0254-6124/2025/45(4)-0950-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

JIANG Fang, MAO Tian, FU Liping, WANG Jinsong, HU Xiuqing, ZHANG Xiaoxin, WANG Yungang, JIA Nan, WANG Tianfang. Study of FY-3D Ionospheric Photometer (IPM) Response to the Extreme Magnetic Storm on 11 May 2024 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, **45**(4): 950–959. CSTR:32142.14.cjss.2024–0079. DOI:10.11728/cjss2025.04.2024–0079

FY-3D 电离层光度计 IPM 对 2024 年 5 月 11 日特大磁暴的响应研究*

江 芳[1,2,3] 毛 田[4] 付利平[1,2,3]
王劲松[4] 胡秀清[4] 张效信[4] 王云岗[4]
贾 楠[1,2,3] 王天放[1,2,3]

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

3(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

4(中国气象局国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 远紫外气辉探测仪小型电离层光度计 IPM 随 FY-3D 卫星于 2017 年 11 月 15 日发射升空, 通过对地测量夜间 O^+和电子辐射复合产生的 135.6 nm 辉光辐射、白天光电子碰撞激发产生的 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 辉光辐射, 可以反演得到夜间峰值电子密度 N_mF_2、白天大气氧原子与氮气分子的柱密度比 O/N_2 等重要参数. 本文对 2024 年 5 月 11 日特大磁暴事件中 IPM 的数据响应进行分析, 对白天数据的研究结果表明, 本次磁暴事件过程中, O/N_2 在各个纬度较磁平静日均是减小的, 可用于解释 IGS (International GNESS Service) TEC 在各纬度大多呈现的负暴效应. 对夜间数据研究发现,磁暴日夜间 135.6 nm 辐射强度相对磁平静日呈现各纬度的增大, 增大幅度可达 3 个数量级, 且从磁暴主相开始一直持续到恢复相, 而对应的 TEC 数据并没有如此大的增强; 另外, 测量 190 nm 以上波长辐射贡献的夜间杂散光通道在磁暴日也相应地增强, 而这一波段的辐射机制与电离层并无直接关联.

关键词 *Dst* 指数, 135.6 nm 辉光辐射, N_2 LBH 带辉光辐射, O/N_2

中图分类号 P351

Study of FY-3D Ionospheric Photometer (IPM) Response to the Extreme Magnetic Storm on 11 May 2024

JIANG Fang[1,2,3] MAO Tian[4] FU Liping[1,2,3]

* 国家重点研发计划项目 (2022YFF0503901), 国家自然科学基金项目 (41874187, 42174226) 和低轨空间等离子体环境模拟装置关键部件中意合作研究项目 (Z221100002722006) 共同资助

2024-06-18 收到原稿, 2024-10-30 收到修定稿

©The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

WANG Jinsong[4]　HU Xiuqing[4]　ZHANG Xiaoxin[4]
WANG Yungang[4]　JIA Nan[1,2,3]　WANG Tianfang[1,2,3]

1(*National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration*, *Beijing* 100190)

3(*Key Laboratory of Environmental Space Situation Awareness Technology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

4(*National Satellite Meteorological Center*, *China Meteorological Administration*, *Beijing* 100081)

Abstract　With the launch of the FY-3D satellite on 15 November 2017, the far ultraviolet Ionospheric Photometer (IPM) on board enables measurements of nighttime 135.6 nm airglow emissions generated by the recombination of O^+ ions and electrons, as well as daytime emissions from OI 135.6 nm and N_2 LBH due to photoelectron impact on atomic oxygen and molecular nitrogen. These measurements can obtain the key parameters such as nighttime peak electron density N_mF_2 and daytime O/N_2. The paper analyzes the response of IPM data during the extreme magnetic storm event on 11 May 2024. The study results of daytime data indicate that during the event, the O/N_2 decreased at all latitudes compared to geomagnetically quiet days. This finding can be used to explain the negative storm effects observed in IGS TEC. The study of nighttime data reveals that during magnetic storms, the intensity of 135.6 nm increases significantly across all latitudes compared to geomagnetically quiet days, with an increase by up to three orders of magnitude. The enhancement persists from the storm main phase through the recovery phase. However, corresponding TEC data does not show such a pronounced increase. Furthermore, the stray light channel measuring radiation contribution above 190 nm wavelength also exhibits a significant increase during magnetic storm days. This further indicates that the enhancement of nighttime 135.6 nm radiation is not solely derived from ionospheric contributions.

Key words　*Dst* index, 135.6 nm airglow emissions, N_2 LBH airglow emission, O/N_2

0　引言

太阳风暴会对地球的磁层产生很大影响, 引发地磁暴. 地磁暴以磁层–电离层–热层系统内发生的多种光化学和电动力学现象为特征, 并严重影响系统内的质量和能量传输, 改变电离层结构[1]. 特别是, 地磁暴对电离层的响应表现为与宁静期间电子密度相比的增加或减少, 分别称为正电离层风暴或负电离层风暴[2]. 地磁暴期间极区粒子沉降和焦耳加热引起中性大气向上流动, 使得上部热层大气中性密度增加, 极区热层内的过剩压力改变了风向模式, 并增强了从极区向中低纬度的水平空气传输. 由于原子氧 (O, 轻气体) 相比分子氮 (N_2, 重气体) 能够更快地被输送并远离加热区域[3,4], 因此, 热层中性物质的变化可以通过 O/N_2 来跟踪[5]. 由于电离层电子的产生率与氧原子呈正相关, 复合率与分子氮呈正相关, 所以当 O/N_2 下降时, 电离层电子浓度下降, 从而产生负暴. 对于正电离层暴, 除了与热层中性物质的变化相关, 还与 F 层的垂直漂移上升、等离子体层的向下等离子体通量等有关, 物理机制更为复杂[6–8].

电离层光度计 IPM 是一种小型、高灵敏度的电离层辉光遥感仪器, 搭载在中国新一代极轨气象卫星 FY-3D 上, 其采用高聚光能力的离轴抛物面镜并结合光子计数式光电倍增管, 可以实现对地约 30 km 空间分辨率的弱气辉光辐射测量. IPM 测量的夜间 135.6 nm 辉光辐射主要源自 O^+与电子的辐射复合, 由于 O^+是 F 层的主要成分, 根据电中性原理, O^+密度近似与电子密度相等, 故 135.6 nm 辐射强度与电子密度的平方有很好的相关性[9,10], 可以直接用于诊断电离层状态. 在白天, 135.6 nm 辉光辐射主要源自光电子与大气氧原子的碰撞激发产生, 而 N_2 LBH 主要源自光电子与氮气分子的碰撞激发, 因而两个波段的辉光辐射联合可以反演得到与电离层 F 层电子密度密切相关的热层参数, 即 O/N_2[11,12].

本文对 2024 年 5 月特大磁暴期间 IPM 的数据响应特性进行分析, 并结合地基 IGS TEC 数据进行

比对, 研究表明 IPM 探测的 O/N_2 在磁暴日的降低与 IGS TEC 数据呈现的负暴效应相一致, 夜间数据的分析及比对结果揭示 135.6 nm 波段在磁暴主相开始一直到恢复相阶段会呈现各纬度的辐射增强, 而这种增强可能并非源自电离层的贡献. 中高层大气及电离层对地磁暴的响应通过一系列复杂的物理过程来实现, 本文的分析旨在为 IPM 探测数据能更好地被开发及应用于地磁暴对大气扰动的研究.

1 数据源

1.1 IPM 载荷及卫星

FY-3D 是风云三号极轨气象卫星系列的第四颗卫星, 其以近极地太阳同步轨道绕地球运行, 轨道高度约 831 km, 倾角为 97.75°. 卫星的升交点在 14:00 LT 左右, 轨道周期为 100 min 左右, 卫星每天完成 14 次轨道飞行, 使 IPM 以天底方向 30 km 的空间分辨率进行连续全球辉光探测.

电离层光度计 IPM 是一种结构紧凑且高灵敏度的遥感仪器. 为了实现必要的高灵敏度, 采用高聚光能力的离轴抛物面镜并结合光子计数式光电倍增管, 可以实现对电离层弱气辉辐射的测量. IPM 的探测器由滨松微型日盲光电倍增管组成, 带有一个氟化镁窗口和一个碘化铯阴极, 该光电倍增管位于离轴抛物面望远镜的主焦点. 为了实现低功耗和排除短于 130.4 nm 波段辐射的干扰, 采用真空紫外级的 BaF_2 滤波片. 在光路中加入步进电机驱动的滤光片轮, 置于 BaF_2 滤波片和光电倍增管之间, 以满足不同探测波段的转换. 滤光片轮上有 6 个位置, 如图 1 所示, 对应于 6 个探测通道. 通道信息如表 1 所示.

BaF_2 滤波片与微型日盲光电倍增管组合可用于夜间 135.6 nm 气辉测量. 由于白天 135.6 nm 和 N_2 LBH 气辉辐射比夜间 135.6 nm 气辉强度高出几个量级, 两个基于 $(AL/MgF_2)_3$ 多层涂层的窄带滤光片 (透射率约 10%) 用于白天测量通道. 一个专门的全口径石英滤光片用于测量夜间长波杂散光 (长于 190 nm), 而石英滤光片与 N_2 LBH 滤光片组合将提供白天的带外杂散光背景. 根据图 1 所示的滤光片轮上每个通道的位置, 滤光片轮在白天工作模式下以大约 12 s 的周期按 2, 3, 2, 3, 4, 2, 3, 2, 3, 4, 1 位置顺序旋转. 在夜间模式下, 滤光片轮在 8 s 内完成 8 次通道 5 的测量. 然后用 0.5 s 转到通道 6 位置, 并停留约 1 s 完成 1 次测量. 接下来用 1 s 移动到通道 1, 并停留 1 s 完成 1 次测量. 然后用 1.5 s 返回通道 5 并开始下一次循环. 夜间模式或者白天模式时, 信号通道计数测量值需减去对应测量时间点最近的带外杂散光通道计数测量值来消除杂散光的影响[13,14].

1.2 其他数据

为研究 IPM 数据在磁暴期间的响应特性, 这里结合地基 TEC 的数据分析 IPM 数据在磁暴期间的响应, TEC 数据来自 IGS TEC 网站*. 此外, 地磁活动指数 *Dst* 来自 WDC 网站**.

2 结果

2.1 暴日 O/N_2 与 IGS TEC 的降低

电离层电子密度主要集中在 F 层. O^+是电离层 F 层的主要离子成分, 其连续方程如下[15]:

$$\frac{\partial[O^+]}{\partial t} = q[O] - \beta[O^+]\cdot M - \nabla\cdot(V[O^+]). \quad (1)$$

其中, $[O^+]$表示O^+密度, t为时间, q为太阳 EUV 辐射或者粒子沉降产生的电离率, $[O]$为中性原子密度, β为离子复合导致的损失率, M为分子O_2或者N_2的数密度, 最后一项包含所有传输过程.

如果忽略输运过程 (例如中性风) 的影响, 式 (1) 可以简化为

$$[O^+] = \frac{q[O]}{\beta M}. \quad (2)$$

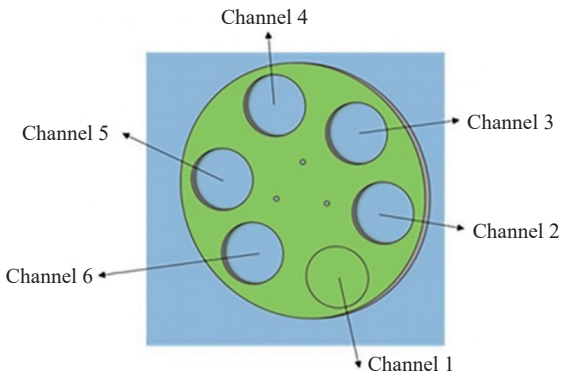

图 1 滤光片轮的 6 个通道

Fig. 1 Six functional channels of the filter wheel

* http://ftp.aiub.unibe.ch/CODE/

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

表 1　滤光片轮各通道信息

Table 1　Channel information of the filter wheel

通道号	滤光片	测量波段	工作模式
1	挡板	暗计数	白天/夜间
2	带通滤光片(中心波长: 135.6 nm)	135.6 nm	白天
3	带通滤光片(中心波长: 160 nm)	LBH	白天
4	滤光片(190 nm以上波长)	带外光	白天
5	孔	135.6 nm	夜间
6	石英	带外光	夜间

假设 q和 β是常数, $([\mathrm{O}]/M)$可以简化为 $([\mathrm{O}]/[\mathrm{N_2}])$, 因为$\mathrm{N_2}$密度远高于$\mathrm{O_2}$密度. 事实上, q会随着不同纬度上太阳天顶角的变化而改变. β会随着不同纬度上的中性温度和离子温度变化而变化.

从式 (1) 和式 (2) 可见, 白天电离层 F 层的$\mathrm{O^+}$与氧原子含量成正比, 与$\mathrm{N_2}$含量成反比, 由于电离层近似电中性, 故$\mathrm{O^+}$密度近似等于电子密度.

从上述内容可知, $\mathrm{O/N_2}$ 与电离层电子密度有一定的相关性, 是电离层–热层研究中非常重要的一个参量. 利用日气辉 OI 135.6 nm 和 $\mathrm{N_2}$ LBH 来反演白天 $\mathrm{O/N_2}$ 的方法首先是由 Strickland 等[16] 提出的, 他们证明了垂直柱密度比 $\mathrm{O/N_2}$ 与天底测量的 OI 135.6 nm 和 $\mathrm{N_2}$ LBH 的强度比成正比, 并指出当 $\mathrm{N_2}$ 的参考深度为 10^{17} $\mathrm{cm^{-2}}$ 时, 两个波段强度之比与 $\mathrm{O/N_2}$ 之间存在唯一的对应关系, 且不确定度最小 (小于 2%). IPM 反演 $\mathrm{O/N_2}$ 的算法亦是基于该理论, 关于算法的详细介绍以及正确性评估已有相关文章发表[13, 17]. 为了建立 OI 135.6 nm 和 $\mathrm{N_2}$ LBH 的强度比与 $\mathrm{O/N_2}$ 之间系数, 采用 AURIC 模型[13, 14] 作为前向模型. 根据实际的日期设定太阳活动指数 $F_{10.7}$ 值 (对于给定的一段时间, 通常为 1～2 d, 因为短时间内太阳 $F_{10.7}$ 指数不会发生显著变化, 因此 $F_{10.7}$ 指数是固定的), 再固定太阳天顶角和卫星观测天底角, 然后分别用 4 个 Ap 值 (32, 42, 51, 164) 来推导 AURIC 模型中嵌套的 MSIS 模型. 每一个 Ap 值时, 通过调整模式中 O 密度标定因子来实现 O 密度剖面的缩放[13]. 每次 AURIC 运行产生一个波长范围在 105.0～900.0 nm, 波长分辨率为 0.1 nm 的光谱. 将该光谱与 IPM 响应曲线 (见图 2) 卷积, 以获得模拟的 135.6 nm 和 $\mathrm{N_2}$ LBH 通道的强度 (以计数值 Counts 表示). 然后再由各通道灵敏度得到对应的辐射强度 (Ra 为单位). 图 3 显示了 $\mathrm{N_2}$ 柱密度水平为 10^{17} $\mathrm{cm^{-2}}$、太阳天顶角 (SZA) 为 0°时模拟 IPM 135.6 nm 和 $\mathrm{N_2}$ LBH 辐射强度的比值与 $\mathrm{O/N_2}$ 的相关性曲线. 图 3 中的实线为线性拟合曲线, 其表示的函数如下:

$$\frac{I_{135.6}}{I_{\mathrm{LBH}}} = 0.08594 + 1.13274 \times [\mathrm{O/N_2}].$$

按照上述方法改变太阳天顶角, 计算不同太阳天顶角下 IPM 的 135.6 nm 和 $\mathrm{N_2}$ LBH 辐射强度比值 $I_{135.6}/I_{\mathrm{LBH}}$与 $\mathrm{O/N_2}$ 的相关性曲线, 于是建立了 $\mathrm{O/N_2}$ 与$I_{135.6}/I_{\mathrm{LBH}}$以及太阳天顶角的二维阵列. 根据探测得到的两个通道辐射强度比值以及太阳天顶角, 通过二维插值可得到 $\mathrm{O/N_2}$.

图 4 给出了用 IPM 数据反演得到的 2024 年 5 月 8－12 日的 $\mathrm{O/N_2}$ 全球分布. 由图 4 可见, 11 日 $\mathrm{O/N_2}$ 在全球大范围明显减小, 持续到 12 日开始有所恢复. 对应的, 图 5 给出了根据 IPM 轨道时间和位置重新采样插值后 IGS TEC 的全球分布. 如图 5 所示, 11 日全球 TEC 相比磁平静日有明显负暴效应, 12 日有所恢复. 由此可见, 当 $\mathrm{O/N_2}$ 下降时, 电离层 TEC 也下降, 产生负暴效应. 进一步的, 图 6 分别给出了 2024 年 5 月 11 日各纬度区间的 $\mathrm{O/N_2}$ 及 TEC 均值相对磁平静日对应纬度均值的变化. 由图 6 可见, 北半球基本各个纬度区间暴日 $\mathrm{O/N_2}$ 是减小的, 相应地, TEC 也基本呈负暴; 南半球大多数情况下 $\mathrm{O/N_2}$ 是减小的, TEC 也基本呈负暴, 当某些纬度 $\mathrm{O/N_2}$ 增大时, TEC 也相应增大. 总体而言, 图 6 所示暴日的 $\mathrm{O/N_2}$ 与 TEC 在各个纬度区间相对磁平静日的变化趋势是大体一致的.

2.2　暴日夜间辐射强度增强

对 2024 年 5 月 11 日磁暴前后夜间 IPM 数据进行分析发现, 磁暴发生时, 夜间 135.6 nm 通道的辐射

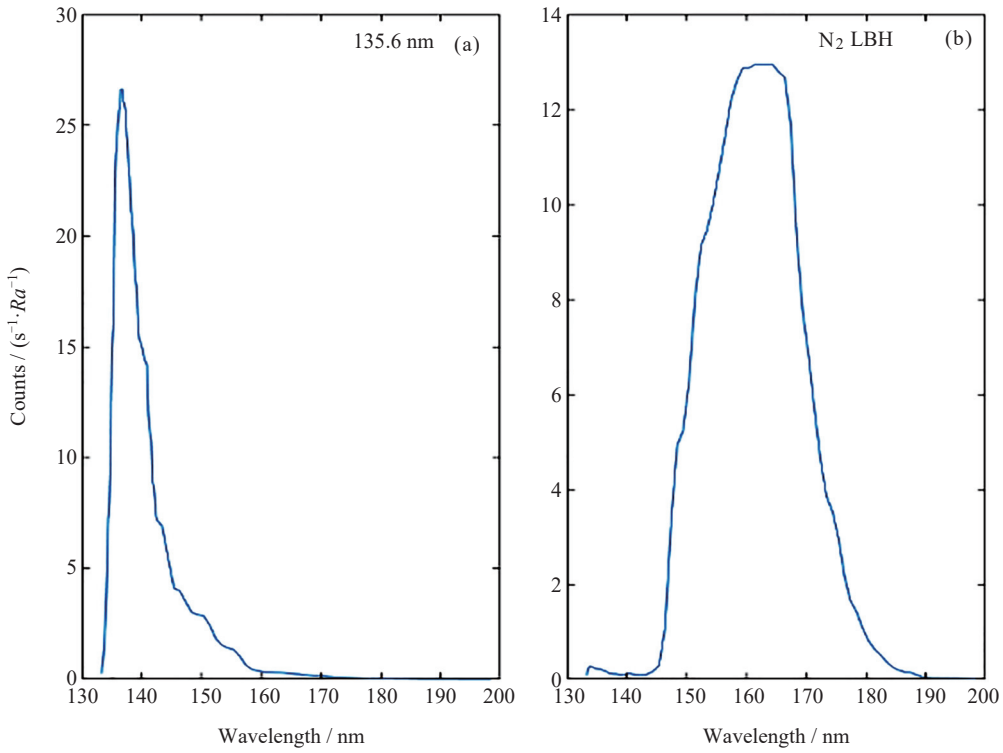

图 2 IPM 在 135.6 nm 和 N_2 LBH 通道的响应曲线

Fig. 2 Response curves of 135.6 nm channel and N_2 LBH channel

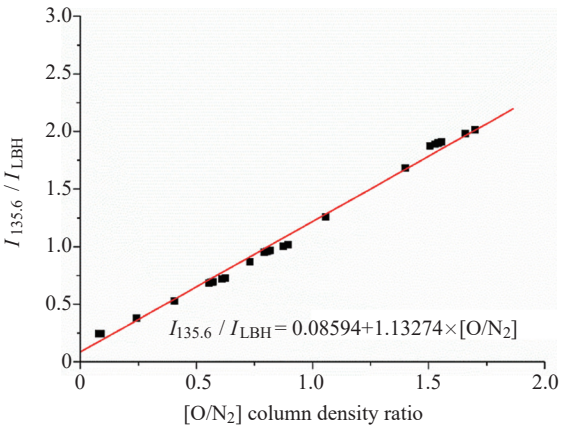

图 3 N_2 柱密度水平为 10^{17} cm^{-2}、太阳天顶角为 0°时模拟 IPM 135.6 nm 和 N_2 LBH 辐射强度的比值与 [O/N_2] 的相关性曲线

Fig. 3 IPM 135.6 nm/N_2 LBH intensity ratios versus the [O/N_2]column density ratios reference at a N_2 column density level of 10^{17} cm^{-2} for the zero degree SZA (Solar Zenith Angle)

强度会发生剧烈扰动. 图 7(b) 给出了 5 月 11 日前后 IPM 135.6 nm 辐射强度值按照世界时排列分布. 结合图 7(a) 中 *Dst* 指数随时间的分布可以看出, 各纬度的 135.6 nm 辐射强度在磁暴期间有很明显的增强: 增强出现在磁暴的主相阶段并持续到恢复相. 如前文所述, IPM 为了抑制带外杂散光, 设置了专门测量 190 nm 以上长波杂散光的通道. 夜间杂散光通道的计数值也按照世界时排列分布如图 7(c) 所示. 图 7(c) 显示的杂散光增强与图 7(b) 在时间和空间上均有较好的一致性. 即 IPM 在磁暴主相及恢复相阶段的辐射增强, 并不仅限于 135.6 nm, 在 190 nm 以上的波段也有增强. 需要说明的是, 图 7(c) 在磁平静日或辐射增强不明显时看到的明亮区域 (见图中黑色箭头所标处) 为南大西洋异常区, 而图 7(b) 所示的信号通道并未明显地受南大西洋异常区影响, 这是因为信号通道的辐射强度是根据该通道的计数测量值减去对应测量时间点最近的杂散光通道计数测量值后再根据定标系数得到的, 故南大西洋异常区对信号通道的影响几乎被扣除.

另外, 为了展示磁暴期间电离层的扰动情况, 图 7(d) 中还给出了对应 IPM 轨道的 TEC 值. 由图可见, 磁暴期间, TEC 在部分区域有正暴分布, 也有部分区域呈负暴分布. 总言之, TEC 值并未出现类似图 7(b) 所示全纬度的大幅度增强.

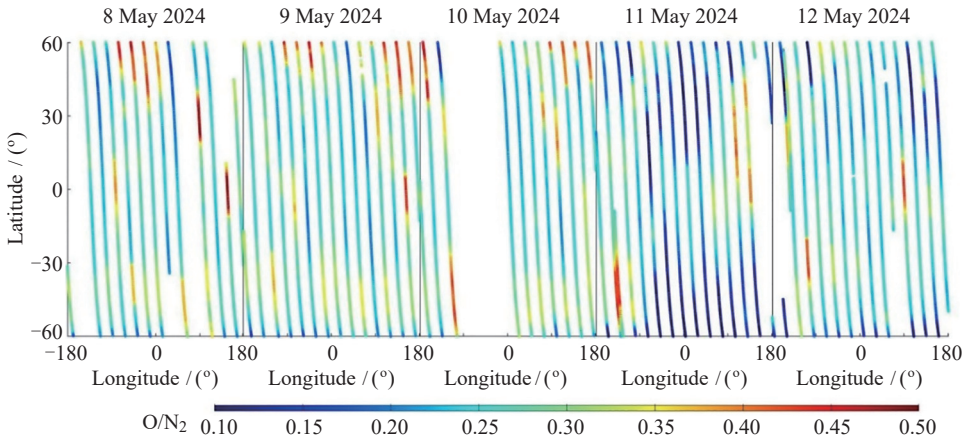

图 4　IPM 反演的 O/N_2 在 2024 年 5 月 11 日前后的全球分布

Fig. 4　O/N_2 by IPM global distribution around 11 May 2024

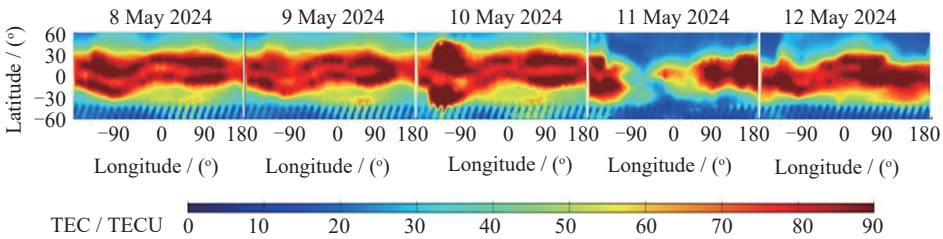

图 5　IGS TEC 在 2024 年 5 月 11 日前后的全球分布

Fig. 5　IGS TEC global distribution around 11 May 2024

由于夜间 135.6 nm 气辉辐射强度可以表征电离层电子含量, 根据探测原理, 天底测量的夜间 135.6 nm 气辉辐射强度与卫星高度以下的 TEC 平方近似呈正比. 虽然 IGS TEC 还包含了 FY-3D 卫星轨道高度以上的 TEC 的贡献, 但是这部分比例较小, 因此可以忽略. 即可以认为, IPM 测量的 135.6 nm 辐射强度与 IGS TEC 平方呈正比. 图 8 分别给出了 5 月 11 日前后各纬度区间的 135.6 nm 辐射强度及 TEC 均值平方相对磁平静日对应纬度均值的变化. 如图 8 所示, 磁平静日 135.6 nm 辐射强度及 TEC 平方较月均值的变化几乎均为 0, 而在磁暴阶段, IPM 测量的 135.6 nm 辐射强度在各纬度均是增大的, 增大幅度可达 3000%, 而 TEC 平方并没有呈现如此大的增强.

由于在非极光区的中低纬度, 夜间 135.6 nm 辐射机制除了 O^+与电子辐射复合产生, 还有一小部分来自 O^+与 O^-的中性复合. 目前关于磁暴期间 O^+与 O^-的中性复合的贡献是否会增大的报道几乎没有看到. Zhang 等[18] 用 GUVI 数据在一次特大磁暴中观测到夜间包含 135.6 nm 波段在内的几个通道均出现辐射增强现象, 并结合 IMAGE 卫星上的 HENA 探测的能量中性原子数据的分析表明, 辐射增强可能来自环电流带电粒子通过电荷交换变成能量中性原子沉降引发的光辐射所致, 即所谓中低纬度极光. 而 IPM 在杂散光通道有相应增强也证实磁暴期间的辐射增强并非仅限于 135.6 nm, 同时结合上述 IGS TEC 的数据分析, 可以认为, 磁暴期间 IPM 观测到的夜间 135.6 nm 辐射增强可能并不是源自电离层.

图 9 进一步给出了 2023 年 4 月 23 日磁暴期间 IPM 夜间 135.6 nm 通道的探测结果以及对应的 IGS TEC 分布. *Dst* 指数自 2023 年 4 月 23 日开始降低且持续到 24 日, *Dst* 指数最低值在 24 日达到–187 nT. 由图 9 可见, 23 日 135.6 nm 辐射强度开始出现增强并持续到 24 日, 且增强出现的时间与 *Dst* 指数显示的在磁暴主相及恢复相有很好的一致性. 如图 9 所示, 在 23 日 TEC 较平静日变化不明显,而 24 日 TEC 在部分地区呈正暴, 也有地区呈负暴. 总言之, TEC 值并未出现类似 IPM 的大幅度增强.

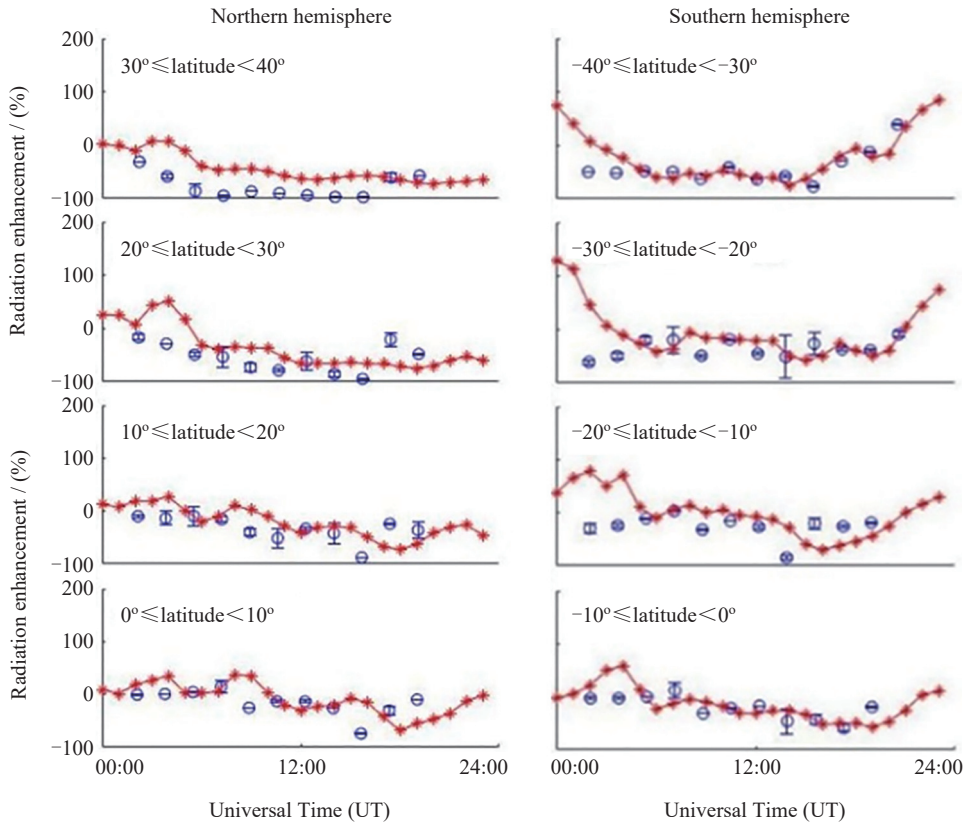

图 6 2024 年 5 月 11 日各纬度区间的 O/N_2 (蓝线) 及 TEC (红线) 均值相对磁平静日对应纬度均值的变化

Fig. 6 Mean value of O/N_2 (the blue line) and the mean Total Electron Content (TEC) for various latitude intervals (the red line) on 11 May 2024. The changes are relative to the mean values of corresponding latitudes during geomagnetically quiet days

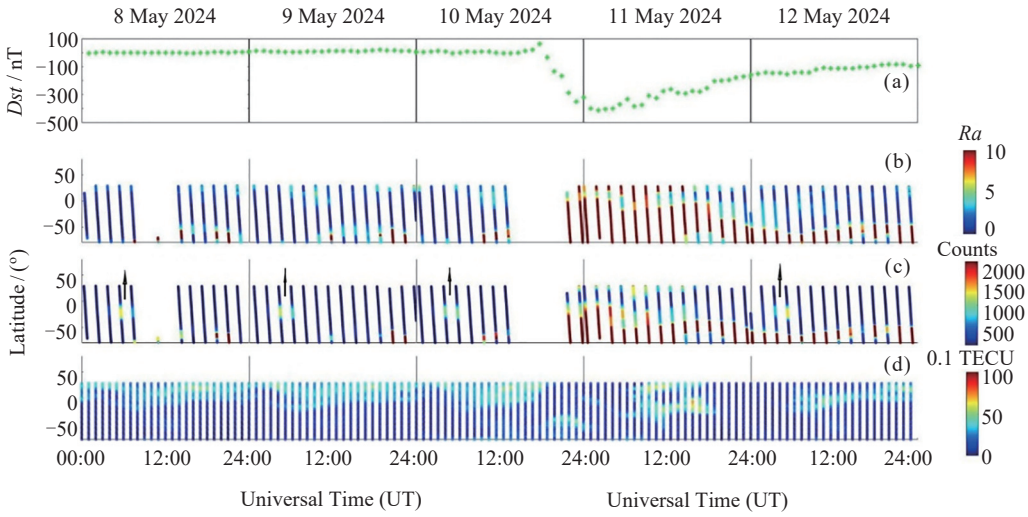

图 7 2024 年 5 月 8—12 日 IPM 测量的夜间 135.6 nm 通道辐射强度、夜间杂散光通道计数值、IGS TEC 及 *Dst* 指数随时间的分布

Fig. 7 Distribution of nighttime 135.6 nm channel radiation intensity, nighttime stray light channel count values, IGS TEC and *Dst* index measured by IPM from 8 to 12 May 2024

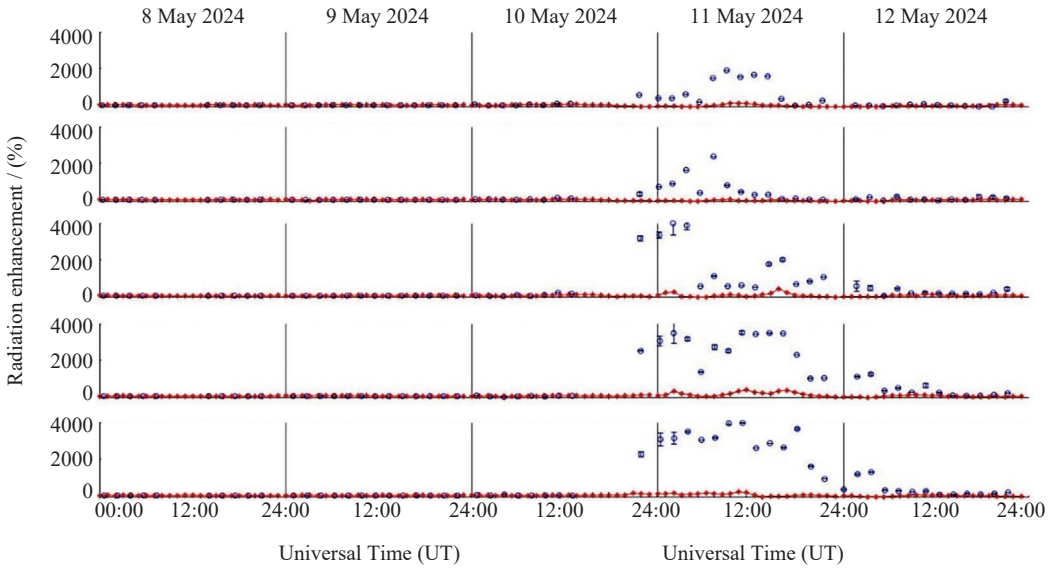

图 8　2024 年 5 月 8—12 日前后各纬度区间的 135.6 nm 辐射强度及 TEC 均值平方相对磁平静日对应纬度均值的变化

Fig. 8　Changes in the square of the mean values of 135.6 nm radiation intensity and TEC for various latitude intervals from 8 to 12 May 2024 relative to the mean values of corresponding latitudes during geomagnetically quiet days

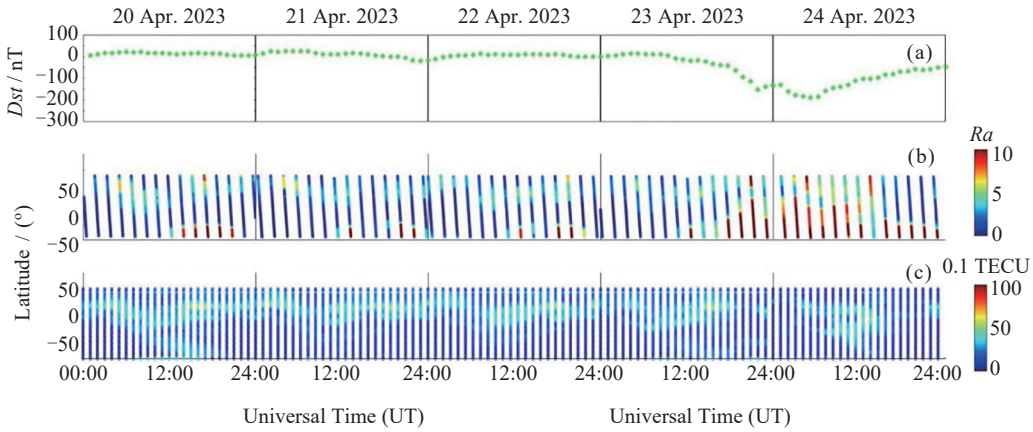

图 9　2023 年 4 月 20—24 日 IPM 测量的夜间 135.6 nm 通道辐射强度、IGS TEC 及 *Dst* 指数随时间的分布

Fig. 9　Distribution of nighttime 135.6 nm channel radiation intensity, IGS TEC and *Dst* index measured by IPM from 20 to 24 April 2023

3　讨论

关于磁暴期间夜侧气辉辐射呈增强的现象, 许多研究利用了各种波长的光学数据, 包括远紫外波长, 也报告了类似现象[19–24]. 根据已有研究的论文报道, 地磁暴期间增强的远紫外辐射 (例如 135.6 nm) 很可能源自能量中性原子沉降. 众所周知, 夜间 135.6 nm 的辉光辐射主要源自 O^+与电子辐射复合, 这可以反映电离层电子密度信息, 而磁暴期间的电离层密度会发生显著变化. 就本文的研究结果看, IPM 测量的 135.6 nm 辐射强度在磁暴期间总是增大的, 而 TEC 在磁暴期间相对磁平静期的变化可能增大也可能减小, 即使是增大的, 其增加量也不及 135.6 nm 辐射的增加量. 因此, IPM 测量的磁暴期间夜间 135.6 nm 辐射增强似乎来自其他机制的贡献, 如能量中性源自沉降. 未来的工作需要结合其他数据以及建模来进行.

4 结论

利用 FY-3D 电离层光度计数据对 2024 年 5 月 11 日的特大磁暴时间进行了响应特性研究, 得到结论如下.

(1) 对 IPM 白天数据的研究结果表明, 本次磁暴事件过程中, O/N_2 在各个纬度较磁平静日都是减小的, 可用于解释地基 IGS TEC 在各纬度呈现的负暴效应.

(2) 夜间数据显示, 135.6 nm 辐射强度及 190 nm 以上的长波杂散光测值在磁暴期间出现一致的增强, 增强出现在磁暴的主相及恢复相. 根据 IPM 轨道时间和位置重新采样插值后, IGS TEC 在磁暴期间并没有出现如此大的增强. 即磁暴期间出现辐射增强的波段并不仅限于能表征电离层状态的 135.6 nm 波段, 同时 IGS TEC 的数据分析也显示电离层 TEC 没有出现相应增大. 类似的, 其他磁暴期间也有相似特性, 从目前分析结果来看, 磁暴期间的夜间 135.6 nm 辐射增强并非由与电离层电子密度相关的 O^+和电子辐射复合机制的贡献而导致.

参考文献

[1] AKASOFU S I. Prediction of development of geomagnetic storms using the solar wind-magnetosphere energy coupling function [J]. *Planetary and Space Science*, 1981, **29**(11): 1151-1158

[2] CANDER L R, HARALAMBOUS H. On the importance of total electron content enhancements during the extreme solar minimum[J]. *Advances in Space Research*, 2011, **47**(2): 304-311

[3] BURNS A G, KILLEEN T L, CARIGNAN G R, *et al.* Large enhancements in the O/N_2 ratio in the evening sector of the winter hemisphere during geomagnetic storms[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A8): 14661-14671

[4] KONSTANTIN R, MAKSIM K, VLADIMIR K, *et al.* After-effects of geomagnetic storms: statistical analysis and theoretical explanation[J]. *Solar-Terrestrial Physics*, 2018, **4**(4): 26-32

[5] STRICKLAND D J, DANIELL R E, CRAVEN J D. Negative ionospheric storm coincident with DE 1-observed thermospheric disturbance on October 14, 1981[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A10): 21049-21062

[6] HUANG C M, CHEN M Q, LIU J Y. Ionospheric positive storm phases at the magnetic equator close to sunset[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2010, **115**(A7): A07315

[7] KUAI J W, LI Q L, ZHONG J H, *et al.* The ionosphere at middle and low latitudes under geomagnetic quiet time of December 2019[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(6): e2020JA028964

[8] WAN Q T, MA G Y, MARUYAMA T, *et al.* Characteristics of ionospheric storm on October 13, 2016 at the Greenwich meridian[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(11): e2020JA028823

[9] Zhang Y L, Paxton Larry, Schaefer Robert. Ionospheric and thermospheric contributions in TIMED/GUVI O 135.6 nm Radiances[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(9): 1-13

[10] DYMOND K F, THONNARD S E, MCCOY R P, *et al.* An optical remote sensing technique for determining nighttime *F* region electron density[J]. *Radio Science*, 1997, **32**(5): 1985-1996

[11] STRICKLAND D J, COX R J, MEIER R R, *et al.* Global O/N_2 derived from DE 1 FUV dayglow data: technique and examples from two storm periods[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1999, **104**(A3): 4251-4266

[12] KIL H, LEE W K, SHIM J, *et al.* The effect of the 135.6 nm emission originated from the ionosphere on the TIMED/GUVI O/N_2 ratio[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2013, **118**(2): 859-865

[13] 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-3D[J]. *Advances in Space Research*, 2020, **66**(9): 2151-2167

[14] JIANG F, MAO T, ZHANG X X, *et al.* The day-glow data application of FY-3D IPM in monitoring O/N_2[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, **205**: 105309

[15] YOUNAS W, KHAN M, AMORY-MAZAUDIER C, *et al.* Middle and low latitudes hemispheric asymmetries in $\sum O/N_2$ and TEC during intense magnetic storms of solar cycle 24[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **69**(1): 220-235

[16] STRICKLAND D J, EVANS J S, PAXTON L J. Satellite remote sensing of thermospheric O/N_2 and solar EUV: 1. Theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A7): 12217-12226

[17] WANG Daxin, FU Liping, WANG Fang, *et al.* Inversion of ionospheric O/N_2 by using FY-3D 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)

[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]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2006, **111**(A9): A09307

[19] TINSLEY B A, ROHRBAUGH R P, RASSOUL H, *et al*. Spectral characteristics of two types of low latitude aurorae[J]. *Geophysical Research Letters*, 1984, **11**(6): 572-575

[20] MEIER R R, WELLER C S. Observations of equatorial EUV bands: evidence for low-altitude precipitation of ring current helium[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1975, **80**(19): 2813-2818

[21] MENDILLO M. Storms in the ionosphere: patterns and processes for total electron content[J]. *Reviews of Geophysics*, 2006, **44**(4): RG4001

[22] PARESCE F. EUV observations of the equatorial aurora[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1979, **84**(A8): 4409-4412

[23] 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

[24] STEPHAN A W, CHAKRABARTI S, DYMOND K F, *et al*. Far ultraviolet equatorial aurora during geomagnetic storms as observed by the low-resolution airglow and aurora spectrograph[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2001, **106**(A12): 30323-30330

作者简介

江　芳　女, 1977 年 1 月生于江苏省淮安市, 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 主要研究方向为中高层大气光学遥感研究.
E-mail: jiangf@nssc.ac.cn

付利平（通信作者）　女, 1972 年 3 月生于湖北省武汉市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要从事中高层大气光学遥感探测研究.
E-mail: fuliping@nssc.ac.cn