0254-6124/2026/46(5)-0001-24 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Xuanqing, CHEN Yao, LE Huijun, LIU Jing. Research Progress on the Effects of Solar Flares on the Thermosphere-Ionosphere-Magnetosphere (T-I-M) Coupling System (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2026, **46**(5): 1–24. CSTR:32142.14.cjss.2025–0218. DOI:10.11728/cjss2026.05.2025–0218

太阳耀斑对热层–电离层–磁层耦合系统影响研究进展*

刘宣青[1] 陈 耀[1] 乐会军[2,3,4] 刘 晶[1]

1(山东大学空间科学与技术学院 空间科学研究院山东省太空环境与探测技术重点实验室 威海 264209)

2(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)

3(中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049)

4(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)

摘 要 作为太阳爆发的重要形式, 耀斑可瞬时释放出强烈的电磁辐射, 可显著扰动地球热层–电离层–磁层 (T-I-M) 耦合系统. 系统综述了近 10 年来中国在耀斑对 T-I-M(Thermosphere-Ionosphere-Magnetosphere) 系统多尺度影响及其耦合物理机制方面的研究进展. 在热层响应方面, 重点总结耀斑引起的热层加热、中性成分变化及大气动力学过程; 在电离层扰动方面, 分析耀斑引发的瞬时光电离响应、动力学变化以及电动力学过程中电场、电流体系的重构, 尤其关注了耀斑极紫外后相对电离层的影响; 在磁层耦合方面, 阐述耀斑通过极区电导率变化调制场向电流与磁层对流结构的观测证据与机理, 探讨耀斑与磁暴共同作用下的非线性耦合特征.

关键词 太阳耀斑, 热层–电离层–磁层耦合, 空间天气, 极紫外后相

中图分类号 P353.7

Research Progress on the Effects of Solar Flares on the Thermosphere-Ionosphere-Magnetosphere (T-I-M) Coupling System

LIU Xuanqing[1] CHEN Yao[1] LE Huijun[2,3,4] LIU Jing[1]

1(*Shandong Key Laboratory of Space Environment and Exploration Technology, Institute of Space Sciences, School of Space Science and Technology, Shandong University, Weihai* 264209)

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

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

* 国家自然科学基金青年科学基金项目 C 类 (42604219), 山东省自然科学基金项目 (ZR2022JQ18), 中国博士后科学基金项目 (2025M780366) 和山东省博士后科学基金项目 (SDZZ-ZR-202501257) 共同资助

2025-12-15 收到原稿, 2026-04-22 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/)

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

Abstract Solar flares release intense electromagnetic radiation and can strongly perturb the Earth's Thermosphere-Ionosphere-Magnetosphere (T-I-M) coupling system. Here, we review progress made by Chinese researchers over the past decade in understanding the multiscale effects of solar flares on the T-I-M system and the underlying coupling mechanisms. For the thermosphere, we summarize flare-induced heating, changes in neutral composition, and atmospheric dynamics. For the ionosphere, we discuss the rapid photoionization response, dynamical changes, and the electrodynamic restructuring of electric fields and current systems, with particular attention to the effects of the extreme ultraviolet late phase. For magnetospheric coupling, we review observational evidence and physical mechanisms showing how flare-driven changes in polar ionospheric conductance modulate field-aligned currents and magnetospheric convection. We also discuss the nonlinear coupling between solar flares and geomagnetic storms.

Key words Solar flares, Thermosphere-Ionosphere-Magnetosphere (T-I-M) coupling, Space weather, Extreme ultraviolet late phase

0 引言

地球空间环境是一个受到太阳活动持续影响的复杂耦合系统[1–4]. 其中热层、电离层和磁层构成了地球空间环境的关键区域, 三者通过光化学、动力学和电动力学过程紧密相连, 共同构成了热层–电离层–磁层耦合系统 (T-I-M). 磁层–太阳风相互作用主导了太阳风向地球的能量注入; 电离层是高层大气中被太阳辐射部分电离的区域, 不仅影响无线电波的传播, 还是连接磁层与中性大气的桥梁; 而热层作为中性大气的主导区域, 其密度、成分变化直接制约低轨航天器的轨道衰减, 并对电离层的光化学和动力学过程产生重要影响. 这一耦合系统的状态及其变化, 直接决定了空间天气的态势, 对在轨航天器的安全运行、宇航员健康、导航与通信系统的可靠性以及地面电网设施均具有至关重要的影响[5,6].

驱动 T-I-M 系统变化的能量绝大部分源于太阳[7,8]. 太阳主要通过两种形式向地球空间输送能量: 其一是持续的太阳辐射, 包括 X 射线 (X-ray) 和极紫外 (EUV) 辐射, 这是电离层与热层的主要电离源和加热源; 其二是伴随太阳活动 (例如耀斑、日冕物质抛射) 的爆发性能量释放, 包括增强的电磁辐射、高能粒子流与高速等离子体等. 太阳爆发事件产生的 X-ray 和 EUV 辐射可使热层大气膨胀、密度增加, 同时使全球电离层电子密度显著提升, 从而将巨大能量在短时间内注入 T-I-M 系统, 引发剧烈的空间天气扰动[9,10]. 因此, 准确理解太阳活动与地球空间环境之间的耦合物理机制, 可为高精度空间天气预报、保障人类空间活动安全等提供重要理论基础.

而耀斑是 T-I-M 系统瞬时响应与能量再分配的关键扰动源. 与持续数小时至数日的磁暴不同, 一个典型的 X 级耀斑通常在数分钟内达到峰值, 持续几分钟到几小时不等, 可引起 X-ray 和 EUV 辐射通量骤增数个量级[11–13]. 这种近乎瞬时的电磁辐射增强, 为研究 T-I-M 系统对单一及明确扰动源的响应提供了理想条件[8,14,15]. 首先, 耀斑辐射以光速传播, 约 8 min 即可到达地球, 其能量注入在时间上高度集中, 且起始时刻精确可知, 使因果关系明确. 其次, 太阳辐射能量主要被日侧高层大气吸收, 尤其是电离层 D 层与 E 层区域, 导致全球电离层电子密度发生剧烈而快速变化, 即所谓的突然电离层骚扰 (SID)[16,17]. 这种直接由光电离驱动的过程, 避免了如磁暴期间, 由太阳风–磁层耦合驱动的粒子沉降和焦耳加热等复杂过程的交织影响.

因此, 剖析耀斑期间 T-I-M 系统的响应, 有助于剥离电磁辐射在该耦合系统中的主导作用, 并追踪其触发一系列连锁耦合效应的完整路径. 近十年来, 全球导航卫星系统、卫星原位探测和数值模拟能力快速发展, 人们得以更精确地量化其能量输入, 并揭示其在全球尺度上对热层、电离层乃至磁层环境产生的深刻而复杂的影响.

在利用高分辨率观测手段揭示耀斑效应的早期

阶段, Zhang 和 Xiao 等[9,10,12,16] 做出了具有奠基意义的开创性贡献. 早在 20 世纪初, 其利用当时正处于快速发展阶段的全球导航卫星系统, 对太阳大耀斑引发的电离层电子密度总含量 (TEC) 变化进行了系统性的定量研究, 精确刻画了 1997 年 11 月 6 日、2000 年 7 月 14 日等强耀斑事件期间, 日侧电离层 TEC(Total Electron Content) 对增强的 X-ray 和 EUV 辐射的瞬时响应过程, 并深入探讨了耀斑能量注入与 TEC 峰值之间的滞后特征及其相关物理机制. 此外, 他们的研究还拓展到晨昏线边界区域, 揭示了耀斑发生时晨昏线边界及夜侧电离层的复杂响应行为. 这些关于 SID(Sudden Ionospheric Disturbance) 的早期 TEC 观测与理论探讨, 有力推动该领域从单点剖面探测向全球大尺度电离层形态演变研究的跨越, 也为后续深入理解耀斑能量在热层–电离层系统中的传输与分配机制奠定了重要观测基础, 进一步推动了中国在该领域的国际影响力.

然而, 关于耀斑能量在不同高度与经纬度区域的分配效率、其通过电动力学耦合对全球电流体系的重构作用以及对磁层环境的潜在影响等关键机制, 目前研究仍存在显著不足, 相关内容始终是该领域的核心前沿课题. 本文系统评述了近十年来在该领域取得的重要进展, 聚焦于耀斑辐射能量在电离层–热层中的瞬时响应、随之触发的区域乃至全球尺度的电动力学耦合过程, 以及能量与扰动如何进一步向上传播并影响磁层的动态演化.

值得注意的是, 已有部分综述从不同侧重点对耀斑的地球空间效应进行了总结. 例如 Tsurutani 等[15] 的综述系统梳理了耀斑期间太阳辐射增强和高能粒子沉降对电离层影响的时序特征, 强调了从太阳至地球空间的全链条扰动过程. 而 Qian 和 Woods[18] 则利用观测与数值模拟, 深入探讨了耀斑辐射在热层–电离层系统中的垂直响应、其对电离层电动力学过程的调制, 以及耀斑本身特性 (例如位置、能量) 对响应幅度的影响. 这些工作为本领域的研究奠定了坚实基础. 相较于这些主要聚焦于耀斑主相辐射或单一、局部圈层响应的已有综述, 本文致力于拓展研究视野, 突出以下三个独特视角. 一是突破传统热层–电离层范畴, 阐述了耀斑通过改变极区电导率进而调制场向电流与磁层对流的物理机制, 强调了 T-I-M 的多圈层耦合特征; 二是特别关注耀斑 EUV 后相这一近年来的研究热点, 深度剖析了这一延迟能量注入过程对电离层引发的滞后效应与持续性扰动; 三是特别梳理并凸显了近年来中国在耀斑能量传输与分配机制、跨圈层物理响应等前沿课题中所做出的重要贡献.

1 太阳耀斑

1.1 耀斑基本情况

太阳耀斑是太阳大气中剧烈的能量释放事件, 通常出现在太阳黑子或活动区[19,20]. 其能量释放与太阳大气磁场拓扑变化及相应的磁场重联过程密切相关. 一次典型大耀斑爆发可释放约 10^{24}～10^{25} J 量级磁能, 与日冕物质抛射能量相当.

耀斑爆发过程涉及多种物理机制, 包括等离子体不稳定性、磁场能量释放、粒子加速与加热、粒子输运、辐射激发等, 此外还会引起多种次级效应, 如色球蒸发、日冕激波等现象[21,22]. 耀斑通常在几秒至几分钟内达到峰值强度[13,23,24]. 除产生显著的 X-ray 和 EUV 辐射外, 还可形成高能粒子流, 对 T-I-M 系统产生影响.

耀斑电磁辐射涵盖多个波段. 伽玛射线 (<1 Å), X-ray(约 1～100 Å), EUV(约 100～1200 Å), 紫外线 (UV, 约 1200～4000 Å), 可见光 (约 4000～7000 Å), 红外线 (约 7000 Å～1 mm) 及射电波 (>1 mm, 见图 1). 其中 UV 对地球大气影响显著, 而 EUV 和 X-ray 主要影响电离层[25]. 根据软 X-ray 辐射通量, 例如 GOES 卫星 (Geostationary Operational Environmental Satellites) 测得的 0.1～0.8 nm 波段峰值通量, 可将耀斑分为 X, M, C, B 和 A 级, 其中 X 级对应于软 X-ray 通量超过 10^{-4} W·m^{-2}, 相邻等级强度相差一个量级[26].

耀斑所释放的硬 X-ray(<1 nm) 能穿透电离层, 导致电离层 D 层光电离增强[27], 而能量较低的软 X-ray(1～10 nm) 则主要增强 E 层光电离程度[28]. 耀斑 X-ray 辐射强度和时间演化特征直接影响电离层的光化学、动力学和电动力学过程. 作为耀斑影响电离层的另一关键波段, EUV 辐射主要被 F 层吸收[15,29]. 与 X-ray 不同, EUV 辐射增强持续时间较长, 且辐射能量在各波段的分布具有显著差异, 因此其对热层–电离层耦合系统的影响通常较为持久. 在耀斑后期, EUV 辐射积累效应会导致电离层电子密度显著上升[30,31].

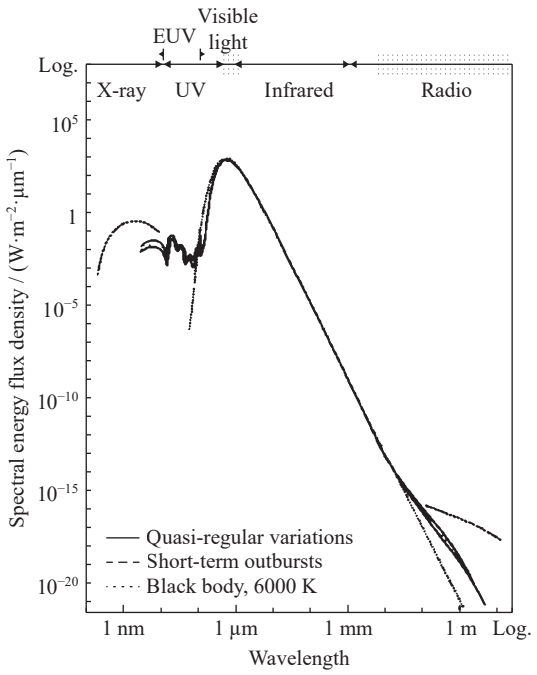

图 1 距太阳 1 AU 不同波段的太阳光谱辐射[25]

Fig. 1 Solar spectrum at different wavelengths at 1 AU from the Sun[25]

1.2 耀斑的不同阶段

耀斑的时间演化特征在不同波段具有显著差异. 在软 X-ray 射线波段, 其辐射曲线通常呈现持续几分钟的快速上升特征, 随后进入可延续数小时的缓慢演化阶段. 在低频射电波段 (例如十米波、米波和分米波), 可观测到持续时间较短的 III 型爆发[32]. 根据软 X-ray 时变特征, 可把耀斑分为三个阶段: 前相、脉冲相与恢复相, 如图 2 所示.

耀斑前相指发生于脉冲相前的早期阶段, 可持续数分钟至数小时, 通常包括耀斑前兆活动. 在此阶段, 日冕中的等离子体被缓慢加热, 在软 X-ray, EUV 或射电波段可观测到较弱的小尺度增亮现象, 通常不伴随硬 X-ray 辐射增强[33–35].

脉冲相是耀斑最主要的能量释放阶段, 持续时间为数秒至数分钟不等. 此阶段硬 X-ray, γ 射线和白光连续辐射急剧上升, 还伴随 UV 和 EUV 辐射的显著增强, 并可观测到耀斑环和耀斑带结构的剧烈演化. 部分事件还可观测到速度在 100 $km\cdot s^{-1}$ 量级的等离子体喷流, 以及 H_α 波段观测到的等离子体流动[36,37].

在耀斑恢复相, 可观测到软 X-ray 和 EUV 高温后环的持续形成和增长. 通常认为, 这些后环源于高能粒子轰击引发的色球蒸发. 这些高温日冕环可持续

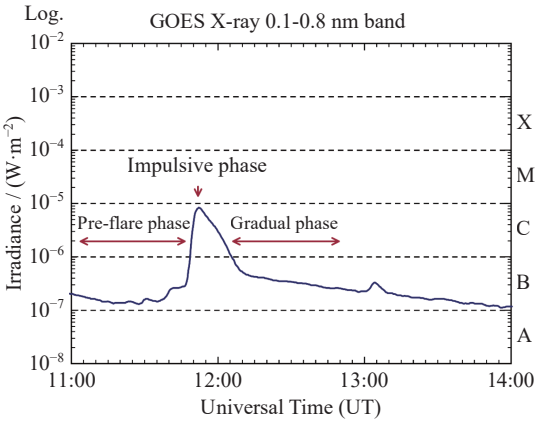

图 2 2010 年 5 月 5 日 C8.8 级耀斑的软 X 射线演化及传统阶段划分[40]

Fig. 2 Soft X-ray evolution and conventional phase classification of the C8.8 flare on 5 May 2010 [40]

存在几十分钟到几小时, 随后各波段辐射逐渐减弱, 磁场结构、等离子体温度等可恢复至耀斑爆发前状态[38,39].

近年来, Woods 等[30] 利用搭载于太阳动力学观测台 (Solar Dynamics Observatory, SDO) 的 EUV 成像仪 (Extreme Ultraviolet Variability Experiment, EVE) 数据发现耀斑的一个新阶段, 某些耀斑在 EVE 暖温度谱线 33.5 nm (Fe XVI, 约 2.5 MK) 中存在两个通量峰值. 第一个峰值与 GOES 的软 X-ray 峰值基本同步, 第二个峰值出现在第一次峰值后的 41 到 204 min 之间, 平均延迟时间为 100 min. 前者对应脉冲相或主相 (MP) 阶段, 后者被定义为 EUV 后相 (ELP) 阶段, 如图 3 所示. 在图 3 中过渡区 He II 30.4 nm 辐射显示了脉冲阶段. GOES X-ray 和热温度日冕辐射 Fe XX/Fe XXIII 13.3 nm 定义了恢复相阶段. 暖温度日冕辐射 Fe XVI 33.5 nm 显示了 EUV 后相阶段, 其中第一个峰值出现在 X-ray 恢复相峰值的几分钟后, 第二个峰值则约 90 min 后出现[30]. Woods 等[30] 还提出两峰值通量比介于 0.2～4.1 之间, 平均值为 0.8. 并不是所有耀斑都存在 EUV 后相阶段, 有 8% 的太阳耀斑会表现出 EUV 后相, 而 X 级耀斑存在 EUV 后相的概率约为 39%[41].

Woods 等[30] 总结耀斑 ELP 具有以下特征, 在软 X-ray 峰值之后, 暖温度谱线辐射 (例如 Fe XV 和 Fe XVI) 出现第二个峰值; 在第二个峰值期间, 无显著热温度谱线辐射 (例如 Fe XX) 增强; 与 EUV 成像中看

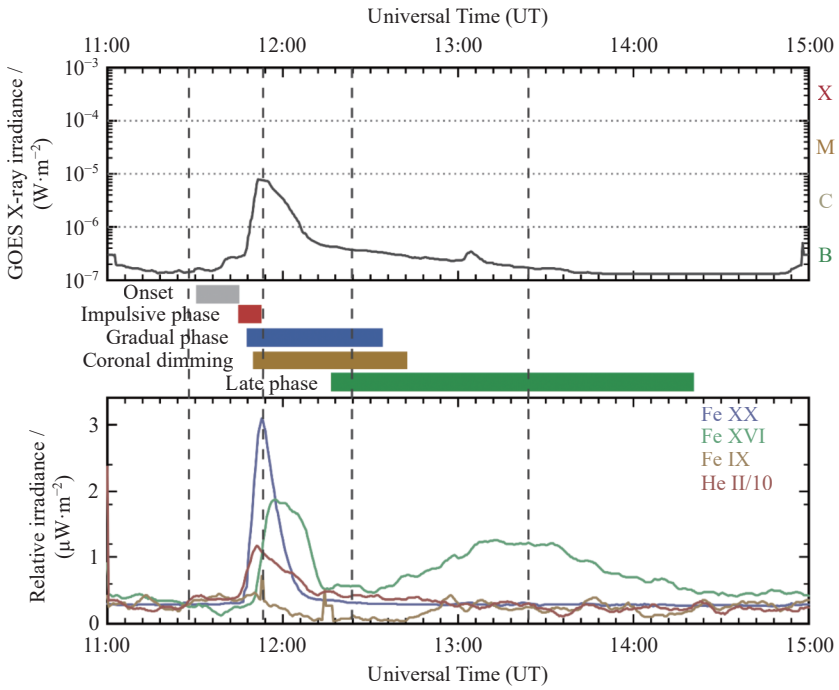

图 3 2010 年 5 月 5 日 C8.8 级耀斑的多波段辐射演化及 EUV 后相特征[30]

Fig. 3 Multiwavelength irradiance evolution and EUV late-phase signature of the C8.8 flare on 5 May 2010 [30]

到的喷发事件相关联; 存在第二组更高且更长的等离子体环. 耀斑的 ELP 主要出现在暖日冕辐射中, 最常见于 EVE Fe XVI 33.5 nm(约 3 MK) 和 Fe XV 28.4 nm(约 2 MK) 谱线, 有时也出现在 EVE Fe XVIII 9.4 nm(约 6 MK) 谱线中. 需要注意的是, ELP 耀斑与长时间耀斑不同, 并非所有耀斑均具有 ELP[41]. 部分耀斑具有完整四阶段, 即前相、脉冲相、恢复相与 ELP 阶段, 而部分耀斑仅具有恢复相阶段. 此外, ELP 对地球电离层的影响尚不明确, 对现有电离层模型研究提出了新课题.

在 Woods 等[30] 揭示 ELP 的初步特征之后, Woods[41] 利用更长时间的 SDO/EVE 观测数据及 GOES X-ray 记录, 对包含 ELP 的耀斑的统计特征进行了系统分析, 将 ELP 的统计特征分析扩展到过去的四个太阳活动周 (1974−2013 年). 该长时序统计研究揭示 ELP 的发生频率具有明显的太阳活动周期依赖性. 耀斑中出现 ELP 的比例在太阳活动极小期前后达到峰值 (发生率约 20%～30%), 而在太阳活动极大期期间则降至最低 (约 10%). 此外, 统计结果显示, 量级较大的耀斑产生 ELP 的频率 (M 级为 24% 和 X 级为 39%) 显著高于 C 级耀斑 (8%), 这主要归因于产生大耀斑的活动区通常具有更为复杂的磁场拓扑结构和多套日冕环系统, 从而更易于满足触发 ELP 的物理条件.

综上, 耀斑能量释放呈现出脉冲–缓变的清晰时序结构. 耀斑主相为 T-I-M 系统注入瞬时能量, 主要触发电离层的快速光电离响应; 而耀斑后相的持续热辐射作为长期的能量源, 主导电离层上层的光化学平衡演变. 近十年来, 高分辨率观测 (例如 SDO 对耀斑环演化的捕捉) 进一步深化了对耀斑不同阶段物理过程的理解. 精确辨析耀斑的时序与辐射特征, 是厘清 T-I-M 系统耦合响应的时间尺度、空间范围与最终效应的关键基础.

2 太阳耀斑对热层的影响

2.1 热层大气成分改变

太阳耀斑引发的辐射增强对热层大气的影响主要表现为中性大气温度快速上升、大气成分变化以及热层大气环流改变. 耀斑释放的短波辐射, 尤其是大幅增强的 EUV 和 X-ray 辐射通量, 会导致电离层 E 层和 F 层电子密度快速增加, 并驱动热层大气快速升温[42]. 耀斑爆发后, 热层温度短时间内快速上升, 导致大气膨胀, 进而影响大气结构和成分分布. 在针对极端空间天气事件的理论推演方面, Le 等[43] 通过构

建耀斑期间太阳 EUV 辐射模型, 模拟 X40 级极端耀斑的响应特征及过程. 其数值模拟结果表明, 在这种超越当前实际观测记录的理论上限条件下, 热层中性温度可在短时间内上升超过 250 K, 尤其在 300～400 km 的高度范围内. 这种温度升高会导致热层膨胀, 尤其是中性气体密度发生显著变化, 例如 400 km 高度的中性大气密度最大增幅超过 100%. 与上述纯理论推演不同, Qian 和 Woods[18] 则结合模型模拟了实际发生过的极端事件, 2003 年 10 月 28 日的 X17 级耀斑. 基于该实际观测事件的模拟结果显示, X17 级耀斑能引起 400 km 处中性温度上升约 100 K(图 4a), 质量密度增加 30%. 热层大气温度显著升高导致大气发生明显膨胀, 高层大气密度显著增加, 从而增大低地球轨道卫星的在轨运行阻力, 加速其轨道衰减.

热层对耀斑的响应表现出明显的时空特征[18,44,45]. 一方面, 中性温度和密度对耀斑的响应与太阳天顶角余弦密切相关, 表明热层响应依赖于太阳天顶角. 另一方面, 温度响应存在明显滞后效应, 峰值响应通常出现在耀斑峰值后 1～2.5 h, 且滞后时间随高度增加而延长. 在垂直分布上, 中性温度增强从低热层向上逐渐增加, 至约 400 km 趋于稳定. 值得注意的是, 热层温度扰动持续时间较长, X 级耀斑的影响通常超过 24 h, 远超过耀斑本身的活动时间, 如图 4(a) 所示.

太阳耀斑引起的加热效应及全球环流改变, 也显著影响热层中性成分的分布格局, 特别是氧原子 (O) 与氮分子 (N_2) 的比值 (O/N_2)[46]. 热层–电离层耦合模型 TIEGCM 模拟结果如图 5 所示[45]. (a)～(f) 为 X2.2 耀斑, (g)～(l) 为 X9.3 耀斑; 在强耀斑 (例如 2017 年 9 月的 X9.3 级耀斑) 作用下, O/N_2 呈现出复杂的空间分布特征. 例如在美洲区域, O/N_2 比值下降约 0.3～0.6, 而在其他区域则上升 0.1～1.8, 表现出明显的经度不对称性. O/N_2 的经度不对称性是导致热层响应经度不对称性的主要因素. 导致这种 O/N_2 空间分布不对称的核心物理机制在于热层风驱动的大气输运过程. 耀斑造成的剧烈且不均匀的加热引发了强烈的压力梯度力, 从而改变了背景热层风场. 基于 NCAR-GMM 以及 TIEGCM 等模型的相关研究进一步指出[47,48], 热层风不仅将低层富含 N_2 的大气输送至热层高处, 还通过水平环流在不同经度区间对中性成分进行重新分配. 这种动力学输运过程与光化学过程的复杂调制, 最终形成耀斑期间 O/N_2 的经度不对称特征.

耀斑位置对热层成分响应具有重要调制作

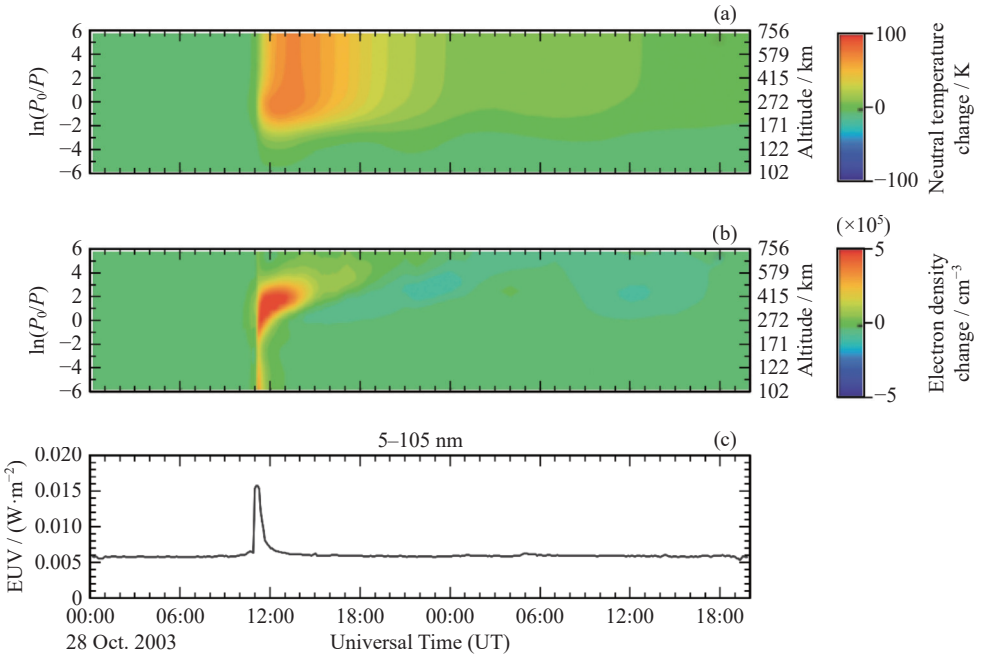

图 4 X17 级耀斑期间磁赤道正午热层和电离层的模拟响应. (a) 中性温度, (b) 电子密度, (c) 5～105 nm 积分 EUV[18]

Fig. 4 Simulated thermospheric and ionospheric responses to an X17 flare at the magnetic equator and local noon. (a) Neutral temperature, (b) electron density, (c) integrated EUV at 5-105 nm[18]

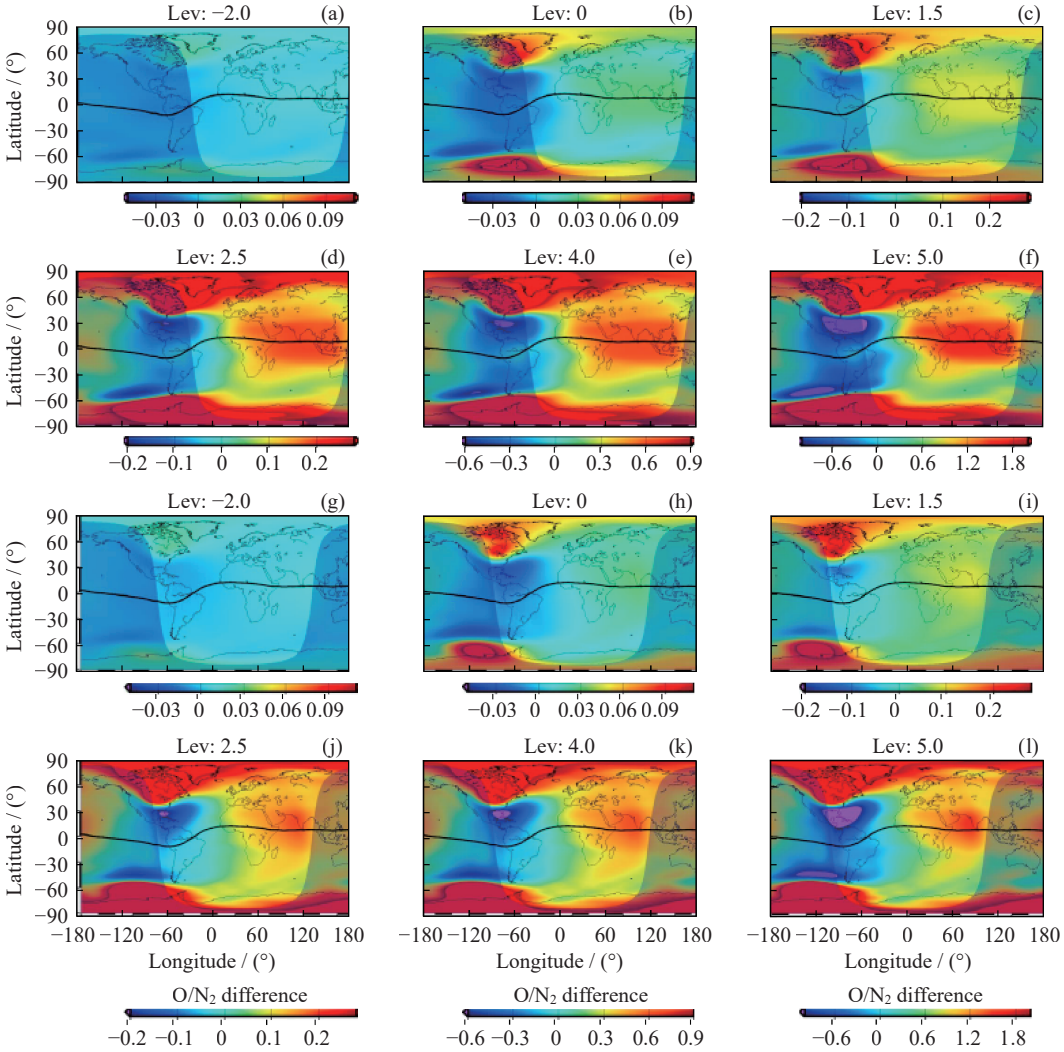

图 5 TIEGCM 模拟的有无耀斑条件下 O/N_2 差值

Fig. 5 TIEGCM-simulated O/N_2 differences between flare and no-flare conditions

用[18,49]. 中心耀斑引起的 EUV 增强约为同级边缘耀斑的 2～3 倍, 导致顶部热层中 O/N_2 变化更为显著. 模拟研究表明, 在约 150 km 以上高度, 耀斑位置效应开始显现, 并随高度增加而增强. 这种位置依赖的响应特征进一步增大热层–电离层耦合的空间差异性, 为理解空间天气效应的区域性特征提供了新视角. 此外, 耀斑效应下热层成分变化的持续时间为数小时至数十小时, 与温度扰动的时间尺度相当, 但空间分布更为复杂. 此种成分结构的长期改变可能对热层的能量平衡和动力学过程产生持续影响, 进而调制整个高层大气系统的演化进程.

2.2 热层动力学过程

太阳耀斑通过释放大量的辐射能量对热层产生显著影响, 不仅快速加热热层, 还会触发一系列复杂的动力学过程, 通过改变大气环流和激发不同尺度的波动, 对整个空间环境产生影响.

太阳耀斑引起的主要动力学效应之一是中性风的显著变化. 耀斑加热导致热层温度急剧上升, 引起大气膨胀并产生强烈的水平风, 风速在日侧半球和夜侧半球均明显增强. 例如 Le 等[44] 通过研究 2001 年 4 月 6 日的 X5.6 级耀斑发现, 太阳辐射加热产生的压力梯度力在日侧存在由日侧指向夜侧的显著中性风, 从而进一步加强全球热层环流 (图 6). 图 6 中白色和黑色三角分别表示耀斑爆发时的日下点和反日下点. Aswathy 等[50] 研究发现, 2012 年 1 月 27 日的 X1.7 级耀斑期间, GOCE 卫星观测到北极和南极地

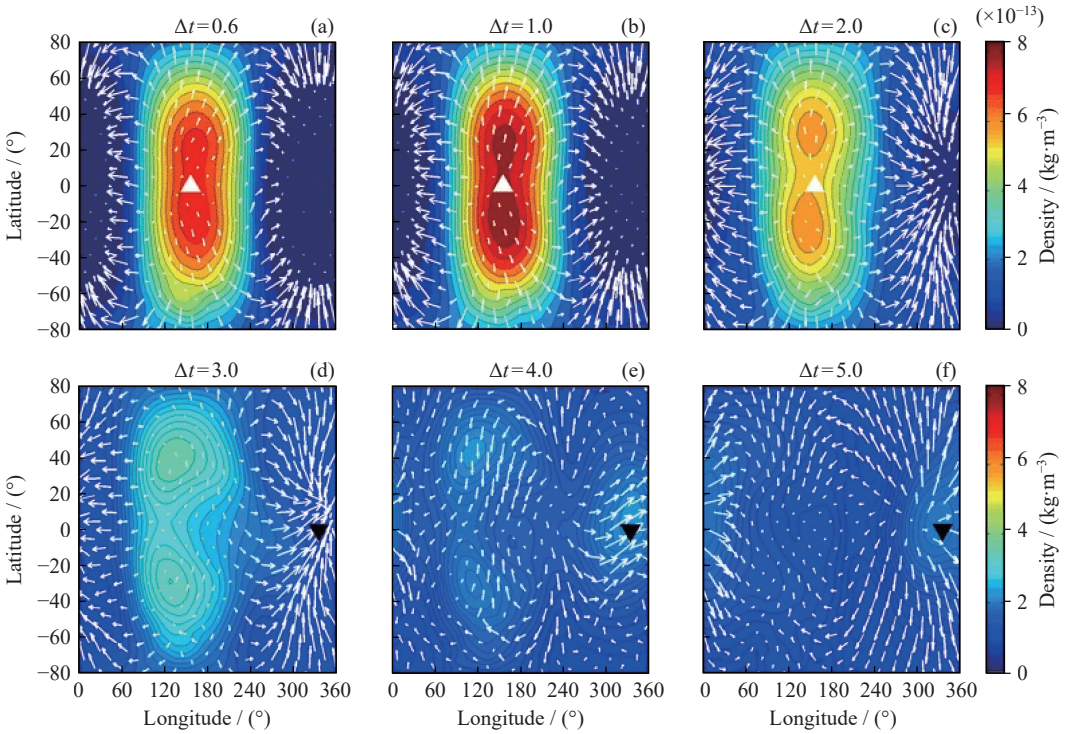

图 6 耀斑发生后 400 km 高度水平风和中性密度变化

Fig. 6 Changes in horizontal wind and neutral density at 400 km after solar flare onset

区的纬向风速分别增加了 100 m·s^{-1} 和 400 m·s^{-1}. 这种中性风的变化不仅影响热层结构, 也为大尺度扰动的激发提供了条件.

太阳耀斑在短时间内向热层注入巨大能量, 形成理想的脉冲式热源, 能够激发各种尺度的大气波动. Pawlowski 和 Ridley[51] 以及 Zhu 和 Ridley[52] 指出, 耀斑期间低热层温度的突然升高可产生声重波和引力波. 然而, 观测表明, 单独由耀斑激发的大尺度行进式大气扰动 (TAD) 较为罕见. 例如 Qian 等[53] 发现, 2003 年 10 月 28 日发生的 X17 级耀斑会产生局部焦耳加热, 从而增强该耀斑发生前由磁暴激发的 TAD, 但该耀斑本身不足以单独激发大尺度 TAD.

2017 年 9 月空间天气事件的详细分析进一步支持了上述结论[18]. 在此期间, 尽管发生了多次 X 级耀斑 (包括 9 月 6 日的 X9.3 耀斑和 9 月 10 日的 X8.2 耀斑), 大尺度 TAD 仅在耀斑与磁暴共同发生时出现, 如图 7 所示. 图中左列和右列底部子图相同, 展示相应的 GOES 软 X-ray(0.1～0.8 nm) 以及 IMF B_z 变化). TIME-GCM 模型模拟和 Swarm 卫星观测均证实, 当仅有耀斑而无地磁活动时, 并未检测到明显的大尺度 TAD 信号. 这表明纯耀斑驱动的大尺度 TADs 相较于磁暴期间较为罕见, 但在特定条件下 (如耀斑与磁暴协同、或极区特殊热力强迫) 可被显著调制或激发.

然而, 耀斑在已存在的波动场中具有重要调制作用[18]. 当背景场中存在由地磁活动激发的大尺度 TADs 时, 耀斑可显著改变这些波动的特性. 模拟结果显示, 耀斑可使 TADs 的振幅增大 30% 以上, 并改变其传播速度, 这种调制效应在日侧 (图 7a) 和夜侧半球 (图 7b) 均被观察到.

综合近年研究成果, 太阳耀斑引起的动力学响应不仅包括热层加热引发的中性风变化, 还涉及 TAD 的传播. 这些扰动通过影响热层和电离层的风场及电子密度分布, 导致热层–电离层耦合系统显著变化. 尤其是 TADs 的传播, 会对电离层后续状态造成影响, 表现为电子密度的剧烈波动, 进而影响电离层动力学和电动力学过程. 然而, 这些效应的具体表现程度强烈依赖于背景地磁条件、耀斑特性 (例如位置、强度和持续时间) 以及局地时空因素的综合作用. 对未来研究的挑战在于更精确地量化这些因素之间的相互调制关系, 从而提升对空间天气事件的预测能力.

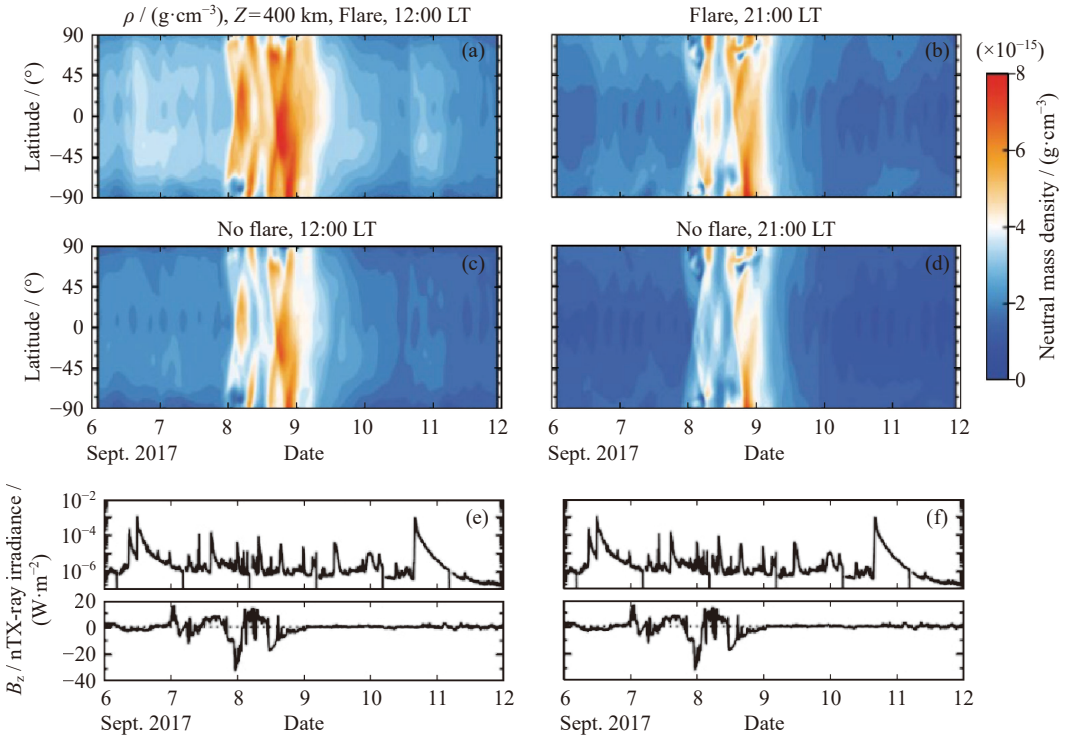

图 7 TIME-GCM 模拟的 2017 年 9 月 6—11 日热层中性密度 (400 km 高度). (a) 12:00 LT 有耀斑情况, (b) 21:00 LT 有耀斑情况, (c) 12:00 LT 无耀斑情况, (d) 21:00 LT 无耀斑情况[18]

Fig. 7 TIME - GCM simulated thermosphere mass density at 400 km from 6 to 11 September 2017. (a) With flares at 12:00 LT, (b) with flares at 21:00 LT, (c) without flares at 12:00 LT, (d) without flares at 21:00 LT[18]

3 太阳耀斑对电离层的影响

3.1 电离层光电离过程

太阳耀斑通过 X-ray 和 EUV 辐射对电离层产生瞬时光电离效应. 电离层的响应特征表现出明显的区域差异和高度依赖性. 电离层 D 层 (约 60～90 km) 主要受太阳 X-ray 控制. 基于昆明 (25.6°N, 103.8°E, 低纬度) 和廊坊 (约 39.5°N, 116.6°E, 中纬度) 中频雷达的观测数据[54,55], 可以揭示东亚扇区电离层 D 层对太阳耀斑的响应特征. 在相似级别的耀斑影响下, 中高纬度地区的太阳天顶角相对较大, X 射线的辐射路径更长, 沿途吸收的辐射更多, 这导致其电离作用相对较弱, 中频雷达所能探测到的有效反射高度也相对较高 (如廊坊的 70 km). 相比之下, 在靠近赤道的低纬度地区, 耀斑期间有效反射高度可降至较低水平 (例如昆明的 58 km). 而在极区, 尽管耀斑 X-ray 辐射同样增强, 但由于背景电离较低、粒子沉降等过程的主导作用, D 层响应的表现形式更为复杂[56]. Li 等[57]统计分析表明, 电离层 D 层电子密度变化与 X-ray 通量呈强正相关 (相关系数达 0.93), 而有效反射高度与 X-ray 通量呈强负相关 (相关系数为–0.96). 因此, 耀斑强度越强, 中频雷达可探测到电子密度的高度越低. 此外, Hayes 等[58] 利用超低频 (24 kHz) 测量数据发现, 电离层 D 层可以响应耀斑在 X-ray 辐射表现出的准周期性脉动.

电离层 E 层对耀斑的响应几乎是瞬时的, 且随耀斑结束而迅速恢复[18]. 该层电子密度变化主要受光化学过程控制, 并且等离子体的复合速率较快, 因此电子密度在耀斑开始和结束时快速增加和恢复. 观测数据表明, 该区域的响应强度与耀斑在日面的位置基本无关, 主要受耀斑 X-ray 辐射通量控制[59], 因为电离层 E 层的电子密度增加主要源于耀斑爆发的 X-ray 辐射增强, 而 X-ray 辐射本身无明显的耀斑日面位置效应[60].

相比之下, 电离层 F 层对耀斑的响应较为缓慢. 该层电子密度变化不仅受光电离影响, 还受到等离子体输运过程的控制[18]. 该层的光电离过程中, 氧和氮通过电离产生 O^+和 NO^+离子, 但由于复合速率较慢,

电子密度的增加通常需要数小时才能达到最大值, 且在耀斑辐射衰减后恢复时间较长. TIME-GCM 模拟结果显示 (图 4b), 在 X17 级耀斑期间, E 层电子密度在耀斑结束后立即恢复, 而 F 层电子密度的峰值出现在耀斑峰值之后, 恢复时间超过 7 h, 扰动超过 24 h. 此外, X17 级中心耀斑导致的电子密度最大增加约 80%, 而同等量级的边缘耀斑约为 30%, 表明耀斑发生位置也会显著影响电离层 F 层电子密度的变化.

全球导航卫星系统 (GNSS) 观测提供了耀斑期间 TEC 的详细变化信息[43,61,62]. 例如, 2017 年 9 月 X9.3 级耀斑在中纬地区引起约 8～10 TECU 的 TEC 突增, 在低纬地区增幅达 15～16 TECU[63], 如图 8 所示. TEC 变化速率在 X9.3 耀斑期间达到 1.3～1.7 TECU·min^{-1}, 而在 9 月的 X2.2 耀斑期间为 0.18～0.24 TECU·min^{-1}. 图 8 中黑色五角星表示太阳日下点位置, 虚线表示 300 km 高度处晨昏线位置. 值得注意的是, TEC 增强的持续时间显著超过 EUV 辐射的增强时间. 基于 GNSS 导航系统的分析表明, 两次 X 级耀斑虽未导致系统的信号丧失, 但 GNSS 导航精密单点定位解算的定位误差增加了约 3 倍. 此外, 两次 X 级耀斑还严重影响高频无线电波传播, 太阳直射区扰动后的最高可用频率可达约 30 MHz, 午后区域最高可达约 15 MHz, 导致无线电中断.

GNSS 观测和模型模拟均显示, 耀斑引起的电离层响应存在明显的区域不对称性[64]. 在 2017 年 9 月 X9.3 耀斑期间, 高纬 TEC 的午前–午后不对称性显著增强, 14:00 LT 时 TEC 在 60°纬度附近增加了 2.6 TECU, 而 10:00 LT 时仅增加 2 TECU. F_2 层峰值高度附近, 电子密度扰动呈现出最大的午前–午后不对称性 (图 9), 不对称性比例达到 14.2%. 图 9 中的 Lev 表示压力面高度. 这种不对称性主要源于化学过程主导的电子密度变化率差异, 以及电子温度升高对电离效率不对称性的放大作用.

此外, De Paula 等[62] 利用巴西低纬扇区多台 GNSS 接收机、测高仪和磁力仪的联合观测, 系统分析了 2017 年 9 月 X9.3 和 X1.3 级耀斑对 GNSS 信号的影响. 研究指出, 耀斑发生伴随的强烈太阳射电暴会作为背景噪声, 导致 GNSS(Global Navigation Satellite System) 载波相位信噪比显著下降. 在 X9.3 级耀斑期间, L2 C 和 L5 频段的信号衰减尤为严重 (最高可达约 10 dB), 并伴随有强烈的振幅闪烁. 这种

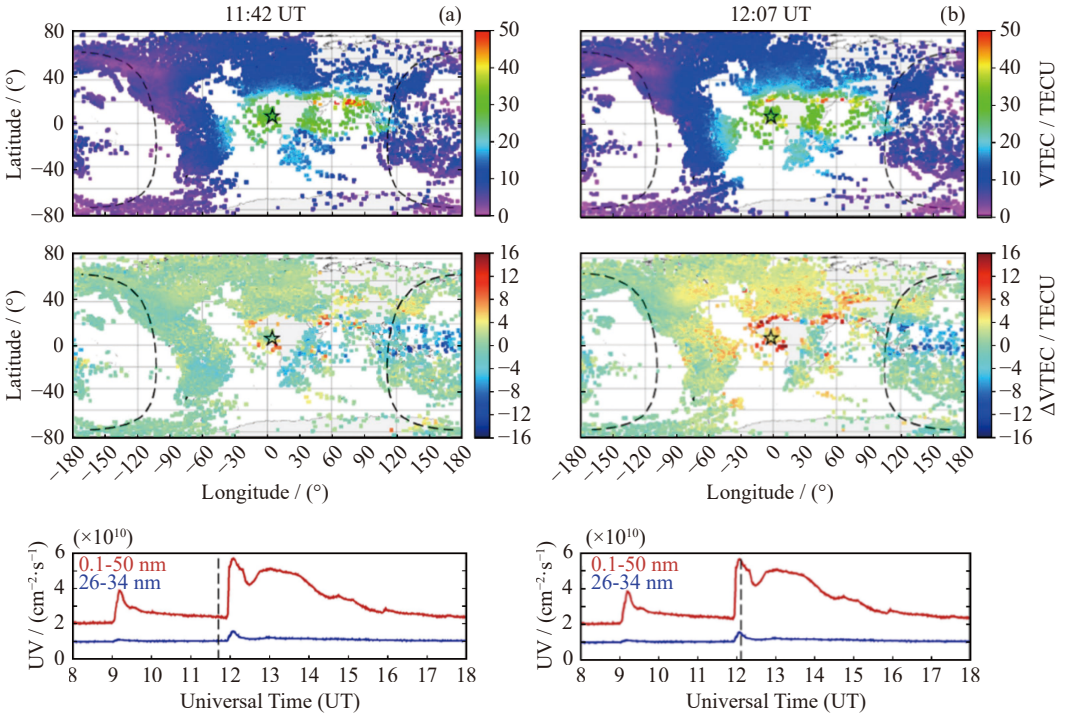

图 8 2017 年 9 月 6 日 X9.3 级耀斑前及峰值期间全球 VTEC, ΔVTEC 和 EUV 变化[63]

Fig. 8 Global VTEC, ΔVTEC, and EUV variations before and during the peak of the X9.3 flare on 6 September 2017[63]

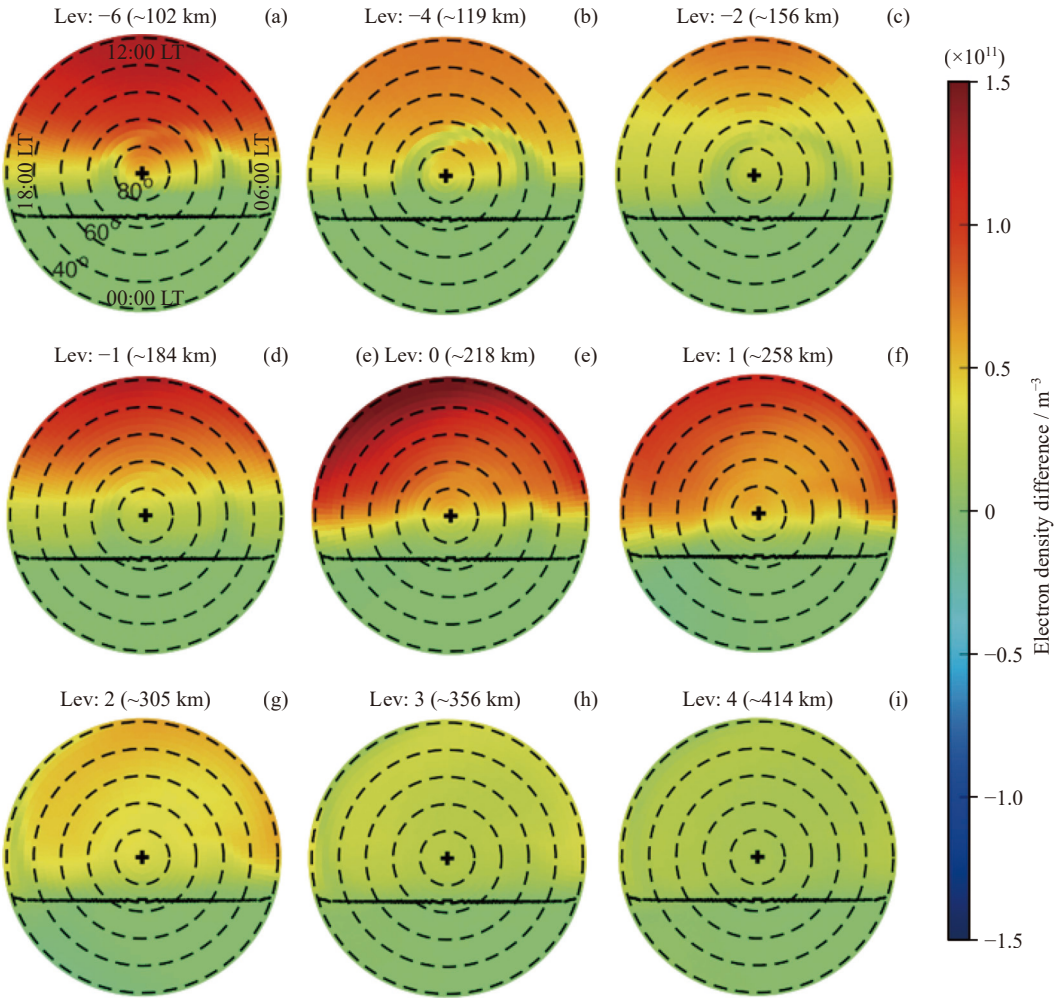

图 9 耀斑峰值时北半球不同压力面电子密度差值 (耀斑-无耀斑)[64]

Fig. 9 Electron density differences between flare and no-flare conditions at different pressure levels in the Northern Hemisphere at the flare peak[64]

信号衰减和波动幅度不仅与耀斑级别正相关, 还呈现出随纬度升高而减弱的空间特征. 在定位精度方面, 极端耀斑期间剧烈的 TEC 突增 (变化率达 2.5～5.0 TECU·min^{-1}) 和信号衰减会导致周跳的发生, 进而严重影响实时动态精密单点定位的解算. 这些结果表明, 太阳耀斑不仅通过 X-ray 和 EUV 辐射快速增强电离层电离, 还通过耀斑伴随的太阳射电暴对 GNSS 信号产生严重影响, 对实时导航定位的准确性构成挑战.

综上所述, 太阳耀斑在电离层中引发的瞬时光电离效应是一个高度复杂的多尺度过程. 该过程在 E 层和 F 层的表现有所不同: E 层响应迅速, 而 F 层响应则较慢且持续时间更长. 由于耀斑辐射波长、位置和时间存在差异, 电离层的光电离效应在全球范围内呈现出显著的空间和时间差异.

3.2 电离层动力学与电动力学过程

太阳耀斑对电离层的影响不仅体现在光化学过程扰动, 还通过改变热层环流、电导率分布及电流体系等显著改变电离层的动力学与电动力学过程. 具体表现为等离子体运动、全球电流系统重组和电场分布等方面的变化.

在动力学响应方面, 耀斑引发的剧烈加热是激发大气波动的重要源区[65]. 2017 年 9 月 6 日 X9.3 级耀斑发生后, GNSS 观测到晨昏线附近形成清晰的行进式电离层扰动 (TID, 见图 10), 以约 150 m·s^{-1} 的相速度向东传播, 周期约为 30 min, 呈现出典型的声重波特征. 此外, 三次 X 级耀斑发生后美洲大陆上空均出现同步的差分 TEC 振荡, 周期约 60 min, 振幅随时间呈指数衰减, 显示出耀斑能量注入的效应. Mill-

stone Hill 非相干散射雷达捕捉到与耀斑峰值几乎同步的大规模离子上行, 在 500 km 高度处的垂直漂移速度在 30 min 内增强至 80 m·s^{-1}. 这表明显著的太阳耀斑加热及相关动力学效应可能是 TID/声重波激发的重要因素.

在等离子体输运方面, 耀斑可引发电离层离子上行现象[66]. 2017 年 9 月 X9.3 耀斑期间, Millstone Hill 非相干散射雷达 (42.6°N) 观测到顶部电离层 (约 570 km) 出现约 110 m·s^{-1} 的离子上行. 通过 TIEGCM 模型的项分析表明, 双极扩散增强是顶部电离层离子上行的主因, 而由电场和中性风引起的离子漂移起次要作用, 如图 11 所示[66]. 图 11 中的黑色曲线表示 420 km 高度处垂直速度, 右侧纵坐标轴给出对应刻度, 垂直虚线表示耀斑峰值时刻. 进一步分

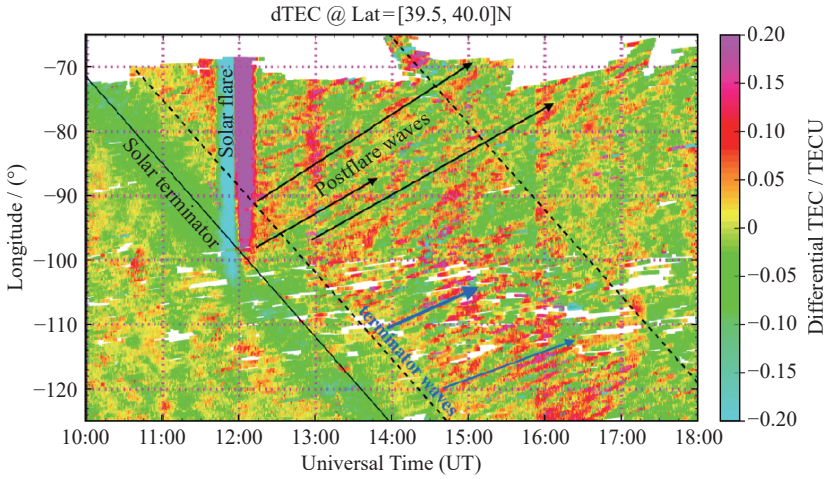

图 10 2017 年 9 月 6 日约 40°N 处耀斑后 TID 的纬向传播[65]

Fig. 10 Zonal propagation of postflare TIDs near 40°N on 6 September 2017[65]

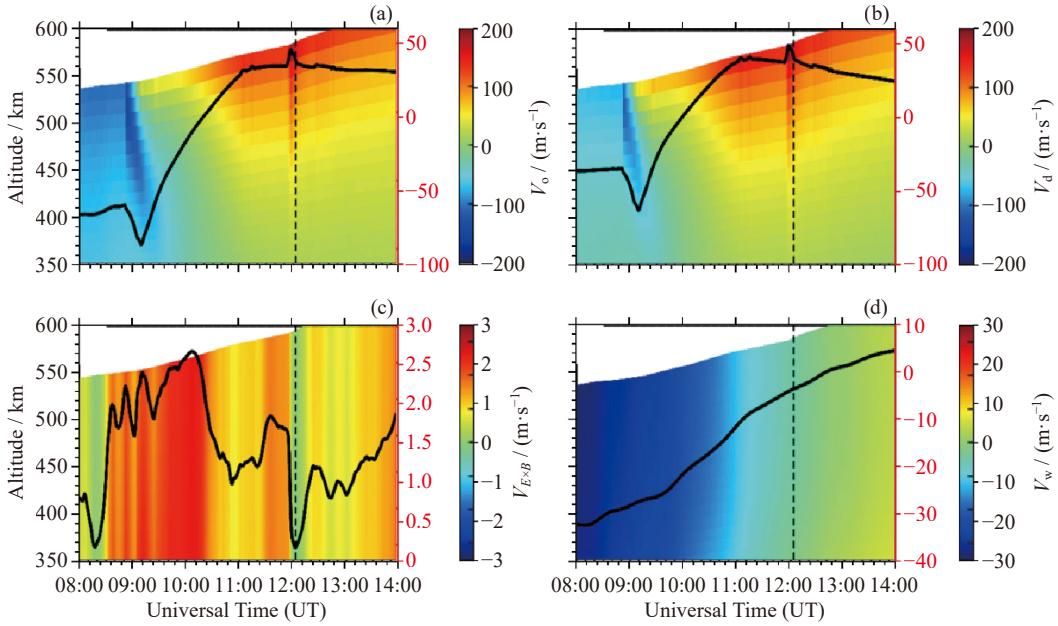

图 11 模拟的离子垂直速度及不同输运过程的贡献随高度和时间变化. (a) 离子垂直速度 (V_o), (b) 双极扩散 (V_d), (c) 漂移贡献 ($V_{\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}}$), (d) 中性风贡献 ($V_w$)[66]

Fig. 11 Simulated ion vertical velocity and contributions from different transport processes as functions of altitude and UT. (a) Ion vertical geometric velocity (V_o), (b) ambipolar diffusion contributions (V_d), (c) drift contributions ($V_{\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}}$), (d) neutral winds contributions (V_w)[66]

解双极扩散速度变化表明, 耀斑诱导的垂直等离子体密度梯度变化是其主因, 这主要源于耀斑 EUV (15.5～79.8 nm) 辐射引起的电离层 F_2 层电子密度与温度增强, X-ray(0～15.5 nm) 辐射则在其中起到较小且间接作用.

在电动力学响应方面, 耀斑通过改变全球电导率分布影响电场和电流系统[67–69]. 观测显示, 耀斑期间日侧东向电场普遍减弱 0.1～0.2 $mV{\cdot}m^{-1}$, 但赤道电集流 (EEJ) 增强, 二者呈现明显负相关. 电场减弱显著抑制了赤道喷泉效应, 导致低纬区域电子密度下降. 2017 年 9 月 10 日 X8.2 耀斑期间[46], TIEGCM 模拟显示, 垂直 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移在耀斑峰值附近迅速减小, 最大降幅达 6 $m{\cdot}s^{-1}$(约 20%), 该变化几乎同时发生在除极区外的所有纬度, 并在耀斑衰减后持续数小时.

在全球电流系统影响方面, 通过对全球地磁台站数据的球谐拟合揭示了耀斑引起的复杂空间变化[70–72]. X9.3 耀斑期间, 北半球电流涡旋中心位于 (40°N, 12:00 LT), 而南半球位于 (30°S, 13:00 LT). 相比之下, X8.3 耀斑的北半球中心位于 (16°N, 12:00 LT), 而南半球位于 (35°S, 14:00 LT). 这种中心位置的显著偏移导致明显的半球不对称性, 尽管两次耀斑均发生在春秋分时期. 此外, X9.3 耀斑总电流强度变化约比 X8.3 耀斑低 16%, 表明总电流强度变化也依赖于耀斑位置和地方时.

在物理机制方面, 多个过程共同调控着耀斑的电动力学响应[73–76]. 磁层–电离层–热层耦合模型 (LTR) 模拟结果表明, 内部的风场发电过程变化和耀斑引起的外部快速穿透电场 (PPEF) 共同调制耀斑期间电离层的电动力学过程变化. 就内部中性风发电机机制而言, 耀斑辐射首先引起电离层 E 层电子密度的大幅增强会增加 Hall 和 Pedersen 电导率, 也会增加 Hall 与 Pedersen 电导率的比值, 这导致低纬地区 Cowling 电导的显著增加. 为了保持全球电流的连续性, 低纬纬向电场必须在耀斑期间减弱, 以防止低纬 Cowling 闭合电流相对于全球发电机电流源过度增加. 观测结果表明, 减弱的东向电场伴随耀斑期间电离层垂直漂移和喷泉效应的减弱. 此外, 在外部耦合机制方面, 耀斑引发的高纬电导率增强会导致高纬电势降低 (图 12), 从而产生耀斑特有的 PPEF(Prompt Penetration Electric Field), 进一步调制了全球尺度的电场分布. 这与传统的、通常响应太阳风条件或磁层动力学变化的 PPEFs 有着本质的差别.

这些动力学与电动力学过程的改变不仅直接影响电离层整体结构与动态变化, 还通过耦合反馈机制进一步调制整个热层–电离层–磁层耦合系统. 耀斑引起的扰动在局部区域可能持续数小时, 并对全球空间天气产生影响. 理解这些复杂过程对完善空间天气预报模型、保障导航通信系统可靠性具有重要意义. 值得注意的是, 耀斑对电离层的扰动并未完全随主相辐射的衰减而结束. 部分耀斑事件中存在的 EUV 后相过程, 作为再次增强的 EUV 辐射源, 会对电离层产生与耀斑主相不同的影响, 这为全面评估耀斑的空间天气效应带来了新挑战.

3.3 耀斑后相扰动过程

近年来, 随着观测数据积累和数值模型发展, 太阳耀斑 ELP 对电离层产生的滞后扰动效应逐渐被发现. 物理机制上, 尽管耀斑的主相和 ELP 辐射均源于同一太阳活动区, 但 ELP 通常与耀斑爆发后形成的第二组更高且更长的等离子体环状结构相关. 由于耀斑环冷却时间尺度与其长度相关, 尺度更大的 ELP 磁环冷却速率明显慢于主相期间形成的耀斑环. 该冷却时间尺度差异解释了 ELP 期间“暖”日冕 EUV 辐射峰值相对于主相 X-ray 峰值的显著延迟. 正是由于该冷却过程持续时间更长, ELP 阶段辐射强度虽通常低于耀斑主相, 但其持续时间更长, 导致累积辐射能量更多, 且光谱特征与主相不同, 从而对电离层各参数产生相比主相的滞后性与持续性特征[30,77].

在电离层 TEC 响应方面, 2012 年 10 月 23 日 X1.8 级耀斑观测数据显示[34], ELP 期间总辐射能量达到 5.838×10^{21} J, 甚至超过主相的能量释放 (5.698×10^{21} J). 持续的能量输入导致日侧 TEC 增加约 5 TECU, 低纬 F_2 层电子密度显著增强 20%～100%, 增强区域从 F_2 层底部延伸至峰值高度, 表明 ELP 辐射对电离层垂直结构的显著影响 (图 13). 图 13 中电子密度的百分比变化是相对于耀斑前 1 h (02:10—03:10 UT) 的平均值计算, 黑线表示 F_2 层峰值高度. 2011 年 11 月 3 日 X2.9 级耀斑的观测分析进一步表明[78], ELP 辐射强度虽仅为脉冲相或主相的约 1/3, 却引起了约 0.2 TECU 的电子含量增加, 占总增量的约 30%. 该效应与 30 nm 附近波段辐射密切相关, 该波段主要作用于电离层 F 区, 能有效电离 O 原子和 N_2 分子. 2012 年 10 月 23 日 X1.8 级耀斑观测数据显

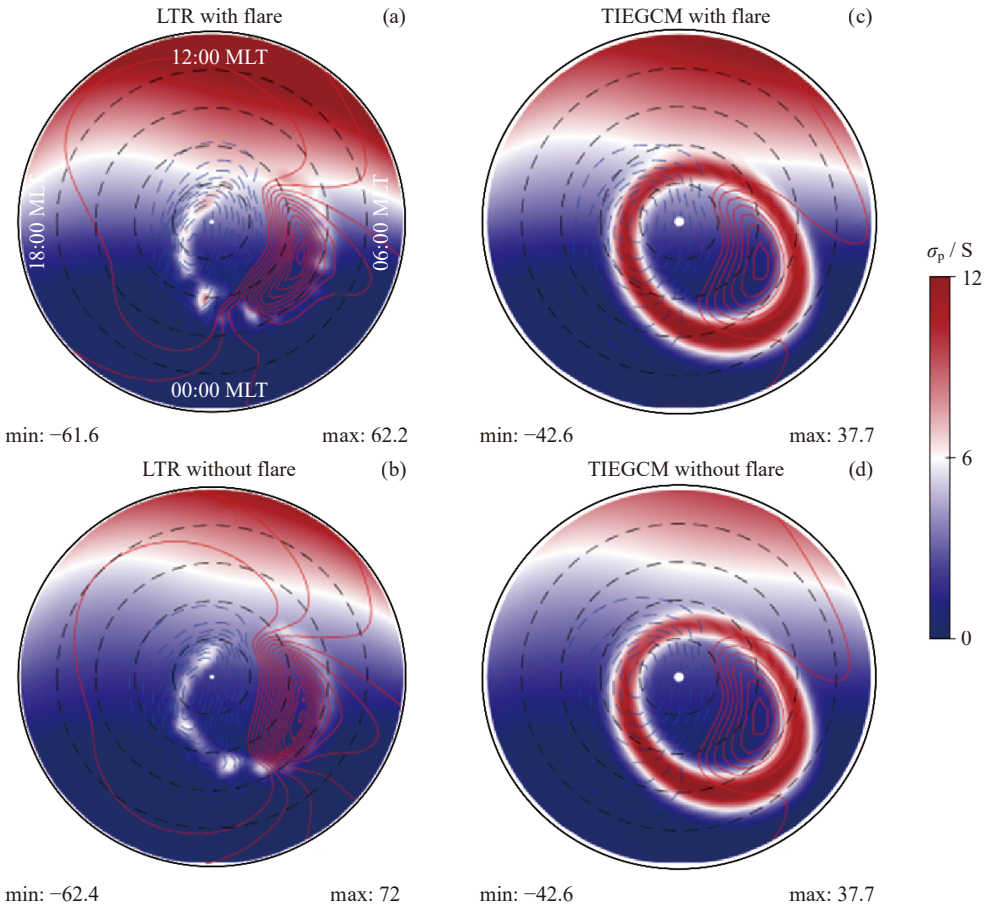

图 12 LTR 和 TIEGCM 模拟的高纬 Pedersen 电导率和电势分布 [76]

Fig. 12 High-latitude Pedersen conductance and electric potential simulated by LTR and TIEGCM [76]

示, 除电子密度增强现象外, 约 300 km 高度处也出现明显的电子密度下降, 该现象在耀斑主相和 ELP 阶段均有发生 (图 13). Smithtro 等[79] 利用测高仪观测研究表明, X 级太阳耀斑期间 E 层和 F1 层电离强度增强, 但 F2 层峰值电子密度 (N_mF_2) 意外下降. 研究提出, N_mF_2 下降主要源于耀斑引发的电子密度和温度剧增导致等离子体向上扩散至更高高度[66,80].

在电流系统响应方面, 多个 X 级耀斑 ELP 事件的观测与模拟呈现一致规律[81]. 以 2014 年 4 月 25 日 X1.3 级耀斑为例, 在排除太阳风扰动影响后, 太阳静日 (Solar quiet, Sq) 电流在耀斑 ELP 期间仍增强约 25%, 虽略低于耀斑主相期间的 30% 增幅, 但持续时间更长 (图 14). 同时, 北半球 Sq 电流涡旋中心在耀斑 ELP 期间极向移动约 3°, 表明 ELP 辐射可能通过改变电离层电导率分布而影响全球电流体系的结构. 事件期间的磁扰动以红色箭头叠加在等高线图上, 矢量尺度为 50 nT. 顶部面板中的垂直虚线表示太阳耀斑前、X-ray 与 EUV 辐射通量峰值、EUV 辐射通量谷值以及 EUV 辐射通量的第二个峰值. 等高线上的灰色虚线表示地磁赤道, 黑色星号表示最大和最小电流强度的位置. 研究还发现, 即便约 2 nPa 的微弱太阳风动压变化, 也能对 ELP 期间的电离层电流产生明显调制, 凸显了 ELP 效应与地球空间环境耦合的复杂性.

值得注意的是, 当前广泛使用的 FISM2 太阳光谱模型未能准确捕捉耀斑 ELP 效应, 这在一定程度上解释了以往利用太阳辐射谱驱动电离层模型模拟中无法重现耀斑 ELP 的影响[82,83]. FISM2 是覆盖 0.1～190 nm 波长范围的太阳辐射谱经验模型. 光谱分辨率为 1 nm, 时间分辨率为 1 min. FISM2 使用观测数据估计完整的 X-ray 和 EUV 太阳辐射谱, 例如 GOES 卫星观测的 X-ray 波段、SDO 卫星观测的 EUV 波段和 TIMED 卫星观测的远紫外线波段等. 通过填补卫星观测中不同谱段和不同时间的空白, 得

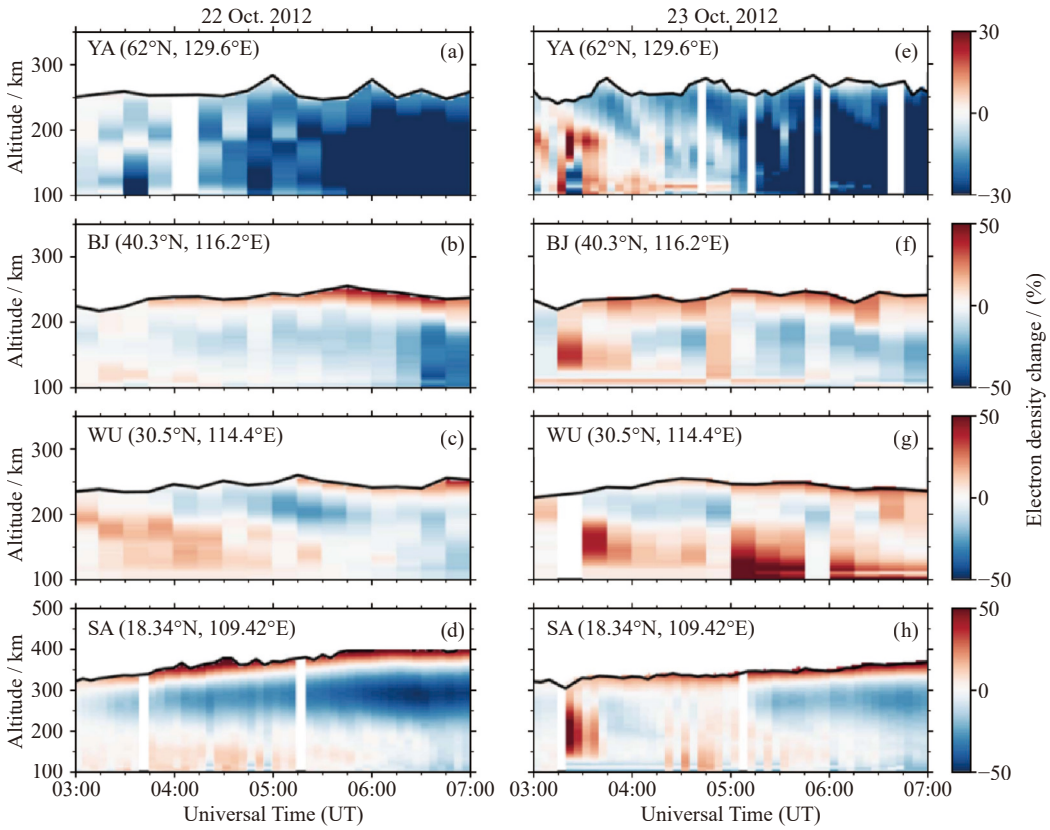

图 13 中国不同纬度台站在平静日和耀斑日的电子密度剖面变化[31]

Fig. 13 Electron density profile variations at different latitudes over China on a quiet day and a flare day[31]

到了包含太阳周期、太阳自转和太阳耀斑变化相关的辐射变化. 对于时变的全球环流模型, 使用 FISM2 高分辨率光谱来计算每个光谱区间、每个时间步、每个大气成分、每个模型网格点在耀斑期间的电离率. 为了提高计算效率, FISM2 被划分为 37 个通道. 然而 FISM2 假设所有 EUV 波段辐射的时间演变与 GOES 软 X-ray 通量或其导数一致, 并将其作为代理. 因此, 需将 SDO 卫星观测到的高分辨率太阳光谱同化至辐射谱模型中, 进而驱动电离层–热层耦合模型, 来模拟耀斑 ELP 期间电离层变化并探究相关现象的物理机制[31,81].

利用修正后的太阳耀斑光谱驱动 TIEGCM 数值模拟进一步阐明了耀斑 ELP 影响的相关物理机制[84]. 对 2012 年 10 月 23 日 X1.8 级耀斑的模拟表明, 耀斑 ELP 导致电离层 F 层电子密度增强和恢复过程与辐射变化不同步, 完全恢复至背景水平需要约 9 h. 机理分析表明, 电子密度增强主要受光化学过程控制, 而恢复阶段则由电场输运效应主导, 这种不同物理过程的主导地位转换是造成滞后效应的根本原因.

在电动力学响应方面, 2017 年 9 月 6 日 X9.3 级耀斑 ELP 的观测与模拟提供了新见解[85]. 与耀斑主相期间日侧电场减弱不同, 耀斑 ELP 期间日侧东向电场增强, 导致向上的 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移速度增加 0.75 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$, 而主相期间减少 2.5 $\mathrm{m\cdot s^{-1}}$. 该差异源于电离层电导率对耀斑 ELP 辐射的高度依赖性变化, 该变化调节了 E 层与 F 层风场发电机对纬向电场的相对贡献. 此外, 电场增强与电导率增加的协同作用, 最终促使 ELP 期间赤道电急流增强约 12 nT.

上述研究结果表明, 耀斑 ELP 通过复杂光化学与电动力学耦合过程, 对电离层电子含量、电流系统和电场分布产生持续数小时的滞后扰动. 该效应的准确表征对完善电离层建模、提升空间天气预报能力具有重要意义, 应在未来研究中予以充分重视.

4 耀斑对电离层–磁层耦合系统的影响

4.1 耀斑影响磁层证据

近年来, 基于 SuperDARN 与 EISCAT 等先进

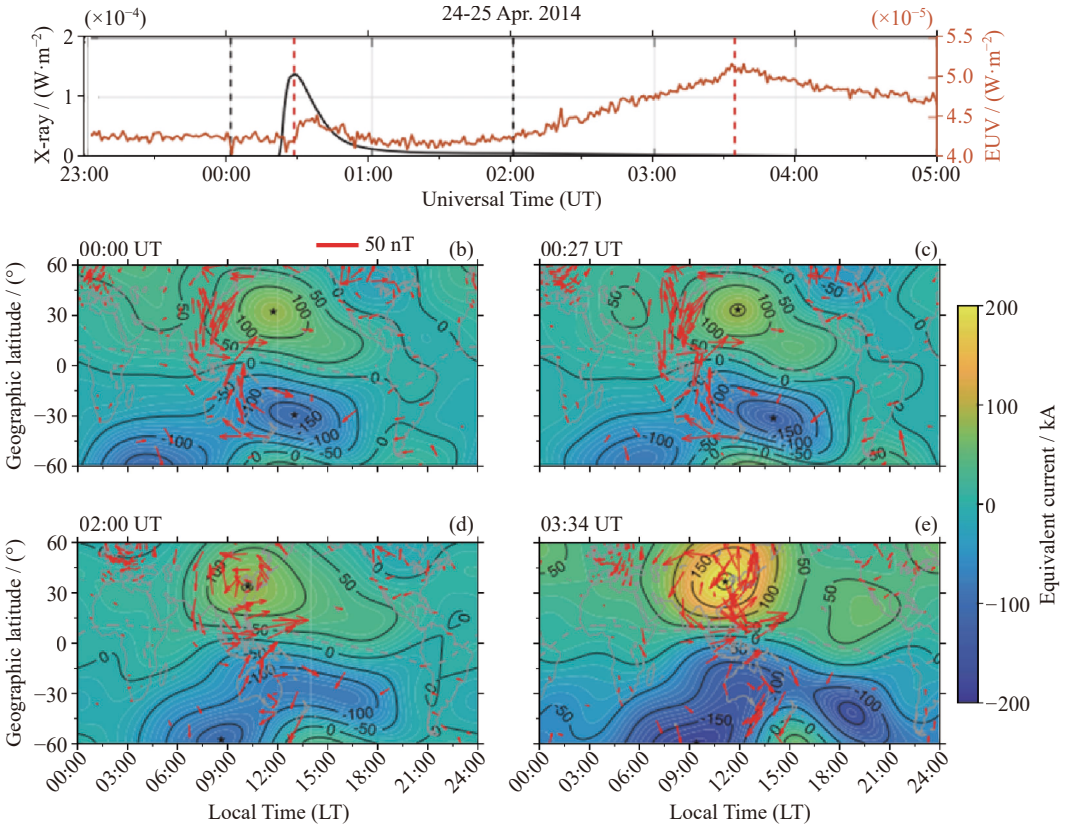

图 14 全球电离层等效电流在包含 ELP 的耀斑期间变化情况[81]

Fig. 14 Variation of Sq currents during the solar flare including the EUV late phase[81]

雷达系统的观测, 为揭示太阳耀斑对极区电离层的直接扰动提供了关键证据, 并进一步揭示了这些扰动如何通过场向电流系统耦合至磁层. 例如在 2015 年 5 月 5 日 X 级耀斑事件中[86], SuperDARN 雷达观测到典型的短波衰减 (SWF) 现象, 伴随有多普勒速度突增特征, 反映出耀斑引起的极区电离层折射率突变 (图 15). 此外, 在 2017 年 9 月 X9.3 级耀斑期间, EISCAT 雷达探测到极区电离层在 200 km 以下高度电子密度快速增强, 以及电子温度与离子温度的显著上升, 尤其在 69°−75°地磁纬度范围内表现突出.

这些极区电离层电子密度、温度等参数的瞬时变化, 直接改变了极区电导率的空间分布, 进而调制场向电流的强度与结构. 基于此, Liu 等[4] 针对 2017 年 9 月 6 日 X9.3 级耀斑事件的综合分析显示, 耀斑峰值时刻极区电离层 E 层 (90～150 km) 电导率在耀斑峰值时刻出现瞬时增强, 并通过场向电流系统迅速耦合至磁层. AMPERE 卫星观测到耀斑期间日侧场向电流密度显著增加 (图 16), 同时 THEMIS 卫星的观测结合模型控制模拟表明, 排除太阳风动压增强的影响后, 耀斑峰值期间磁层顶和弓激波出现明显地向位移, 表明整个日侧磁层结构受到压缩 (图 17c).

特别值得注意的是, SuperDARN 记录到极盖区逆阳流速度在耀斑峰值时刻从 >150 m·s^{-1} 急剧下降至 <50 m·s^{-1}, 这与 LTR(LFM- TIEGCM- RCM) 模型模拟的跨极盖电势下降一致. 这些观测证据共同表明, 耀斑通过改变电离层电导率特性, 影响磁层–电离层电流回路, 最终导致磁层对流系统改变.

4.2 电离层–磁层耦合过程与机制

耀斑期间极区电离层电导率的剧烈变化是调控磁层响应的关键物理过程. 观测和模拟研究均表明, X 级耀斑可使极区 Pedersen 电导率从约 4 S 增至 8 S (图 17g～i), Hall 电导率从约 4 S 增至 10 S, 这种增强主要由耀斑辐射增强引起的 E 层光电离加剧所致[4].

电导率升高通过两种机制影响磁层动力学: 一方面, 增强的电导率改变场向电流的闭合效率, 导致跨极盖电势显著降低. LTR 模拟显示, 在 X9.3 耀斑峰值期间, 跨极盖电势从无耀斑时的 114.0 kV 下降至

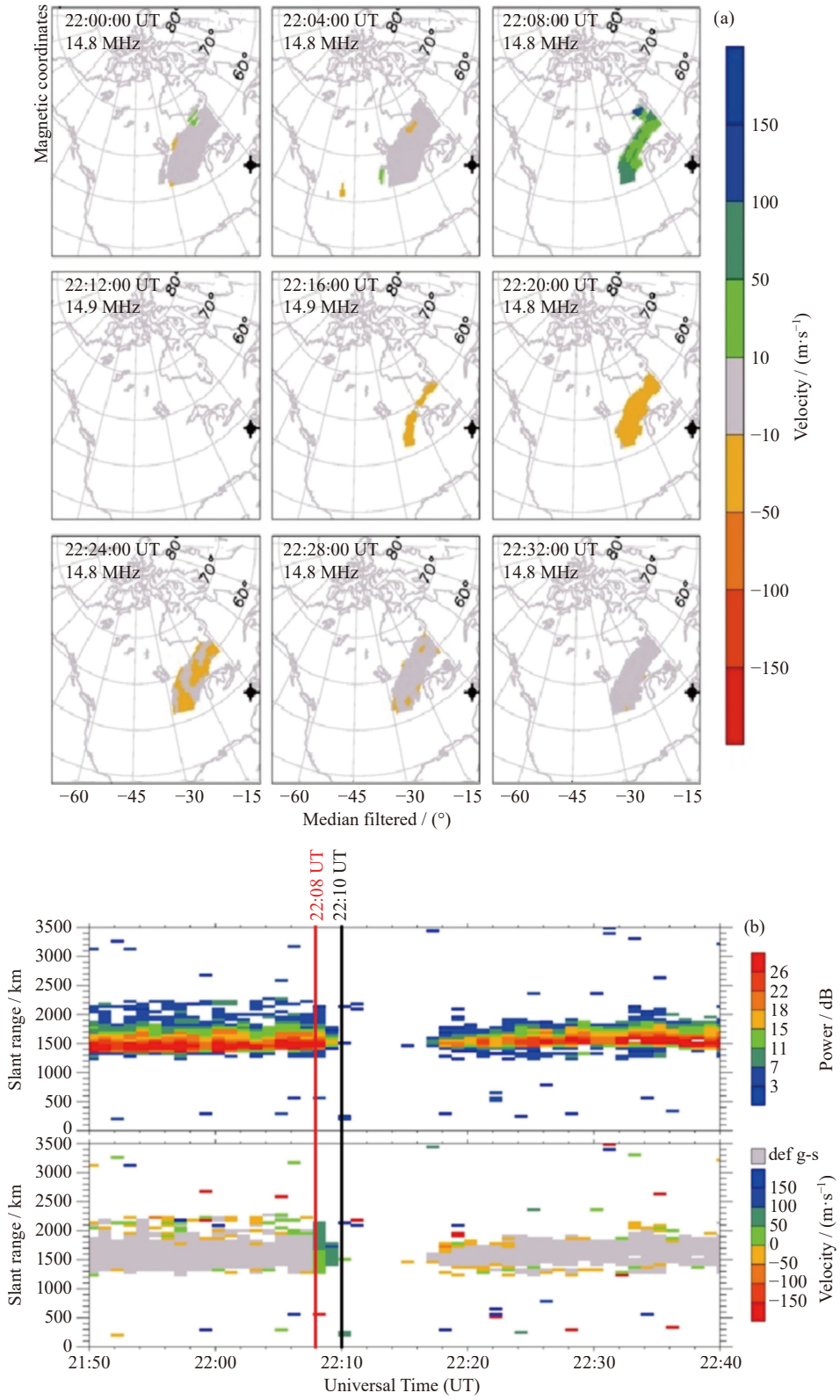

图 15 Blackstone 雷达对 2015 年 5 月 15 日太阳耀斑的响应. (a) 视场多普勒速度, (b) 波束 7 的后向散射功率和多普勒速度[86]

Fig. 15 Response of the Blackstone radar to the solar flare on 15 May 2015. (a) FoV Doppler velocity, (b) backscattered power and Doppler velocity on beam 7[86]

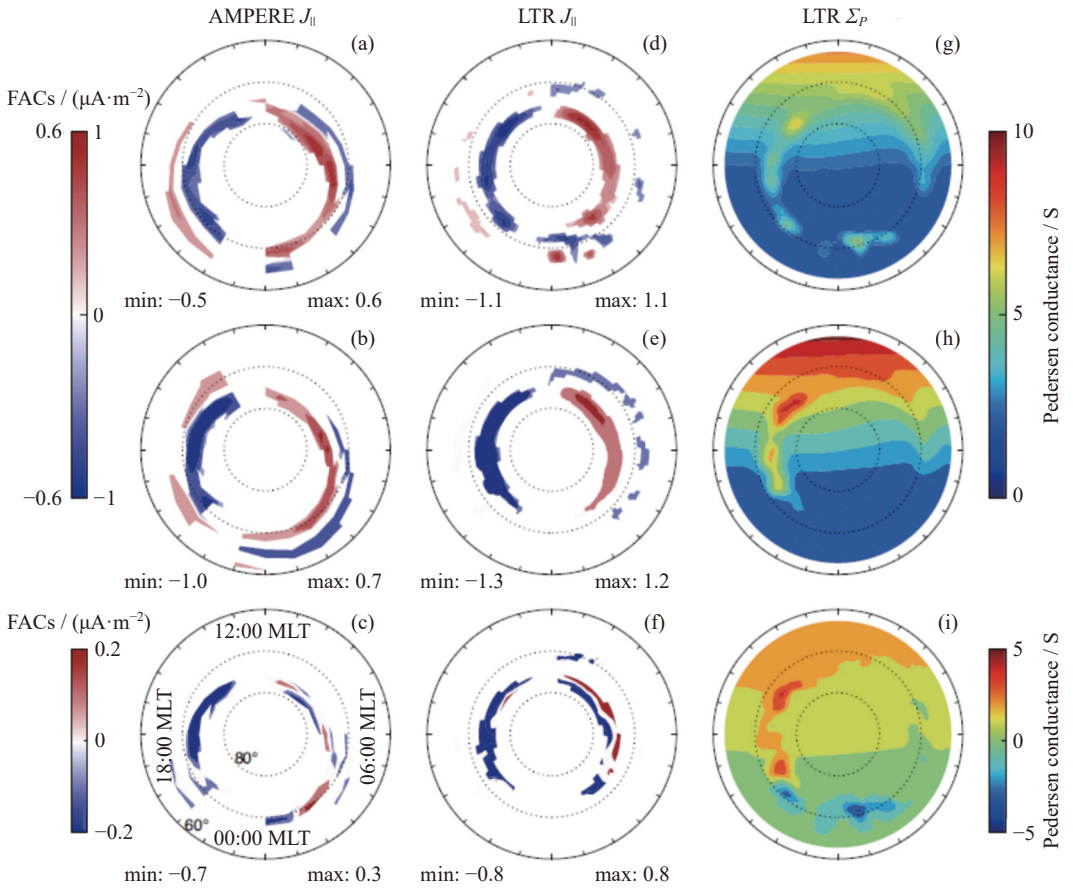

图 16 2017 年 9 月 6 日耀斑前后北半球场向电流和 Pedersen 电导率的观测与模拟结果[4]

Fig. 16 Observed and simulated Northern Hemisphere FACs and Pedersen conductance before and during the flare on 6 September 2017[4]

99.7 kV, 降幅达 12.5%. 另一方面, 电导率的日–夜梯度变化引起磁层对流模式的重新配置. 等离子体片中的对流速度呈现出明显的晨昏不对称性, 昏侧流速 (约 400 km·s^{-1}) 约为晨侧的两倍, 表明磁尾重联过程受到耀斑调制, 如图 17(a) 所示. 此外, 电导率变化通过调节焦耳加热率影响磁层能量收支. 尽管电导率增加, 但由于电场减弱更为显著, 导致耀斑峰值期间半球积分焦耳加热率反而降低, 表明耀斑引起的电离层负载特性变化改变了磁层能量的耗散方式. 即耀斑期间极区电离层电导率的突增, 相当于电离层负载电阻的急剧减小; 在太阳风–磁层发电机提供的电动势相对稳定的情况下, 负载电阻的减小促使磁层–电离层回路中的电流 (即场向电流) 增加, 而分配在电离层两端的电压 (即跨极盖电势) 则相应下降.

当耀斑与磁暴共同发生时, 两者对磁层–电离层耦合系统产生复杂的非线性相互作用. Liu 等[87] 通过 LTR 模型对比四种情景 (有无耀斑×有无磁暴) 发现, 在磁暴条件下, 耀斑效应表现更为显著. 该研究选取 2017 年 9 月 6 日发生的 X9.3 级太阳耀斑作为研究对象, 该耀斑是第 24 太阳活动周中最强的中心耀斑, 具有显著的地球空间效应. 为模拟磁暴条件, 将 IMF B_z 分量在 09:00−15:00 UT 期间人为降低 10 nT, 以构建理想化强磁暴事件 (IMF B_z<−10 nT, 持续时间 > 6 h, 预计引发 Dst < −100 nT 的强磁暴).

在磁暴条件下, 耀斑引起的电导率增强伴随显著降低的跨极盖电势, 且降低幅度更为明显: 从无耀斑时的 334.7 kV 下降至有耀斑时的 291.5 kV. 同时, 日侧场向电流在耀斑情况下增强更为显著, 峰值电流从 1.8 μA·m^{-2} 增至 2.3 μA·m^{-2} (方向向上) 和从 3.1 μA·m^{-2} 增至 3.7 μA·m^{-2}(方向向下). 这种响应特征表明, 磁层–电离层耦合系统在耀斑影响下既非纯粹的电压发生器, 也非纯粹的电流发生器, 而是呈现出更为复杂的阻抗特性.

耀斑与磁暴的相互作用还显著影响极区结构. 磁

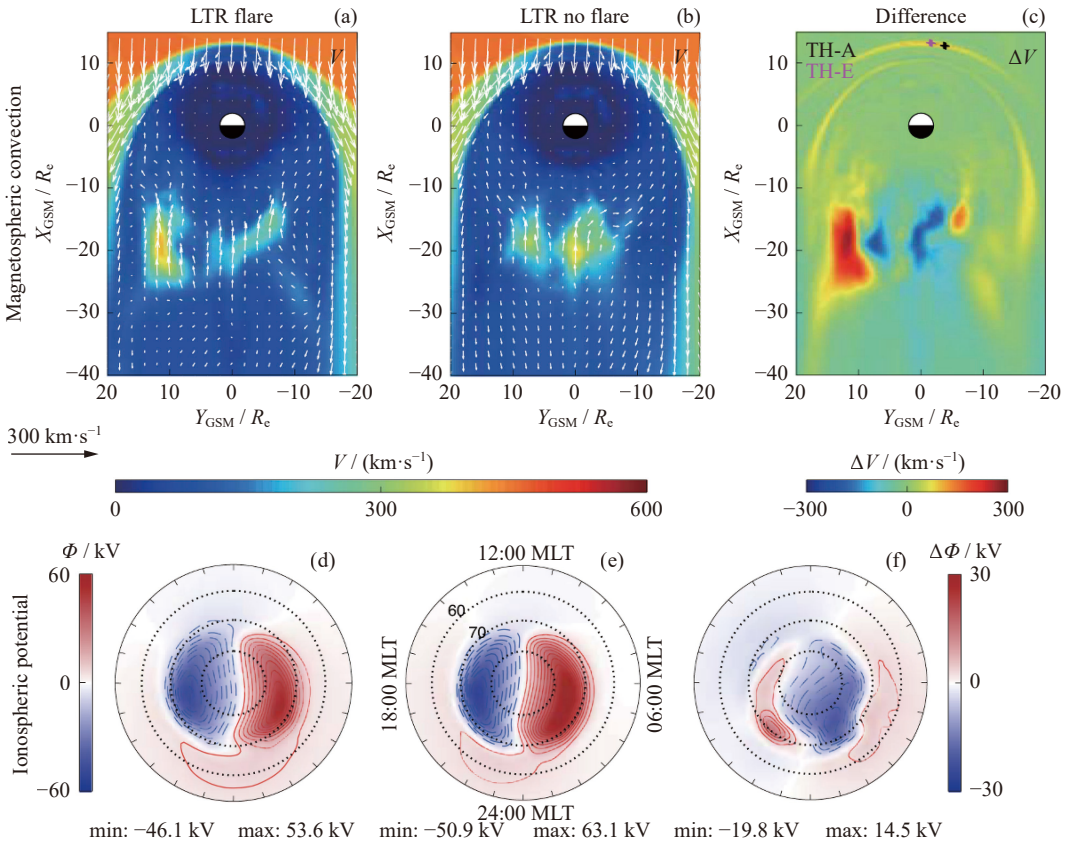

图 17 LTR 模拟的 2017 年 9 月 6 日耀斑效应. (a)～(c) 磁层赤道面对流速度, (d)～(f) 高纬电势[4]

Fig. 17 LTR-simulated solar flare effects on 6 September 2017. (a)-(c) Magnetospheric convection velocity in the equatorial plane, (d) - (f) high-latitude electric potential[4]

暴期间增强的对流将中纬等离子体输运至极盖区, 形成电离舌 (TOI) 结构. 耀斑通过两个相反的过程影响 TOI 发展 (图 18a～c). 一方面, 耀斑增强的 F 层电子密度为 TOI 提供了更丰富的等离子体源; 另一方面, 耀斑引起的电导率增强削弱高纬对流, 抑制等离子体的极向输运. 模拟结果表明, 前者占主导地位, 导致耀斑情况下 TOI 出现更早、强度更大, 即使在磁暴引起的对流减弱情况下也是如此.

此外, 耀斑还通过改变电离层穿透电场影响中低纬电离层[76]. 在磁暴期间南向 IMF 条件下, 耀斑增强的电导率降低了穿透电场的效率, 导致中低纬地区 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 垂直漂移的增强幅度减小. 这种屏蔽效应的增强源于高纬电导率升高导致的电流短路效应, 体现了耀斑对全球电流耦合的系统性影响.

综上所述, 耀斑引起的高纬电导率变化改变了极区场向电流、跨极盖电势分布以及磁层响应机制. 耀斑与磁暴的耦合作用使磁层–电离层系统反应变得更加复杂, 这些变化不仅引起短期电离层扰动, 还会通过长时间的反馈机制持续影响磁层能量与物质传输.

5 结论与展望

5.1 结论

近 10 年来, 由于多平台高分辨率观测与数值模拟技术的显著进步, 人们对太阳耀斑影响热层–电离层–磁层耦合系统的物理过程取得了更为系统与深入的认识, 主要进展如下.

(1) 耀斑能量注入的精确量化与多波段响应特征. SDO 观测设备实现了对耀斑 X-ray 与 EUV 辐射的高分辨率测量, 不仅精确刻画了耀斑脉冲–缓变的时序能量释放特征, 还揭示耀斑后相持续释放能量的新阶段的存在、特性及其对电离层的滞后影响.

(2) 热层响应的复杂性与时空分布. 研究证实, 耀斑引起热层大气快速加热、膨胀及中性成分 (例如 O/N_2) 的显著改变. 响应呈现明显的太阳天顶角依赖和经度不对称性, 且峰值响应存在 1～2.5 h 滞后. 耀

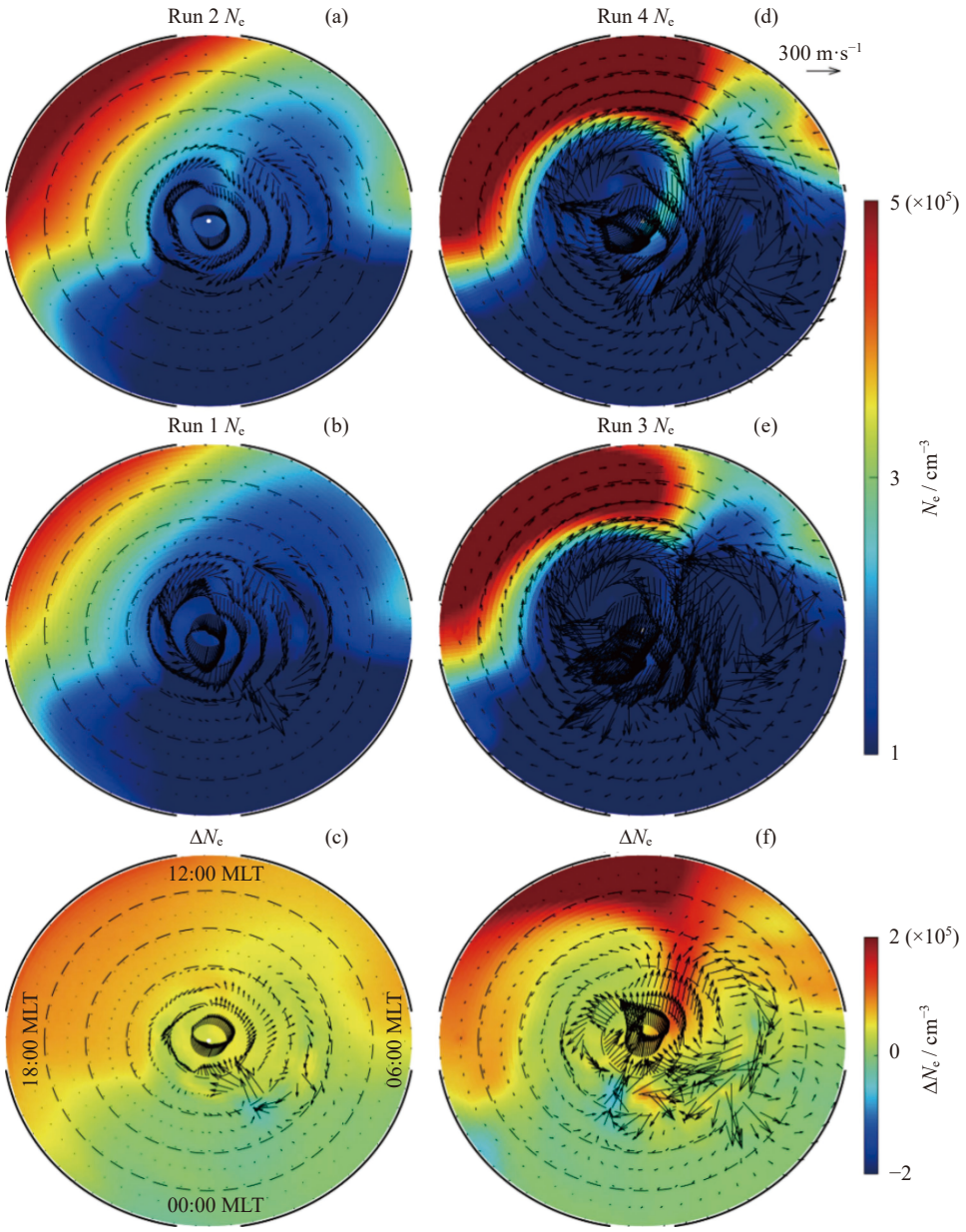

图 18 无磁暴和磁暴条件下 LTR 模拟的北半球约 300 km 电子密度和离子对流. (a) (d) 有耀斑, (b) (e) 无耀斑, (c) (f) 两者差值[87]

Fig. 18 LTR-simulated electron density and ion convection at ~300 km in the Northern Hemisphere under non-storm and storm conditions. (a) (d) With flare, (b) (e) without flare, and (c) (f) their differences[87]

斑发生位置 (日面中心或边缘) 对热层加热和成分变化幅度也具有关键调制作用.

(3) 电离层多过程扰动. 瞬时光电离: 耀斑在电离层 D/E 层引发快速的电子密度陡增, 在 F 层则导致缓慢但持久的电子密度增强与 TEC 变化, 响应幅度和持续时间受耀斑强度、位置及背景条件共同影响. 动力学与电动力学改变, 耀斑可激发大气波动并引起等离子体输运变化. 此外, 耀斑通过改变全球电离层电导率分布, 导致赤道电集流增强、东向电场减弱、全球电流体系重构, 并可能引发快速穿透电场等复杂电动力学响应. 耀斑后相效应: 耀斑后相作为持久的能量源, 能引起电离层电子密度、TEC 和电流系统持续性变化, 其影响机制与主相不同, 且在传统太阳光谱模型中未曾考虑.

(4) 磁层耦合响应的观测与机制. 多卫星联合观测与耦合模型模拟证实, 耀斑可通过极区电离层电导

率的瞬时增强, 直接调制场向电流、跨极盖电势和磁层对流模式, 甚至引起磁层顶压缩位移. 耀斑与磁暴共同发生时, 二者对磁层–电离层耦合系统产生非线性相互作用, 显著影响极区电离层结构 (如电离舌) 和能量耗散过程.

(5) 中国的重要贡献. 一是地基观测体系建设, 依托子午工程等国家级观测平台, 中国在中低纬与极区电离层监测方面形成了独特优势. 例如, 利用昆明和廊坊中频雷达揭示电离层 D 层对耀斑 X-ray 辐射的定量响应特征, 为理解电离层低层光化学过程提供了关键观测约束; 并结合三亚、武汉、北京和漠河等台站的观测, 详细分析了中国中低纬电离层在耀斑主相及后相期间的电子密度变化. 二是数值模型开发与应用, 中国深度参与了 LTR 等国际领先的磁层–电离层–热层耦合模型的开发与验证工作, 首次实现了对耀斑期间磁层对流、场向电流及跨极盖电势变化的自洽模拟. 这些工作将耀斑研究从传统的电离层–热层范畴拓展至磁层耦合的新维度. 三是跨圈层耦合理论创新, 在物理机制层面实现了多项突破, 系统提出了耀斑后相对电离层电子密度、电场及全球电流体系产生滞后与持续性扰动的完整物理图像. 此外, 明确了耀斑内部风场发电机与外部快速穿透电场协同调制电离层电动力学的机制, 并揭示了电离层电子密度响应的晨昏不对称性成因以及顶部电离层离子上行的双极扩散驱动机理等.

5.2 展望

尽管相关工作已取得显著进展, 该领域仍面临诸多挑战, 未来研究可重点关注以下方向.

(1) 高精度、全波段太阳辐射模型的构建. 当前广泛应用的太阳光谱模型对耀斑, 尤其是 EUV 后相阶段的辐射增强刻画不足. 亟需发展能同化 SDO 等高分辨率观测数据、精确反映耀斑全波段辐射时变特征的新一代模型, 为耦合数值模拟提供可靠驱动输入.

(2) 多尺度耦合数值模型的发展与验证. 需进一步发展和完善如 LTR 能够自洽描述从磁层到热层完整耦合过程的数值模型. 重点改进太阳辐射、极区电导率、粒子沉降等关键参数化方案, 并利用多维度观测数据对模型进行系统性验证.

(3) 耀斑与背景空间天气条件的非线性相互作用. 耀斑效应依赖于背景地磁活动水平、季节和地方时等条件. 未来需深入研究这些背景因素如何调制耀斑的响应幅度、空间分布及持续时间, 厘清其中的非线性耦合机制.

(4) 极端耀斑事件的影响评估与预报. 当前对历史极端耀斑事件的研究仍不充分. 通过结合历史上的极端空间天气事件, 未来需利用高精度数值模型, 深入评估 Carrington 级别极端耀斑事件对现代技术系统 (如区域电网、低轨卫星编队、导航与通信等) 的潜在破坏极限与灾害边界条件. 同时, 需发展具备预报耀斑快速电离层扰动及其对导航、通信系统影响的空间天气预报模型.

(5) 数据驱动与机器学习方法的融合应用. 随着空间天气监测数据日益增长, 单纯依赖物理模型进行实时预报面临计算效率与参数化的挑战. 建议未来研究积极探索机器学习与深度学习技术在挖掘耀斑观测数据特征方面的潜力, 发展物理机制与数据驱动相结合的混合建模新范式, 以显著提升对耀斑爆发及其电离层–磁层响应的短临预报精度与时效性.

(6) 多星联合探测与新一代综合观测计划的新机遇. 建议规划并推动针对太阳活动与地球空间环境响应的综合性立体探测计划, 通过协调太阳成像、行星际监测、原位探测与地基遥感等多种手段, 实现对能量从太阳释放到地球空间吸收、转化与耗散的全链条闭合观测. 特别是依托国外 Swarm, THEMIS 卫星以及国内风云系列、张衡卫星等现有仪器, 并紧抓未来空间探测任务 (如中国太阳风–磁层相互作用全景成像卫星 SMILE, 增强型 X 射线时变与偏振空间天文台 eXTP 等) 带来的新机遇, 构建跨区域、多尺度的多星联合探测网络. 这将为揭示极端太阳爆发下 T-I-M 系统的全球瞬态响应与能量物质跨圈层耦合机制提供前所未有的数据支撑.

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] BAKER D N. Effects of the Sun on the Earth's environment[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2000, **62**(17/18): 1669-1681

[2] PULKKINEN T. Space weather: terrestrial perspective[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2007, **4**(1): 1

[3] MILAN S E, CLAUSEN L B N, COXON J C, *et al*. Overview of solar wind-magnetosphere-ionosphere-atmosphere coupling and the generation of magnetospheric currents[J].

Space Science Reviews, 2017, **206**(1/2/3/4): 547-573

[4] LIU J, WANG W B, QIAN L Y, *et al*. Solar flare effects in the Earth's magnetosphere[J]. *Nature Physics*, 2021, **17**(7): 807-812

[5] ZHANG D H, SHI H, JIN Y Q, *et al*. The variation of the estimated GPS instrumental bias and its possible connection with ionospheric variability[J]. *Science China Technological Sciences*, 2014, **57**(1): 67-79

[6] HAO Y Q, HUANG J P, LIU W L, *et al*. Prompt GPS TEC response to magnetospheric compression[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(4): 4357-4366

[7] PRÖLSS G W. Physics of the Earth's Space Environment: An Introduction[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2004. DOI: 10.1007/978-3-642-97123-5

[8] SARRIS T E. Understanding the ionosphere thermosphere response to solar and magnetospheric drivers: status, challenges and open issues[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 2019, **377**(2148): 20180101

[9] ZHANG D H, XIAO Z. Study of the ionospheric TEC using GPS during the large solar flare burst on Nov. 6, 1997[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(19): 1749-1752

[10] XIAO Z, YU S M, SHI H, *et al*. A brief of recent research progress on ionospheric disturbances[J]. *Science China Information Sciences*, 2013, **56**(12): 1-9

[11] EPARVIER F G, WOODS T N. Solar EUV spectral irradiance: measurements and variability[C]//WILSON A. Solar Variability as an Input to the Earth's Environment: International Solar Cycle Studies (ISCS) Symposium. Noordwijk: ESA Publications Division, 2003: 209-216

[12] ZHANG D H, XIAO Z, LIU J, *et al*. Sunlit boundary ionospheric response to the great flare on Oct. 28, 2003[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, **49**(15): 1570-1574

[13] BENZ A O. Flare observations[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2017, **14**(1): 2

[14] MITRA A P. Ionospheric Effects of Solar Flares[M]. Dordrecht: Springer, 1974. DOI: 10.1007/978-94-010-2231-6

[15] TSURUTANI B T, VERKHOGLYADOVA O P, MANNUCCI A J, *et al*. A brief review of "solar flare effects" on the ionosphere[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A17

[16] ZHANG D H, XIAO Z, IGARASHI K, *et al*. GPS-derived ionospheric total electron content response to a solar flare that occurred on 14 July 2000[J]. *Radio Science*, 2002, **37**(5): 1086

[17] QIAN L Y, BURNS A G, CHAMBERLIN P C, *et al*. Variability of thermosphere and ionosphere responses to solar flares[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A10): A10309

[18] QIAN L Y, WOODS T N. Solar flare effects on the thermosphere and ionosphere[M]//WANG W B, ZHANG Y L, PAXTON L J. Upper Atmosphere Dynamics and Energetics. Hoboken: American Geophysical Union, 2021: 253-274. DOI: 10.1002/9781119815631.ch14

[19] SHIBATA K, MAGARA T. Solar flares: magnetohydrodynamic processes[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2011, **8**(1): 6

[20] TORIUMI S, WANG H M. Flare-productive active regions[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2019, **16**(1): 3

[21] HESSE M, CASSAK P A. Magnetic reconnection in the space sciences: past, present, and future[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(2): e2018JA025935

[22] PONTIN D I, PRIEST E R. Magnetic reconnection: MHD theory and modelling[J]. *Living Reviews in Solar Physics*, 2022, **19**(1): 1

[23] FLEISHMAN G D, GARY D E, CHEN B, *et al*. Decay of the coronal magnetic field can release sufficient energy to power a solar flare[J]. *Science*, 2020, **367**(6475): 278-280

[24] FLEISHMAN G D, NITA G M, CHEN B, *et al*. Solar flare accelerates nearly all electrons in a large coronal volume[J]. *Nature*, 2022, **606**(7915): 674-677

[25] PRÖLSS G W. Physics of the Earth's Space Environment: An Introduction[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012

[26] THOMAS R J, TESKE R G. Solar soft X-rays and solar activity[J]. *Solar Physics*, 1971, **16**(2): 431-453

[27] HARGREAVES J K. The Solar-Terrestrial Environment [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1992

[28] RISHBETH H, GARRIOTT O K. Introduction to ionospheric physics[M]. New York: Academic Press, 1969

[29] HUANG J P, HAO Y Q, ZHANG D H, *et al*. Changes of solar extreme ultraviolet spectrum in solar cycle 24[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(7): 6844-6854

[30] WOODS T N, HOCK R, EPARVIER F, *et al*. New solar extreme-ultraviolet irradiance observations during flares[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **739**(2): 59

[31] LIU X Q, QIAN L Y, CHAMBERLIN P C, *et al*. Data-driven simulation of effects of a solar flare with extreme-ultraviolet late phase on ionospheric electron density[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **974**(2): 157

[32] ASCHWANDEN M J, BENZ A O, DENNIS B R, *et al*. Solar electron beams detected in hard X-rays and radio waves[J]. *The Astrophysical Journal*, 1995, **455**: 347

[33] FÁRNÍK F, HUDSON H, WATANABE T. Spatial relations between preflares and flares[J]. *Solar Physics*, 1996, **165**(1): 169-179

[34] WARREN H P, WARSHALL A D. Ultraviolet flare ribbon brightenings and the onset of hard X-ray emission[J]. *The Astrophysical Journal*, 2001, **560**(1): L87-L90

[35] FÁRNÍK F, HUDSON H S, KARLICKÝ M, *et al*. X-ray and radio observations of the activation stages of an X-class solar flare[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2003, **399**(3): 1159-1166

[36] ZARRO D M, CANFIELD R C, STRONG K T, *et al*. Explosive plasma flows in a solar flare[J]. *The Astrophysical Journal*, 1988, **324**: 582

[37] MILLIGAN R O, GALLAGHER P T, MATHIOUDAKIS

M, *et al*. RHESSI and SOHO CDS observations of explosive chromospheric evaporation[J]. *The Astrophysical Journal*, 2006, **638**(2): L117-L120

[38] QIU J, LONGCOPE D W. Long duration flare emission: impulsive heating or gradual heating?[J]. *The Astrophysical Journal*, 2016, **820**(1): 14

[39] ZHU C M, QIU J, LONGCOPE D W. Two-phase heating in flaring loops[J]. *The Astrophysical Journal*, 2018, **856**(1): 27

[40] NAGEM T A M H, QAHWAJI R, IPSON S, *et al*. Deep learning technology for predicting solar flares from (geostationary operational environmental satellite) data[J]. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 2018, **9**(1): 492-498

[41] WOODS T N. Extreme ultraviolet late-phase flares: before and during the solar *Dynamics observatory* mission[J]. *Solar Physics*, 2014, **289**(9): 3391-3401

[42] HUANG Y S, RICHMOND A D, DENG Y, *et al*. Wavelength dependence of solar irradiance enhancement during X-class flares and its influence on the upper atmosphere[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2014, **115-116**: 87-94. DOI: 10.1016/j.jastp.2013.10.011

[43] LE H J, LIU L B, REN Z P, *et al*. A modeling study of global ionospheric and thermospheric responses to extreme solar flare[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(1): 832-840

[44] LE H J, REN Z P, LIU L B, *et al*. Global thermospheric disturbances induced by a solar flare: a modeling study[J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, **67**(1): 3

[45] LI W, YUE J P, YANG Y, *et al*. Ionospheric and thermospheric responses to the recent strong solar flares on 6 september 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(10): 8865-8883

[46] QIAN L Y, WANG W B, BURNS A G, *et al*. Responses of the thermosphere and ionosphere system to concurrent solar flares and geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2020, **125**(3): e2019JA027431

[47] BURNS A G, SOLOMON S C, WANG W, *et al*. Explaining solar cycle effects on composition as it relates to the winter anomaly[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(7): 5890-5898

[48] QIAN L Y, BURNS A G, SOLOMON S C, *et al*. Solar cycle variations of thermospheric composition at the solstices[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(4): 3740-3749

[49] LE H J, LIU L B, WAN W X. An analysis of thermospheric density response to solar flares during 2001-2006[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2012, **117**(A3): A03307

[50] ASWATHY R P, DAVIS E V, KRISHNA PRAKASH K R. Wave perturbations in Earth's thermosphere in conjunction with X1.7 solar flare: observational perspective[J]. *Advances in Space Research*, 2024, **73**(7): 3722-3729

[51] PAWLOWSKI D J, RIDLEY A J. Modeling the thermospheric response to solar flares[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A10): A10309

[52] ZHU J, RIDLEY A J. Modeling subsolar thermospheric waves during a solar flare and penetration electric fields[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2014, **119**(12): 10507-10527

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

[54] LI N, LEI J H, LUAN X L, *et al*. Responses of the D region ionosphere to solar flares revealed by MF radar measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, **182**: 211-216

[55] QUAN L, CAI B, HU X, *et al*. Study of ionospheric D region changes during solar flares using MF radar measurements[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **67**(2): 715-721

[56] MACOTELA E L, CLILVERD M, MANNINEN J, *et al*. D-region high-latitude forcing factors[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(1): 765-781

[57] LI N, LEI J H, LUAN X L, *et al*. Responses of the D region ionosphere to solar flares revealed by MF radar measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2019, **182**: 211-216

[58] HAYES L A, GALLAGHER P T, MCCAULEY J, *et al*. Pulsations in the earth's lower ionosphere synchronized with solar flare emission[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(10): 9841-9847

[59] QIAN L Y, WANG W B, BURNS A G, *et al*. Solar flare and geomagnetic storm effects on the thermosphere and ionosphere during 6-11 September 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(3): 2298-2311

[60] LE H J, LIU L B, HE H, *et al*. Statistical analysis of solar EUV and X-ray flux enhancements induced by solar flares and its implication to upper atmosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2011, **116**(A11): A11301

[61] NOGUEIRA P A B, SOUZA J R, ABDU M A, *et al*. Modeling the equatorial and low-latitude ionospheric response to an intense X-class solar flare[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2015, **120**(4): 3021-3032

[62] DE PAULA E R, MARTINON A R F, CARRANO C, *et al*. Solar flare and radio burst effects on GNSS signals and the ionosphere during September 2017[J]. *Radio Science*, 2022, **57**(10): e2021RS007418

[63] YASYUKEVICH Y, ASTAFYEVA E, PADOKHIN A, *et al*. The 6 September 2017 X-class solar flares and their impacts on the ionosphere, GNSS, and HF radio wave propagation[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(8): 1013-1027

[64] LIU X Q, NIU X Y, LIU J, *et al*. Solar flare-induced prenoon-postnoon asymmetry of ionospheric electron density[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2025, **130**(8): e2024JA033581

[65] ZHANG S R, COSTER A J, ERICKSON P J, *et al*. Trav-

eling ionospheric disturbances and ionospheric perturbations associated with solar flares in September 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(7): 5894-5917

[66] LIU X Q, LIU J, WANG W B, *et al*. Explaining solar flare-induced ionospheric ion upflow at millstone hill (42.6°N)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(7): e2021JA030185

[67] 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

[68] SUMOD S G, PANT T K. An investigation of solar flare effects on equatorial ionosphere and thermosphere using coordinated measurements[J]. *Earth, Planets and Space*, 2019, **71**(1): 125

[69] ZHANG K D, WANG H, LIU J, *et al*. The significant enhanced quiet-time equatorial ionization anomaly by the intense solar flare on 06 September 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2024, **129**(12): e2024JA033264

[70] ANNADURAI N M N, HAMID N S A, YAMAZAKI Y, *et al*. Investigation of unusual solar flare effect on the global ionospheric current system[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(10): 8599-8609

[71] CURTO J J, MARSAL S, BLANCH E, *et al*. Analysis of the solar flare effects of 6 September 2017 in the ionosphere and in the earth's magnetic field using spherical elementary current systems[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(11): 1709-1720

[72] OWOLABI C, LEI J H, BOLAJI O S, *et al*. Ionospheric current variations induced by the solar flares of 6 and 10 September 2017[J]. *Space Weather*, 2020, **18**(11): e2020SW002608

[73] MAO T, SUN L F, WANG Y G, *et al*. Response of the equatorial and low-latitude ionosphere over the West Pacific Ocean Sector to an X1.2 solar flare on 15 May 2013[J]. *Advances in Space Research*, 2017, **60**(5): 1029-1038

[74] CHEN J J, LEI J H, WANG W B, *et al*. Ionospheric electrodynamic response to solar flares in september 2017[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(11): e2021JA029745

[75] GOPIKA P G, AMBILI K M, CHOUDHARY R K. The response of the D and E regions of the equatorial ionosphere to solar flare events[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(12): e2021JA029350

[76] LIU J, QIAN L Y, MAUTE A, *et al*. Electrodynamical coupling of the geospace system during solar flares[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(1): e2020JA028569

[77] WOODS T N, EPARVIER F G, HOCK R, *et al*. Extreme Ultraviolet Variability Experiment (EVE) on the Solar Dynamics Observatory (SDO): overview of science objectives, instrument design, data products, and model developments[J]. *Solar Physics*, 2012, **275**(1): 115-143

[78] BEKKER S, MILLIGAN R O, RYAKHOVSKY I A. The influence of different phases of a solar flare on changes in the total electron content in the earth's ionosphere[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **971**(2): 188

[79] SMITHTRO C G, SOJKA J J, BERKEY T, *et al*. Anomalous F region response to moderate solar flares[J]. *Radio Science*, 2006, **41**(5): RS5S03

[80] MENDILLO M, ERICKSON P J, ZHANG S R, *et al*. Flares at earth and mars: an ionospheric escape mechanism?[J]. *Space Weather*, 2018, **16**(8): 1042-1056

[81] LIU X Q, FAN X Y, LIU J, *et al*. Response of global ionospheric currents to solar flares with extreme ultraviolet late phases[J]. *The Astrophysical Journal*, 2024, **963**(1): 27

[82] CHAMBERLIN P C, EPARVIER F G, KNOER V, *et al*. The Flare Irradiance Spectral Model-version 2 (FISM2)[J]. *Space Weather*, 2020, **18**(12): e2020SW002588

[83] NISHIMOTO S, WATANABE K, JIN H, *et al*. Statistical analysis for EUV dynamic spectra and their impact on the ionosphere during solar flares[J]. *Earth, Planets and Space*, 2023, **75**(1): 30

[84] LIU J, QIAN L Y, WANG W B, *et al*. Energy deposition into the ionosphere during a solar flare with extreme-ultraviolet late phase[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, **963**(1): L8

[85] LIU X Q, LIU J, CHEN J J, *et al*. Impacts of extreme ultraviolet late phase of the solar flare on ionospheric electrodynamics[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2024, **974**(1): L19

[86] CHAKRABORTY S. Characterization and Modeling of Solar Flare Effects in the Ionosphere Observed by HF Instruments[D]. Blacksburg: Virginia Tech University, 2021

[87] LIU J, WANG W B, QIAN L Y, *et al*. Impacts of ionospheric conductance on magnetosphere-ionosphere coupling [J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2023, **128**(2): e2022JA030864

作者简介

刘宣青 女, 1996 年 12 月出生于山西省朔州市, 现为山东大学空间科学与技术学院博士后, 主要研究方向为太阳耀斑对地球电离层–热层耦合系统影响.
E-mail: xuanqingliu@sdu.edu.cn

刘 晶(通信作者) 男, 1983 年 12 月出生于湖北省黄冈市, 现为山东大学空间科学与技术学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为地球电离层–磁层耦合系统以及数值与人工智能建模等.
E-mail: liujing2019@sdu.edu.cn