

LIU Dan, YANG Junfeng, HU Xiong, XIAO Cunying, CHENG Xuan. Simulation on the Impact of the Sudden Process of Solar Activity on the Near Space Atmosphere (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, 43(1): 101–111. DOI:10.11728/cjss.2023.01.210929104

太阳活动突发过程对临近空间大气影响的模拟*

柳 丹^{1,2,3} 杨钧烽^{1,2} 胡 雄^{1,2}
肖存英⁴ 程 旋^{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(中国科学院大学 北京 100049)

4(北京师范大学天文系 北京 100875)

摘 要 空间天气对地球及近地空间具有重要影响, 大的空间天气事件对中上层大气动力学和成分具有不同的影响。利用全大气耦合模式 WACCM, 针对太阳耀斑、太阳质子、地磁暴三类事件, 以太阳活动平静期 2015 年 5 月 10–14 日的 GEOS-5 数据为模式背景场, 通过 $F_{10.7}$ 、离子产生率、 Kp 及 A_p 指数设置, 分别模拟三类事件对临近空间大气温度、密度和臭氧的影响。结果表明耀斑事件在三类事件中对临近空间大气温度和密度的影响最为显著。平流层大气温度增加是由耀斑辐射增强引起平流层臭氧吸收紫外辐射发生的光化学反应所致, 耀斑事件引起平流层和低热层温度增加约为 2~3 K, 低热层大气相对密度增加在 6% 以内; 太阳质子事件及磁暴事件主要影响低热层, 但太阳质子事件和磁暴事件对低热层温度扰动不大于 1 K。

关键词 太阳活动, 临近空间, 模拟, 响应特征

中图分类号 P351

Simulation on the Impact of the Sudden Process of Solar Activity on the Near Space Atmosphere

LIU Dan^{1,2,3} YANG Junfeng^{1,2} HU Xiong^{1,2}
XIAO Cunying⁴ CHENG Xuan^{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(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

4(Department of Astronomy, Beijing Normal University, Beijing 100875)

* 中国科学院战略性先导科技专项(A类)(XDA17010301), 国家自然科学基金项目(42174192, 91952111, 11872128)和中国科学院国家空间科学中心“攀登计划”项目共同资助

2021-09-28 收到原稿, 2022-10-11 收到修定稿

E-mail: liudan@nssc.ac.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/>)

Abstract Space weather has important effects on the Earth and near-Earth space, while large space weather events have different effects on the dynamics and composition of the pelagic atmosphere. The Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM) is used to simulate the effects of three types of events on atmospheric parameters of high altitude atmospheric parameters in the near space, atmospheric temperature, density and ozone through $F_{10.7}$, ion production rate, Kp , and Ap index settings, respectively, for solar flares, solar protons and geomagnetic storms. The results show that flare events have the most significant effect on the temperature and density of the near space atmosphere among the three types of events, and the increase in stratospheric atmospheric temperature is caused by the photochemical reaction caused by stratospheric ozone absorption of ultraviolet radiation caused by the enhancement of radiation during the solar flare event, the increase of temperature in stratosphere and low thermosphere is roughly 2~3 K, and the relative density of the lower thermosphere increases within 6%. Solar proton events and geomagnetic storm events mainly affect the low thermosphere, but solar proton events and magnetic storm events disturb the temperature of the lower thermosphere by no more than 1 K.

Key words Solar activity, Near space, Modeling, Response characteristics

0 引言

空间天气对地球和近地空间具有重要影响^[1], 而大的空间天气事件对中层大气的动力学和成分也具有不同的影响。太阳活动影响气候系统的机制主要可以分为三大类: 一类是总太阳辐照度通过辐射过程影响气候, 第二类是紫外辐射通过影响平流层与对流层间的动力学过程影响气候, 第三类是太阳通过调制高能粒子影响形成云的微观物理过程影响气候。

根据观测表明, 一个太阳活动周期内紫外辐射的变化幅度约为 6%~8%, 远大于太阳辐射总剂量的变化幅度, Woods^[2] 也在 2003 年 10 月太阳风暴期间研究了太阳辐射的变化, 发现太阳风暴期间紫外辐射变化幅度可达 10% 以上, X 射线波段变化可至数倍增长。

目前有很多观测数据被用来研究大气与太阳活动周期(11 年和 27 天周期)的关系, 也有很多研究侧重于太阳活动期间化学成分的变化。Thiéblemont 等^[3] 研究赤道地区平流层臭氧与紫外辐射的相关性, 这与太阳的 27 天自转周期密切相关, 同时利用化学-气候模式 CCM 模式进行了模拟研究。Bag^[4] 利用雷达数据研究 M 级耀斑引发的质子事件对中间层钠层影响; Denton 等^[5] 利用 191 次太阳质子事件的臭氧矿物质数据进一步明确了北半球极涡对质子事件后臭氧迅速下降的破坏影响。近年来多种全球气候模式已经被用来研究太阳耀斑和太阳质子事件的影响机制, 多集中于真实事件的模拟研究。Pettit 等^[6] 利

用 WACCM 模式模拟了 2005 年 9 月的太阳耀斑和太阳质子事件对中层大气的影响, 发现质子事件在极地平流层和中间层影响强于耀斑事件, 而耀斑在赤道地区的低热层影响更大。Gan 等^[7] 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 ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$) 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。Jackman 等^[8-11] 研究了太阳质子事件对中层大气的影响变化; Bardeen 等^[12] 利用 WACCM 模型研究 2012 年 1 月太阳质子事件对极地中层云的影响; Kovács 等^[13] 利用不同版本的 WACCM 模型对 2005 年 1 月的太阳质子事件对 D 区的化学反应影响进行模拟; Liu 等^[14] 利用 WACCM-X 模型研究了 2008 年太阳活动极小年大气参数随高度的变化, 模拟结果与 SABER/TIMED 卫星的温度、TIDI/TIMED 纬向风结果一致; Pedatella 等^[15] 利用 Jicamarca 观测数据和 WACCM-X 模拟分析了太阳耀斑在 150 km 电离层的影响。

本文主要研究与太阳活动相关的三类事件: 太阳耀斑事件、太阳质子事件和磁暴事件。利用 WACCM 模拟太阳质子事件和太阳耀斑活动研究已经比较成熟, 本文主要集中于真实事件的重现模拟。利用观测数据分析太阳活动对中层大气的影响结果有

很多,较集中于 27 天和 11 年太阳活动周期的响应分析。在大部分事件中太阳耀斑、质子事件以及地磁暴会依次发生或者叠加出现,利用观测数据分析太阳活动影响较为复杂,各类事件的叠加影响可能无法完全分开。因此,本文采用物理模式设计实验组:太阳耀斑、地磁暴事件、太阳质子事件、空白对照组,着重于单独模拟各类事件对临近空间大气不同高度的研究,区分不同事件对不同高度的影响,分析临近空间大气对太阳活动突发过程的响应机制。

1 数据来源

采用 2015 年 5 月 10—14 日的 GEOS-5 (Version 5 of the Goddard Earth Observing System Data Assimilation System) 数据^[16]作为模式的初始背景场。GEOS-5 是一个模型系统,使用地球系统建模框架,用于支持 NASA 全球建模同化办公室在数据分析、观测系统方面的地球科学研究建模和设计、气候和天气预报,以及基础研究。

模式输入的太阳活动参数包括太阳黑子数 isn (International Sunspot Number), 10.7 cm 太阳射电辐射流量 $F_{10.7}$, $F_{10.7}$ 指数 81 天平均值 $F_{10.7a}$ 和地磁活动参数 Kp 及 Ap 指数的 3 h 历史数据*来源于德国地球科学研究中心 GFZ German Research Center for Geosciences (Helmholtz-Zentrum Potsdam-Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam)。

离子产生率是利用 1963—2012 年期间测量卫星在太阳质子事件期间的质子通量计算能量沉积得到的。离子产生率是一个随气压变化的函数,气压范围从 888 hPa (对应高度约 1 km) 到 8×10^{-5} hPa (对应高度约 115 km),采用的太阳质子事件数据是选取的 2001 年 11 月 4 日的真实离子产生率数据**,具体数据来源见表 1。

2 模式与输入参数

2.1 WACCM 模式

WACCM (Whole Atmosphere Community Climate Model) 是美国大气研究中心 (NCAR) 发展的对

流层—平流层—中间层—热层底部一体化的全球三维大气模式,也是通用地球系统模式 CESM (Community Earth System Model) 的一个子系统^[15, 20]。

如图 1 所示, WACCM 由 NCAR 三个部门合作完成, HAO (High Altitude Observatory) 的高层大气模式 TIME-GCM, ACD (Atmospheric Chemistry) 中层大气化学模式 MOZART, CGD (Climate and Global Dynamics) 对中层大气模式 MACCM, WACCM 采用 CESM 作为框架。WACCM-SD 模式为 WACCM4 模式的动力场版本, WACCM4 的详细描述参见 Marsh^[21], 可以用来研究太阳活动对中层和高层大气的影响, 其外部的气象场资料由 GMAO (Global Modeling and Assimilation Office) GEOS-5 资料提供。模式水平分辨率为 $1.9^\circ \times 2.5^\circ$ (纬度 $\times$ 经度), 覆盖地面至约 140 km。垂直分层 88 层 ($1000 \sim 5.96 \times 10^{-6}$ hPa)^[18, 19], 垂直分辨率随高度增加而增大, 在对流层为 1.1 km 左右变动, 靠近 50 km 增

表 1 离子产生率数据来源

Table 1 Introduction of data source of ion production rate

Years	Source of Protons
1963—1973	IMP 1~7
1974—1993	IMP 8
1994—2005	GOES 7, 8, 10, 11
2006—2012	GOES 11, 13

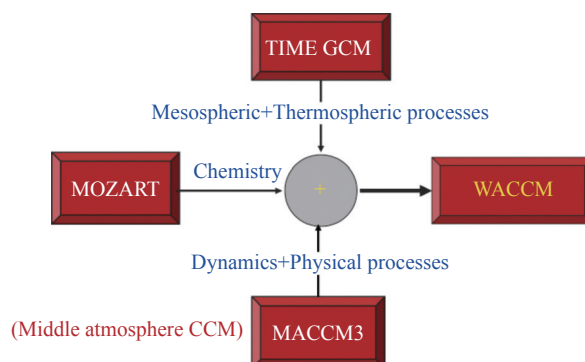


图 1 WACCM 模式

Fig. 1 WACCM Model

*ftp://ftp.gfz-potsdam.de/pub/home/obs/Kp_ap_Ap_SN_F107

**<http://strat-www.met.fu-berlin.de/~matthes/sparc/inputdata.html>^[17-19]

大为 1.5 km, 在 65 km 以上为 3.5 km^[22]。WACCM4 中关于太阳光谱辐射波长小于 121 nm 的参数化是基于 $F_{10.7}$ 指数^[23]; 高于 121 nm 的参数化具体方案参考文献^[24]。

2.2 太阳活动相关事件的输入参数设置

三类事件均基于 WACCM 模式模拟事件发生时对临近空间大气的影响, 基于太阳平静期 2015 年 5 月 10—14 日为背景(背景场为同化模式数据), 设定 $F_{10.7}$, $F_{10.7a}$, Kp , Ap , isn 等事件相关指数(人为设定值), 由模式的活动事件和平静期背景场的大气参量改变量分析三类事件对临近空间大气的影响, 具体参数设置见表 2。

第一组: 设定 2015 年 5 月 10—14 日太阳活动参数平静期, $F_{10.7}$ 设定为耀斑级别, $F_{10.7}$ 从 70 增强到 190 后减小到 70 为人为设定值, 如图 2 所示。

表 2 输入参数设置(模拟时间: 2015 年 5 月 10—14 日)

组别	$F_{10.7}$	$F_{10.7a}$	Kp	Ap	isn	IP / ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
第一组 太阳耀斑事件	190	70	1	3	150	0
第二组 地磁暴事件	70	70	7	150	20	0
第三组 太阳质子事件	70	70	1	3	20	随气压变化函数, 采用真实事件数据输入
第四组 平静对照组	70	70	1	3	20	0

注 IP 为 Ion Production。

第二组: 设定 2015 年 5 月 10—14 日太阳活动参数平静期, $Kp=7$ 为地磁暴事件为人为设定值, 如图 3 所示。

第三组: 设定 2015 年 5 月 10—14 日太阳活动参数平静期, $f(p)$ 为质子事件相关的离子产生率函数, 选用的是 2001 年 11 月 4 日真实质子事件数据, 如图 4 所示。

第四组: 设定 2015 年 5 月 10—14 日太阳活动参数平静期, 设定 $F_{10.7}$, $F_{10.7a}$, Kp , Ap , isn 及离子产生率在此期间按表 2 为恒定值作为平静背景对照组。

根据模拟结果将实验组与对照组的结果进行偏差计算后得到临近空间大气参量在太阳突发事件作用下响应的变化特征。

3 模拟结果与分析

3.1 三种事件下临近空间气温度的变化特征

选取三类事件 20°N, 40°N, 70°N 三个纬度带的

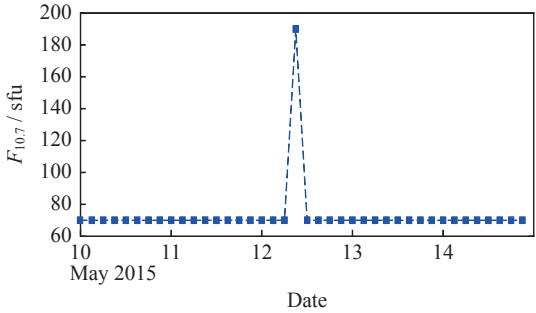


图 2 $F_{10.7}$ 指数随时间的变化

Fig. 2 $F_{10.7}$ index varies with time

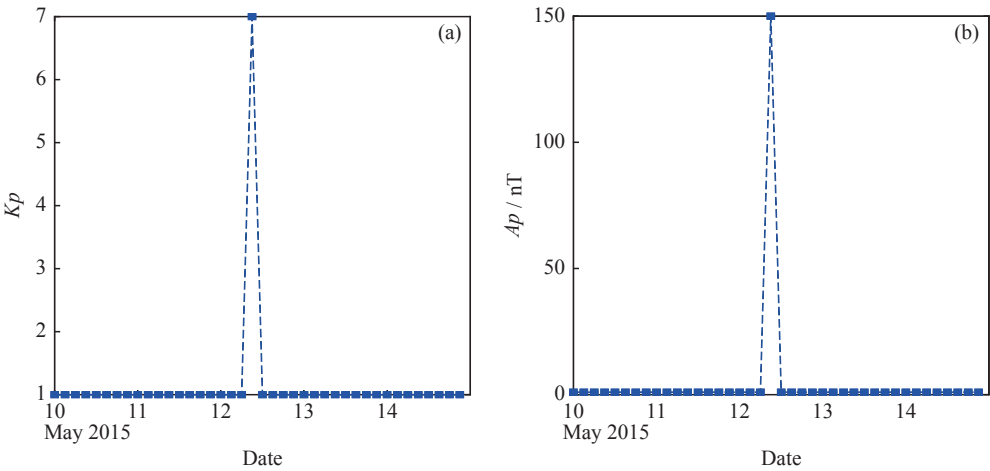


图 3 Kp 和 Ap 指数随时间的变化

Fig. 3 Kp and Ap index vary with time

临近空间大气温度的变化进行分析。

由图 5~7 可明显看到三类事件作用下太阳耀斑

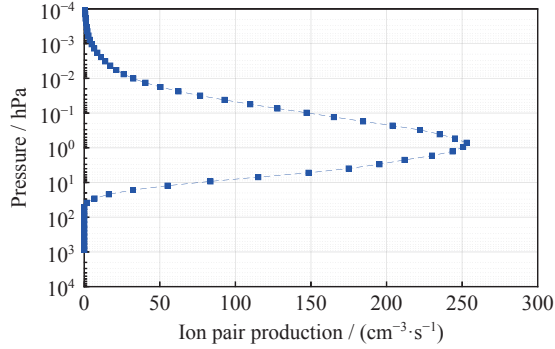


图 4 2015 年 5 月 12 日离子产生率随气压的变化

Fig. 4 Solar proton event ion production rates as a function of pressure on 12 May 2015

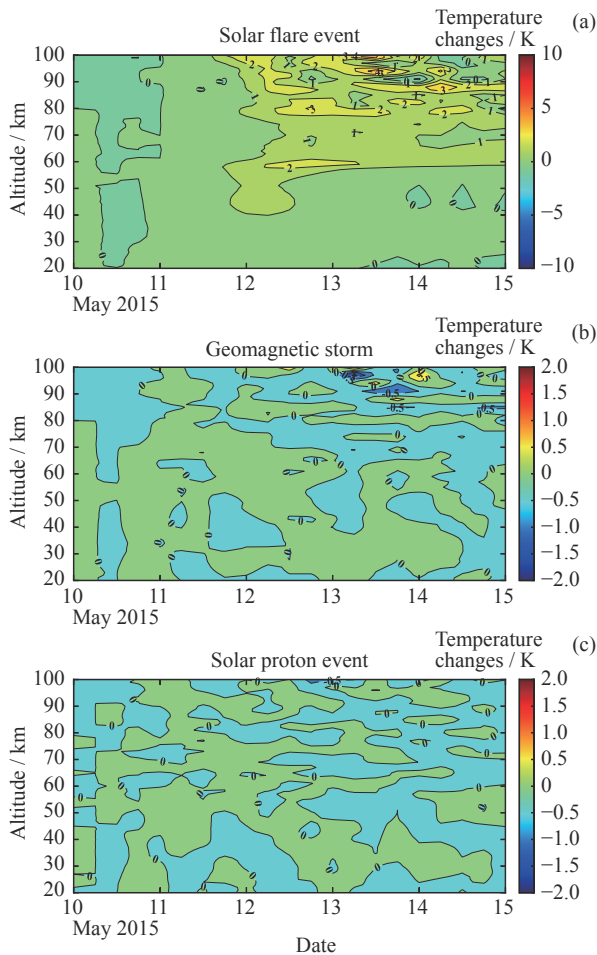


图 5 三种事件中 20°N 温度改变量随时间-高度变化

Fig. 5 Time-altitude evolution of temperature changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 20°N of three types of events

对临近空间大气温度的影响最为显著, 平流层及中间层温度增加 3 K 左右, 且温度改变量随纬度增大变化有差异, 随纬度的升高而增大; 而其他两类事件在低热层 95~100 km 左右有不大于 1 K 的温度扰动, 随纬度不同无差异。

在太阳耀斑发生期间, 太阳紫外辐射整体有 10% 以上的增长, 波长在 240~320 nm 之间的紫外辐射(该波段的紫外辐射被平流层臭氧普遍吸收)增加并进一步被臭氧吸收辐射加热大气, 从而使得在不同的高度和纬度上产生温度梯度的变化。

在 30 km 以上, 高中低纬均表现出不同程度的温度增加, 平流层高度范围内受臭氧吸收辐射加热大气影响与 $F_{10.7}$ 增加时间区间保持一致, 在 2015 年 5 月 12—13 日温度增强区间与臭氧极值中心保持一致, 温

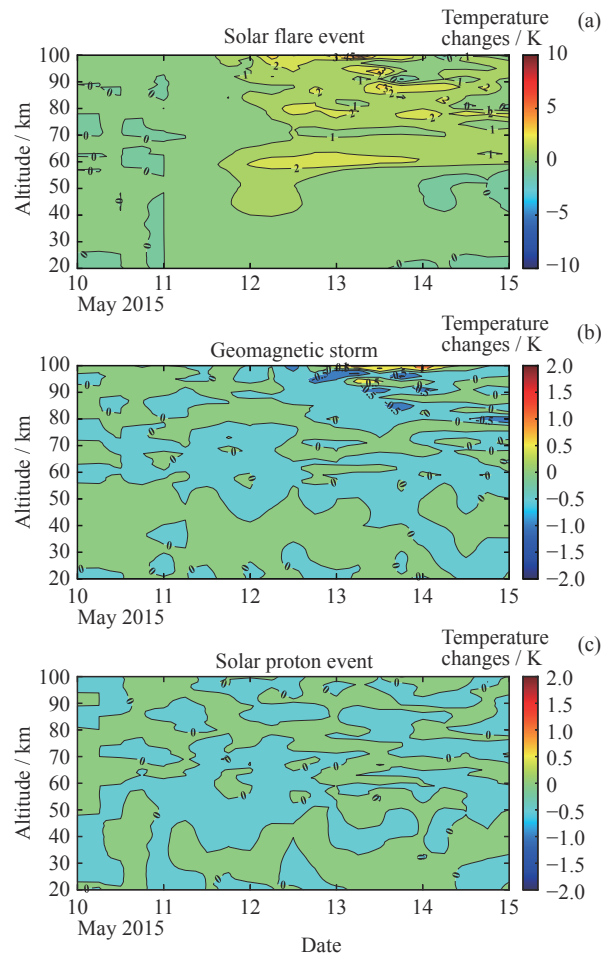


图 6 三种事件中 40°N 温度改变量随时间-高度的变化

Fig. 6 Time-altitude evolution of temperature changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 40°N of three types of events

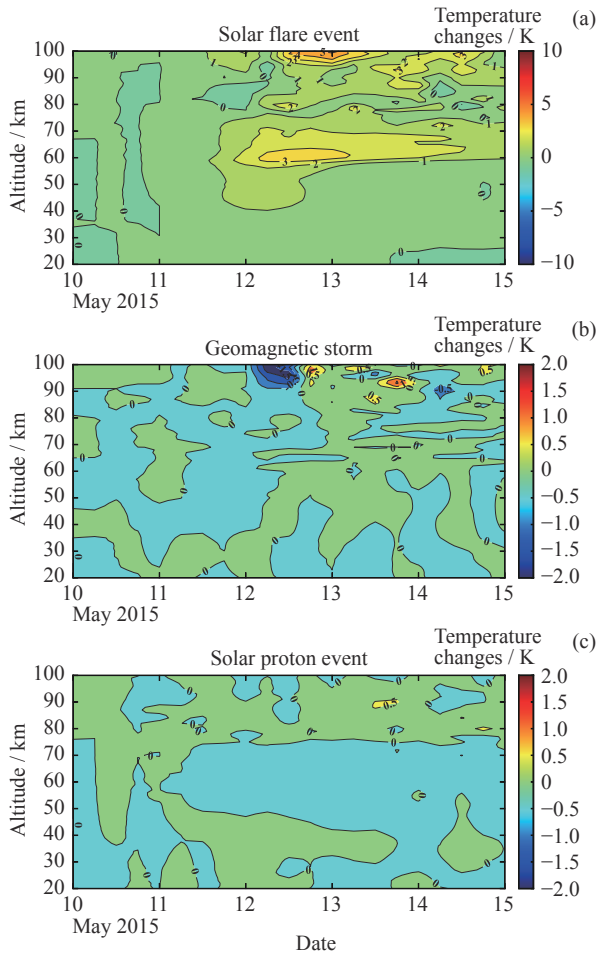


图 7 三种事件中 70°N 温度改变量随时间-高度的变化
Fig. 7 Time-altitude evolution of temperature changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 70°N of three types of events

度增加 1~2 K, 这是由臭氧的间接作用导致的大气加热; 在 88 km 以上整层大气有 3 K 的温度增加, 这是由太阳的直接辐射作用所致。

磁暴是强环电流引起的全球性的磁场活动, 可引起全球性的电离层和高层大气扰动。磁暴期间, 极区电离层电场强度和极光高能粒子沉降显著加强, 源自太阳风-磁层扰动的沉降粒子, 以及对流电场和扰动电流的焦耳加热^[25], 使低热层大气有较大增温, 热层底部(约 100 km 高度附近)不规则的温度扰动则不超过 1 K。

3.2 三种事件下临近空间大气相对密度的变化特征

选取三类事件 20°N, 40°N, 70°N 三个纬度带的临近空间大气相对密度变化进行分析。

图 8~10 可明显看到三类事件作用下太阳耀斑

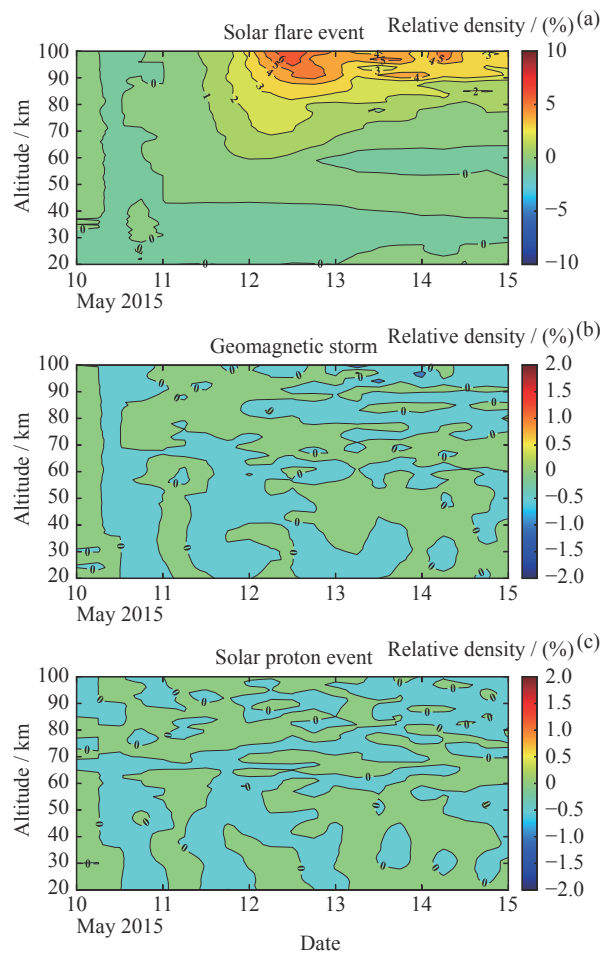


图 8 三种事件中 20°N 相对密度改变量随时间-高度的变化

Fig. 8 Time-altitude evolution of relative density changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 20°N of three types of events

对临近空间大气密度的影响最为显著, 在 70 km 以上有 2%~6% 的增大, 且相对密度改变量随纬度的升高而增大; 其他两类事件在 70 km 以上有不大于 0.5% 的密度扰动, 随纬度不同无差异。

密度分布与温度以及分子质量相关, 在太阳耀斑期间温度 40 km 以上有明显的增加, 大气加热导致低层大气抬升, 使较高层大气密度增加。其他两类事件由于对 100 km 以下大气温度影响很小, 所以密度改变也不显著。

3.3 三种事件下临近空间大气臭氧的变化特征

臭氧是一种微量气体, 在大气中所占比例很少, 主要集中在 10~50 km 的平流层, 极大值在 20~30 km^[26-28]。平流层臭氧主要在太阳紫外辐射的作用

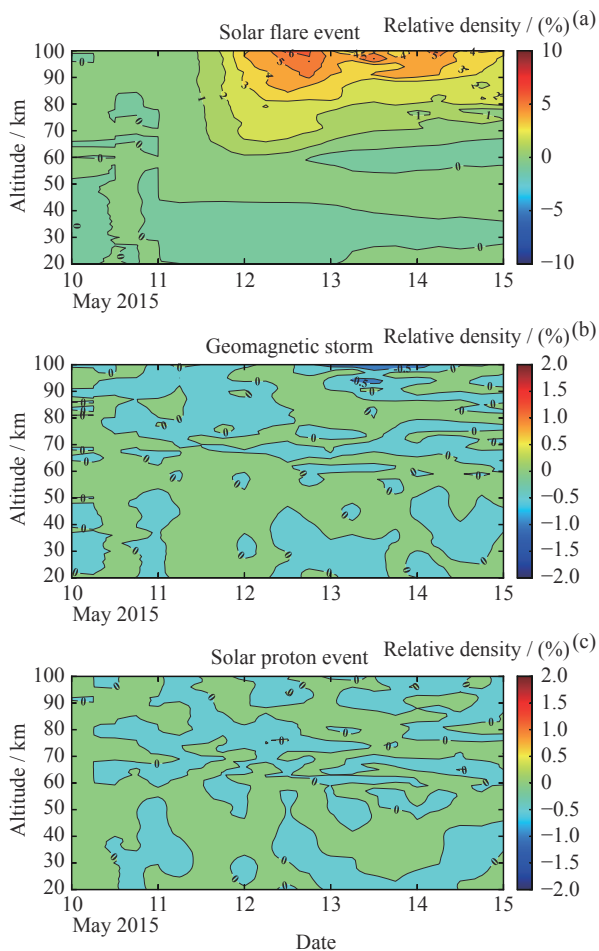


图 9 三种事件中 40°N 相对密度改变量随时间-高度的变化

Fig. 9 Time-altitude evolution of relative density changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 40°N of three types of events

下,通过光化学反应生成。平流层大气中的氧气分子(O_2)在能量较高的紫外短波辐射的作用下会分解成原子氧(O)。

平流层 O_3 随纬度分布是不均匀的,热带太阳紫外辐射最强所以热带 O_3 含量最高^[23],全球 O_3 的分布受到太阳辐射以及平流层环流的综合作用在赤道地区的 O_3 通过大气环流向极地传输,所以其总量的最大值常出现在中、高纬度地区。在太阳耀斑发生期间,太阳紫外辐射整体有 10% 以上的增长,波长在 200 nm 附近的太阳紫外辐射(该波段的紫外辐射会导致氧分子分解,并形成臭氧)增加,产生更多的臭氧;中紫外波段辐射增加并进一步被臭氧吸收,加热大气,这就使得在不同的高度和纬度上产生温度梯度

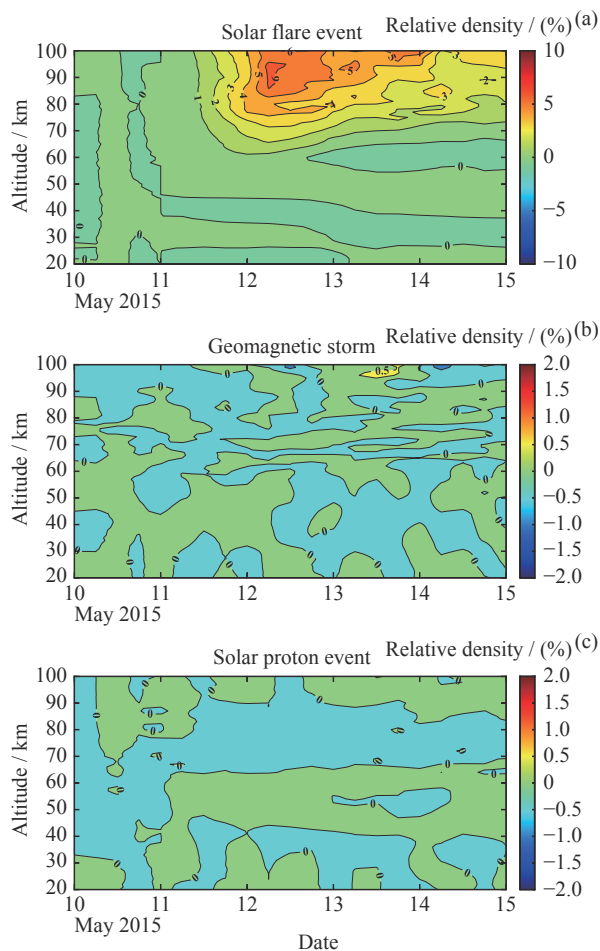


图 10 三种事件中 70°N 相对密度改变量随时间-高度的变化

Fig. 10 Time-altitude evolution of relative density changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 70°N of three types of events

的变化,如 图 11(a)、图 12(a)、图 13(a)所示。平流层臭氧吸收紫外辐射,浓度增大,在 25~40 km 高度上增加最为明显。图 11(b)、图 12(b)、图 13(b)由于地磁暴事件主要影响低热层,因此在 85~100 km 造成臭氧扰动,但变化不显著。

被阻挡在大气层中高能粒子与大气中的氮、氧原子发生连续核反应产生大量的次级粒子,次级粒子主要分布在十几千米高度的大气中,这些粒子到达地球(或其附近)时,开始和地磁场相互作用,其轨道受地磁场的影响而发生偏转。因为这些粒子的回转半径比地磁场特征尺度小得多,所以只能沿地磁力线进入极区附近,而不能到达低纬和中纬度地区。可以观测到的最低纬度,通常在南、北纬 75°附近。如图 11(c)、

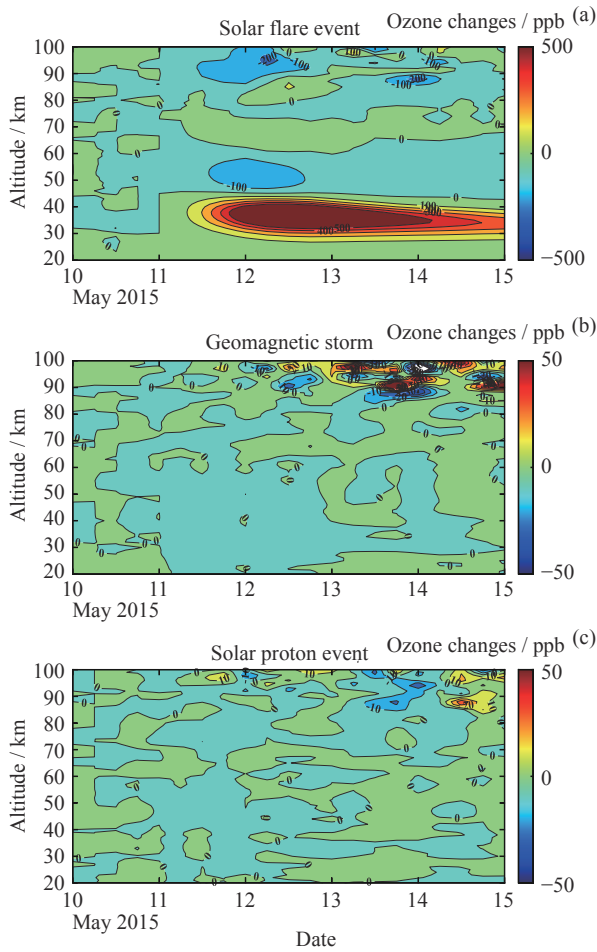


图 11 三种事件中 20°N 臭氧改变量随时间-高度变化

Fig. 11 Time-altitude evolution of ozone changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 20°N of three types of events

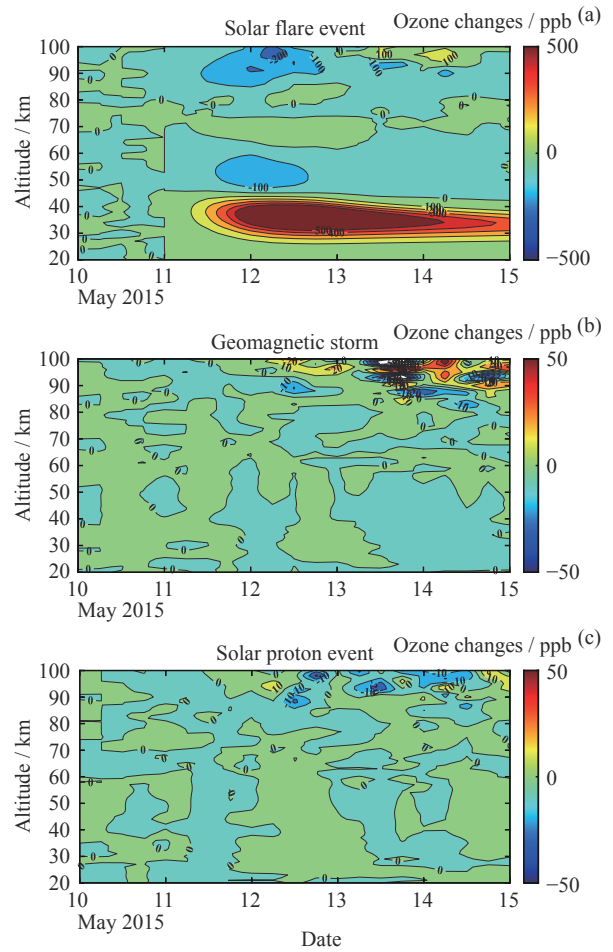


图 12 三种事件中 40°N 臭氧改变量随时间-高度变化

Fig. 12 Time-altitude evolution of ozone changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 40°N of three types of events

图 12(c)、图 13(c)结果所示,由于太阳质子事件的高能粒子进入导致的臭氧减少发生在高纬地区,中低纬地区臭氧基本没有变化。因此在高纬地区平流层中臭氧与高能粒子反应浓度减小,在 85 km 左右臭氧含量有不规则的扰动变化。

3.4 太阳耀斑事件临近空间大气风场的变化特征

大气温度梯度变化决定了风场的变化,太阳耀斑造成 64 km 以上温度明显增加 3 K,臭氧导致平流层有 1~2 K 的温度增加,上下层温度梯度变化造成风场的变化。从图 14 可以看出,纬向风在 64~120 km 之间,高中低纬度都出现不同程度的变化,风向甚至也发生了变化,风速变化差异中纬地区最强。从图 15 可以看出,经向风也出现了相似的变化特征,在 64~100 km 高度上风速风向出现了不同程度的变

化,中纬地区表现差异最大,其他两类事件对 100 km 以下风速变化的影响不显著。

4 结论与讨论

利用物理模式基于真实数据构建模拟方案得到太阳风暴期间临近空间大气参数的变化特征,通过单独模拟三类事件可知太阳耀斑对临近空间大气温度和密度的影响比其他两类事件显著,平流层大气温度增加是由耀斑辐射增强主要是太阳 MUV(200~300 nm) 辐射增强加热平流层引起臭氧的光化学反应造成的,而 EUV(30~120 nm)和 XUV(1~30 nm)主要影响中间层上层和热层下层引起低热层的温度增加。太阳质子事件和磁暴事件主要影响低热层大

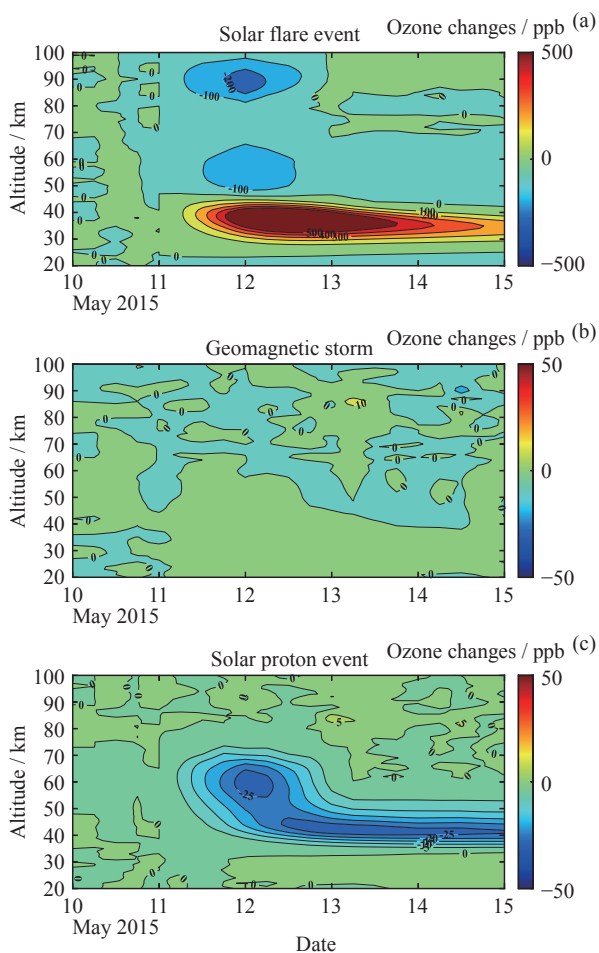


图 13 三种事件中 70°N 臭氧改变量随时间-高度变化

Fig. 13 Time-altitude evolution of ozone changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 70°N of three types of events

气温度,会造成微小的温度扰动,而太阳质子事件对极地平流层臭氧的影响主要是由于高能粒子受磁力线偏转进入高纬地区造成臭氧减小;跟以往相似模拟研究对比,Pettit^[6]等利用 WACCM 模式模拟了 2005 年 9 月的太阳耀斑和太阳质子事件对中层大气的影响,太阳耀斑对赤道地区低热层影响要比太阳质子事件显著,这一点是与本文模拟结果一致的;Gan 等^[7]利用 eCMAM30 模式 1979—2010 年模拟数据和 TIMED/SABER 卫星 2002—2015 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 ($1 \text{ sfu} = 10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$) 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;其与本文的耀斑模拟结果相

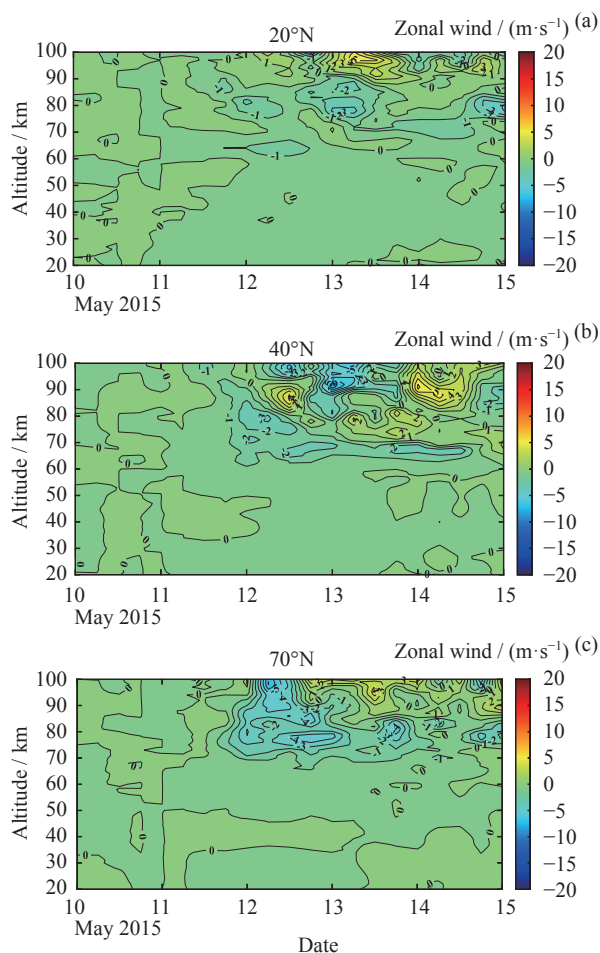


图 14 太阳耀斑事件中 20°N, 40°N, 70°N 纬向风随时间-高度的变化

Fig. 14 Time-altitude evolution of zonal wind changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 20°N, 40°N, 70°N in solar flare event

比也是相似的,本文在耀斑期间 80 km 以下温度增加 1~2 K 左右,在 80~100 km 温度响应增加 2~3 K 左右,弱于 TIMED/SABER 卫星观测数据的响应结果;Pikulina^[29]等基于耀斑辐照光谱模型(FISM2) 0.01~190 nm 数据和中性和电离大气模型(HAMMONIA)研究了太阳耀斑对上层和中层大气化学成分和臭氧的影响,在耀斑期间南半球高纬平流层发现有 5% 以内的臭氧增加,与本文臭氧响应结果也是相似的;说明本文的模拟结果是具有参考性的。

采用太阳平静期的同化模式数据作为背景场,人为设定三类事件的输入参数:耀斑、地磁暴、太阳质子事件,虽然人为控制了初始输入参数和背景场,同时设置空白对照组尽量排除观测数据对结果的影响,

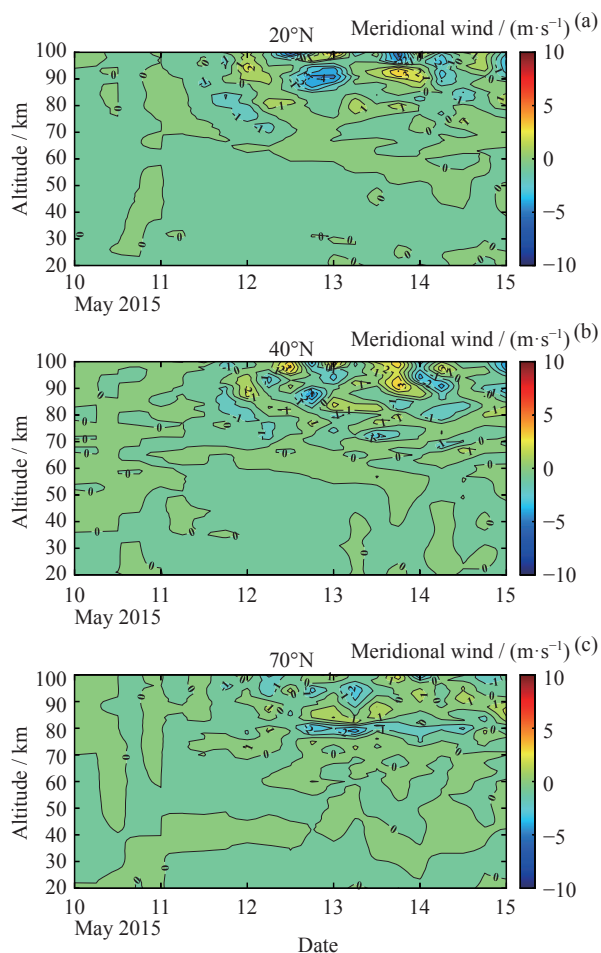


图 15 太阳耀斑事件中 20°N, 40°N, 70°N 经向风随时间-高度的变化

Fig. 15 Time-altitude evolution of meridional wind changes between the experimental simulation and the baseline simulation in 20°N, 40°N, 70°N in solar flare event

但是 SD-WACCM 同化了大量实测数据, 其中已经包含了真实的太阳、地磁等活动, 即使改变了输入但是模拟结果中应包含了观测数据的影响, 这可能会使模拟结果与实测数据的结果有一定的偏差, 值得进一步探讨。

针对以上模拟, 在三类事件中可得到以下结果。

太阳耀斑爆发后两天内中间层大气有明显增温, 在 64 km 以上有 2~3 K 左右的增温; 平流层由于臭氧增加影响在爆发前后 1 天内温度增加 1~2 K 左右。太阳耀斑对大气温度的影响在 20°N—70°N 的地区 25 km 以上高度都存在。太阳耀斑爆发时的温度效应是由太阳耀斑爆发期间太阳远紫外辐射增强和

在中层大气内的臭氧光化学过程造成。太阳耀斑造成的温度效应引起低热层大气相对密度增加、风场扰动变化。

磁暴爆发后两天内低热层大气有增温效应, 磁暴造成的低热层温度效应引起低热层密度、风场的扰动变化。磁暴对 20~100 km 临近空间大气参量影响很小。

太阳质子事件对大气温度的影响在 20°N—60°N 的广大地区 80 km 以上高度存在不超过 1 K 的温度扰动。太阳质子事件造成温度扰动会引起对应高度上的密度、风场微小扰动。太阳质子事件高能粒子沉降引起高纬地区平流层臭氧浓度减小。

致谢 CESM-WACCM 模型由 NCAR/UCAR 提供, GEOS-5 数据由 NASA 提供, 太阳活动指数数据由 GFZ 提供。

参考文献

- [1] LANZEROTTI L J. Space weather effects on technologies [J]. *Space Weather*, 2001, **125**: 11-22
- [2] WOODS T N, EPARVIER F G, FONTENLA J, *et al*. Solar irradiance variability during the October 2003 solar storm period[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**(10): L10802
- [3] 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
- [4] BAG T. Impact of M-solar flare-induced solar proton event on mesospheric Na layer over Utah (41.8°N, 112°W)[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(8): 8808-8815
- [5] DENTON M H, KIVI R, ULICH T, *et al*. Northern hemisphere stratospheric ozone depletion caused by solar proton events: the role of the polar vortex[J]. *Geophysical Research Letters*, 2018, **45**(4): 2115-2124
- [6] PETTIT J, RANDALL C E, MARSH D R, *et al*. Effects of the September 2005 solar flares and solar proton events on the middle atmosphere in WACCM[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(7): 5747-5763
- [7] 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*, 2016, **121**: 1011-1024

- al of Geophysical Research: Space Physics*, 2017, **122**(4): 4801-4818
- [8] JACKMAN C H, MCPETERS R D, LABOW G J, *et al.* Northern hemisphere atmospheric effects due to the July 2000 Solar Proton Event[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, **28**(15): 2883-2886
- [9] JACKMAN C H, DELAND M T, LABOW G J, *et al.* Neutral atmospheric influences of the solar proton events in October-November 2003[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A9): A09S27
- [10] JACKMAN C H, MARSH D R, VITT F M, *et al.* Short- and medium-term atmospheric constituent effects of very large solar proton events[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2008, **8**(3): 765-785
- [11] JACKMAN C H, RANDALL C E, HARVEY V L, *et al.* Middle atmospheric changes caused by the January and March 2012 solar proton events[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(2): 1025-1038
- [12] BARDEEN C G, MARSH D R, JACKMAN C H, *et al.* Impact of the January 2012 solar proton event on polar mesospheric clouds[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(15): 9165-9173
- [13] KOVÁCS T, PLANE J M C, FENG W H, *et al.* D-region ion-neutral coupled chemistry (Sodankylä Ion Chemistry, SIC) within the Whole Atmosphere Community Climate Model (WACCM 4)-WACCM-SIC and WACCM-rSIC[J]. *Geoscientific Model Development*, 2016, **9**(9): 3123-3136
- [14] LIU J, LIU H L, WANG W B, *et al.* First results from the ionospheric extension of WACCM-X during the deep solar minimum year of 2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2018, **123**(2): 1534-1553
- [15] PEDATELLA N M, CHAU J L, VIERINEN J, *et al.* Solar flare effects on 150 km echoes observed over Jicamarca: WACCM-X simulations[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(20): 10951-10958
- [16] SI Y D, LI S S, CHEN L F, *et al.* Validation and spatiotemporal distribution of GEOS-5-based planetary boundary layer height and relative humidity in China[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, **35**(4): 479-492
- [17] VITT F M, JACKMAN C H. A comparison of sources of odd nitrogen production from 1974 through 1993 in the Earth's middle atmosphere as calculated using a two-dimensional model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 1996, **101**(D3): 6729-6739
- [18] JACKMAN C H, MARSH D R, VITT F M, *et al.* Long-term middle atmospheric influence of very large solar proton events[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, **114**(D11): D11304
- [19] PAN Chen, ZHU Bin, SHI Chunhua, *et al.* SD-WACCM modeling study on the chemical components in the stratosphere[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2015, **35**(1): 9-16 (潘晨, 朱彬, 施春华, 等. SD-WACCM模式对平流层化学组分的模拟研究[J]. *气象科学*, 2015, **35**(1): 9-16)
- [20] PECK E D, RANDALL C E, HARVEY V L, *et al.* Simulated solar cycle effects on the middle atmosphere: WACCM3 Versus WACCM4[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2015, **7**(2): 806-822
- [21] MARSH D R, MILLS M J, KINNISON D E, *et al.* Climate change from 1850 to 2005 simulated in CESM1 (WACCM)[J]. *Journal of Climate*, 2013, **26**(19): 7372-7391
- [22] LIU Yi, LIU Chuanxi. Simulation studies on seasonal variations of the stratospheric dynamics and trace gases using coupled chemistry-climate model WACCM-3[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2009, **29**(6): 580-590 (刘毅, 刘传熙. 利用WACCM-3模式对平流层动力、热力场及微量化学成分季节变化的数值模拟研究[J]. *空间科学学报*, 2009, **29**(6): 580-590)
- [23] SOLOMON S C, QIAN L Y. Solar extreme-ultraviolet irradiance for general circulation models[J]. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 2005, **110**(A10): A10306
- [24] LEAN J, ROTTMAN G, HARDER J, *et al.* SORCE contributions to new understanding of global change and solar variability[J]. *Solar Physics*, 2005, **230**(1/2): 27-53
- [25] QUAN Lin, XUE Junchen, HU Xiaogong, *et al.* Performance of GPS single frequency standard point positioning in China during the main phase of different classified geomagnetic storms[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2021, **64**(9): 3030-3017 (全林, 薛军琛, 胡小工, 等. 中国区域GPS单频点定位在不同类型磁暴主相期间定位性能分析[J]. *地球物理学报*, 2021, **64**(9): 3030-3017)
- [26] ZHANG Jiankai. A Study of Climate Change Impact on Total Ozone Column over the Northern Hemisphere[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2016 (张健恺. 气候变化对北半球臭氧总量变化影响的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2016)
- [27] 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)
- [28] CHEN Wen, HUANG Ronghui. The dynamics of planetary wave transport on ozone in the atmosphere[J]. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, **19**(5): 513-524 (陈文, 黄荣辉. 准定常行星波对大气中臭氧输运的动力作用[J]. *大气科学*, 1995, **19**(5): 513-524)
- [29] PIKULINA P, MIRONOVA I, ROZANOV E, *et al.* September 2017 solar flares effect on the middle atmosphere[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(11): 2560