0254-6124/2024/44(2)-0262-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

LIU Dan, WU Zhijing, YANG Junfeng, CHENG Xuan, WANG Jianmei, ZHANG Yiming, HU Xiong. Analysis of the Nighttime Variation Characteristics of Mesospheric Ozone and Correlation with Solar Activity (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(2): 262–269. DOI:10.11728/cjss2024.02.2023–0061

中间层臭氧的夜间变化特征及与太阳活动的相关性*

柳 丹[1,2] 吴止境[3] 杨钧烽[1,2] 程 旋[1,2]
王建美[1,2] 张依鸣[1,2] 胡 雄[1,2]

1(中国科学院国家空间科学中心 空间天气学国家重点实验室 北京 100190)

2(中国科学院国家空间科学中心 太阳活动与空间天气重点实验室 北京 100190)

3(中国东方红卫星股份有限公司 北京 100094)

摘 要 基于 ENVISAT-1/GOMOS(Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) 和 TIMED/SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 卫星的臭氧廓线数据结合模式 HAMMONIA (Hamburg Model of the Neutral and Ionized Atmosphere) 对热带低纬度地区 (20°S－20°N) 中间层 (60～110 km 高度) 夜间 (20:00 LT－24:00 LT) 臭氧的分布进行统计, 分析其与 27 天太阳周期的相关性. 观测与模式均表明中间层夜间臭氧在 95 km 达到峰值, 并在中间层上层存在半年振荡. 通过与相同时间段内的太阳辐射强迫 Lyman-α 数据对比发现, 中间层上层臭氧与太阳强迫作用可能是反相关, 中间层下层臭氧与太阳强迫作用可能呈正相关. 虽然观测结果与模型结果在臭氧随月份的时间和空间分布上有一定的相同特征, 但在臭氧峰值的数值上发现有较大的差异, 其中臭氧敏感性的振幅被模型低估.

关键词 中间层, 臭氧, 夜间变化, 太阳活动

中图分类号 P351

Analysis of the Nighttime Variation Characteristics of Mesospheric Ozone and Correlation with Solar Activity

LIU Dan[1,2] WU Zhijing[3] YANG Junfeng[1,2] CHENG Xuan[1,2]
WANG Jianmei[1,2] ZHANG Yiming[1,2] HU Xiong[1,2]

1(*State Key Laboratory of Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

2(*Key Laboratory of Solar Activity and Space Weather*, *National Space Science Center*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190)

3(*China Spacesat Co.*, *Ltd.*, *Beijing* 100094)

* 国家自然科学基金项目 (12241101, 42174192, 11872128), 中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”项目和部委研究项目 (JK20211A020086) 共同资助

2023-05-31 收到原稿, 2024-01-05 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Abstract　The satellite ozone data of ENVISAT-1/GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) and TIMED/SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) are analyzed to provide a statistical analysis of the distribution of ozone in the tropical mesosphere (60～110 km) at night (20:00 LT－24:00 LT) and explore its correlation with the 27-day solar cycle with HAMMONIA (Hamburg model of the neutral and ionized atmosphere). Both observations and model indicate that the nighttime ozone in the mesosphere peaks at 95 km and there is a semiannual oscillation in the upper mesosphere; Comparison with Lyman-α solar radiative forcing data over the same period shows that upper mesospheric (above 80 km) ozone may be inversely correlated with solar forcing, and lower mesospheric ozone may be positively correlated with solar forcing.. In order to better explore the correlation with solar activity, the ozone data were processed by filtering, and it was found that the inverse correlation between ozone at 95 km and Lyman-α was more significant. This correlation is more pronounced when long-term and short-term fluctuations are removed, especially in the months before and after the period of maximum amplitude of the 27-day solar radiative forcing cycle (around January and July 2004). Although the observations and the model results share some common features in the temporal and spatial distribution of ozone variations with months, large differences are found in the values of the peaks where the amplitude of ozone sensitivity is greatly underestimated by the model.

Key words　Near space, Ozone, Nighttime variations, Solar activity

0　引言

临近空间臭氧在平流层和中间层有两个极值区, 平流层和中间层臭氧的昼夜变化有很多原因. 目前明确的是平流层臭氧变化的很大一部分来源于太阳活动的短期和长期准周期性波动, 特别是太阳的 11 年活动周期和 27 天的太阳旋转周期[1], 但中间层臭氧对太阳短期活动变化的响应和研究受限于观测数据较少.

目前最适合用于分析的中间层臭氧数据集可能由太阳同步卫星提供, 其在任务过程中几乎以固定的本地时间进行测量. 在太阳同步轨道上发射的 SME(Solar Mesosphere Explorer) 卫星提供了固定的本地时间的臭氧数据集[2], 并成功地在中间层臭氧中检测出太阳自转信号. Aikin 和 Smith[3] 首次提出了中层臭氧时间序列中太阳旋转周期性的确凿证据, 利用 244 天的 SME 臭氧数据证明了臭氧和太阳紫外线指标 Lyman-α 线之间有显著的相关性. Keating 等[4] 分析了纬度 40°N－40°S 之间的近 2 年的 SME 数据, 发现在 0.05 mbar (70 km) 附近的臭氧反应最大, 臭氧敏感度峰值为 0.14, 即太阳 Lyman-α 线强度增加 1%, 臭氧减少 0.14%(Lyman-α 线辐照度在 27 天的太阳周期中变化大约 10%～15%). Hood 等[5] 利用大约 4 年的 SME 数据, 其研究结果与 Keating 等[4] 的研究结果基本一致, 同时在 80 km 附近检测到了臭氧反应的第二个最大值, 与中间层 OH 对太阳旋转变化的响应最大值的高度完全对应[5]. Thiéblemont 等[1] 首次利用夜间 GOMOS 数据与 HAMMONIA 模型研究夜间中间层臭氧与 Lyman-α 的相关性, 二者在中间层臭氧的夜间分布上具有一定的共同特征, 但第二极值区数值差异较大, 在模型中臭氧敏感性的振幅被大大低估. Shapiro 等[6] 利用来自 (MLS/Aura) 的中层 OH 和 H_2O 数据在太阳旋转时间尺度上与 11 年周期的不同阶段相对应的太阳宁静期和太阳活动频繁期两个时间段, 首次证明中层 OH 浓度与 Lyman-α 线强度在零时滞下有良好的相关性 (相关系数高达 0.79). 结果证实, 中间层 OH 与 H_2O 丰度是密切相关的, O_3 与太阳辐照度在中间层主要是反相关的, 因为 Lyman-α 线驱动的 H_2O 光解是氢自由基的来源, 是最主要的中间层臭氧破坏来源. Lee 等[7] 利用 Aura 微波探测仪 (MLS) 的观测, 分析了中间层次级臭氧最大值层附近夜间臭氧的 11 年太阳周期变化, MLS 夜间臭氧数据和来自 Solar Radiation and Climate Experiment (SORCE) 的 Solar-Stellar Irradiance Comparison Experiment (SOLSTICE) 的 240 nm 紫外线数据在太阳周期中显示出正相关. 夜间的臭氧与温度密切相关, 一般为正相关, 但高纬度地区的冬季除外. Gan 等[8] 利用 eCMAM30 模式

1979－2010 年模拟数据和 TIMED/SABER 卫星 2002－2015 年的温度数据研究中间层大气温度对太阳 11 年活动周期的响应. 模拟结果表明, 利用 31 年纬向平均模拟数据在 $F_{10.7}$ 增加 100 sfu (1 sfu = 10^{-22} W·m^{-2}·Hz^{-1}) 时 80 km 以下温度增加 1～2 K, 在 80～100 km 温度响应增加 2～4 K, 弱于观测数据响应结果.

中国利用卫星数据分析平流层和中间层的臭氧研究也不断深入[9–15], Tang[13] 利用 SABER 多年夜间臭氧廓线数据分析中间层顶臭氧的时空分布特征, 发现在 80 km 以上臭氧浓度与太阳 11 年活动周期存在明显的跟随变化. Liu 等[14] 利用 2002－2008 年的 GOMOS 数据分析了热带平流层的臭氧、二氧化氮和三氧化氮的准两年振荡和半年振荡特征, 阐述了动力输送对赤道平流层臭氧分布的影响. 常舒捷[15] 利用 SABER/TIMED 的 2002－2015 年的臭氧廓线及重力波参数发现中间层上层和低热层 85～100 km 的高度存在臭氧的大值区, 该区域是继平流层臭氧的第二大臭氧大值区, 且存在明显的季节变化.

观测和模型研究都表明平流层中臭氧来源于受太阳紫外线驱动的分子氧光解, 且与 27 天太阳旋转周期有一定相关性; 但是太阳短期活动对中间层的臭氧影响研究较少, 主要是受限于观测数据的不足以及中间层臭氧昼夜变化具有相当大的振幅, 短期臭氧变异可能与昼夜周期采样有关的波动相关从而可能使臭氧对短期太阳活动变化的反应估计变得不确定, 因此本文采用两种卫星观测数据同时结合化学模型对中间层夜间臭氧的分布特征进行统计分析, 并对其与太阳 27 天周期相关性展开探讨.

1 数据来源

1.1 ENVISAT-1/GOMOS 臭氧数据

ENVISAT-1 (Environmental Satellite) 卫星是欧空局的极轨对地观测卫星系列之一, ENVISAT 卫星于 2002 年 3 月 1 日发射, 2012 年 4 月 8 日停止运行. 卫星轨道为太阳同步轨道, 轨道高度为 796 km, 轨道倾角为 98.54°. 降交点 (卫星从北往南穿越黄道) 时间为 10:00 LT. 升交点 (卫星从南往北穿越黄道) 时间为 22:00 LT.

GOMOS (Global Ozone Monitoring by Occultation of Stars) 是搭载在欧洲空间局环境卫星 ENVISAT 上的一颗探测器, 其利用掩星的方法同时进行 3 个光谱通道的观测: 250～675, 756～773 和 926～952 nm 从而可以得到全球平流层和中间层的臭氧化学相关的大气参数, 例如 NO_2, NO_3, H_2O 和气溶胶等大气参数[14,16].

本文所选取的臭氧数据是 GOMOS_UFP_gridded 数据. 该数据基于 GOMOS_UFP, 将其在高度上进行网格化, 高度分辨率为 1 km, 能够给出 10～110 km 高度范围的高度方向网格化的臭氧数据.

2005 年 1－8 月, GOMOS 的镜面转向装置发生了严重的电子故障, 导致关闭了几个月. 其他有大量空白的时期发生在之前 (例如 2003 年 5 月至 9 月的几个空白期) 和之后 (特别是 2009 年), 减少了可用的文件数量. 因此采用 2003 年 9 月 1 日至 2005 年 1 月 31 日的数据 (大约 17 个太阳公转周期), 该时期的特点是数据缺失的天数比例较低 (8%)(例如上文所述, 在消除了无效资料后). 如果考虑整个时期 (2002－2012 年), 大约 38% 的臭氧数据在有关的高度范围内缺失. 2006－2011 年处于太阳宁静期, 在 27 天的太阳公转时间尺度上, SSI 的波动幅度非常小, 不利于研究太阳活动与中间层臭氧的相关性[1].

1.2 TIMED/SABER 臭氧数据

热层–电离层–中间层能量和动力学卫星 TIMED (Thermosphere Ionosphere Mesosphere Energetics and Dynamics) 是美国航空与航天管理局 (NASA) 太阳关联计划中的第一个太阳地球探测任务. TIEMD 卫星着重于理解中间层、低热层和低电离层 MLTI 区域的能量输入和输出, 同时了解由于能量输入和输出导致的基本的压强、温度和风场的特性. TIMED 卫星于 2001 年 12 月 7 日发射, 目前仍正常运行. 卫星轨道为太阳同步轨道, 高度约 625 km, 轨道倾角为 74.1°, 约每 60 天实施 1 次偏航机动, 有效载荷共有 4 台[17].

利用宽带发射辐射测量法探测大气层的大气廓线测量仪 SABER (Sounding of the Atmosphere using Broadband Emission Radiometry) 是 TIMED 卫星上的 4 个载荷之一, 是一个十通道的红外辐射计, 可以获得 15～135 km 的大气温度和成分. 每天大约有 15 个轨道, 每个正常工作日可以获得 1000 多个剖面数据[18,19].

目前, SABER 仍在轨运行, 状态正常. 当前最新的 SABER 二级数据版本是 V2.0. 选择与 GOMOS 相同时间段的 V2.0 臭氧数据进行对比分析.

1.3　太阳活动数据

Lyman-α 线被选作太阳的替代物, 因为其决定了 H_2O 的光解率, 从而决定了破坏臭氧的氢自由基的产生, 这是中间层臭氧化学平衡的一个关键参量. 每天的 Lyman-α 线时间序列来自 LISIRD(LASP Interactive Solar Irradiance Datacenter) 的日均值数据. LASP Interactive Solar Irradiance Datacenter (LISIRD) 是一个可以发现、可视化和下载来自各种空间任务、仪器、模型和实验室的太阳数据. LISIRD 专注于通过直观的用户界面、详细的元数据、交互式绘图功能和广泛的数据集目录, 提供公开的、易于分析的太阳数据*.

2　HAMMONIA 模式

Hamburg Model of the Neutral and Ionized Atmosphere (HAMMONIA) 是一个全球三维化学–气候模型, 从地表延伸到热层, 上边界在 250 km 左右. 其是 Fifth-Generation Atmospheric General Circulation Model (ECHAM5)[20] 和 MAECHAM5 (MAECHAM 是 ECHAM5 的中层大气配置) [21,22] 环流模式向高空的延伸. 在 HAMMONIA 中实施了一些新的参数化来说明发生在中间层和热层的重要过程 (例如波长低至 5 nm 的太阳加热, 红外冷却的非 LTE 效应, 近红外 CO_2 波段的加热, 分子热传导和示踪剂的扩散, 以及离子阻力). 由于该模型包括对流层动力学和物理学的完整表述, 该模型的动力学和物理学与 MOZART3 化学方案[23] 交互耦合, 该方案包括 48 种化合物和 153 种气相反应[24]. HAMMONIA 已经被应用于研究大气对 11 年太阳周期的响应[25]. 模式受太阳谱强迫 S_λ 驱动, 具有 27 天时间周期的正弦变化, 由平均太阳谱强迫 $S_{0,\lambda}$ 和时间 t (年际日) 决定, A_λ 为与波长相关的辐射振幅[24], 有

$$S_\lambda(t) = S_{0,\lambda}(t) + A_\lambda \sin(t/27).$$

详细的模型描述可参见文献 [25]. Thiéblemont 等[1] 提供了 2003 年 9 月开始 1826 天 5 年理想状况和实际状况两种太阳活动条件 HAMMONIA 模式输出的臭氧数据, 本文采用其实际状况的臭氧输出数据**[1].

3　结果与分析

研究中间层臭氧对太阳 27 天周期变化的响应, 选取热带地区 20°S－20°N 作为研究区域是基于该区域的臭氧对太阳变化的响应最强烈. 臭氧对太阳变化的响应在很大程度上是由光化学过程驱动的, 尤其是在太阳 27 天时间尺度上, 而选取夜间的臭氧作为研究对象则排除了臭氧日变化振幅波动大的影响. GOMOS 卫星数据覆盖整个热带中间层, 并提供几乎恒定的本地时间测量. 因此采用两种卫星数据的观测结果与 HAMMONIA 模型的结果比较, 不仅可以互相验证观测结果的准确性, 也可以测试该模型模拟中间层夜间臭氧对太阳 27 天自转变化的响应能力.

3.1　观测数据对比分析

结合臭氧的分布选取 20°S－20°N 作为研究区域, 图 1(a) 为利用 2003 年 9 月至 2005 年 1 月 (大约 17 个太阳公转周期共 519 天) 的 SABER 的 V2.0 臭氧廓数据统计的夜间 20:00 LT－24:00 LT 的 20°S－20°N 臭氧变化随高度和时间的分布, 图 1(b) 为对应时间对应区域的 GOMOS 臭氧数据随高度和时间的分布.

图 1 给出了观测到的 (SABER) 和 (GOMOS) 中层夜间臭氧剖面 (60～110 km) 在 2003 年 9 月－2005 年 1 月期间的变化. 图 1(a) 为 SABER 臭氧混合比在 2003 年 9 月 1 日－2005 年 1 月 31 日期间, 在中间层顶区域 (约 95 km) 达到峰值, 数值高于 14 ppm 且存在一个规律的半年震荡; 空白部分为采取 3 倍标准偏差质量控制后的剔除空白.

图 1(b) 为 GOMOS 臭氧混合比也在中顶区域 (约 95 km) 达到峰值, 数值高于 16 ppm. 这个次级臭氧最大值 (与最初的平流层臭氧最大值相比) 是中间层顶的原子氧最大值和普遍存在的影响化学速率系数和大气密度的极低温度的综合作用的结果. 在 80 km 以上, 有一个非常明显的半年振荡信号, 对应

* https://lasp.colorado.edu/lisird/data

** https://figshare.com/s/67a1508c022c1227e291[1].

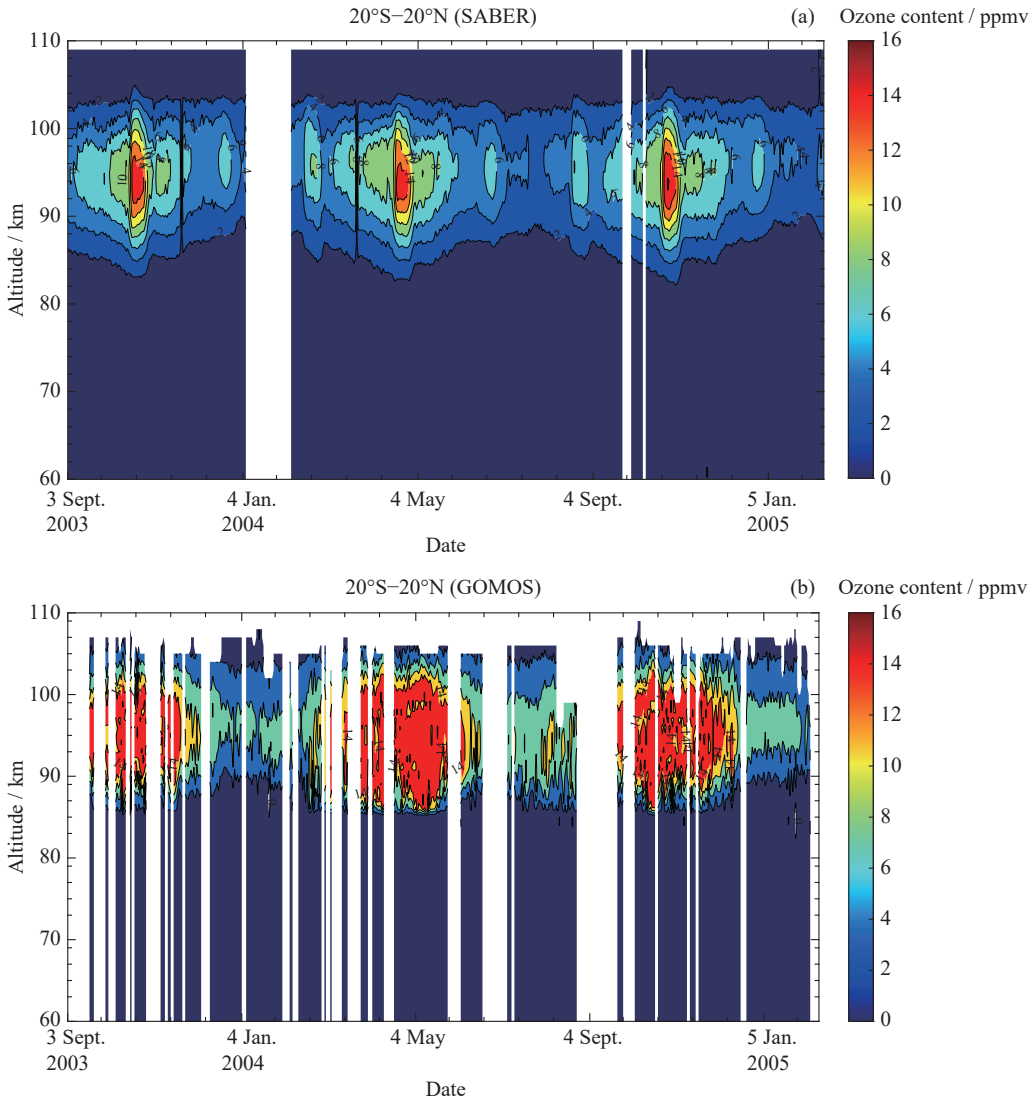

图 1 2003 年 9 月至 2005 年 1 月中间层夜间臭氧随时间–高度的变化

Fig. 1 Mesosphere night time ozone variation with time-height from September 2003 to January 2005

臭氧浓度最大的月份可观察到臭氧昼夜潮的振幅最大, 这应该是由于温度下降并从下层带来低浓度的原子氧和氢, 导致了一个更高的臭氧平衡值的净效应的结果. 这与之前的研究结果一致, 在 80 km 以上, SABER 的温度和臭氧的半年震荡相位基本一致, 臭氧振荡与温度振荡正相关[26].

两种观测数据是采取不同测量方法得到的观测数据, 结果的一致性也说明了中间层夜间臭氧分布特征, 中间层夜间臭氧在 95 km 左右存在一个次大值区, 且有一个明显的半年震荡信号.

3.2 模式结果分析

图 2 为 HAMMONIA 模式输出的与观测数据时间和区域一致的臭氧分布, 采用的太阳输入参数条件也一致, 模式结果分布特征与观测结果类似, 均在 95 km 附近发现了次级臭氧最大值, 而且其半年度的相对变化幅度也很大. 如图 1(b) 所示, SABER 与 GOMOS 臭氧含量观测结果半年期振荡相对变化是模拟结果的 2 倍. 在以往研究中, 模式结果较观测结果数值偏低, 这与本文的两种观测结果对比一致[25], HAMMONIA 模式输出的中间层的臭氧的次级臭氧最大值被低估了, 原因可能是该模型本身受到有效传输的强烈影响, 而有效传输是由涡流和分子扩散过程造成的, 而这些过程在 HAMMONIA 已被考虑.

3.3 与太阳活动相关性分析

图 3 为利用 LISIRD 综合观测数据后模式得到的 Lyman-α 随选取观测数据的时间变化, 时间序列

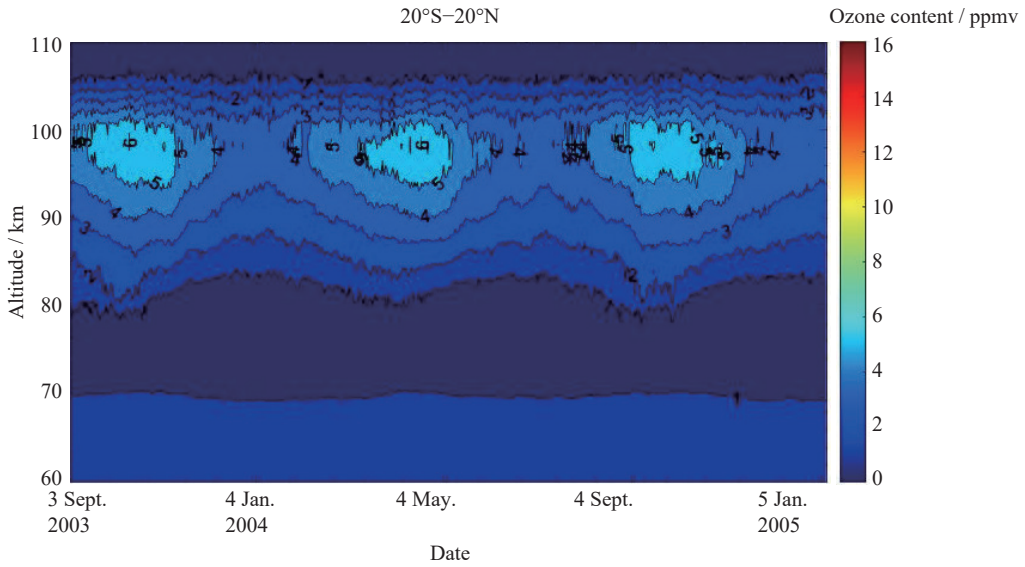

图 2　HAMMONIA 模式输出夜间臭氧随时间–高度的变化

Fig. 2　HAMMONIA model output night time ozone vary with time-height

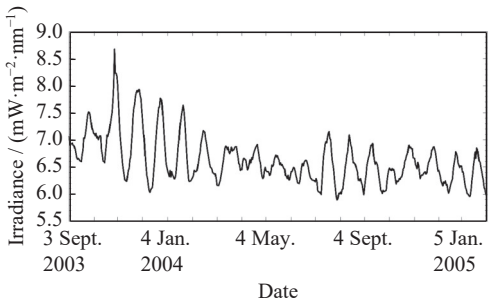

图 3　LISIRD 的 Lyman-α 数据随时间的变化

Fig. 3　Lyman-α data of LISIRD vary with over time

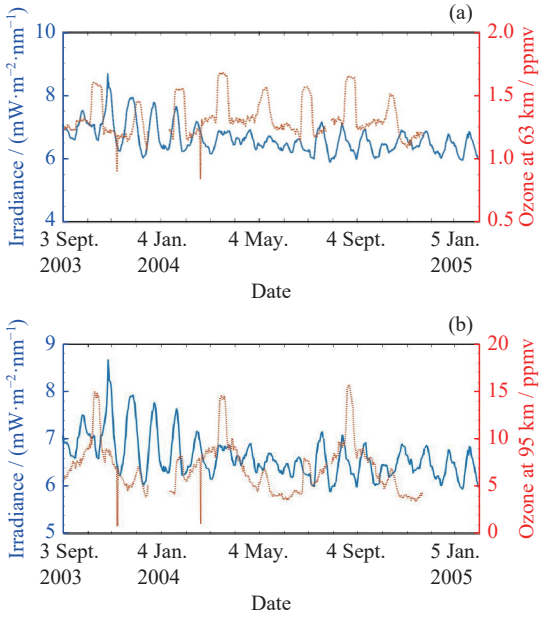

图 4　SABER 观测的 63 km 和 95 km 臭氧浓度与太阳辐射 Lyman-α 的相关性

Fig. 4　Correlation of 63 km and 95 km ozone concentrations observed by SABER with solar radiation Lyman-α

对应选取臭氧的观测时间为 2003 年 9 月 1 日至 2005 年 1 月 31 日.

图 3 给出了研究所使用的 Lyman-α 太阳辐照度强迫数据. 在 LISIRD 中重建的 Lyman-α 线. 图 3 表明 27 天周期在时间上并不恒定, 其波动在亚周期上尤为明显. 尽管太阳公转周期信号以 27 天为中心, 但跨度很大. 围绕 27 天其周期范围相当广泛, 从 20～35 天不等. 这是由于活动区域并不总是位于太阳的同一经度上, 而且太阳的旋转周期取决于纬度 (即差分旋转).

由于 GOMOS 数据在质量控制后缺失值较多, 因此选取 SABER 数据进行太阳活动的相关性分析. 图 4 为选取 SABER 数据 63 km 和 95 km 两个高度层上的臭氧数据与 Lyman-α 进行相关性分析. 在 63 km 处, 太阳辐射强迫和臭氧时间序列总体上是正相关的, 在 90～100 km 处, 太阳辐射强迫和臭氧时间序列总体上是反相关的; 为了使相关性更加明显, 对数据进行滤波处理, 先做 7 天平均去除短期波动再减去一个 35 天的平均去除长期波动. 图 5 为选取 SABER 数据 95 km 的臭氧数据与 Lyman-α 滤波处

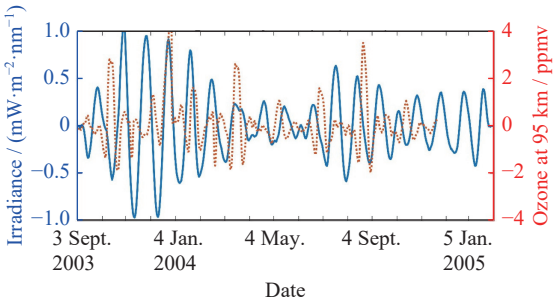

图 5 滤波处理后的 SABER 95 km 臭氧浓度与太阳辐射 Lyman-α 的相关性

Fig. 5 Correlation of 95 km ozone concentrations by SABER with solar radiation Lyman-α after filter

理后的相关性分析. 由图中可见进行滤波处理后太阳辐射强迫和臭氧时间序列的反相关性更加明显, 在周期振幅最大的时期 (2004 年 1 月和 7 月左右) 前后几个月臭氧与 Lyman-α 的相关性更容易区分.

4 结论

GOMOS 和 SABER 卫星提供了太阳下降期间 (2003 年 9 月至 2005 年 1 月) 的臭氧有效数据占比较高的两种数据集, 为研究中间层夜间臭氧的分布特征提供了数据支持. 利用两种不同测量方法得到的卫星观测数据分析了相同时间段内 (2003 年 9 月至 2005 年 1 月) 低纬度地区 (20°S－20°N) 夜间 (20:00 LT－24:00 LT) 臭氧的分布特征, 并与模式 HAMMONIA 输出的结果进行了比较, 卫星观测和模式输出的臭氧夜间数据均显示中间层夜间臭氧在 95 km 处达到峰值, 并在中间层上层存在半年振荡.

通过与相同时间段内的太阳辐射强迫 Lyman-α 数据对比发现中间层上层臭氧与太阳强迫作用可能是反相关, 中间层下层臭氧与太阳强迫作用可能呈正相关, 在太阳辐射强迫 27 天周期振幅最大的时期 (2004 年 1 月和 7 月左右) 前后几个月更容易区分这种相关性.

中间层夜间臭氧对太阳短期变化有明显的反应, 在中间层低层, 随着太阳紫外线的增加, 分子氧的光解作用增强 (导致臭氧产量增加), 而随着高度的增加, 这种影响逐渐被 HO_x 自由基产量增加所抵消. 随着高度的增加, 逐渐被通过增加 H_2O 光解产生的 HO_x 自由基所抵消. 而且反应的幅度在上层 MLT 较大, 而在模型中臭氧反应被低估了, 需要更多的研究来评估模型模拟这种臭氧反应的能力, 这对提高驱动中层大气的化学和动力学过程的理解具有重要意义.

致谢 SABER 数据由 TIMED 卫星工作组提供, GOMOS 数据由 ENVISAT 卫星工作组提供, 太阳活动指数数据由 LASP 提供, HAMMONIA 臭氧数据由 Thiéblemont R 分享.

参考文献

[1] THIÉBLEMONT R, BEKKI S, MARCHAND M, *et al.* Nighttime mesospheric/lower thermospheric tropical ozone response to the 27-day solar rotational cycle: ENVISAT-GOMOS satellite observations versus HAMMONIA idealized chemistry-climate model simulations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2018, **123**(16): 8883-8896

[2] BARTH C A, RUSCH D W, THOMAS R J, *et al.* Solar mesosphere explorer: scientific objectives and results[J]. *Geophysical Research Letters*, 1983, **10**(4): 237-240

[3] AIKIN A C, SMITH H J P. Mesospheric ozone changes associated with 27 day solar ultraviolet flux variations[J]. *Geophysical Research Letters*, 1986, **13**(5): 427-430

[4] KEATING G M, PITTS M C, BRASSEUR G, *et al.* Response of middle atmosphere to short-term solar ultraviolet variations: 1. Observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1987, **92**(D1): 889-902

[5] HOOD L L, HUANG Z, BOUGHER S W. Mesospheric effects of solar ultraviolet variations: Further analysis of SME IR ozone and Nimbus 7 SAMS temperature data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1991, **96**(D7): 12989-13002

[6] SHAPIRO A V, ROZANOV E, SHAPIRO A I, *et al.* Signature of the 27-day solar rotation cycle in mesospheric OH and H_2O observed by the Aura Microwave Limb Sounder[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(7): 3181-3188

[7] LEE J N, WU D L. Solar cycle modulation of nighttime ozone near the mesopause as observed by MLS[J]. *Earth and Space Science*, 2020, **7**(4): e2019EA001063

[8] GAN Q, DU J, FOMICHEV V I, *et al.* Temperature responses to the 11 year solar cycle in the mesosphere from the 31 year (1979-2010) extended Canadian Middle Atmosphere Model simulations and a comparison with the 14 year (2002-2015) TIMED/SABER observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(4): 4801-4818

[9] CHENG Xuan, XIAO Cunying, HU Xiong, *et al.* Evaluation of atmospheric empirical model based on TIMED/SABER satellite temperature data[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2018, **48**(10): 104701 (程旋, 肖存英, 胡雄, 等. 基于 TIMED/SABER 卫星温度数据对大气经验模型的评估 [J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, **48**(10): 104701)

[10] CAO Wenxiang, ZHANG Shaodong, YI Fan, *et al.* Vari-

ation of the mesopause observed by SABER/TIMED satellite[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, **55**(8): 2489-2497 (操文祥, 张绍东, 易帆, 等. 中间层顶变化的 SABER/TIMED 卫星观测 [J]. 地球物理学报, 2012, **55**(8): 2489-2497)

[11] XU Jiyao, JI Qiao, YUAN Wei, *et al.* Comparison between the TIMED observed global temperature distribution and the NRLMSISE-00 empirical atmospheric model[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2006, **26**(3): 177-182 (徐寄遥, 纪巧, 袁韦, 等. TIMED 卫星探测的全球大气温度分布及其与经验模式的比较 [J]. 空间科学学报, 2006, **26**(3): 177-182)

[12] WAN Lingfeng. Response and related mechanism of stratospheric ozone in the summer northern hemisphere to the quasi-11 years ultraviolet cycle of the sun[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2016 (万凌峰. 夏季北半球平流层臭氧对太阳紫外准 11 年循环的响应及机制 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2016)

[13] TANG Chaoli. Study on the temporal and spatial distribution characteristics of multiple parameters of high altitude atmosphere[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2018 (唐超礼. 高空大气多参数时空分布特性研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2018)

[14] LIU Yi, LU Chunhui, WANG Yong, *et al.* The quasi-biennial and semi-annual oscillation features of tropical O_3, NO_2, and NO_3 revealed by GOMOS satellite observations for 2002-2008[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(18): 1455-1463 (刘毅, 陆春晖, 王永, 等. 利用 GOMOS 卫星资料研究热带平流层臭氧、二氧化氮和三氧化氮的准两年和半年振荡特征 [J]. 科学通报, 2011, **56**(18): 1455-1463)

[15] CHANG Shujie. Analysis of gravity waves in the middle atmosphere based on multi-source data and its impact on ozone[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2021 (常舒捷. 基于多源资料的中层大气重力波分析及其对臭氧的影响 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2021)

[16] LU Chunhui. Characteristics of stratospheric circulation and its response to ENSO events and sunspot cycle[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011 (陆春晖. 平流层环流的变化特征及其对 ENSO 海温异常和太阳周期活动的响应 [D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2011)

[17] CHENG Xuan. Researches on atmospheric modeling and applications in near space[D]. Beijing: National Space Science Center, University of Chinese Academy of Sciences, 2020 (程旋. 临近空间大气建模及其应用研究 [D]. 北京: 中国科学院大学 (中国科学院国家空间科学中心), 2020)

[18] YANG Wenkai, YANG Junfeng, GUO Wenjie, *et al.* Global stratospheric gravity wave characteristics by Aura/MLS and TIMED/SABER observation data[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(5): 919-926 (杨文凯, 杨钧烽, 郭文杰, 等. Aura/MLS 与 TIMED/SABER 观测全球重力波特性 [J]. 空间科学学报, 2022, **42**(5): 919-926)

[19] XIAO Cunying. Researches on the dynamics of the atmosphere in the near space[D]. Beijing: Center for Space Science and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, 2009 (肖存英. 临近空间大气动力学特性研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院 (空间科学与应用研究中心), 2009)

[20] ROECKNER E, BROKOPF R, ESCH M, *et al.* Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model[J]. *Journal of Climate*, 2006, **19**(16): 3771-3791

[21] GIORGETTA M A, MANZINI E, ROECKNER E, *et al.* Climatology and forcing of the Quasi-Biennial Oscillation in the MAECHAM5 model[J]. *Journal of Climate*, 2006, **19**(16): 3882-3901

[22] MANZINI E, GIORGETTA M A, ESCH M, *et al.* The influence of sea surface temperatures on the northern winter stratosphere: ensemble simulations with the MAECHAM5 model[J]. *Journal of Climate*, 2006, **19**(16): 3863-3881

[23] KINNISON D E, BRASSEUR G P, WALTERS S, *et al.* Sensitivity of chemical tracers to meteorological parameters in the MOZART-3 chemical transport model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2007, **112**(D20): D20302

[24] GRUZDEV A N, SCHMIDT H, BRASSEUR G P. The effect of the solar rotational irradiance variation on the middle and upper atmosphere calculated by a three-dimensional chemistry-climate model[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(2): 595-614

[25] SCHMIDT H, BRASSEUR G P, CHARRON M, *et al.* The HAMMONIA chemistry climate model: sensitivity of the mesopause region to the 11-year solar cycle and CO_2 doubling[J]. *Journal of Climate*, 2006, **19**(16): 3903-3931

[26] HUANG F T, MAYR H G, REBER C A, *et al.* Ozone quasi-biennial oscillations (QBO), semiannual oscillations (SAO), and correlations with temperature in the mesosphere, lower thermosphere, and stratosphere, based on measurements from SABER on TIMED and MLS on UARS[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2008, **113**(A1): A01316

作者简介

柳　丹　女, 空间物理学博士. 现为中国科学院国家空间科学中心助理研究员. 主要研究方向为临近空间环境特性研究、临近空间对太阳活动响应的模拟研究等.
E-mail: liudan@nssc.ac.cn

杨钧烽（通信作者）　男, 2016 年于中国科学院国家空间科学中心获得空间物理学博士学位. 现为中国科学院国家空间科学中心副研究员, 硕士生导师. 主要研究方向为事临近空间大气环境特性分析、环境建模和同化预报等.
E-mail: yangjunfeng@nssc.ac.cn