 结构内部的极化电场驱动产生, 即西向倾斜的 EPB 结构内部产生向上的极化电场分量, 该分量随 EPB 结构映射至中低纬地区后, 通过 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 为 EPB 内部的等离子体施加额外的西向驱动力, 使 EPB 内部等离子体西向漂移速度大于外部, 导致等离子体堆积于 EPB 结构西侧, 从而形成斑块结构.

5 电离层暴时参数预报模型研究: 从经验方法到深度学习

Gao 等[48] 基于电离层扰动的季节性主导规律, 考虑到地磁活动历史水平效应, 构建了一种适用于中纬度 Yakutsk 单站的电离层暴线性经验预报模型. 模型验证结果表明, 该模型在夏季和春秋季对电离层扰动的预测效果显著优于 IRI 中的 STORM 模型, 平均改善度约 35%. 模型能够有效刻画连续磁暴事件中 δf_0F_2 分阶段下降的特征, 并对正相扰动及其持续时间具有一定反应能力, 然而正相扰动的预报精度仍需进一步提高. 该研究为单站电离层暴预报提供了具有实用价值的改进参考.

Liu 等[49] 基于日本 Wakkanai 电离层测高仪站记录的 F_2 层临界频率 (f_0F_2) 逐时值, 构建了一个适用于中纬度单站、可同时服务于地磁宁静条件与扰动条件的 f_0F_2 预报模型. 该模型的宁静模块首次尝试对 f_0F_2 的上下四分位数进行预测, 以表征其显著的日际变化, 验证表明, 其捕捉 f_0F_2 气候学变化的精度优于国际参考电离层 (IRI) 模型. 扰动模块通过修正地磁活动指数 (K_f 指数) 调制的全日与半日波动, 描述磁暴引起的 f_0F_2 相对偏差, 并提供是否启用卡尔曼滤波算法的两种模式选项. 结果显示, 在扰动模块中引入卡尔曼滤波算法可实时优化模型系数, 显著提高预报精度.

深度学习在高精度电离层参数预测中的应用已成为空间天气研究的热点. Ren 等[50] 提出一种改进的混合卷积神经网络–双向长短期记忆 (CNN-BiLSTM) 模型, 用于预测全球电离层暴时 TEC. 该模型采用长达 25 年的全球电离层 TEC 地图数据进行训练, 并评估了其对电离层暴的预测精度. 结果表明, 在太阳–地理坐标系中使用历史 TEC 作为输入驱动数据, 相比地心坐标系能获得更高预测精度. 通过比较不同输入参数发现, 引入 Kp, ap 与 Dst 指数可有效提升模型性能, 尤其在长期预测中 R^2 提升 3.49%, 均方根误差降低 13.48%. 与 BiLSTM-深度神经网络 (DNN) 和 CNN-BiLSTM 相比, 混合 CNN-BiLSTM 模型具有最优的预测精度, 这得益于 CNN 模块对空间信息的处理能力与 DNN 模块对地磁指数修正结果的融合. 在短期预测中, 该模型能准确预报电离层暴的演化过程; 延长预测时长后, 模型预测虽存在误差, 但仍能捕捉暴时变化全过程. 此外, 预测结果显著受经度、磁纬和地方时的影响.

Ren 等[51] 设计了三种电离层 TEC 暴时深度学习

预测方法. 全球数据驱动预测模型 (GDDPM)、区域数据驱动预测模型 (RDDPM) 和单站拼接预测模型 (SSSPM), 并对其性能进行了评估. 结果表明, SSSPM 在预测精度方面优于 GDDPM 和 RDDPM, 其优势在于能够充分利用单一观测站数据, 并通过拼接技术提高预测准确性, 但存在预测结果不连续、稳定性不足及参数较多的问题. RDDPM 在短期预测中表现优于 GDDPM, 这得益于其对区域电离层变化的捕捉能力; 而在中长期预测方面, GDDPM 则展现出更好的稳定性和准确性, 可能源于其对全球电离层扰动特征的综合把握. 综上所述, 三种模型各具特点, 实际应用中需根据预测时长、区域特性及数据条件选择适宜的模型.

6 未来展望

未来中低纬电离层暴研究的核心方向在于构建天基与地基协同的立体观测体系与多尺度耦合的物理模型. 当前离子漂移、中性风和中性成分等关键参数观测的时空覆盖严重不足, 需大力发展小型化卫星星座技术, 实现对 150 km 以上全高度层的多点原位同步探测, 同时在全球数据空白区布设地基站点. 建模方面, 需开发高性能数值模型, 使其能够精确描述能量注入时空尺度、解析等离子体–中性气体耦合机制, 并整合从局域到全球的多重尺度物理过程. 特别需要关注低层大气波源特性及其向上传播的机制, 以及高纬度能量输入如何通过风场与电流重新分布影响全球电离层–热层系统. 这一研究方向需紧密结合数据同化与人工智能技术, 将稀疏观测融合为可靠的三维时空重构, 最终建立具备高预测能力的预报系统, 为空间天气预警、航天活动保障及理解日地联系奠定坚实基础.

致谢 谨以此文纪念肖佐教授, 并感谢他对研究团队长期的关心和帮助. 除本文介绍的电离层暴相关研究外, 感兴趣的读者可参阅为中国 COSPAR 委员会撰写的中国电离层研究进展报告 (每两年一次). 该系列报告先后发表于《空间科学学报》、《地球物理学报》、《Earth Planetary Physics》和《Science Bulletin》等刊物.

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] HEELIS R A, MAUTE A. Challenges to understanding the Earth's ionosphere and thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(7): e2019JA027497

[2] HEELIS R A. Longitude and hemispheric dependencies in storm-enhanced density[M]//FULLER-ROWELL T, YIZENGAW E, DOHERTY P H, *et al*. Ionospheric Space Weather: Longitude and Hemispheric Dependences and Lower Atmosphere Forcing. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2016: 59-70

[3] YIZENGAW E. Ionospheric dynamics and their strong longitudinal dependences[M]//HUANG C S, LU G, ZHANG Y L, *et al*. Ionosphere Dynamics and Applications. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2021: 401-419

[4] HUANG F Q, LEI J H, YUE X A, *et al*. Interplay of gravity waves and disturbance electric fields to the abnormal ionospheric variations during the 11 May 2024 superstorm[J]. *AGU Advances*, 2025, **6**(1): e2024AV001379

[5] CHEN Y, AA E, YUAN T, *et al*. The extreme depletion of ionospheric electron density and its hemispheric asymmetry during the May 2024 storm[J]. *National Science Review*, 2025, **12**(10): nwaf307

[6] WANG C, XU J Y, LIU L B, *et al*. Contribution of the Chinese Meridian Project to space environment research: highlights and perspectives[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, **66**(7): 1423-1438

[7] KUAI J W, LIU L B, LIU J, *et al*. Effects of disturbed electric fields in the low-latitude and equatorial ionosphere during the 2015 St. Patrick's Day storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(9): 9111-9126

[8] KUAI J W, LIU L B, LEI J H, *et al*. Regional differences of the ionospheric response to the July 2012 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(4): 4654-4668

[9] LI Q L, HUANG F Q, ZHONG J H, *et al*. Persistence of the long-duration daytime TEC enhancements at different longitudinal sectors during the August 2018 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(11): e2020JA028238

[10] ZHANG R L, LIU L B, YANG Y Y, *et al*. Ionosphere responses over Asian-Australian and American sectors to the 10-12 May 2024 superstorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(12): e2024JA033071

[11] TARIQ M A, LIU L B, SHAH M, *et al*. Longitudinal variations of ionospheric responses to the February and April 2023 geomagnetic storms over American and Asian sectors[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(6): 3033-3049

[12] ZHAO B Q, YANG C J, CAI Y H, *et al*. East-west difference in the ionospheric response of the March 1989 great

magnetic storm throughout East Asian region[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(11): 9364-9380

[13] YU T T, WANG W B, REN Z P, *et al*. Middle-low latitude neutral composition and temperature responses to the 20 and 21 November 2003 superstorm from GUVI dayside limb measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(8): e2020JA028427

[14] GUO X, ZHAO B Q, YU T T, *et al*. East–west difference in the ionospheric response during the recovery phase of May 2024 super geomagnetic storm over the East Asian[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(9): e2024JA033170

[15] YU T T, WANG W B, REN Z P, *et al*. The response of middle thermosphere (~160 km) composition to the November 20 and 21, 2003 superstorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(10): e2021JA029449

[16] YU T T, WANG W B, REN Z P, *et al*. Vertical variations in thermospheric O/N_2 and the relationship between O and N_2 perturbations during a geomagnetic storm[J]. *Earth and Space Science*, 2023, **10**(10): e2023EA002988

[17] YU T T, CAI X G, REN Z P, *et al*. Investigation of interhemispheric asymmetry of the thermospheric composition observed by GOLD during the first strong geomagnetic storm in solar-cycle 25, 1: IMF B_y effects[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(10): e2023JA031429

[18] GUO X, ZHAO B Q, YU T T, *et al*. A peculiar discontinuous ionospheric latitudinal variation over the East Asia region during the recovery phase of the November 2003 super magnetic storm: a hint from May 2024 superstorm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(9): e2025GL114919

[19] YU T T, ZHAO B Q, REN Z P, *et al*. The underlying physical processes of the vortex-like structure over the East Asia region during the recovery phase of the November 2003 superstorm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2026, **131**(2): e2025JA034433

[20] HE F, ZHANG X X, WANG W B, *et al*. Large-scale structure of subauroral polarization streams during the main phase of a severe geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(4): 2964-2973

[21] HE F, ZHANG X X, WANG W B, *et al*. Evolution of the subauroral polarization stream oscillations during the severe geomagnetic storm on 20 November 2003[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(2): 599-607

[22] YANG Y Y, LIU L B, LI W B, *et al*. Localized plasma density peak at middle latitudes during the April 2023 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(2): e2023JA032165

[23] YANG Y Y, SUN W J, LI W B, *et al*. Special ionospheric structure over the Asia-Australia sector during the May 2024 superstorm recovery phase[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(8): e2025JA033822

[24] ZHAO B C, WAN W, LEI J H, *et al*. Positive ionospheric storm effects at Latin America longitude during the superstorm of 20–22 November 2003: revisit[J]. *Annales Geophysicae*, 2012, **30**(5): 831-840

[25] LIU L B, LE H J, CHEN Y D, *et al*. New aspects of the ionospheric behavior over Millstone Hill during the 30-day incoherent scatter radar experiment in October 2002[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(7): 6288-6295

[26] ZHANG R L, LIU L B, MA H, *et al*. Extreme enhancements of electron temperature in low latitude topside ionosphere during the October 2016 storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(3): e2022JA030278

[27] KUAI J W, SUN H, LIU L B, *et al*. A case study of ionospheric storm-time altitudinal differences at low latitudes during the May 2021 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(5): e2024JA032484

[28] LIU B W, LIU J, LIU X Q, *et al*. On the relationship between traveling atmospheric disturbances and traveling ionospheric disturbances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(1): e2024JA033271

[29] HAN T W, LE H J, YANG Y Y, *et al*. Characteristics of large-scale traveling ionospheric disturbances during the 10 May 2024 geomagnetic storm[J]. *Space Weather*, 2025, **23**(10): e2024SW004283

[30] SUN W J, LI G Z, ZHANG S R, *et al*. Complex ionospheric fluctuations over East and Southeast Asia during the May 2024 super geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(12): e2024JA033096

[31] LI S Y, REN Z P, YUE X A, *et al*. Extracting exospheric temperature from daytime ionospheric electron density profiles[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(4): e2022JA030988

[32] LI S Y, REN Z P, YU T T, *et al*. A case study of thermospheric exospheric temperature responses during the G-condition at Mohe and Beijing stations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(10): e2024JA032653

[33] LI W B, LIU L B, CHEN Y D, *et al*. Multi-instruments observation of ionospheric-thermospheric dynamic coupling over Mohe (53.5°N, 122.3°E) during the April 2023 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(12): e2023JA032141

[34] YU T T, CAI X G, REN Z P, *et al*. Investigation of the $\sum O/N_2$ depletion with latitudinally tilted equatorward boundary observed by GOLD during the geomagnetic storm on April 20, 2020[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(12): e2022JA030889

[35] YU T T, WANG W B, REN Z P, *et al*. Diagnostic analy-

sis of the physical processes underlying the long-duration $\sum O/N_2$ depletion during the recovery phase of the 8 June 2019 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(12): e2022JA031075

[36] YU Tingting, REN Zhipeng, CAI Xuguang, *et al*. Vertical variations of a neutral "tongue" during the recovery phase of the geomagnetic storm on April 20, 2020[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, **66**(11): 4437-4450 (于婷婷, 任志鹏, 蔡旭光, 等. 2020 年 4 月 20 日磁暴恢复相期间舌状中性结构的垂直变化 [J]. 地球物理学报, 2023, **66**(11): 4437-4450)

[37] YU T T, REN Z P, ZHAO B Q, *et al*. Coupled thermosphere-ionosphere tongue-like structure during the recovery phase of the geomagnetic storm on 12 May 2021[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(1): e2024JA033119

[38] ZHANG R L, LIU L B, LE H J, *et al*. The storm time evolution of the ionospheric disturbance plasma drifts[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(11): 11665-11676

[39] ZHANG R L, LIU L B, LE H J, *et al*. Equatorial ionospheric electrodynamics during solar flares[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(10): 4558-4565

[40] ZHANG R L, LIU L B, LE H J, *et al*. Equatorial ionospheric electrodynamics over Jicamarca during the 6-11 September 2017 space weather event[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(2): 1292-1306

[41] ZHANG R L, LIU L B, YUE X A, *et al*. The penetration electric fields during the 10 May 2024 superstorm observed by ISRs over Sanya and Jicamarca[J]. *Geophysical Research Letters*, 2025, **52**(6): e2024GL114543

[42] KUAI J W, LIU L B, LIU J, *et al*. The long-duration positive storm effects in the equatorial ionosphere over Jicamarca[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(2): 1311-1324

[43] JIN Y Y, ZHAO B Q, LI G Z, *et al*. Inhibition of F3 layer at low latitude station Sanya during recovery phase of geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(12): e2021JA029850

[44] HAO H L, ZHAO B Q, JIN Y Y, *et al*. Latitude variation of the post-sunset plasma density enhancement during the minor geomagnetic storm on 27 May 2021[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(3): e2023JA032156

[45] SUN W J, LI G Z, LEI J H, *et al*. Ionospheric super bubbles near sunset and sunrise during the 26-28 February 2023 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(11): e2023JA031864

[46] SUN W J, LI G Z, ZHANG S R, *et al*. Regional ionospheric super bubble induced by significant upward plasma drift during the 1 December 2023 geomagnetic storm[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(6): e2024JA032430

[47] SUN W J, LI G Z, ZHAO B Q, *et al*. Midlatitude plasma blob-like structures along with super equatorial plasma bubbles during the May 2024 great geomagnetic storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2024, **51**(21): e2024GL111638

[48] GAO Qin, LIU Libo, ZHAO Biqiang, *et al*. A prediction method for midlatitude ionospheric storms at a single station based on modified *Kp*[J]. *Progress in Geophysics*, 2009, **24**(6): 1943-1950 (高琴, 刘立波, 赵必强, 等. 基于修正 *Kp* 指数的中纬区单站电离层暴预报方法研究 [J]. 地球物理学进展, 2009, **24**(6): 1943-1950)

[49] LIU J, LIU L B, ZHAO B Q, *et al*. Empirical modeling of ionospheric F2 layer critical frequency over Wakkanai under geomagnetic quiet and disturbed conditions[J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, **55**(5): 1169-1177

[50] REN X C, ZHAO B Q, REN Z P, *et al*. Deep learning-based prediction of global ionospheric TEC during storm periods: mixed CNN-BiLSTM method[J]. *Space Weather*, 2024, **22**(7): e2024SW003877

[51] REN X C, ZHAO B Q, ZENG L Q, *et al*. Comparative analysis of different prediction methods for TEC in China based on deep learning[J]. *Advances in Space Research*, 2025, **75**(8): 6469-6486

作者简介



刘立波（通信作者） 男, 1970 年 11 月出生于湖南省汉寿县, 现为中国科学院地质与地球物理研究所研究员, 主要研究方向为电离层与高层大气物理研究.
E-mail: liul@mail.iggcas.ac.cn