0254-6124/2023/43(5)-0807-14 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LI Chunlai, LU Jianyong, LI Jingyuan. Variation in the Longitude-latitude Distribution and Latitude-altitude Distribution of OI 135.6 nm Airglow during Magnetic Storms (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(5): 807–820. DOI:10.11728/cjss2023.05.2023–0022

磁暴期间 OI 135.6 nm 气辉经纬及高度分布的变化特征*

李春来　吕建永　李婧媛

(南京信息工程大学大气物理学院空间天气研究所　南京　210044)

摘　要　利用 GUVI 探测器观测的 OI 135.6 nm 气辉辐射数据，研究了 2003 年 10 月和 11 月两次持续时间不同的强磁暴期间气辉辐射强度经纬度分布及纬度–高度分布的变化。结果表明，全球大部分区域内 OI 135.6 nm 气辉辐射强度在磁暴期间会随着 *Dst* 指数的降低而增强，与磁暴的剧烈程度呈现准正相关关系。从纬度上看，气辉辐射强度的增强会由磁静期的磁赤道两侧附近向高纬地区延伸至南北半球 50°附近，增幅基本在 80% 以上，最大可超过 200%，且经纬度分布在磁暴期间的变化情况呈现出南北不对称性和纬向不对称性；从高度上看，气辉辐射强度的增强会由磁静期的 300～400 km（即电离层 F_2 层高度）扩散至其他高度，特别是在 100～200 km（即低热层高度）的部分纬度上会出现相比其他高度更为显著的增强，增幅超过 300%；气辉辐射出现增强的时间与磁暴相位基本同步。

关键词　远紫外气辉，GUVI，磁暴，经纬分布，高度分布

中图分类号　P352

Variation in the Longitude-latitude Distribution and Latitude-altitude Distribution of OI 135.6 nm Airglow during Magnetic Storms

LI Chunlai　LU Jianyong　LI Jingyuan

(*Institute of Space Weather, School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing* 210044)

Abstract　Variation in the latitude-longitude distribution and latitude-height distribution of airglow emission intensity during two intense magnetic storms in October and November 2003 were investigated using OI 135.6 nm airglow emission data observed by the GUVI detector. The results show that the intensity of OI 135.6 nm airglow emission in most regions of the world increases with a decrease in the *Dst*

* 国家自然科学基金项目资助（42030203，42004132）

2023-02-13 收到原稿，2023-05-06 收到修定稿

E-mail：15208545525@163.com. 通信作者 吕建永，E-mail：jylu@nuist.edu.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

index during the magnetic storms and shows a quasi-positive correlation with the intensity of magnetic storms. Horizontally, the enhancement of airglow emission extends from both sides of the magnetic equator during the magnetic quiescence to the high latitudes to near 50° in the northern and southern hemispheres, and the increase is basically more than 80%, and the maximum can exceed 200%, and the variation of latitude and longitude distribution during the magnetic storms show north-south and latitudinal asymmetry. Vertically, the enhancement of the airglow emission spreads from 300 km to 400 km (*i.e.*, F_2 layer height) to other heights, especially at some latitudes between 100 km to 200 km (*i.e.*, low thermosphere height), which is more significant than other heights, with an increase of more than 300%; the time of the enhancement of the airglow emission is basically synchronized with the magnetic storm phase.

Key words FUV airglow, GUVI, Magnetic storms, Longitude-latitude distribution, Altitude distribution

0 引言

地球大气直接或间接吸收太阳能量后会被激发到较高的能级，从高能级跃迁至低能级时释放出的微弱光辐射即为气辉。对气辉辐射特性的研究有助于推进对中高层大气各种光化学和动力学过程的深入理解[1]。根据辐射波长的不同，气辉可分为多种，例如紫外气辉、可见气辉、红外气辉等。按照国际通用的紫外波段划分标准[2]，波长为 100～200 nm 的气辉为远紫外气辉。远紫外气辉的辐射特性几乎不受地表及边界层大气复杂背景的影响，被视为是中间层、低热层和电离层物理化学过程及动力学过程信息的重要来源，已成为分析日地空间结构能量传输和转换以及中高层大气和电离层参量日常监测的重要手段[3]。自 20 世纪 50 年代以来，便有研究者开始利用卫星搭载成像光谱仪进行远紫外气辉辐射光学遥感探测[4]，并着手研究其观测结果显示出的分布特征，从而为监测电离层和中高层大气变化奠定了理论基础。OI 135.6 nm 气辉辐射是远紫外气辉中的典型光谱之一，是由氧原子发生($3s^5S \rightarrow 2p^{43}P$)能级跃迁过程产生的二重态谱线，主要激发源为电离层中光电子与中性成分氧原子之间的碰撞以及光电子本身在传输过程中发生的多次散射[5]。目前有许多研究工作集中在利用 OI 135.6 nm 气辉辐射反演电离层峰值电子密度 N_mF_2 和峰值高度 h_mF_2 或联合 N_2 LBH 气辉反演电离层氧氮柱密度比 $[O]/[N_2]$，从而对电离层状态及变化规律进行监测和预报[6,7]。

在磁暴期间，太阳风能量被地球磁层捕获，在极区通过焦耳加热和粒子沉降的方式首先进入到极区高层大气，进而沿着磁力线移动，与中低纬度大气粒子相互作用，在全球热层和电离层中产生一系列显著影响。因此，气辉辐射强度和辐射层高度在磁暴期间会随着电离层的扰动而改变，同时气辉辐射的变化也会影响此期间中高层大气的恢复过程。研究磁暴期间的气辉辐射变化，掌握其变化规律不仅有助于加深对暴时电离层–中高层大气变化机制的理解，还有助于提高暴时电离层–中高层大气光学遥感探测的精度，具有重要的科学意义和应用价值。对于磁暴期间气辉变化的研究，目前已有大量结果。Zhang 等[8] 利用 UARS 上搭载的 WINDII 探测器观测到 OI 557.7 nm 气辉辐射在磁暴期间减弱，并且与高度及磁暴的相位有关。Sahai 等[9] 和 Leonovich 等[10] 分别基于全天空气辉成像仪和气辉光度计的观测发现磁暴期间氧原子的两种气辉辐射在低纬度地区无明显变化、在中纬度地区明显增强；而 Mukherjee[11] 和 Ghodpage 等[12] 使用同种观测资料发现磁暴期间同样两种气辉辐射在中纬度地区无明显变化，在低纬度地区明显增强，这与 Sahai 等[9] 和 Leonovich 等[10] 的结论相反。Karan 等[13] 发现低纬度地区的 OI 630.0 nm 气辉辐射在磁暴期间的变化情况会根据季节的不同而不同。而针对远紫外气辉的研究结果同样丰富。Ishimoto 等[14] 和 Tinsley 等[15] 报道了磁扰动时期远紫外气辉辐射在中低纬地区的增强。Stephan 等[16] 进一步表明气辉辐射特征与 *Dst* 指数呈显著的负相关关系，并指出这种现象是由环电流驱动的。DeMajistre 等[17] 首次在磁暴期间同时观测了中低纬地区的远紫外气辉辐射强度和高能中性原子

沉降, 发现气辉辐射的增强与高能中性原子沉降具有很好的相关性。Zhang 等[18] 研究了三次磁暴事件期间远紫外气辉辐射从亚极光纬度至赤道地区的增强, 并利用 IMAGE 卫星上的 HENA 探测器观测的高能粒子通量发现气辉辐射的增强与高能粒子通量有很好的相关性, 并将这种增强命名为中性粒子极光。Wang 等[19] 利用中国自主研发的 FY-3 D 卫星上的电离层光度计发现磁暴期间 OI 135.6 nm 气辉辐射在中高纬区域内会迅速减弱。而 Jiang 等[20] 使用同种观测资料并结合地面台站数据表明磁暴期间 OI 135.6 nm 气辉辐射在中低纬地区增强, 并且认为电离层 TEC 增加是气辉辐射增强的原因之一, 此外还有高能中性原子沉降、相互中和发射等因素。Zhang 等[21] 发现行星际磁场也会对磁暴期间的远紫外气辉产生影响。综上所述, 可以发现对于远紫外气辉在磁暴期间的变化情况的研究仍在进行中, 磁暴影响远紫外气辉的物理机制尚未被系统地认识, 仍存在多种解释。此外, 目前的研究更多集中于磁暴期间远紫外气辉纬度分布上的变化, 而在高度分布上鲜有涉及。考虑到气辉的产生机制与海拔高度密切相关, 且电离层具有明显的高度分布特征, 而这种特征在磁暴期间也有可能发生变化, 可以认为研究磁暴期间远紫外气辉高度分布的变化情况是必要的。因此, 本文研究了在 2003 年 10 月和 11 月连续两次持续时间不同的特大磁暴期间 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的经纬度分布和纬度–高度分布的变化情况, 并着重介绍了纬度–高度分布在磁暴期间出现的一个显著变化, 进而讨论了产生这些变化的物理机制。

1 数据

研究所使用的远紫外气辉辐射强度数据来源于搭载在 TIMED(Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energy and Dynamics)卫星上的全球紫外成像仪 GUVI(Global Ultraviolet Imager)。TIMED 卫星于 2001 年 12 月 7 日发射升空, 其轨道高度约为 625 km, 轨道倾角约为 74.1°, 轨道周期约为 96 min, 即每 24 h 绕地球运动约 14 周。GUVI 探测器是 TIMED 卫星上携带的 4 个科学载荷之一, 主要用于观测中间层至低热层/电离层区域内波长为 120～180 nm 的远紫外气辉辐射, 为掌握该区域中的物理化学反应及能量传输过程奠定基础[22]。GUVI 通过在穿轨方向上旋转扫描镜和在沿轨方向上随卫星运动来完成对目标气辉的观测, 并向地面提供 HI 121.6 nm 谱线, OI 130.4 nm 谱线, OI 135.6 nm 谱线, N_2LBHs 谱带和 N_2LBHl 谱带 5 种特定波段气辉的辐射强度数据, 其中 OI 135.6 nm 谱线是远紫外气辉中的一条非常显著的特征谱线, 被认为是电离层/热层遥感探测氧原子和电子密度的最佳气辉辐射[23]。GUVI 对气辉的观测分为天底(Disk)观测和临边(Limb)观测, 其中天底观测的范围为从与天底方向成–60°夹角(靠近太阳方向)到与天底方向成 67.2°夹角(远离太阳方向), 临边观测的范围为从与天底方向成 67.2°夹角到与天底方向成 80°夹角[24]。

GUVI 发布的数据有 L0, L1A, L1B, L1C, L2B, L3 共 6 个级别, 其中 L1C 级数据分离了 GUVI 原始数据中的天底数据和临边数据, 包含了每个探测点的经纬度信息, 并且将原始数据的单位 Count (光子计数)转换为 Rayleigh (亮度, 定义为 R), 其中 1 R=4π×10^6 $cm^{-2}\cdot s^{-1}\cdot nm^{-1}$, 这个过程修正了 GUVI 在观测过程中的一些计数误差和其他杂散光污染[25,26]。此外, 相较于天底观测而言, 临边观测的观测天顶角更大, 记录了每个探测点的海拔高度信息, 有助于研究气辉高度分布的变化规律。基于以上因素, 本文采用 GUVI L1C 级 OI 135.6 nm 临边观测数据进行研究。

GUVI 绕地球一周后, 在沿轨方向产生 408 组 L1C 级临边观测数据, 每一组沿轨方向上的数据包含 19 个穿轨方向上的数据, 即 GUVI 在沿轨方向上扫描 408 次, 一次扫描会得到 19 个以不同观测天顶角观测的气辉辐射强度。为避免研究结果被磁暴期间探测器受其影响而产生的暗计数、假计数、相近波段辐射重叠等不可用数据干扰, 对每一次扫描, 研究选取其产生的 19 个气辉辐射强度的中值作为此次扫描的结果, 即 GUVI 每绕地球一周取得 408 个结果。

2 OI 135.6 nm 气辉辐射强度在两次磁暴期间的变化

利用 GUVI 数据研究 2003 年 10 月和 11 月两次磁暴期间 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的经纬度分布及纬度–高度分布的变化情况。磁暴的强度以 *Dst* 指数表示*, 两次磁暴的 *Dst* 指数最低均低于–300 nT,

* https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/index.html

10 月的磁暴持续时间较长, 而 11 月的较短。为尽量避免遗漏气辉辐射强度的经纬度分布及纬度–高度分布在磁暴期间的变化情况中可能存在的提前或滞后效应, 本文取 10 日作为一次磁暴的周期, 即初相(含磁静期和急始)3 日、主相 1—2 日、恢复相 5—6 日, 研究在这 10 日内经纬度分布和纬度–高度分布的变化情况。

2.1 2003 年 10 月 29 日 特大磁暴

Dst 指数低于–200 nT 的磁暴被称为特大磁暴。2003 年 10 月 29 日发生了一次特大磁暴, 其 *Dst* 指数最低达–357 nT。图 1 给出了 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日 *Dst* 指数的每小时变化情况。由图 1 可知, 此次磁暴的初相起始于 2003 年 10 月 27 日(第 300 日), 主相从 2003 年 10 月 29 日(第 302 日)持续至 31 日(第 304 日), 主相期间出现了两次 *Dst* 指数明显下降的过程。

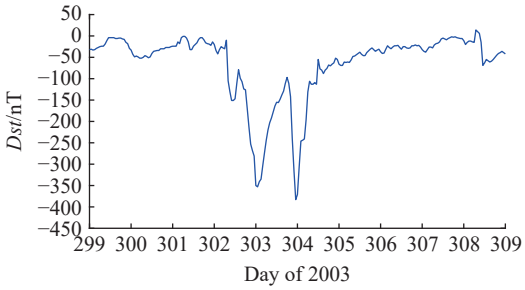


图 1 2003 年 10 月 26 日(第 299 日)至 11 月 4 日(第 308 日) *Dst* 指数的变化情况

Fig. 1 Variation of the *Dst* index from 26 October (Day 299) to 4 November (Day 308) in 2003

图 2 给出了 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日期间 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的经纬度分布情况, 其中网格点经度和纬度均以 5°为间隔。为避免极光辐射的污染, 纬度超过 50°的区域被排除在外。由图 2 可知, OI 135.6 nm 气辉辐射近似对称分布在磁赤道两侧, 纬度的升高向两极逐渐减弱, 形成双峰结构, 这体现了由电离层 F 层中 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移引起的喷泉效应导致的电离层赤道异常。在磁暴初相, 赤道附近的气辉辐射强度已经出现了一定程度的增强, 特别是 10 月 28 日(第 301 日), 相较于磁静期, 30°W—10°E 范围内的增强从赤道附近向北一直延伸至中纬度地区, 增幅在 50% 左右。在 10 月 29 日(第 302 日), 随着 *Dst* 指数的迅速下降, 气辉辐射强度在全球大部分范围内都发生了显著的增强。赤道附近至中低纬地区的增幅超过 60%, 部分高纬地区的增幅甚至超过 100%, 例如在 130°—50°W, 30°N 以北的区域内辐射强度的增幅超过了 400%; 在 130°—90°W 和 70°—130°E, 10°—30°N 的区域内辐射强度的增幅在 160% 左右; 此外, 在东半球 30°S 以南的区域内辐射强度也存在约 120% 的增强。在 10 月 30 日(第 303 日), *Dst* 指数开始回升, 但在 18:00 UT 后又迅速下降直至 31 日凌晨。因此, 相较于 10 月 29 日和 10 月 30 日当天的气辉辐射强度并不完全呈现减弱的趋势, 某些区域反而出现了增强, 例如在 170°—130°W, 0°—30°N 的区域内辐射强度出现了约 80% 的增强, 但除了个别区域的增强, 全球范围内其他大部分区域的辐射强度均表现出明显的降低(或增强的区域逐渐缩小), 特别是在东半球赤道附近至中低纬地区, 相较前一日降幅基本在 70% 以上。10 月 31 日(第 304 日), 磁暴进入恢复相, *Dst* 指数在前半日由–370 nT 迅速回升至–70 nT, 在后半日回升速度较为缓慢, 当天的气辉辐射强度进一步减弱, 仅剩个别小范围区域仍然保持增强。自 11 月 1 日(第 305 日)后, 随着 *Dst* 指数的逐渐回升, 在全球范围内, 气辉辐射强度已基本上减弱至磁暴初相甚至磁静期的同等水平。

图 3 给出了不同纬度气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日的变化情况, 其中对每一日同一经度范围内的辐射强度进行了平均, 磁静期的气辉辐射强度以磁暴周期之前 3 日(即 2003 年 10 月 23—25 日)的气辉辐射强度平均值来表示。由图 3 可知, 每个纬度上气辉辐射强度的增幅并不相同, 增幅的峰值大约出现在 20°N, 但出现增强的时间基本一致; 同时图 2 和图 3 显示了辐射强度在磁暴期间的增强存在着一定的南北不对称性。此外, 从图 2 也可以看出, 同一日的辐射强度在不同经度上可能呈现不同的趋势, 即纬向不对称性, 例如 10 月 31 日(第 304 日)。

图 4 给出了 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日期间 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的纬度–高度分布情况, 其中网格点纬度以 5°为间隔、高度以 10 km 为间隔。纬度超过 50°区域由于极光污染被排除在外。由图 4 可知, OI 135.6 nm 气辉辐射在磁静期主要分布在海拔 330 km 附近, 即电离层 F_2 层, 这是由于在 F_2 层光电子与氧原子的碰撞激发过程和氧离子与电

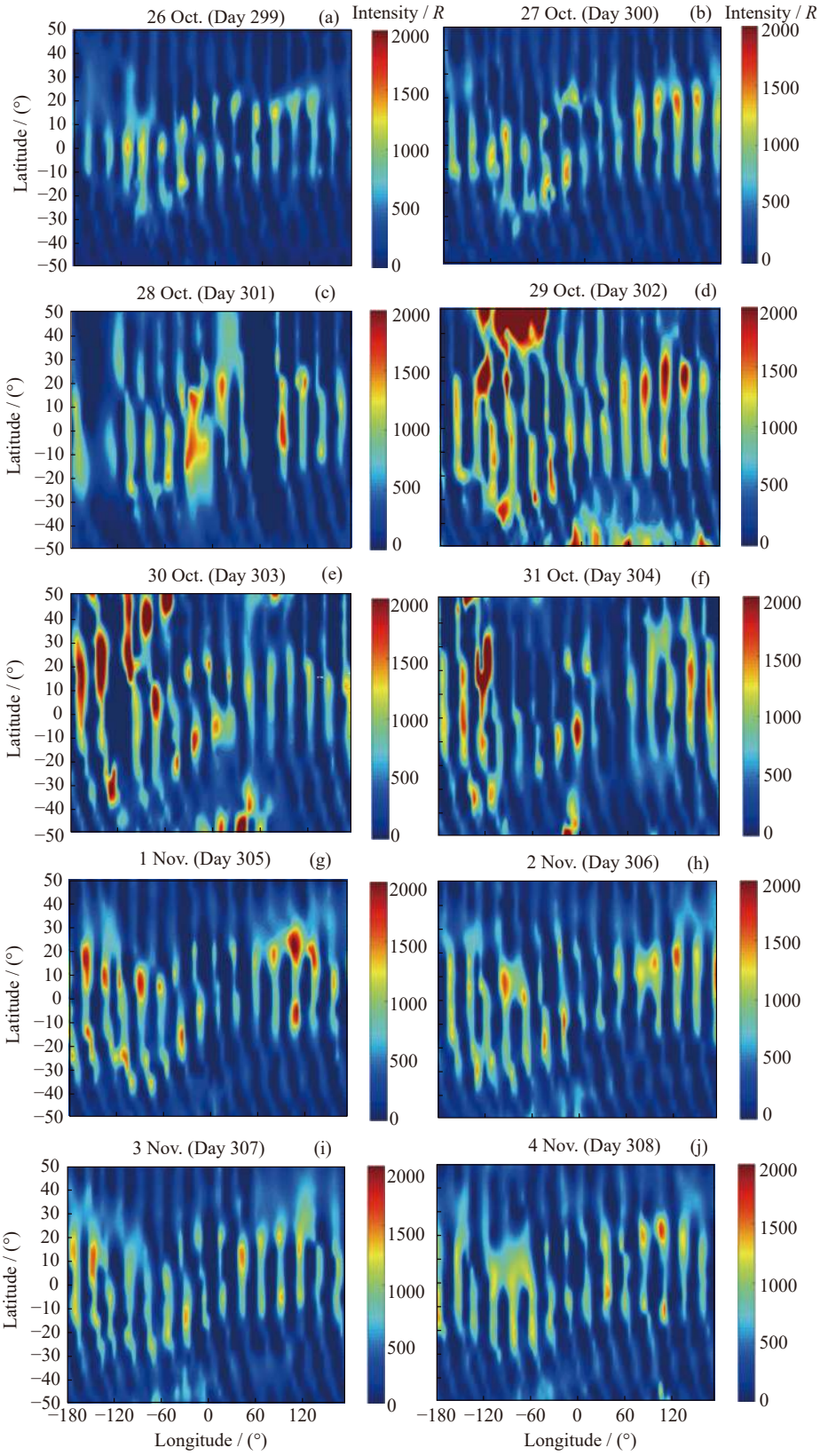


图 2 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的经纬度分布情况

Fig. 2 Longitude and latitude distributions of OI 135.6 nm airglow emission intensity from 26 October to 4 November in 2003

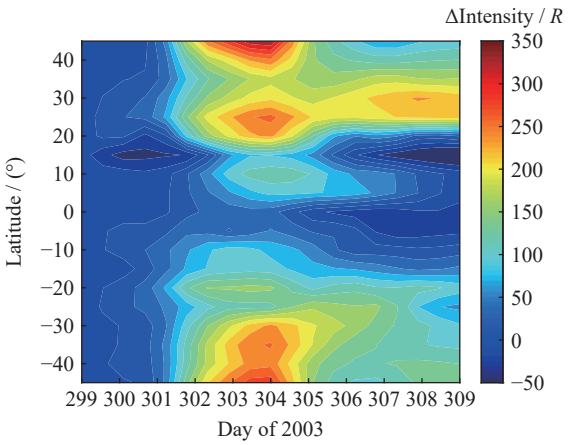


图 3 不同纬度 OI 135.6 nm 气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日的变化情况

Fig. 3 Variation of OI 135.6 nm airglow emission intensity at different latitudes compared to the magnetostatic period from 26 October to 4 November in 2003

子的辐射复合过程相较其他高度更为强烈; 从纬度上看, 气辉辐射主要分布在赤道至 20°N 左右的区域。在磁暴来临前, 除了 330 km 附近, 气辉辐射在中低纬地区 150 km 附近也存在零星分布, 且这两个高度范围内的辐射强度处于同等水平。在磁暴初相, 330 km 附近范围内的气辉辐射强度开始增强, 较磁静期增幅最高达到 70% 以上, 且增强有向中高纬地区扩散的趋势, 但 150 km 附近的开始降低, 至 10 月 28 日(第 301 日)几乎降低至 0。10 月 29 日(第 302 日), 磁暴进入主相, 330 km 附近范围内的气辉辐射强度进一步增强, 与前一日相比又增加了 20% 左右, 且增强出现在所有纬度范围内。而在 330 km 以上高度的气辉辐射强度也出现了增强现象, 例如在北半球中低纬地区的 350～450 km 范围内, 相比前一日增强了 120% 以上。此外, 在低热层同样出现了增强现象, 尤其是在 10°－30°N 的 130 km 附近区域内存在一个明显的增强, 该区域内的气辉辐射强度在整个初相期间几乎为 0, 但在主相第一日即迅速增至 1600 *R* 以上。在 10 月 30 日(第 303 日), *Dst* 指数先回升再降低, 但当天气辉辐射强度在高度分布上并未出现明显的变化, 仅在北半球中纬度地区的 440 km 附近发生了减弱, 在 30°S 的 400 km 附近和 40°N 的 300 km 附近发生小范围增强, 而在 10°－30°N 的低热层附近区域内的显著增强仍然存在, 且增幅与前一日相比几乎保持不变。10 月 31 日(第 302 日), 磁暴进入恢复相, 随着 *Dst* 指数的不断回升, 气辉辐射强度逐渐减弱, 350 km 以上高度的增强除个别小范围区域外已基本消失, 330 km 附近范围内的辐射强度相比前一日降低了 30% 左右, 在 10°－30°N 的低热层附近区域内的增强也基本消失。此后, 随着 *Dst* 指数逐渐回升至正常水平, 气辉辐射强度的纬度–高度分布也基本恢复至磁静期的情况, 但赤道至中低纬地区 330 km 附近的辐射强度总体上比磁静期略高一些, 且不再出现 150 km 附近的零星分布。

图 5 给出了不同高度 OI 135.6 nm 气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日的变化情况, 其中对每一日同一纬度范围内的辐射强度进行了平均, 磁静期的气辉辐射强度以磁暴周期之前 3 日(即 2003 年 10 月 23－25 日)的气辉辐射强度平均值来表示。由图 5 可知, 在磁暴期间除了 300～400 km 范围内的气辉辐射强度存在显著的增强现象之外, 在 100～150 km 范围内(低热层)也会产生较为明显的增强现象, 并且相对于磁暴主相, 该高度上的增强现象出现的时间几乎不存在提前或滞后效应, 仅会在主相当天随着 *Dst* 指数的迅速增加而产生, 在恢复相首日即迅速消失。另外在其他部分高度上气辉辐射强度也存在一定的增强, 例如 200～250 km 范围内。

为了更清晰地呈现磁暴期间 10°－30°N 的低热层附近区域内 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的增强现象, 根据图 4 所示, 对每日 10°－30°N 范围内的气辉辐射强度进行了平均, 将其相较于磁静期的变化量的高度分布在 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日期间的变化情况在图 6 中单独给出, 其中磁静期的气辉辐射强度以磁暴周期之前 3 日(即 2003 年 10 月 23－25 日)的气辉辐射强度平均值来表示。由图 6 可知, 10°－30°N 的低热层附近区域内的气辉辐射强度在磁暴初相便会出现增强现象, 但这个增强在初相最后一天会消失, 而在主相来临时重新出现, 且增幅和出现的高度范围都会更大, 其出现时间与主相来临的时间相比同样不存在明显的提前或滞后。

2.2 2003 年 11 月 20 日特大磁暴

2003 年 11 月 20 日发生了一次特大磁暴, *Dst* 指数最低达 –419 nT。图 7 给出了 2003 年 11 月

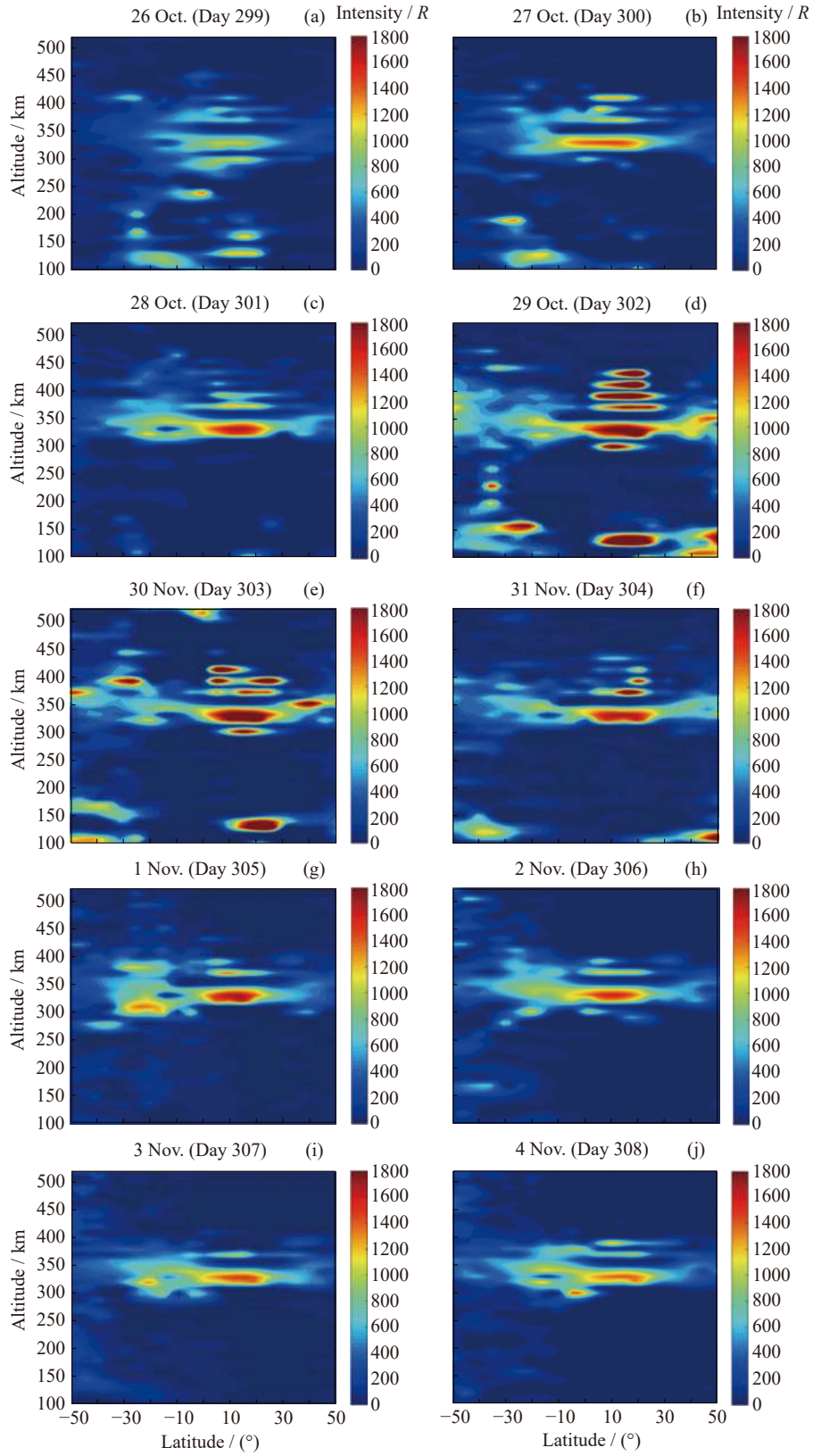


图 4 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的纬度–高度分布情况

Fig. 4 Latitude-altitude distributions of OI 135.6 nm airglow emission intensity from 26 October to 4 November in 2003

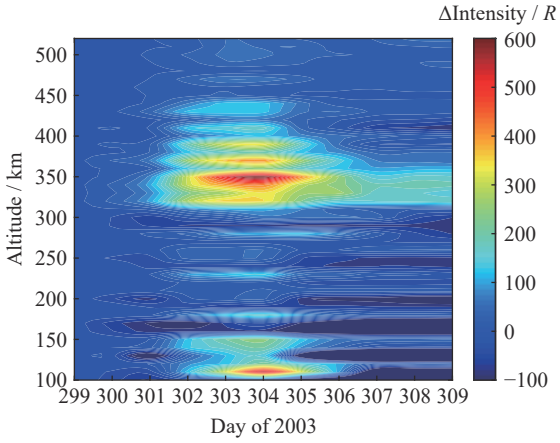


图 5 不同高度 OI 135.6 nm 气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日的变化情况

Fig. 5 Variation of OI 135.6 nm airglow emission intensity at different altitudes compared to the magnetostatic period from 26 October to 4 November in 2003

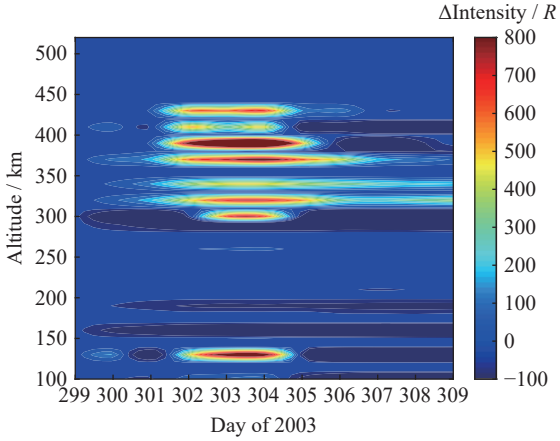


图 6 不同高度 10°－30°N 范围内 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的平均值相较于磁静期的变化量在 2003 年 10 月 26 日至 11 月 4 日的变化情况

Fig. 6 Variation of the mean OI 135.6 nm airglow emission intensity in the range 10°N to 30°N at different altitudes compared to the magnetostatic period from 26 October to 4 November in 2003

17－26 日 *Dst* 指数的每小时变化情况。由图 7 可知，此次磁暴的初相起始于 2003 年 11 月 19 日（第 323 日），主相为 2003 年 11 月 20 日（第 324 日）。相比于 2003 年 10 月 29 日的磁暴，本次磁暴的持续时间较短，*Dst* 指数下降的过程仅维持了 11 月 20 日

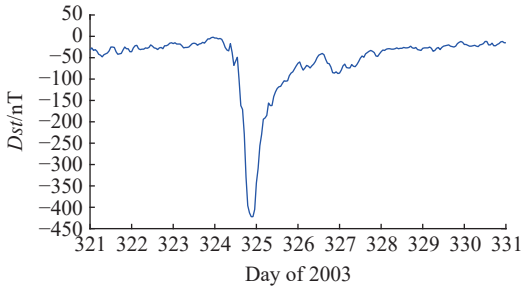


图 7 2003 年 11 月 17 日（第 321 日）至 11 月 26 日（第 330 日）*Dst* 指数的变化情况

Fig. 7 Variation of the *Dst* index from 17 November (Day 321) to 26 November (Day 330) in 2003

1 天。

图 8 给出了 2003 年 11 月 17－26 日期间 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的经纬度分布情况，其中网格点经度和纬度均以 5°为间隔。纬度超过 50°的区域由于极光污染被排除在外。由图 8 可知，本次磁暴发生前，OI 135.6 nm 气辉辐射强度的经纬度分布几乎没有发生变化，11 月 17－19 日期间均以双峰结构分布在磁赤道两侧，强度约为 800 *R*。在 11 月 20 日（第 324 日），随着 *Dst* 指数的迅速下降，气辉辐射强度发生了明显的增强现象。增强主要出现在 150°－60°W，30°S－40°N 的区域内，增幅相较于磁静期最高达到 300%，辐射强度最大值超过了 1400 *R*，另外在 30°W－70°E 的高纬度地区也存在明显的增强现象，增幅最高达 200%。而在东半球的赤道至中纬度地区，气辉辐射强度几乎不存在增强现象。由于本次磁暴的持续时间较短，在 11 月 21 日（第 325 日）磁暴即进入恢复相，*Dst* 指数在当天迅速回升，气辉辐射强度较前一日明显下降，除东半球赤道以北的中高纬地区存在增幅约为 80% 的小范围增强外，其他地区基本恢复至磁静期水平。在 11 月 22 日（第 326 日），*Dst* 指数出现一定波动，但最低值仍然保持在–100 nT 以上，因此当天的气辉辐射强度没有发生明显增强，东半球的辐射强度甚至有所下降，由磁静期的 800 *R* 降至 600 *R* 左右。自 11 月 23 日（第 327 日）后，随着 *Dst* 指数逐渐回升至正常范围，全球区域内的气辉辐射强度已基本恢复至磁暴初相甚至磁静期的同等水平，不存在明显的增强或减弱现象。

与图 3 类似，图 9 给出了不同纬度气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在 2003 年 11 月 17－26 日的变化情况，其中对每一日同一经度范围内的辐射强度

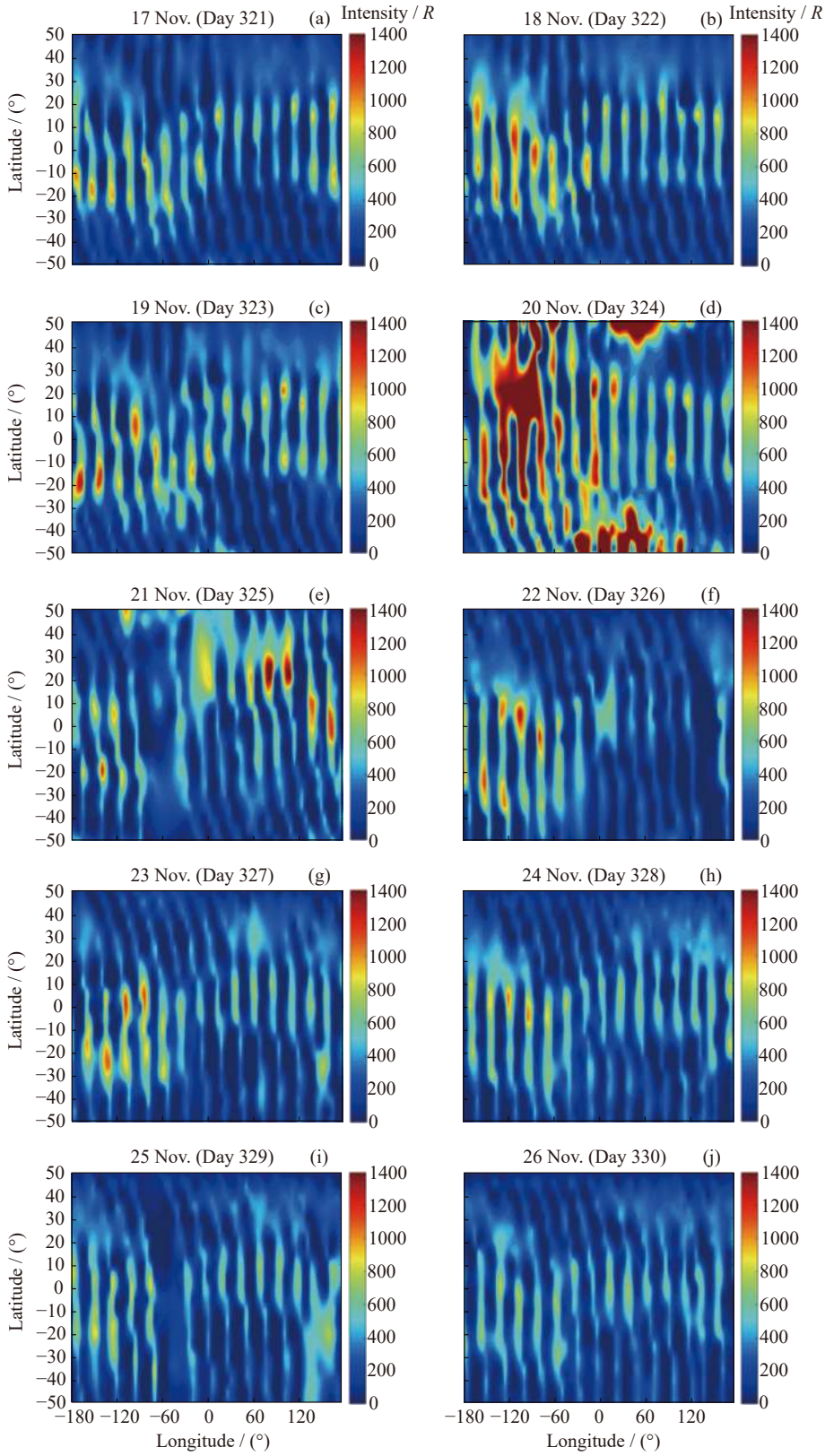


图 8 2003 年 11 月 17—26 日 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的经纬度分布情况

Fig. 8 Longitude and latitude distributions of OI 135.6 nm airglow emission intensity from 17 to 26 November in 2003

进行了平均，磁静期的气辉辐射强度以磁暴周期之前3日（即2003年11月14—16日）的气辉辐射强度平均值来表示。由图9可知，每个纬度上气辉辐射强度的增幅并不相同，磁赤道两侧的低纬度地区均存在增幅的峰值（高纬度地区的增强存在可见的由高纬向低纬扩散的趋势，因此无法排除受极光污染的可能性）。另外，气辉辐射强度的经纬度分布在本次磁暴期间的变化情况同样展现了南北不对称性和纬向不对称性。有研究表明，南北不对称性可能是由不同经度之间 $\boldsymbol{E}\times\boldsymbol{B}$ 漂移、磁偏角、中性风的差异引起的[27]。此外，日地距离的变化、地理赤道与地磁赤道的偏移也是造成电离层南北不对称的主要因素[28]；而纬向不对称性是因为一日的气辉辐射强度的经纬度分布由GUVI绕地球运动14周产生，带有GUVI观测时的地方时信息，而 *Dst* 指数的变化情况是以小时分辨率给出，所以不同经度上的气辉辐射强度会随每小时 *Dst* 指数的变化而变化（见图2和图8）。综上所述，对比两次事件可以发现，OI 135.6 nm气辉辐射强度在磁暴期间会随着 *Dst* 指数的降低而增强，与 *Dst* 指数呈现近似的负相关关系，并且在赤道至50°纬度范围内均会出现增强，增强出现的时间与磁暴相位基本同步。

图10给出了2003年11月17—26日期间OI 135.6 nm气辉辐射强度的纬度–高度分布情况，其中网格点纬度以5°为间隔、高度以10 km为间隔。纬

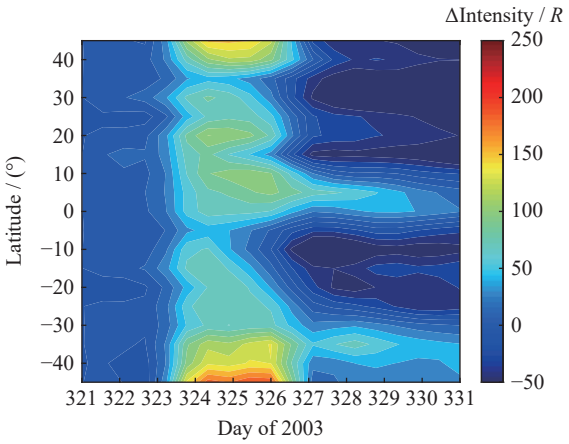


图9 不同纬度OI 135.6 nm气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在2003年11月17—26日的变化情况

Fig. 9 Variation of OI 135.6 nm airglow emission intensity at different latitudes compared to the magnetostatic period from 17 to 26 November in 2003

度超过50°的区域由于极光污染被排除在外。与图4类似，从图10同样可以看出OI 135.6 nm气辉辐射磁静期主要分布在海拔330 km、赤道至20°N左右的区域。在磁暴来临前，除上述区域之外，其他地区基本上不存在明显的OI 135.6 nm气辉辐射。在磁暴初相，只有30°S的200 km和450 km处的气辉辐射强度出现了小范围、小幅度增强，与磁静期相比增幅不超过40%，其他区域的辐射强度几乎没有发生变化。11月20日（第324日），磁暴进入主相，330 km附近范围内的气辉辐射强度明显增强，与磁静期相比增加了150%左右，并且增强扩散至高纬度地区。在其他高度上辐射强度也发生了增强，例如在30°—10°S范围内，从150～450 km均有可见的增强现象出现，此外在低热层高度上30°—50°N范围内出现了一个显著的增强现象，该区域内的辐射强度在磁静期至初相期间都几乎为0，但在主相当天即迅速增至1000 *R* 以上，与330 km附近的峰值几乎一致。在11月21日（第325日），磁暴进入恢复相，随着 *Dst* 指数的迅速回升，各纬度上330 km附近的气辉辐射强度逐渐减弱至磁静期水平，而主相时明显增强的北半球中高纬地区低热层附近区域内的辐射强度虽然已经减弱但尚未消失，部分区域相较于磁静期仍有将近30%的增强。自11月22日（第326日）后，随着 *Dst* 指数逐渐回升至正常范围，各个高度上的气辉辐射强度已基本上恢复至磁静期同等水平，几乎不存在明显的增强或减弱现象，赤道至中低纬地区330 km附近的辐射强度不再向高纬度地区扩散，北半球中高纬地区低热层附近区域内的辐射强度基本消失。

图11给出了不同高度OI 135.6 nm气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在2003年11月17—26日的变化情况，其中对每一日同一纬度范围内的辐射强度进行了平均，磁静期的气辉辐射强度以磁暴周期之前3日（即2003年11月14—16日）的气辉辐射强度平均值来表示。由图11可知，在磁暴期间，除了300～400 km范围内的气辉辐射强度存在显著的增强现象之外，在100～150 km范围内（低热层）也会产生较为明显的增强现象，增幅接近300～400 km范围内的增强，并且相对于磁暴主相，该高度上的增强现象出现的时间几乎不存在提前或滞后效应，仅会在主相当天随着 *Dst* 指数的迅速增加而产生，在恢复相首

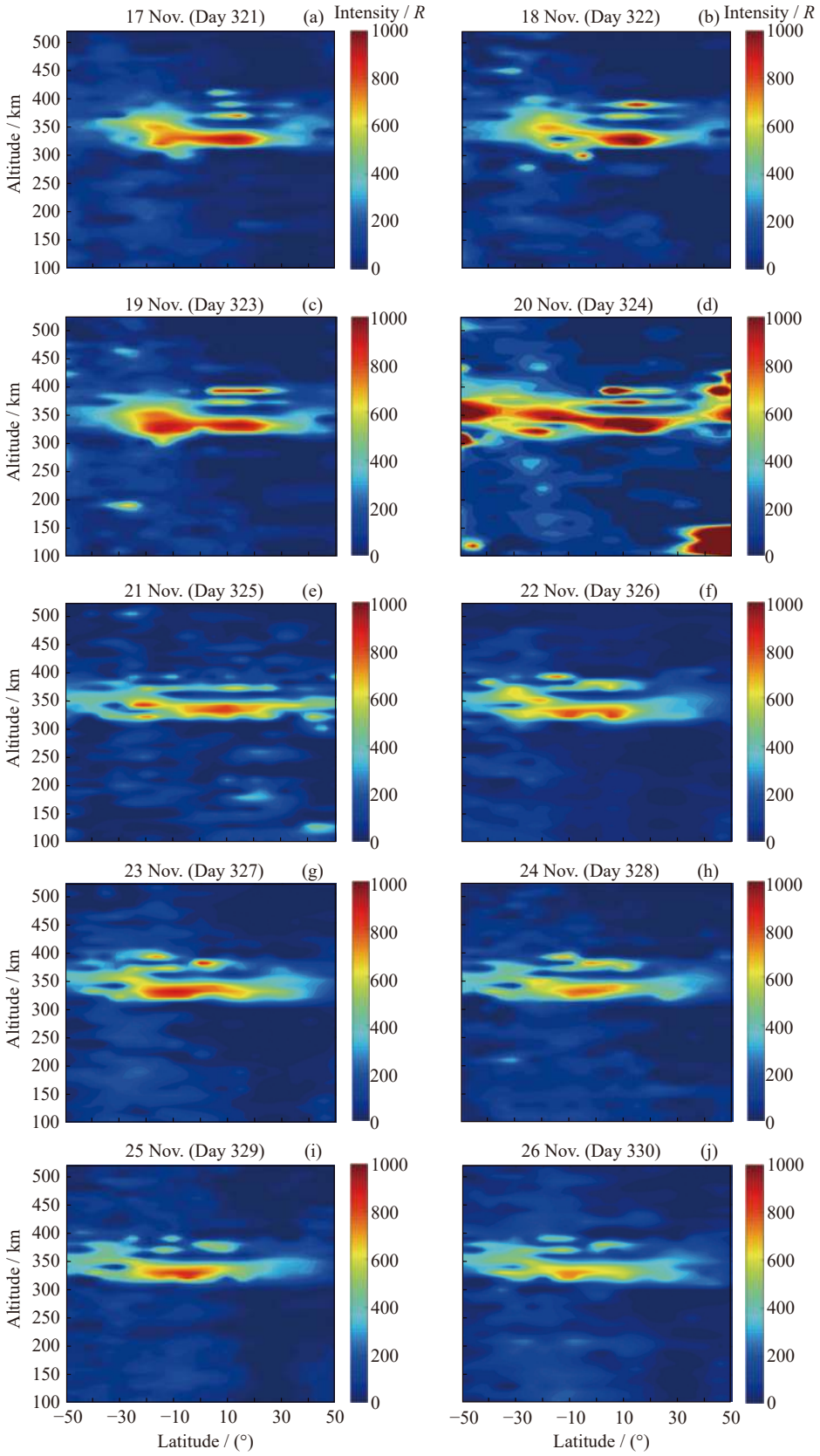


图 10　2003 年 11 月 17—26 日 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的纬度–高度分布情况

Fig. 10　Latitude-altitude distributions of OI 135.6 nm airglow emission intensity from 17 to 26 November in 2003

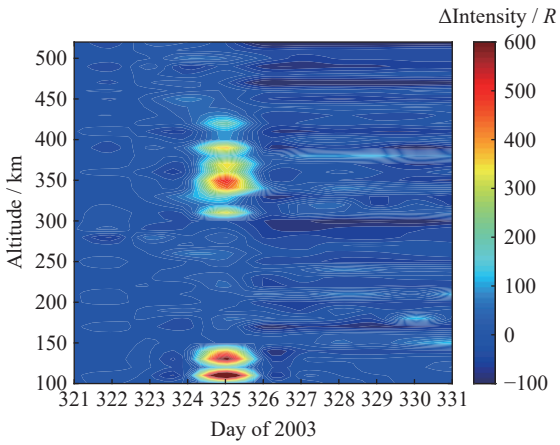


图 11 不同高度 OI 135.6 nm 气辉辐射强度相较于磁静期的变化量在 2003 年 11 月 17－26 日的变化情况

Fig. 11 Variation of OI 135.6 nm airglow emission intensity at different altitudes compared to the magnetostatic period from 17 to 26 November in 2003

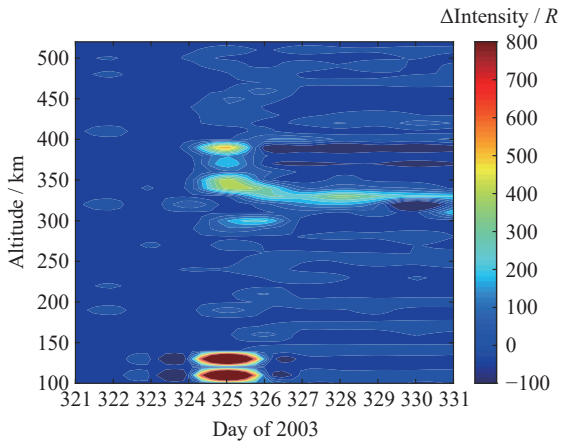


图 12 不同高度 30°－50°N 范围内 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的平均值相较于磁静期的变化量在 2003 年 11 月 17－26 日的变化情况

Fig. 12 Variation of the mean OI 135.6 nm airglow emission intensity in the range 30°N to 50°N at different altitudes compared to the magnetostatic period from 17 to 26 November in 2003

日即迅速消失。气辉辐射强度在其他高度上基本不存在增强或减弱现象。

为了更加清晰地展现磁暴期间 30°－50°N 的低热层附近区域内 OI 135.6 nm 气辉辐射强度的增强现象，根据图 10 所示，对每一日 30°－50°N 范围内的气辉辐射强度进行了平均，将其相较于磁静期的变化量的高度分布在 2003 年 11 月 17－26 日期间的变化情况在图 12 中单独给出，其中磁静期的气辉辐射强度以磁暴周期之前 3 日（即 2003 年 11 月 14－16 日）的气辉辐射强度平均值来表示。由图 12 可知，30°－50°N 的低热层附近区域内的气辉辐射强度在磁暴主相当天出现明显的增强现象，增强出现的范围几乎包括了从 100～150 km 的所有高度，且增幅甚至高于在同纬度范围 300～400 km 区域内的增强，其出现时间与磁暴主相来临的时间相比同样不存在明显的提前或滞后。针对低热层高度的气辉辐射强度在磁暴主相时突然出现的大幅度增强现象，热层–电离层甚至更高区域内的垂直风输运过程可能是其原因之一。综上所述，对比两次事件，可以发现 OI 135.6 nm 气辉辐射强度平时主要分布在海拔 330 km、赤道至 20°N 左右的区域，在磁暴期间会随着 *Dst* 指数的降低而增强，与 *Dst* 指数呈现近似的负相关关系，并且该高度上辐射强度的增强会从中低纬地区一直扩散至高纬度地区，增强出现的时间与磁暴相位基本同步。除此之外，还发现在低热层高度部分纬度上的辐射强度会在磁暴主相时突然出现大幅度的增强，并随着磁暴进入恢复相而迅速消失。

3 结论

利用由 TIMED 卫星上搭载的 GUVI 探测器观测的 L1C 级 OI 135.6 nm 临边观测数据，研究了 2003 年 10 月和 11 月两次持续时间不同的特大磁暴期间气辉辐射强度的经纬度分布及纬度–高度分布的变化情况。结果表明，OI 135.6 nm 气辉辐射强度在磁暴期间会随着 *Dst* 指数的降低而增强，与磁暴的剧烈程度呈现准正相关关系，并且增强会由磁静期的磁赤道两侧附近向高纬地区延伸至南北半球 50°附近，在本文所讨论的范围内各区域的增幅基本保持在 80% 以上，最大可超过 200%，增强出现的时间与磁暴相位基本同步，此外增强也会由磁静期的 300～400 km（即电离层 F_2 层高度）扩散至其他高度，特别是在 100～200 km（即低热层高度）的部分纬度上会出现相比其他高度更为显著的增强，该区域内的增幅超过 300%。结果还显示，气辉辐射强度的经纬度分布在磁暴期间的变化情况会呈现出一定的南北不对称性和纬向不对称性。

随着行星际磁场 IMF（Interplanetary Magne-

tic Field) B_z 分量的快速南向翻转和高纬对流的突然性增强, 极光电急流活动的快速发展标志着亚暴或磁暴的发生, 此时高纬电场会迅速穿透至中低纬地区形成快速穿透电场。在磁暴期间, 由于电场和电导率的增强, 极光电急流活动增强并导致高纬电离层–热层系统的加热和膨胀, 增强的电流通过碰撞作用将能量传输给中性成分, 因此高能中性原子沉降是针对磁暴期间远紫外气辉辐射增强的其中一个被广为接受的源, 这种增强也被称为中性粒子极光, 但除此之外增强也存在其他原因, 例如电离层 TEC 增强和相互中和发射。此外, 磁暴期间能量注入导致的极光加热作用会造成热层风增强或驱动从极区吹向赤道的扰动风场, 从而改变宁静水平下热层环流模式, 并形成持续时间较久的扰动风场发电机电场, 因此气辉辐射在低热层高度部分纬度上出现的与磁暴主相同步的显著增强, 可能与热层–电离层甚至更高区域内环流模式的改变有关。

致谢 本文所用数据部分来源: *Dst* 指数数据网址为 https://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/wdc/Sec3.html, OI 135.6 nm 气辉辐射强度、经度、纬度、高度数据网址为 http://guvitimed.jhuapl.edu/data_fetch_l1c_imaging_v013。

参考文献

[1] GAO Hong, XU Jiyao, CHEN Guangming, *et al*. Global distributions of OH and O_2 (1.27 μm) nightglow emissions observed by TIMED satellite[J]. Science China Technological Sciences, 2011, **54**(2): 447-456 (高红, 徐寄遥, 陈光明, 等. TIMED卫星测量得到的OH和O_2(1.27 μm)夜气辉全球分布特征[J]. 中国科学: 技术科学, 2011, **41**(3): 374-384)

[2] MEIER R R. Ultraviolet spectroscopy and remote sensing of the upper atmosphere[J]. *Space Science Reviews*, 1991, **58**(1): 1-185

[3] WANG Yongmei, FU Liping, WANG Yingjian. Review of space-based FUV aurora/airglow observations[J]. *Progress in Geophysics*, 2008, **23**(5): 1474-1479 (王咏梅, 付利平, 王英鉴. 星载远紫外极光/气辉探测发展综述[J]. 地球物理学进展, 2008, **23**(5): 1474-1479)

[4] KUPPERIAN JR J E, BYRAM E T, CHUBB T A, *et al*. Far ultraviolet radiation in the night sky[J]. *Planetary and Space Science*, 1959, **1**(1): 3-6

[5] WANG Daxin. Research on Radiation Characteristics and Inversion Algorithm of Vacuum Ultraviolet Ionospheric Optical Remote Sensing[D]. University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences), 2020 (王大鑫. 真空紫外电离层光学遥感辐射特性和反演算法研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020)

[6] DYMOND K F. Remote sensing of nighttime F region peak height and peak density using ultraviolet line ratios[J]. *Radio Science*, 2009, **44**(1): RS0A28

[7] STEPHAN A W, KORPELA E J, SIRK M M, *et al*. Daytime ionosphere retrieval algorithm for the ionospheric connection explorer (ICON)[J]. *Space Science Reviews*, 2017, **212**(1/2): 645-654

[8] ZHANG S P, SHEPHERD G G. Neutral winds in the lower thermosphere observed by WINDII during the April 4–5th, 1993 storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(13): 1855-1858

[9] SAHAI Y, SHIOKAWA K, OTSUKA Y, *et al*. Imaging observations of midlatitude ionospheric disturbances during the geomagnetic storm of February 12, 2000[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A11): 24481-24492

[10] LEONOVICH L A, MIKHALEV A V, LEONOVICH V A. The 557.7 and 630-nm atomic oxygen midlatitude airglow variations associated with geomagnetic activity[J]. *Atmospheric and Oceanic Optics*, 2011, **24**(4): 396-401

[11] MUKHERJEE G K. Airglow and other F-layer variations in the Indian sector during the geomagnetic storm of February 5-7, 2000[J]. *Earth, Planets and Space*, 2006, **58**(5): 623-632

[12] GHODPAGE R N, PATIL P T, GURAV O B, *et al*. Ionospheric response to major storm of 17 th March 2015 using multi-instrument data over low latitude station Kolhapur (16.8°N, 74.2°E, 10.6°dip. Lat.)[J]. *Advances in Space Research*, 2018, **62**(3): 624-637

[13] KARAN D K, PALLAMRAJU D. Effect of geomagnetic storms on the daytime low-latitude thermospheric wave dynamics[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **170**: 35-47

[14] ISHIMOTO M, ROMICK G J, PAXTON L J, *et al*. Night UV spectra (1100-2900Å) at mid and low latitude during a magnetic storm[J]. *Geophysical Research Letters*, 1992, **19**(8): 813-816

[15] TINSLEY B A, ROHRBAUGH R P, ISHIMOTO M, *et al*. Middle- and low-latitude emissions from energetic neutral atom precipitation seen from ATLAS 1 under quiet magnetic conditions[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1994, **99**(A10): 19577-19584

[16] STEPHAN A W, CHAKRABARTI S, COTTON D M. Evidence of ENA precipitation in the EUV dayglow[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, **27**(18): 2865-2868

[17] DEMAJISTRE R, BRANDT P C, IMMEL T J, *et al*. Storm-time enhancement of mid-latitude ultraviolet emissions due to energetic neutral atom precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, **32**(15): L15105

[18] ZHANG Y, PAXTON L J, KOZYRA J U, *et al*. Nightside thermospheric FUV emissions due to energetic neutral atom precipitation during magnetic superstorms[J]. *Jour-*

nal of Geophysical Research: Space Physics, 2006, **111**(A9): A09307

[19] WANG Daxin, FU Liping, JIANG Fang, *et al*. Inversion of ionospheric O/N_2 by using FY-3 D ionospheric photometer data[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2021, **41**(4): 1004-1010 (王大鑫, 付利平, 江芳, 等. 利用FY-3(D)卫星电离层光度计数据反演电离层O/N_2[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, **41**(4): 1004-1010)

[20] JIANG F, MAO T, ZHANG X X, *et al*. Nightside 135.6 nm emission enhancements of mid/low latitudes during geomagnetic storms as observed by the ionosphere Photo Meter (IPM) on the Chinese meteorological satellite FY-3 D[J]. *Advances in Space Research*, 2023, **71**(6): 2781-2798

[21] ZHANG Y L, PAXTON L J, HUANG C S, *et al*. FUV observations of variations in thermospheric composition and topside ionospheric density during the November 2004 magnetic superstorm[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2022, **228**: 105832

[22] WANG Jing. Research on Inversion Techniques for Key Ionospheric Parameters in Far Ultraviolet Remote Sensing[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015 (王静. 远紫外遥感电离层关键参量的反演技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015)

[23] HUFFMAN R E. Atmospheric Ultraviolet Remote Sensing[M]. Boston: Academic Press, 1992

[24] GUO Bing. Study on Ionospheric Spread-F at Low- and Mid-latitude and Wavelike Structure in Equatorial Ionization Anomaly Crests[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (National Space Science Center, the Chinese Academy of Sciences), 2020 (郭兵. 电离层扩展F不规则体及赤道异常驼峰区波状结构的研究[D]. 北京: 中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心), 2020)

[25] CHRISTENSEN A B, WALTERSCHEID R L, ROSS M N, *et al*. Global Ultraviolet Imager (GUVI) for the NASA Thermosphere-Ionsphere-Mesosphere Energetics and Dynamics (TIMED) mission[J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 1994, **2266**: 451-466

[26] PEACOCK K. Spectrographs in space[C]//Proceedings of the SPIE 3116, Small Spacecraft, Space Environments, and Instrumentation Technologies. San Diego: SPIE, 1997: 57-68

[27] JIANG F, MAO T, ZHANG X X, *et al*. Observation of thermosphere and ionosphere using the ionosphere Photo-Meter (IPM) on the Chinese meteorological satellite FY-3 D[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(9): 2151-2167

[28] ZENG Z, BURNS A, WANG W B, *et al*. Ionospheric annual asymmetry observed by the COSMIC radio occultation measurements and simulated by the TIEGCM[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A7): A07305