

SHI Zheng, FU Liping, JIANG Fang, MAO Tian. Seasonal Transition Study of Thermospheric Atmospheric Composition Ratios at Twilight Based on Fengyun-3E Satellite Detection (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2025, 45(1): 113–124. CSTR:32142.14.cjss.2024-0023. DOI:10.11728/cjss2025.01.2024-0023

基于风云三号 E 星探测的黄昏时热层大气成分比值季节转换研究*

石 正^{1,2} 付利平^{1,3,4} 江 芳^{1,3,4} 毛 田⁵

1(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(天基空间环境探测北京市重点实验室 北京 100190)

4(中国科学院空间环境态势感知技术重点实验室 北京 100190)

5(国家卫星气象中心 北京 100081)

摘 要 中国的多颗风云三号卫星配备了电离层光度计,能探测到 OI 135.6 nm 和 N₂ LBH 带的气辉辐射积分通量,并计算出 135.6/LBH 比值.风云三号 E 星作为第二代近极地太阳同步轨道卫星,特别适合晨昏轨道的气辉观测.该比值与热层大气成分中 [O]/[N₂] 比值成正比,反映了影响电离层电子密度变化的重要参数.利用风云三号 E 星近两年的数据,分析了中低纬地区 135.6/LBH 比值及相应参量的季节转换规律.结果显示, OI 135.6 nm 和 N₂ LBH 带辐射强度的季节变化以冬季和夏季为主,在春秋两季快速转变,且这种变化随纬度而异. 135.6/LBH 比值在春秋季也出现快速转换,但其峰值和谷值时期与前述两种辐射强度不同.中纬度地区表现为冬季高、夏季低的季节特征,而赤道附近则相反,呈现半年变化周期.研究还发现, 135.6/LBH 比值的季节转换存在不对称性,受纬度和半球的影响显著.这些结果证明,风云卫星电离层光度计对热层大气成分比的季节、纬度和半球变化可以进行有效探测,为电离层热层的研究、建模以及空间天气预报提供了重要依据.

关键词 风云三号卫星, 气辉, 热层, 季节变化

中图分类号 P352

Seasonal Transition Study of Thermospheric Atmospheric Composition Ratios at Twilight Based on Fengyun-3E Satellite Detection

SHI Zheng^{1,2} FU Liping^{1,3,4} JIANG Fang^{1,3,4} MAO Tian⁵

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

2(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

* 国家自然科学基金项目 (4187040455) 和国家重点研发计划项目 (2022YFF0503901) 共同资助

2024-02-18 收到原稿, 2024-04-17 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/>)

3(Beijing Key Laboratory of Space Environment Exploration, Beijing 100190)

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

5(National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract Two Fengyun-3 satellites are equipped with Ionospheric Photometers capable of detecting the integrated radiant flux of the OI 135.6 nm and N₂ LBH band airglow emissions, from which the ratio (referred to as the 135.6/LBH ratio) is derived. Among them, the Fengyun-3E satellite, the second generation of near-polar sun-synchronous orbit satellites, provides airglow observations during dawn-dusk orbits. The 135.6/LBH ratio is typically proportional to the thermospheric atmospheric composition ratio of [O]/[N₂], reflecting variations in this ratio, which is a significant parameter influencing changes in ionospheric electron density. This paper collects data from Fengyun-3E satellite in the past two years to analyze the seasonal conversion patterns of 135.6/LBH ratio and corresponding parameters in mid to low latitudes. The results showed that the seasonal variation of OI 135.6 nm and N₂ LBH band radiation intensity was mainly in winter and summer, with rapid changes in spring and autumn, and this change varies with latitude. The 135.6/LBH ratio also shows a rapid transition in spring and autumn, but its peak and valley periods are different from the aforementioned two radiation intensities. The mid latitude region shows a seasonal characteristic of high in winter and low in summer, while the opposite is true near the equator, showing a semiannual variation cycle. The study also found that there is asymmetry in the seasonal transition of the 135.6/LBH ratio, which is significantly influenced by latitude and hemisphere. These results demonstrate that the Fengyun satellite ionospheric photometer has good performance in detecting seasonal, latitudinal, and hemispheric variations in the composition ratio of the thermosphere atmosphere, providing important basis for research, modeling, and space weather forecasting of the ionospheric thermosphere.

Key words Fengyun-3 satellite, Airglow, Thermosphere, Seasonal changes

0 引言

在约 120 km 以上的热层大气, N₂ 和 O 是热层中的主要中性成分. 这两种热层大气成分的比值, 即 [O]/[N₂] 比值, 与日间电离层电子密度密切相关. 白天, 电离层电子密度最稠密的 F 层等离子体的产生率取决于 O 密度, 损失率正比于 N₂ 密度. 因此 [O]/[N₂] 比值对日间电子密度具有重要的影响. 在 F 层, 根据电子满足的连续性方程, 稳态、无风和电场漂移情况下, 由于电离层的伺服效应, 峰高处电离层在白天处于平衡态, 峰值电子密度与 [O]/[N₂] 比值成正比^[1]. 在 F₂ 层峰以下的 F 层位置, 白天电离层接近或处于光化学平衡, 也近似满足电子密度与 [O]/[N₂] 比值成正比的状态. 同时, 在较高的电离层与热层高度, 由于 [O]/[N₂] 比值随高度增加而增加^[2], 白天当电离层高度升高或降低时, 电离层电子密度也分别趋于增大或减小. 因此, 热层大气成分比是度量日间电离层电子密度的一个重要指标.

白天的氧氮柱含量的比值 ([O]/[N₂]) 可通过 135.6 nm 和 N₂ LBH 谱段的远紫外气辉的探测来反演. 由于地球大气直接或间接吸收太阳辐射能量, 大气成分可被激发到较高的能级, 当其从高能级跃迁至低能级时, 发出的辉光就是气辉. 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, 可作为中间层、低热层和电离层物理化学过程及动力学过程信息的载体. 远紫外气辉探测已成为分析热层大气和电离层参量的重要手段. OI 135.6 nm 气辉辐射是远紫外气辉中的典型光谱之一, 是由氧原子发生能级跃迁过程产生的谱线, 主要激发源为电离层中光电子与中性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^[3]. N₂ LBH 的主要激发源也是光电子与氮气分子的碰撞. Strickland 等^[4,5] 首先提出了利用 OI 135.6 nm 和 N₂ LBH 的远紫外气辉辐射通量来反演白天的 [O]/[N₂] 比值的方法, 证明了白天 O 和 N₂ 的垂直柱含量之比与天底观测的 OI

135.6 nm 和 N_2 LBH 气辉辐射积分通量之比成正比. 此外, 在夜间气辉则主要产生于原子或带电粒子光化学反应或辐射复合过程, 利用 OI 135.6 nm 夜气辉辐射可反演电离层峰值电子密度 $N_m F_2$ 、峰值高度 $h_m F_2$ 和总电子含量 TEC^[6]. 因此, 上述远紫外谱段的日辉与夜辉的探测均可用于获取电离层状态及变化规律.

在全球中低纬地区, 受太阳辐射加热引起的大气环流的影响, 同一台站平均热层大气成分 $[O]/[N_2]$ 比值一般在冬季高于夏季, 而春秋季节居中^[7-9]. 由于热层大气成分 $[O]/[N_2]$ 变化可导致电子密度变化, 因此 $[O]/[N_2]$ 比值以及电离层电子密度的季节特征和转换时间一直以来受到人们的关注, 这种氧氮柱密度之比、电离层电子密度的值的变化的大小和变化的时间特征, Perrone 等^[10] 称为季节转换 (seasonal transitions). 早期非相干散射雷达探测结果显示, 从日间到夜间的电子密度峰谷比夏季高于冬季, 该电子密度的冬季与夏季特征之间的季节转换所需要的时间一般为 20~25 天, 但最快只需 6~10 天^[8]. 以往的理论模型也肯定了热层大气成分比值与气辉辐射存在季节转换^[9]. Rishbeth 等^[1] 通过耦合的热层-电离层-等离子体层模型 CTIP 模拟, 发现分日期间的季节变化非常快. 以往的工作认为由于 N_2 密度变化较小, 电离层的季节转换主要由 O 原子和中性风的季节变化造成, 并可能与极区极光活动相关. 近年来, 利用欧洲和北美地区的两个测高仪台站探测表明, 同样为中纬地区的两个台站电子密度的冬夏特征转换有显著差别^[10]. 该研究结果显示, 欧洲 Juliusruh 站电子密度冬季日变化特征持续 172 天, 夏季特征持续 145 天, 秋季只有 12 天, 而春季持续 36 天, 因此该站冬-夏和夏-冬电子密度特征的转换快慢不一致. 同时, 其冬季特征的持续时间明显比北美 Boulder 站的 60 天左右长. 同时期 CHAMP/STAR 卫星观测的热层大气成分比 $[O]/[N_2]$ 以及中性风在这两个地区均不同. Boulder 站夏季电子密度日变化特征持续时间较长, 而冬季特征持续期较短, 与 GOLD 远紫外辐射探测获取的正午前后 $[O]/[N_2]$ 比值的季节转换特点类似^[11]. 近年来, 利用位于地球同步轨道、聚焦东部美洲地区的 GOLD 远紫外 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 探

测反演的 $[O]/[N_2]$ 比值, Qian 等^[11] 发现 GOLD 探测反演的 $[O]/[N_2]$ 比值只有冬季和夏季特征, 冬季短 (122 天) 而夏季长 (243 天), 季节转换只需一天.

以上研究显示电离层和热层大气成分的季节转换呈现出复杂的变化特征. 由于热层大气成分 $[O]/[N_2]$ 比值的变化与地方时、季节、太阳辐射、地磁活动、赤道异常驼峰以及低层大气过程等多种因素有关^[2,12]. 此外, 动力学因素的影响也可改变电离层 $[O]/[N_2]$ 比值^[13], 且有模拟研究表明该 $[O]/[N_2]$ 经度变化与极区粒子沉降及其相伴随的焦耳加热过程有关^[14]. 因此, $[O]/[N_2]$ 的季节转换受到较多因素的影响, 且以往对 $[O]/[N_2]$ 的探测还存在一定的局限性, 如 TIMED/GUVI 的探测有利于查看全球的总体分布, 但难以聚焦于特定的地方时, 而 GOLD 探测仪仅聚焦于有限经度范围. 因此, 进一步开展 $[O]/[N_2]$ 的季节转化研究特性与形成机制, 对研究电离层和热层的形态变化及形成机制, 具有重要意义.

本文旨在利用风云三号 E 星 (FY-3E) 所搭载的多角度电离层光度计探测的远紫外辐射通量来获取热层变化特征. 该多角度光度计 (Tri-IPM) 是 IPM 的改进型号, 其视角更广, 时间和空间精度更高, 观测早晨和黄昏两个时段. 应用 FY-3E 提供的黄昏时 (约 18:00 LT) 探测结果, 研究 2022—2023 年热层辐射通量及其代表热层大气成分 135.6/LBH 比值的季节转换规律与形成机制, 可为后续 FY-3E 光度计探测数据进一步的处理和应用提供参考, 并为电离层热层相关研究和建模以及空间天气预报应用提供可靠基础.

1 卫星、载荷与数据

风云三号系列卫星是中国的第二代极地太阳同步轨道卫星, 风云三号 E 星 (FY-3E) 是全球首颗民用晨昏轨道气象卫星, FY-3E 一级数据于 2022 年 3 月 15 日上线. FY-3D 和 FY-3E 与在轨的 FY-3C 卫星组网运行, 同时拥有上午、下午、晨昏三条轨道组网观测能力^{*}, 有效补充了 6 h 同化窗内卫星观测资料的空白. FY-3E 的轨道设计与 FY-3D 相似, 标称高度为 836 km, 轨道倾角为 98.75°, 近圆轨道周期为 101.5 min. FY-3E 的升降交点地方时分别为

* <http://www.nsmc.org.cn/nsmc/cn/satellite/FY3E.html>

17:30 LT 和 05:30 LT, 且 8 年内地方时漂移小于 20 min. FY-3D 和 FY-3E 的光度计都是对地探测, 对地总视场约为 3.5° (沿轨) $\times 1.6^\circ$ (跨轨), 测量波段为 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带 (145.0~180.0 nm), 在星下点的空间分辨率为 30 km. FY-3E 搭载的多角度型电离层光度计 (Tri-IPM) 是一种具有三个探头的高灵敏度气辉强度探测仪, 分别探测相邻的三个不同的纬度带, 其中 A 探头为天底探测, B 和 C 探头为斜向探测. 该仪器通过测量 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 的气辉辐射强度, 实现日夜交界面上气辉变化监测. FY-3E 卫星的多角度电离层光度计是改进型载荷, 在 FY-3D 卫星的电离层光度计基础上增加两个分别指向日侧、夜侧的探头. 本文数据来自国家卫星气象中心网站* 的 L1 级数据.

图 1 和图 2 分别给出了 2023 年分点 (第 90 天) 和至点 (第 180 天) 日的 FY-3E 电离层光度计

三个探头探测的 OI 135.6 nm 气辉辐射强度、 N_2 LBH 气辉辐射强度和 135.6/LBH 比值全球分布. 可以看出, 该探测可在一日内覆盖全球中低纬区域, 并具有较均匀的经度分布. 2023 年第 90 天的 K_p 指数在 00:00 LT—12:00 LT 和 21:00 LT—24:00 LT 时为 $3^+ \sim 4^+$, 地磁活动水平属轻度扰动水平, 在 12:00 LT—18:00 LT 时不大于 3, 地磁活动水平平静, 2023 年第 90 天的 K_p 指数全天小于 3, 地磁活动水平平静. 这两日的 $F_{10.7}$ 指数, 分别为 129 sfu 和 155 sfu, 太阳活动分别处于中等和较高水平. 图 1 和图 2 同时给出了 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 气辉以及 135.6/LBH 比值在春秋两季 (分日季节) 和夏冬两季 (至日季节) 的季节转变特征. 其中, OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 气辉在夏季半球强度分别可达 500 Ra 和 1500 Ra , 在冬季半球强度不超过 100 Ra , 在春秋两季半球强度分别约为 300 Ra 和 700 Ra . 气辉辐射强度

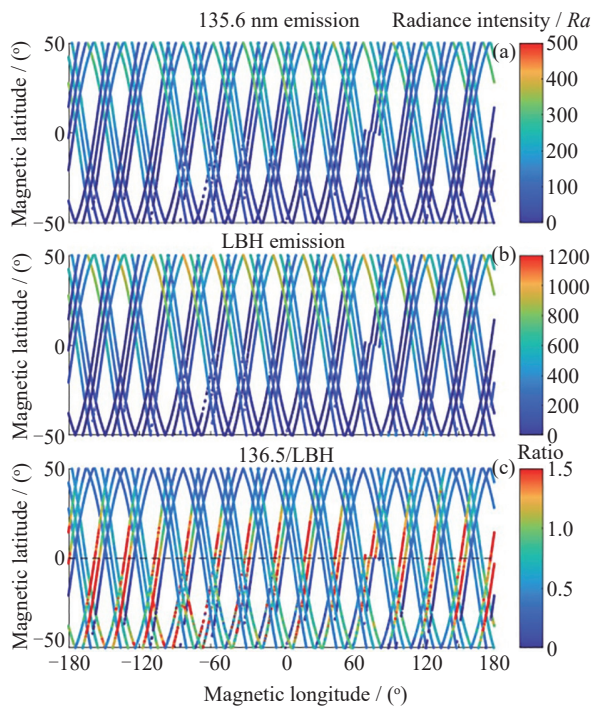


图 1 2023 年第 90 天 FY-3E OI 135.6 nm 气辉辐射强度、 N_2 LBH 气辉辐射强度和 135.6/LBH 全球分布 (三探头)

Fig. 1 On the 90th day of 2023, FY-3E OI 135.6 nm airglow radiation intensity, N_2 LBH airglow radiation intensity, and 135.6/LBH global distribution (with three probes)

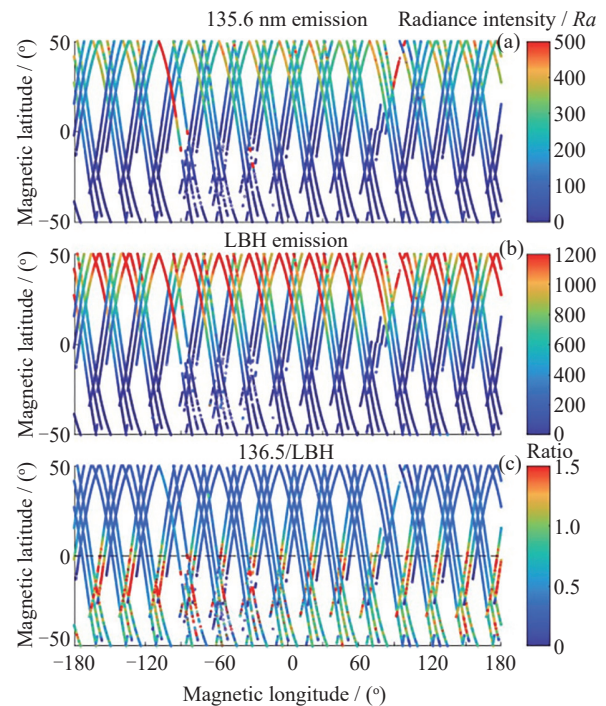


图 2 2023 年第 180 天 FY-3E OI 135.6 nm 气辉辐射强度、 N_2 LBH 气辉辐射强度和 135.6/LBH 全球分布 (三探头)

Fig. 2 On the 180th day of 2023, FY-3E OI 135.6 nm airglow radiation intensity, N_2 LBH airglow radiation intensity, and 135.6/LBH global distribution (with three probes)

* <http://satellite.nsmc.org.cn/>

复合在夏季较高、在冬季较低、在春秋居中的特征, 与太阳辐射通量的季节变化一致. 同时可以看见 135.6/LBH 比值具有的显著季节、纬度和半球变化. 在 3 月分日附近, 135.6/LBH 比值在南北半球分布较为对称, 峰值大多位于赤道和低纬. 而在 6 月至日附近, 南半球处于冬季, 135.6/LBH 比值较高, 北半球处于夏季, 135.6/LBH 比值较低; 从北半球中高纬至南半球中纬地区, 135.6/LBH 比值逐渐升高. 该 135.6/LBH 比值的季节与纬度变化与热层大气 $[O]/[N_2]$ 比值的变化一致^[7], 较好地反映了热层大气的变化.

主要应用 Tri-IPM 探测仪 A 探头黄昏时的观测开展研究. 选用该探头可聚焦处于日落前的 18:00 LT 时刻的观测. 以 $40^\circ S$, $20^\circ S$, 0° , $20^\circ N$, $40^\circ N$ 为中心线选取其南北各 10° 的滑动窗, 计算获取中纬、中低纬、赤道地区的 OI 135.6 nm、 N_2 LBH 气辉辐射强度和 135.6/LBH 的分布特征. 为对比研究各参量季节转化随纬度的变化趋势, 将中心纬度线以 10° 一个纬度格点的方式, 探讨 $50^\circ S$ 和 $50^\circ N$ 之间的变化特征.

2 结果与讨论

图 3 给出了 2022 年 3 月 15 日至 2023 年 12 月 31 日 Tri-IPM 探测仪观测的北半球中纬 40° 附近的 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带气辉辐射强度以及二者的比值 135.6/LBH, 并给出了同时期的地磁活动指数 Kp 和太阳辐射通量指数 $F_{10.7}$ 变化. 该段时期内地磁活动处于宁静到中小磁暴水平, $F_{10.7}$ 指数总体处于上升水平, 在 2022 年处于 120 sfu 左右的中等水平, 在 2023 年上升到 150 sfu 左右的较高水平. 与太阳辐射水平相对应, 2023 年夏季 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带气辉辐射强度均明显高于 2022 年的值, 但二者的比值 135.6/LBH 未出现明显的年际变化. 图 3 还表明, OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带气辉辐射强度的季节变化以夏季特征和冬季特征为主, 夏天高, 冬天低, 呈现年变化特征, 其最小值在冬至日前到达, OI 135.6 nm 的最小值提前 21 天到达, N_2 LBH 的最小值提前 21 天到达. 但 OI 135.6 nm 在 2022 年的极大值早于至日 23 天, 2023 年的极大值早于至日 5 天, 而 N_2 LBH 带极大值则晚于至日, 2022 年极大值晚于至日

19 天, 2023 年极大值早于至日 5 天. 因此, OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带气辉辐射强度以及 135.6/LBH 比值均关于至日不对称. 135.6/LBH 比值具有相反的季节变化特征, 冬季高, 夏季低. 值得注意的是, 135.6/LBH 比值具有较显著的峰值和较平缓的谷值, 且冬季极大值早于冬至日、夏季最小值晚于夏至出现. 从季节转换特点上看, 各参量从夏季到冬季的转换均较为迅速, 在秋季仅用少数几天即完成从夏季特征到冬季特征的转换. 但在春季, OI 135.6 nm 辐射强度变缓, 而 N_2 LBH 带气辉辐射的季节转换速度仍然较快, 因此 135.6/LBH 比值在春季的变化速度也变缓, 与秋季不一致.

与图 3 类似, 图 4 给出了北半球低纬的结果. 两种气辉辐射强度总体依然符合夏季最高冬季最低的年变化特征, 且冬季极小值早于冬至日到达, 135.6/LBH 比值的主要季节变化也与中纬类似. 但是与中纬相比, OI 135.6 nm 气辉在春季出现一个次峰, 且 N_2 LBH 带谱段气辉辐射强度的季节转换速度也在春季变缓, 相应地 135.6/LBH 比值在春季出现一个次峰.

图 5 给出了赤道纬度带的结果, 显示各参量的季节转化与中低纬有显著的不同. OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带气辉辐射强度没有出现夏季峰值, 二者的峰值均靠近春季, 且出现在春分之前. 二者具有显著的春秋季节不对称特征, 春季高而秋季低, 与中纬和低纬地区春秋季节辐射强度大体相当的特征明显不同. N_2 LBH 带气辉辐射强度在夏秋之间出现明显的次峰, 而 OI 135.6 nm 同时期也有次峰出现, 只是峰值比较平缓. 因此, OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带气辉辐射强度总体呈现半年变化特征. 相应地, 135.6/LBH 比值出现近分日高、近至日低的显著半年变化特征, 且在秋分点之后出现最大峰值. 因此, 135.6/LBH 比值春季峰值衰减缓慢, 而秋季峰值衰减迅速. 因此, 赤道地区 135.6/LBH 比值在高值特征与低值特征之间的季节转换出现在至点附近, 并滞后于至点.

图 6 和图 7 分别给出了南半球低纬 20° 和中纬 40° 两种气辉强度及其比值的季节转化特征. 与赤道地区相比, OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带气辉辐射强度在 12 月至点和秋分点之间的峰显著增强, 且在出现时间上更靠近 12 月至点 (夏季), 其他次峰消失, 因此二者均呈现夏季高、冬季低的年变化特征, 与北半球

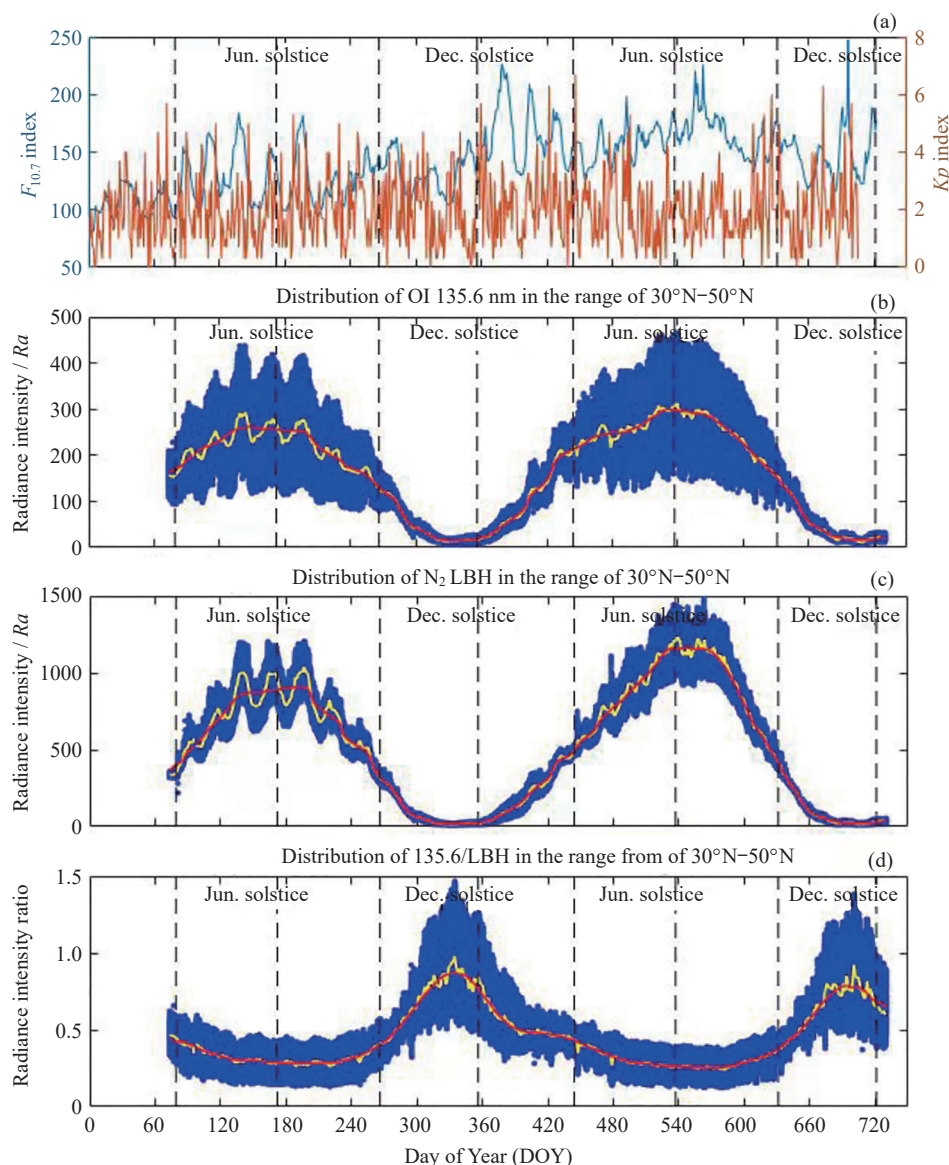


图3 2022年3月15日至2023年12月31日期间40°N附近纬度带17:00 LT–18:30 LT时观测结果. 蓝点为观测值, 黄线、红线分别为平滑窗设置为1天、27天的平滑曲线. 竖线给出了分点和至点的位置

Fig. 3 Observational results between 17:00 LT and 18:30 LT within the latitude band near 40°N from 15 March 2022 to 31 December 2023. Blue dots represent the observational values, while the yellow and red lines correspond to the smoothed curves with a smoothing window set to 1 day and 27 days, respectively.

Vertical lines indicate the positions of the equinoxes and solstices

中低纬地区季节变化一致. 值得注意的是, 图6和图7显示, OI 135.6 nm和N₂ LBH带气辉辐射强度在季节转化过程中, 从冬季到夏季的变化较缓慢, 而从夏季到冬季的变化速度较快, 与北半球季节转化速度一致. 图6和图7给出的135.6/LBH比值季节转化也与北半球类似, 即在低纬具有靠近冬季(6月至点)的主峰和靠近春季(9月分点)的次峰, 在季节变

化上以年变化为主, 叠加小幅度半年变化特征(图6); 而在中纬地区则在冬季出现强峰值而夏季出现长时期谷值, 冬季特征与夏季特征转换迅速, 平均时间仅有一天. 由于在春季无次峰出现, 中纬135.6/LBH比值呈现显著的年变化特征, 这与北半球中纬季节变化一致.

图8给出了2022年3月15日至2023年12月

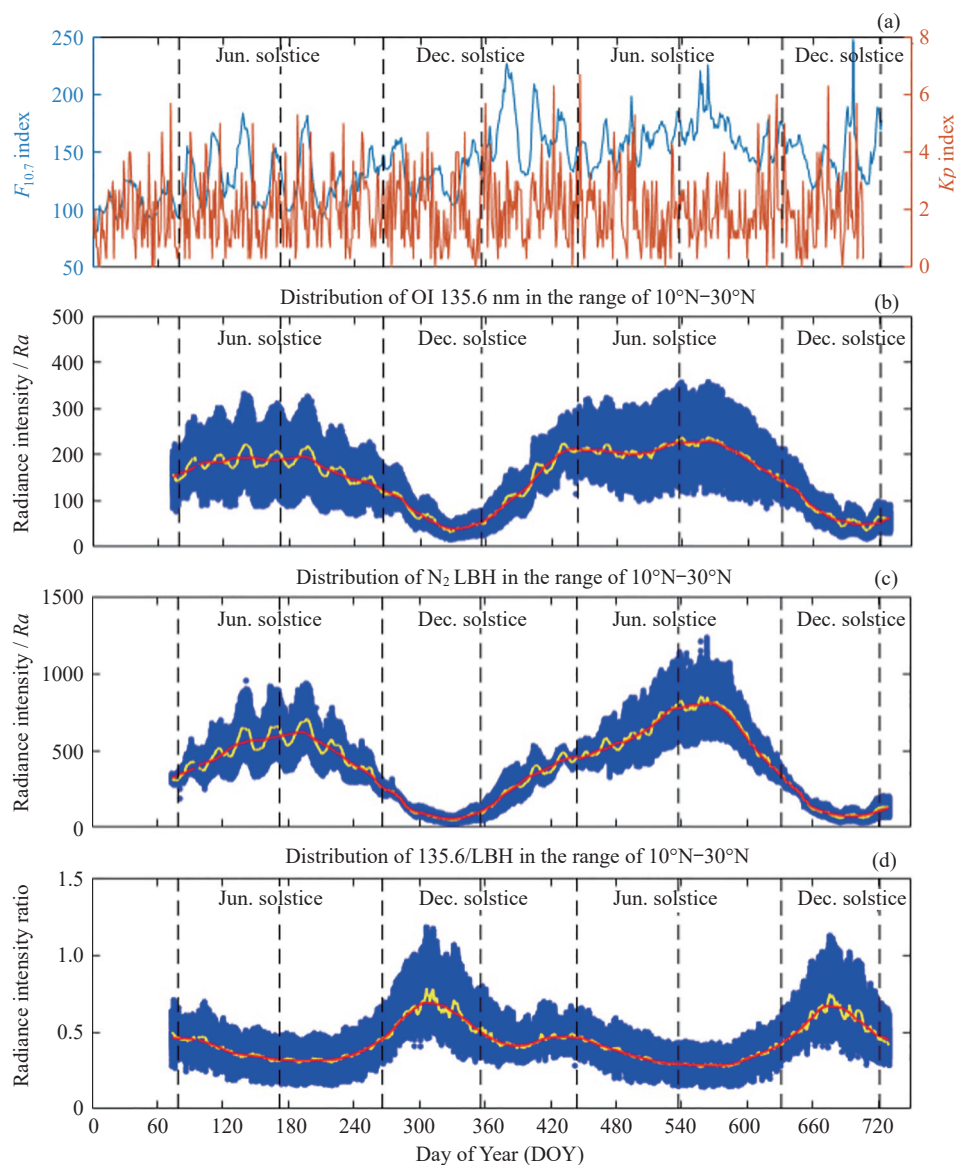


图 4 2022 年 3 月 15 日至 2023 年 12 月 31 日期间 20°N 附近纬度带 17:00 LT–18:30 LT 时观测结果

Fig. 4 Observational results between 17:00 LT and 18:30 LT within the latitude band near 20°N from 15 March 2022 to 31 December 2023

31 日北半球和南半球的各纬度带 18:00 LT 时 135.6/LBH 比值季节变化的对比, 以及全球各纬度带不同时期的半球间差异 (南半球减北半球的). 对比 135.6/LBH 比值在南、北半球 5 个不同纬度带内的变化曲线和南北半球间差值可发现其季节变化随纬度和半球的变化特征. 在北半球中纬, 135.6/LBH 比值主要由年变化主导, 在冬至附近最大, 早于冬至 30 天左右, 在夏至附近最小, 晚于夏至 30 天左右. 随着纬度从高到低变化, 夏季 135.6/LBH 比值的最小值逐渐升高, 冬季的最大值逐渐降低, 春分附近的生长逐

渐明显, 到赤道附近区间转变成春秋高、夏季最低和冬季次低的半年特征. 这与 Yue 等^[7]应用 TIMED/GUVI 观测的 [O]/[N₂] 比值的季节变化的结果类似. 此外, 图 8 显示, 从低纬到中高纬, 夏季低值特征持续时间较长, 且极小均发生在夏至以后的时间, 该极小值滞后于夏至日天数与纬度相关. 在 2022 年北半球夏季极小晚于夏至的天数从低纬到高纬在 18~36 天, 随纬度增加, 滞后时间缩短. 类似地, 冬季极大早于冬至的天数也与纬度相关. 冬季极大比冬至超前的天数从低纬到高纬在 20~53 天; 纬度越高, 135.6/LBH 比

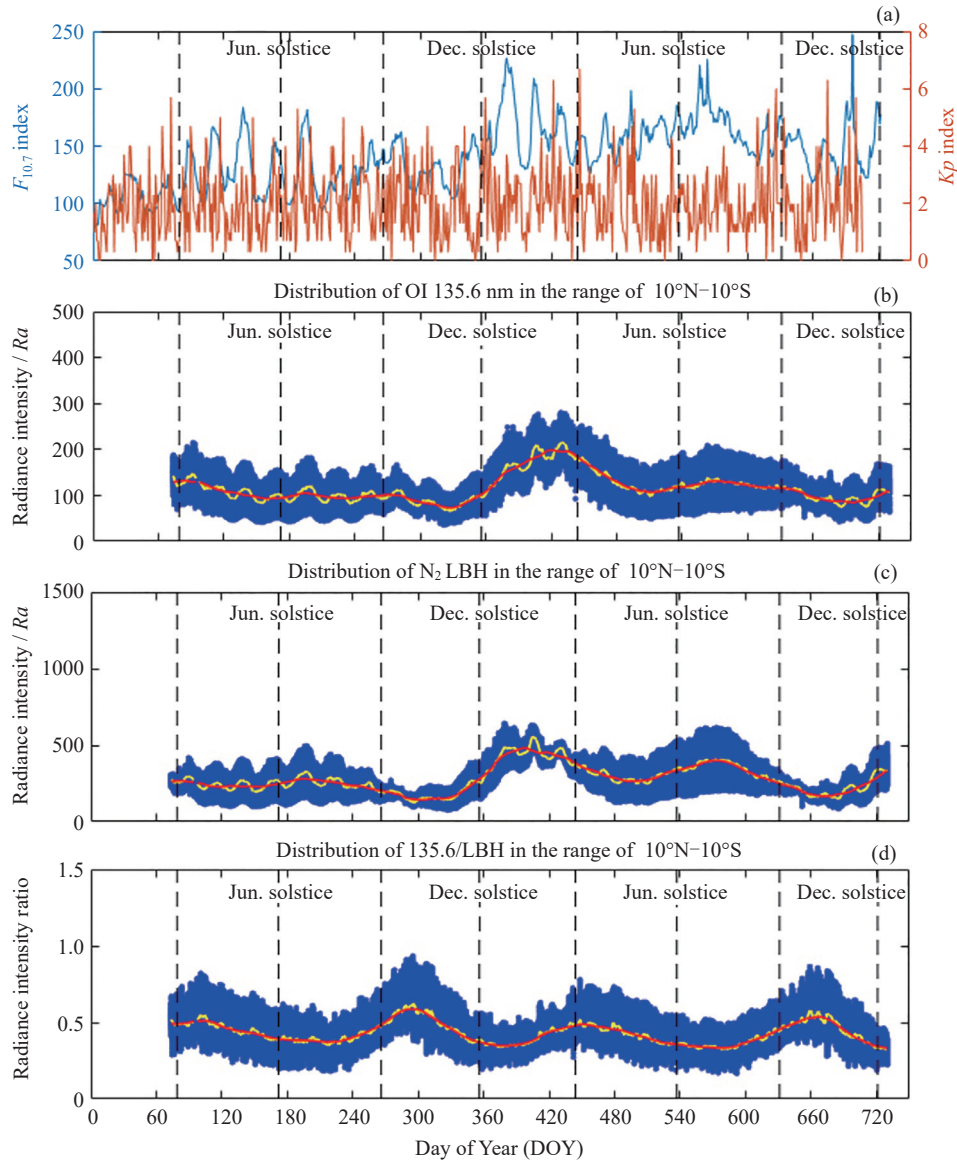


图 5 2022 年 3 月 15 日至 2023 年 12 月 31 日期间赤道附近纬度带 17:00 LT–18:30 LT 时的观测结果

Fig. 5 Observational results between 17:00 LT and 18:30 LT within the latitude band near equator from 15 March 2022 to 31 December 2023

值最大值出现的时间越靠近冬至. 在 2023 年北半球夏季极小滞后于夏至的天数从低纬到高纬在 30 天左右, 冬季极大早于冬至的天数随纬度的变化与 2022 年类似. 综合来看, 北半球 135.6/LBH 比值的冬季高值特征持续时间在高纬比低纬长, 其极大值随纬度增加而增加, 且在高纬出现时间晚于低纬, 这些结果反映了极区加热热层大气环流及 135.6/LBH 比值的影响. 南半球 135.6/LBH 也是在低纬具有半年变化, 在中纬地区呈现年变化, 但是 40° 及以上纬度带 135.6/LBH 比值在冬季出现双峰结构, 考虑到这

两个纬度带偏高, 可能会受极区粒子沉降及其他极区过程的影响, 也可能与 FY-3E 电离层光度计在南半球有效观测样本比北半球少有关, 尚需进一步的研究. 与北半球相比, 南半球冬季极值的出现时间相对至日点超前的时间随纬度变化不大.

随着纬度的增加, 135.6/LBH 比值的南北半球间差值的绝对大小也在增大. 这与热层大气环流引起的热层大气成分 $[O]/[N_2]$ 比值的纬度变化一致^[1]. 如果忽略南北半球间可能的其他差异, 该差值随时间的变化反映了热层大气由冬夏差异 (6 月至点附近) 向夏

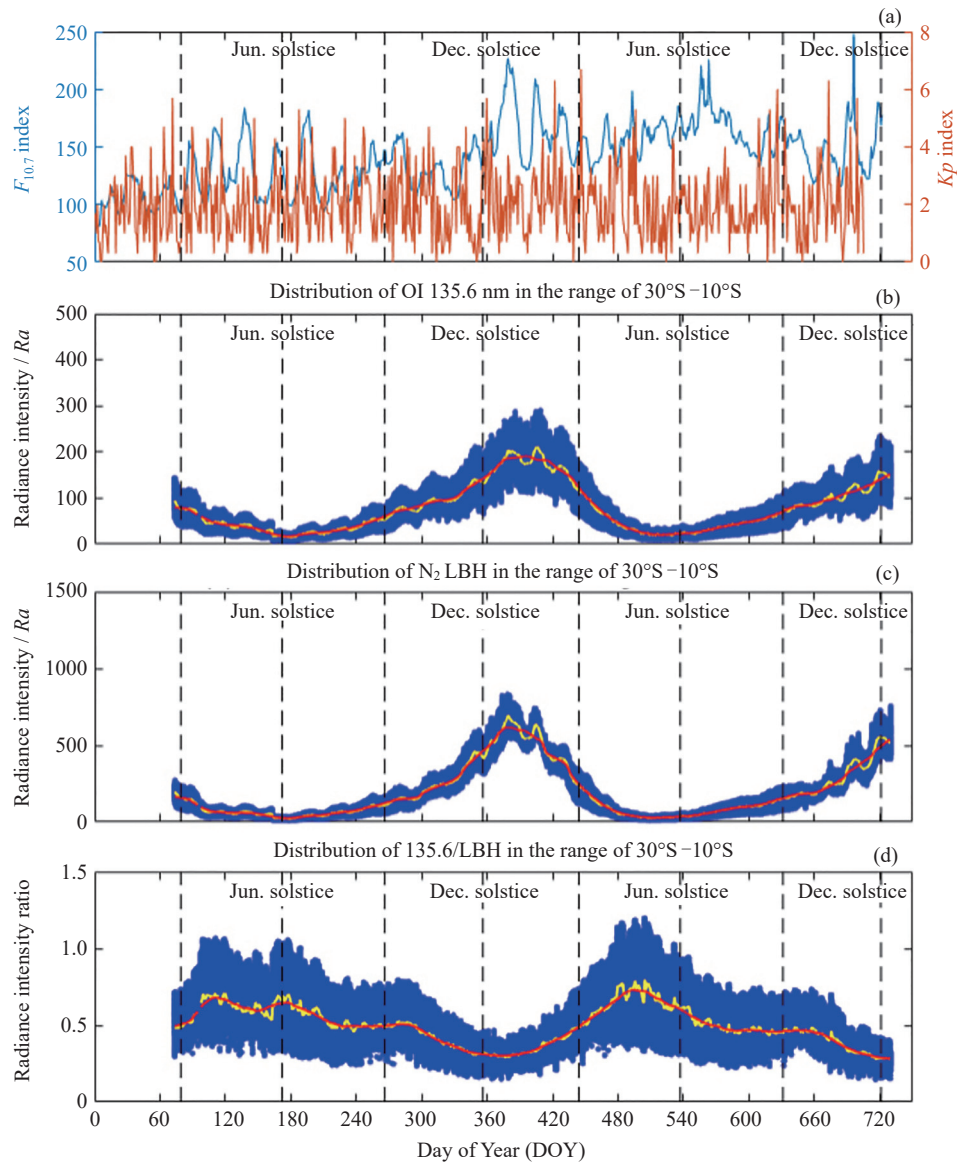


图 6 2022 年 3 月 15 日至 2023 年 12 月 31 日期间 20°S 附近纬度带 17:00 LT—18:30 LT 时的观测结果

Fig. 6 Observational results between 17:00 LT and 18:30 LT within the latitude band near 20°S from 15 March 2022 to 31 December 2023

冬差异 (12 月) 的转换过程. 总体上分析, 在中高纬该转换过程在春秋季节时期较快, 而在靠近赤道的低纬度地区明显放缓. 该结果预示了热层与电离层的季节转换过程存在显著的纬度变化. 同时, 由于各纬度带 135.6/LBH 比值到达峰值的时间早晚不同, 也预示了不同纬度电离层和热层季节转换快慢的不同. 值得指出的是, 若将 135.6/LBH 比值南北半球差异的零值点定义为热层成分的热层分日^[11], 其代表热层大气由冬夏差异 (6 月至点附近) 向夏冬差异 (12 月) 的转换时间点, 同时也是南北半球 135.6/LBH 比值大体对

称零差异的时间点. 图 8 显示可见各纬度带的热层分日非常集中, 从赤道附近向中高纬, 在 2022—2023 年出现三个热层分日, 这三个点出现在第 275~280 天、第 437~440 天 (即 2023 年第 72~75 天)、第 642~646 天 (即 2023 年第 277~281 天), 在所有“热层分日”, 各纬度间的总体差距不超过 6 天, 这意味着全球中、低纬度热层在冬季特征和夏季特征之间的转换时间较为一致, 出现在 275 天之后和 75 天之前.

以往 Fuller-Rowell 提出了“热层勺”的机制^[15]. 该机制认为全球范围内的环流在冬夏两季时混合了

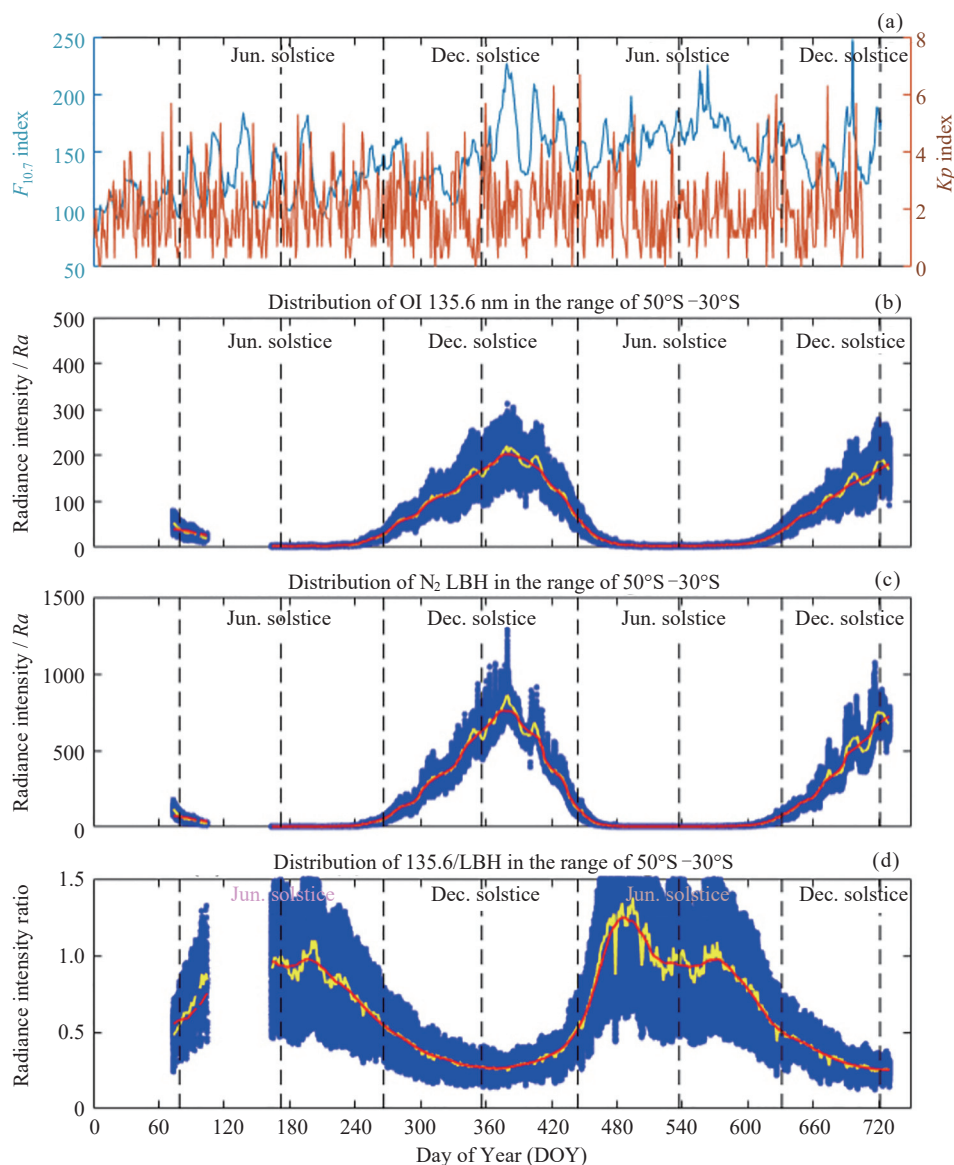


图 7 2022 年 3 月 15 日至 2023 年 12 月 31 日期间 40°S 附近纬度带 17:00 LT–18:30 LT 时的观测结果

Fig. 7 Observational results between 17:00 LT and 18:30 LT within the latitude band near 40°S from 15 March 2022 to 31 December 2023

主要的热层成分. 这种效应导致了冬夏两季各个成分的扩散分离, 与春秋两季相比, 这种“搅拌”导致电离层和热层高度冬夏两季平均质量增大, 大气密度标高减小, 因此从固定高度看, 大气密度在冬夏两季减小, 而春秋两季处于峰值, 从而形成 N_2 和 O 原子等各种成分以及总大气密度的半年变化. 另从全年尺度来看, 因为地球公转的日地距离变化, 地球一年中所受太阳辐射通量发生变化, 在近日点和远日点这个差距在 7% 左右, 可引起热层大气成分的年变化^[16], 这种来自太阳辐射的全年尺度的变化可以解释本文中低纬 OI

135.6 nm 气辉辐射强度和 N_2 LBH 带气辉辐射强度的峰值出现在夏季的结果.

从本文观测结果分析, 中低纬 OI 135.6 nm 气辉辐射强度和 N_2 LBH 带气辉辐射强度的峰值出现在夏季, 表明该气辉辐射的季节变化主要受到太阳辐射的影响. 除了太阳辐射的影响, 气辉辐射的季节变化还有可能是受到 N_2 和 O 原子春秋两季峰值的调制, 尤其是北半球春季的 OI 135.6 nm 气辉辐射 (见图 3 和图 4). 这有可能是北半球低纬及赤道 135.6/LBH 比值形成春季次峰的一个可能机制之一, 并对 135.6/LBH

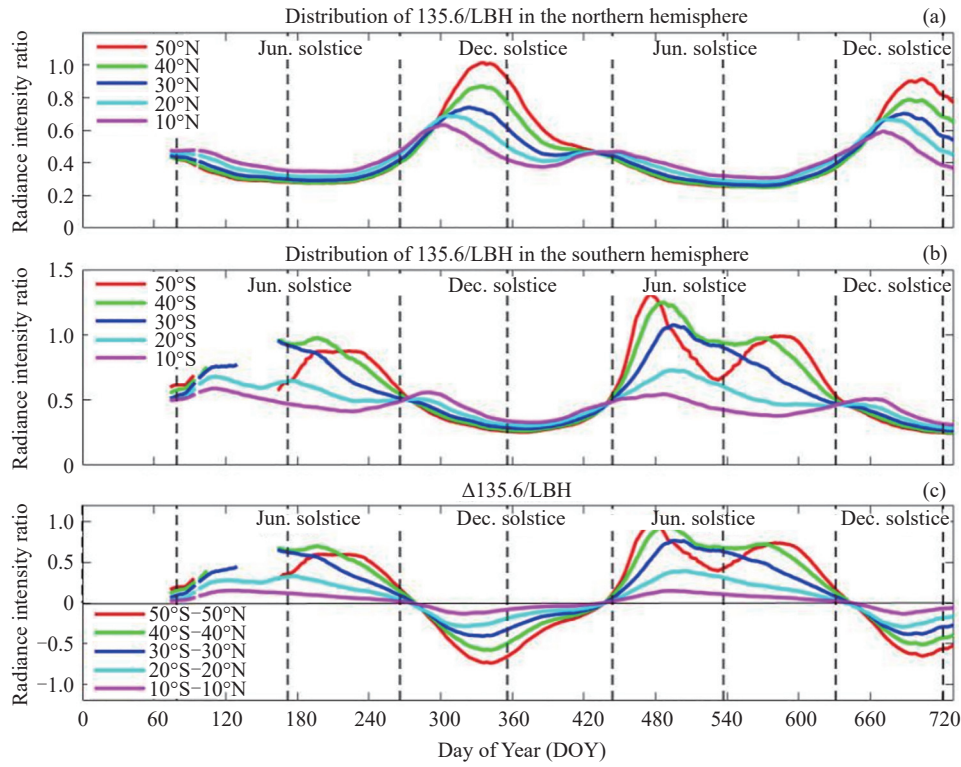


图 8 2022 年 3 月 15 日至 2023 年 12 月 31 日 17:00 LT–18:30 LT 北半球 (a) 和南半球 (b) 各纬度带的 135.6/LBH 比值季节变化, 以及全球不同纬度带不同时期的季节差异 (c). 其中季节差异为南半球减去北半球的结果
Fig. 8 Seasonal variations of the 135.6/LBH ratio at various latitude bands in the northern hemisphere (a) and southern hemisphere (b) between 17:00 LT and 18:30 LT from 15 March 2022, to 31 December 2023, as well as seasonal differences across different periods for global latitude bands (c). The seasonal differences are calculated by subtracting the values of the northern hemisphere from those of the southern hemisphere

比值在低纬和赤道的半年变化有贡献。

此外, 135.6/LBH 比值的季节转化变化特征还显示出一定的半球不对称性. 根据热层分日计算冬季高值和夏季低值特征的时长, 可知在北半球, 冬季高值特征时长为 160.8 天, 远小于夏季特征的 205.2 天; 相应的, 在南半球, 冬季特征的时长大于夏季半球, 半球间差异为 44.4 天, 而 Qian 等^[1]通过 GOLD 探测器所得 $[O]/[N_2]$ 的半球间差异为 9 天, 该差异可能与 $[O]/[N_2]$ 比值的经度和地方时变化有关. 本文光度计探测结果代表日落前全球各个经度的平均结果, 而 Qian 等^[1]聚焦于正午时刻, 且 GOLD 探测器仅聚焦于西经 45° 片区。

3 结论

分析 2022 年 3 月 15 日至 2023 年 12 月 31 日的 FY-3E 多角度电离层光度计 Tri-IPM 的 OI 135.6 nm

和 N_2 LBH 带气辉辐射强度及二者之比 135.6/LBH 在 18:00 LT 的全球季节变化转化特征及其随纬度和半球的变化. 主要结果如下。

(1) OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带辐射强度的季节转换特征相似, 二者均以冬季 (强度弱) 和夏季 (轻度强) 特征为主, 在春秋出现快速的季节转换; 二者的季节变化特征均随纬度变化, 随着纬度降低, 半年变化逐渐显露。

(2) 135.6/LBH 比值的季节变化特征随纬度变化, 在春秋出现较快转换, 但其季节特征, 即其峰和谷值出现的时期与 OI 135.6 nm 和 N_2 LBH 带辐射有显著不同。

(3) 135.6/LBH 比值在中纬呈现冬季高值和夏季低值两种主要季节特征, 季节变化特征具有显著年变化, 而在赤道附近则呈现春秋高值、冬夏低值的季节特点, 呈现半年变化。

(4) 135.6/LBH 比值的季节转化具有不对称性,

并随纬度和半球变化而变化. 135.6/LBH 的变化幅值也随纬度变化, 纬度越高, 极大值越大, 极小值越小, 南北半球差的幅值也越大, 季节变化完成时间随着纬度变化而变化, 尤其是至日附近的极值与至日的差距, 纬度越高, 极值与至日的差距越小.

(5) 135.6/LBH 在南半球和北半球转换时间发生在较短的几天内, 分别是 5 天 (2022 年第 275~280 天)、3 天 (2023 年第 72~75 天)、4 天 (2023 年第 277~281 天), 而冬季半球和夏季半球持续时间差异较大, 冬季半球比夏季半球长 44.4 天.

这表明该卫星的探测结果能较好地反映了热层大气成分比的季节、纬度和半球变化, 可为电离层热层相关研究和建模以及空间天气预报应用提供可靠基础.

参考文献

- [1] RISHBETH H, MÜLLER-WODARG I C F. Vertical circulation and thermospheric composition: a modelling study [J]. *Annales Geophysicae*, 1999, **17**(6): 794-805
- [2] QIAN L Y, BURNS A G, WANG W B, *et al.* Effects of the equatorial ionosphere anomaly on the interhemispheric circulation in the thermosphere[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2016, **121**(3): 2522-2530
- [3] STRICKLAND D J, BISHOP J, EVANS J S, *et al.* Atmospheric ultraviolet radiance integrated code (AURIC): theory, software architecture, inputs, and selected results[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 1999, **62**(6): 689-742
- [4] STRICKLAND D J, EVANS J S, PAXTON L J. Satellite remote sensing of thermospheric O/N₂ and solar EUV: 1. Theory[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A7): 12217-12226
- [5] EVANS J S, STRICKLAND D J, HUFFMAN R E. Satellite remote sensing of thermospheric O/N₂ and solar EUV: 2. Data analysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1995, **100**(A7): 12227-12233
- [6] HSU M L, RAJESH P K, LIU J Y, *et al.* Ionospheric electron density concurrently derived by TIP and GOX of FORMOSAT-3/COSMIC[J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2009, **20**(1): 207-214
- [7] YUE J, JIAN Y X, WANG W B, *et al.* Annual and semi-annual oscillations of thermospheric composition in TIMED/GUVI limb measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2019, **124**(4): 3067-3082
- [8] EVANS J V. Millstone Hill Thomson scatter results for 1965[J]. *Planetary and Space Science*, 1970, **18**(8): 1225-1253
- [9] FULLER-ROWELL T J, REES D. Derivation of a conservation equation for mean molecular weight for a two-constituent gas within a three-dimensional, time-dependent model of the thermosphere[J]. *Planetary and Space Science*, 1983, **31**(10): 1209-1222
- [10] PERRONE L, MIKHAILOV A V. Seasonal transitions in the thermosphere inferred from ionospheric observations[J]. *Remote Sensing*, 2023, **15**(8): 2022
- [11] QIAN L Y, GAN Q, WANG W B, *et al.* Seasonal variation of thermospheric composition observed by NASA GOLD[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2022, **127**(6): e2022JA030496
- [12] JONES JR M, SUTTON E K, EMMERT J T, *et al.* On the effects of mesospheric and lower thermospheric oxygen chemistry on the thermosphere and ionosphere semiannual oscillation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2021, **126**(3): e2020JA028647
- [13] QIAN L Y, SOLOMON S C, KANE T J. Seasonal variation of thermospheric density and composition[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2009, **114**(A1): A01312
- [14] LUAN X L, WANG W B, BURNS A, *et al.* Solar cycle variations of thermospheric O/N₂ longitudinal pattern from TIMED/GUVI[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(2): 2605-2618
- [15] FULLER-ROWELL T J. The “thermospheric spoon”: a mechanism for the semiannual density variation[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 1998, **103**(A3): 3951-3956
- [16] 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

作者简介



石正男, 1998年6月出生于湖北省孝感市, 中国科学院大学地球与空间探测技术专业硕士研究生, 研究方向为电离层光学遥感数据处理。
E-mail: shizheng21@mails.ucas.ac.cn



付利平 (通信作者) 女, 1972年3月出生于湖北省武汉市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 博士生导师, 主要研究方向为光学遥感探测技术及应用等。
E-mail: fuliping@nssc.ac.cn