0254-6124/2024/44(6)-1056-12 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

SU Wei, HUANG Chunming. Quasi-stationary Planetary Waves during the 2018–2019 Elevated Stratopause Event (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 1056–1067. CSTR:32142.14.cjss.2024–0001. DOI:10.11728/cjss2024.06.2024–0001

2018－2019 年平流层顶抬升事件期间的准定常行星波*

苏 伟 黄春明

(武汉大学电子信息学院 武汉 430072)

摘 要 2018－2019 年北半球高纬地区的冬季发生了平流层顶抬升事件, 各种大气波动在该事件中所扮演的角色尚不完全清楚. 利用卫星和再分析数据, 给出了在这次 ES 事件发生前后平流层顶和背景大气的变化, 深入研究了准定常行星波在平流层和中间层下部的活动. 结果显示, 纬向波数为 1 的准定常行星 1 波在 12 月初开始增强, 在 12 月中旬达到最大值. 在整个 12 月, 即原平流层顶的下降与增温阶段, 都呈现出对背景大气强烈的西向波强迫. 在平流层顶抬升事件发生后, 该波活动减弱, 对背景大气的拽力很弱, 可能没有参与平流层顶抬升事件的后续阶段. 纬向波数为 2 的准定常行星在 ES 事件发生前活动较弱, 而在 1 月中旬开始增强, 在 1 月中旬到 2 月末, 即高平流层顶形成阶段以及之后的下降与增温阶段, 呈现出对背景大气的西向波强迫, 强迫中心随高度的下降与高平流层顶的下降一致, 说明该波主要在这一阶段发挥作用.

关键词 准定常行星波, 平流层顶抬升, 平流层, MERRA-2 再分析数据

中图分类号 P351

Quasi-stationary Planetary Waves during the 2018–2019 Elevated Stratopause Event

SU Wei HUANG Chunming

(*Electronic Information School*, *Wuhan University*, *Wuhan* 430072)

Abstract The winter of 2018－2019 at high latitudes in the Northern Hemisphere was characterized by an Elevated Stratospheric (ES) event, and the role played by various atmospheric fluctuations in this event is not fully understood. Using satellite and reanalysis data, the changes in the stratopause and background atmosphere before and after this ES event were demonstrated, providing insights into the activity of quasi-stationary planetary waves in the stratosphere and lower mesosphere. The results show that the quasi-stationary planetary waves with a zonal wave number of 1 began to intensify in early December and reached a maximum in mid-December. A strong westerly wave forcing on the background atmosphere is shown throughout December, the descending and warming phase of the original stratopause. After the ES, the wave activity weakened and the tug on the background atmosphere was weak, and

* 国家自然科学基金项目资助 (42074182)

2024-01-03 收到原稿, 2024-04-16 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/)

may not have been involved in the subsequent phases of the ES event. The quasi-stationary planet with a zonal wave number of 2 has a weak activity before the ES, and starts to strengthen in mid-January, and shows westward wave forcing on the background atmosphere from the middle of January to the end of February, during the stage of the formation of the upper stratopause and the subsequent stages of the descent and warming, and the decrease of the center of the forcing with the altitude coincides with the decrease of the upper stratopause, which suggests that the wave mainly plays a role in this stage.

Key words　Quasi-stationary planetary waves, Elevated stratospheric, Stratospheric, MERRA-2 reanalysis data

0　引言

在平流层突然增温 (Stratospheric Sudden Warming, SSW) 事件发生后, 原本位于 50～60 km 的平流层顶开始下降并变得模糊, 随后在远高于其气候学平均高度的位置 (约 80 km) 重新形成, 这种现象被称为平流层顶抬升 (Elevated Stratopause, ES)[1–5]. ES 是一种大气异常现象, 一般发生在北半球 1 月至 3 月的高纬地区.

目前, 被认可的 ES 的发生机制是: 在 SSW 事件发生以后, 反向的平流层背景西风带会减弱向上传播的西向行星波, 从而导致平流层的温度几乎相等, 以温度极大值来定义的平流层顶变得模糊; 涡旋和西向行星波强迫开始恢复, 当中间层的西向波强迫恢复到足够大的水平时, 就会在比平常更高的高度, 在下降流最强的地方引发强烈的绝热加热, 从而导致平流层顶的重新形成; 强烈的重力波会驱动非绝热下降流, 从而导致高平流层顶的下降[6–14].

自 ES 现象被发现至今已经近 20 年. ES 事件的发生机制研究不断深入, 但并未获得完全一致的结论. 一些研究专注于行星波在 ES 事件中所起的作用. 2013 年 Chandran 等[8] 的研究发现, 在 68 个 ES 事件中, 仅在少数事件中行星波强迫具有气候学意义上的增强; 2015 年 Stray 等[15] 利用 SD-WACCM 模型确定了 2000—2008 年间的 7 次 ES 事件, 发现当 ES 事件发生时, MLT 中纬向波数为 1 和 2 的行星波振幅都有增加, 这与 Chandran 等[8] 的研究结论不相符. 2016 年, Limpasuvan 等[10] 对 13 个伴随有 ES 事件的 SSW 事件 (ES-SSW) 进行了综合分析. 结果表明, 极地中间层和低热层 (Mesosphere and Lower Thermosphere, MLT) 中西向的行星波强迫引起的下降流是 ES 形成的原因. 2022 年 Orsolini 等[16] 研究发现, ES 发生后的低热层平均经向环流的逆转, 是由西向传播的行星波驱动导致的. 2020 年 Shepherd 等[17] 利用 MLS 卫星观测报道了 2018—2019 年冬季发生的 1 次 ES 事件. 2021 年 Okui 等[18] 利用日本高层大气研究大气一般环流模型模拟了这次 ES 事件, 发现中间层逆温层 (Mesospheric Inversion Layer, MIL) 的出现可能会影响平流层顶重新形成时的高度, 而 MIL 的形成又与行星波有关. 2022 年 Scheffler 等[19] 发现, 在 ES 发生以后, 在中间层发生局地大气不稳定的位置产生了西向传播的波数为 1 的行星波. 2023 年 Rhodes 等[20] 研究发现, ES 发生后, 东向传播的行星波会在平流层的西风带内产生, 这种现象有助于平流层背景东向风的恢复.

另有一些研究着注于重力波在 ES 事件中所起的作用. Siskind 等[13,21] 和 Thurairajah 等[22] 的研究表明, 重力波强迫 (Gravity Wave Forcing, GWF) 诱导了 ES 的形成和下降. 2012 年 Tomikawa 等[23] 利用具有重力波分辨能力的一般环流模型[24] 研究了在一次 SSW 主增温事件的恢复阶段中 ES 的形成, 发现东向的行星波强迫 (Planetary Waves Forcing, PWF) 会导致主增温事件发生后的极地东向急流的快速恢复, 而恢复的急流上方的西向重力波强迫有助于 ES 的形成. 2014 年 Thurairajah 等[22] 利用从冰实验的太阳掩星数据中推导出的全球高纬度的温度测量数据, 提供了 SSW 发生后中间层上部重力波活动增强的观测证据, 发现重力波驱动的非绝热下降导致了 ES 事件的下降. 非地形重力波阻力引起了 SSW 后的异常剩余环流, 导致了 ES 事件的发生.

关于重力波和行星波在整个 ES 事件中的相对贡献, 还没有获得一致的结论. 有研究提出, 为了阐明行星波和重力波在与 ES 相关的中层大气动力学变化中的相对重要性, 应考虑波的局地激发. 2008 年

Watanabe 等[24] 通过模式研究发现, 在南极冬季中间层中, 强烈的重力波强迫扭曲了大尺度的平均流, 从而导致了正压/斜压不稳定 (Barotropic/Baroclinic Instability) 的产生, 最终激发出东 4 天波. Smith[25,26] 和 Lieberman 等[27] 提出, 被平流层行星尺度风结构过滤所造成的重力波动量沉积导致了中间层中上部行星波的局地激发. 2015 年 Sato 和 Nomoto [28] 在使用模式对北半球冬季进行案例研究后, 提出了中层大气中重力波和行星波相互作用的重要性. 他们为由重力波强迫引起的位涡 (Potential Vorticity) 最大值所产生的正压/斜压不稳定导致行星波的局地激发提供了证据. 2018 年 Sato 等[29] 发现, 源自低层大气的重力波引起的正压/斜压不稳定与剪切不稳定在中间层分别激发了行星波和重力波.

本文利用卫星和再分析数据, 对 2018－2019 年的 ES 事件进行深入研究. 根据 MERRA-2, MLS, ERA5 数据以及从中提取准定常行星波的方法, 利用 2018－2019 年北半球高纬 (70°N) 冬季 (12－2 月) 的 20～80 km 高度范围的 MERRA-2 数据, 对准定常行星波在 ES 事件中的活动变化进行深入研究.

1 数据与分析

MERRA(Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications) 是美国国家航空航天局推出的高分辨率全球再分析资料[30] . MERRA 第 2 版 (MERRA-2) 是在 MERRA 的基础上, 在同化系统方面做了很多改进并综合了更多的观测结果[31]. MERRA-2 更新了全球统计插值 (Global Statistical Interpolation, GSI) 分析格式和戈达德地球观测系统 (Goddard Earth Observing System, GEOS) 模式, 将模式数值与多个时空分布不规则的观测数据结合成空间完整的网格化气象数据集. 本研究采用 MEAAR-2 的数据 inst6_3 d_ana_Nv, 该数据给出了物理变量在 4 个天气时间 (00:00 GMT, 06:00 GMT, 12:00 GMT 和 18:00 GMT) 和 72 个标称气压水平 (985～0.01 hPa) 下的分析结果. 原始分辨率为 0.625°(经度)×0.5°(纬度). 经纬度覆盖范围分别为 180.0°W－179.375°E 和 90.0°S－90.0°N. 本研究主要利用的是东向风速 (u)、北向风速 (v) 和气温 (T) 这 3 个物理分量, 时间覆盖范围是从 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 2 月 28 日.

安装于 Aura 卫星上微波临边探测仪 (Microwave Limb Sounder, MLS), 通常每天可以提供分布在全球 (82°S－82°N) 的 3500 个温度垂直剖面. 这些轮廓线沿轨道间隔约 165 km, 测量的高度范围约为 11～97 km (261～0.001 hPa). 本文使用的数据集是 MLS 3.3. 在平流层上部和中间层下部, MLS 温度的垂直分辨率为 4～6 km, 在 1 hPa 左右降至 7 km 左右, 在 0.01 hPa 以上降至 10～12 km 左右. 在平流层, MLS 温度测量的精度为–0.6 K, 在中间层的精度降至–2.5 K, 而且在中间层存在高达 8 K 的冷偏差. 本文所采用的 MLS 数据是利用 Livesey 等[32] 最新推荐的质量筛选程序对 MLS 3.3 数据集进行筛选后的结果. 由于重点研究的是 ES 现象, 所以关注的是位于 70°N－80°N 纬度带的 MLS 数据. 在经度上从 180°W 起划分间隔 30°的经度带. 在每个网格内求取每日的平均值, 得到温度随经度的逐日变化.

ERA5 再分析数据是目前时空分辨率最高的再分析数据, 其最重要的特点是提供了 137 个高度以及小时级的时间分辨率. ERA5 提供了大量大气、陆地和海洋多个物理变量的每小时估计值, 并使用 137 个从地表到约 80 km 高度的模式高度来解析大气, 包括在降低空间和时间分辨率时所有变量的不确定性信息. ERA5 将模型数据与来自世界各地的观测数据结合起来, 形成一个全球完整的、一致的数据集, 取代了其前身 ERA-Interim 再分析数据. 本文使用的 ERA5 数据时间分辨率为 6 h, 空间分辨率为 2.5°(经度)×2.5°(纬度).

对于准定常行星波, 拟采用前人的方法[33], 在 30 天的时间窗里提取准定常行星波. 30 天的窗长明显大于常见瞬态行星波的周期, 所以既能够体现准定常行星波的“准定常性”, 又能够排除瞬态行星波. 对于确定高度和确定纬度, 准定常行星波的拟合公式如下:

$$f(t,\lambda) = f_0 + f_1 t + \sum_{k=1}^{4} A_k \cos\left(\frac{2\pi}{360} k\lambda - \varphi_k\right) + R(t,\lambda). \tag{1}$$

其中, λ代表经度, A_k和φ_k分别代表纬向波数为 k的准定常行星波的振幅和相位. 式 (1) 等号右边 4 项分别为平均值、随时间线性变化的项、准定常行星波项和余项.

2　结果

图 1 给出了分别从 MERRA-2、MLS 和 ERA5 数据中得到的 2018 年 12 月 1 日到 2019 年 2 月 28 号的纬向平均日均温度的时间–高度剖面. MERRA-2 数据的结果与 MLS 及 ERA5 数据的结果吻合得较好, 说明 MERRA-2 数据是可靠的.

具有温度极大值的平流层顶在 12 月 22 日左右, 从约 55 km 的高度开始下降, 同时温度逐渐增加, 最大振幅在 12 月 25 日左右分别达到 267, 273, 266 K. 随后从 MLS 数据可以看到, 在 90 km 处出现了振幅为 220 K 的温度极大值, 形成所谓的中间层逆温层 (MIL). 1 月 10 日左右平流层顶下降到 30 km 并逐渐消失, 直到 1 月 14 日在 80 km 高度处重新形成一个明确的温度为 240 K 的平流层顶. 平流层顶在较高高度上形成之后, 又随着时间逐渐下降并变暖. 在 1 月 24 日, 平流层顶下降到 65 km 高度, 温度达到约 260 K. 在 2 月 20 日左右, 平流层顶达到最高温度 (接近 275 K), 并下降到约 56 km 的高度上.

为了研究纬向波数为 1/2 的准定常行星波 (SPW1/SPW2) 在 ES 事件期间的变化, 给出了从 MERRA-2 数据中推导出的 SPW1 和 SPW2 的振幅.

图 2 从上到下分别给出了从 MERRA-2 数据中提取的 SPW1 和 SPW2 的纬向风速、经向风速和温度振幅. 从 12 月份开始, 平流层顶附近 SPW1 的三个分量的振幅均开始逐渐增强. 在 12 月 16 日左右振幅达到最大值, 纬向风速、经向风速和温度分别达到约 35 $m\cdot s^{-1}$ 和 59 $m\cdot s^{-1}$ 及 19 K. 随后 SPW1 的振幅开始减弱. 12 月 24 日, 纬向平均纬向风在 40～80 km 区域发生了风向反转, 此后反转的西向风速逐渐下降至 30 km 左右, 风速达到–20 $m\cdot s^{-1}$, 零风线在 20 km 附近出现.

1 月 10 日原平流层顶消失. 背景纬向风从上至下逐渐由西向转为东向. 从 1 月 14 日起, 平流层顶在较高高度 (约 70 km) 上重新形成并且持续下降. 此时的背景纬向风已经从上至下由西向转为东向, 背景风的中心也从中间层逐渐向平流层移动, 与新平流层顶高度的下降保持一致. 在这个时间阶段, SPW2 振幅逐渐增强, 在 1 月 27 日左右达到最大值, 纬向风速、经向风速和温度分别达到约 16 $m\cdot s^{-1}$ 和 20 $m\cdot s^{-1}$ 及 5.5 K.

在 ES 发生之前 (2018 年 12 月 15 日到 2019 年 1 月 10 日), 平流层的背景风从东到西的逆转是由平流层西向行星波强迫的增加引起的, 此时 SPW1 的振

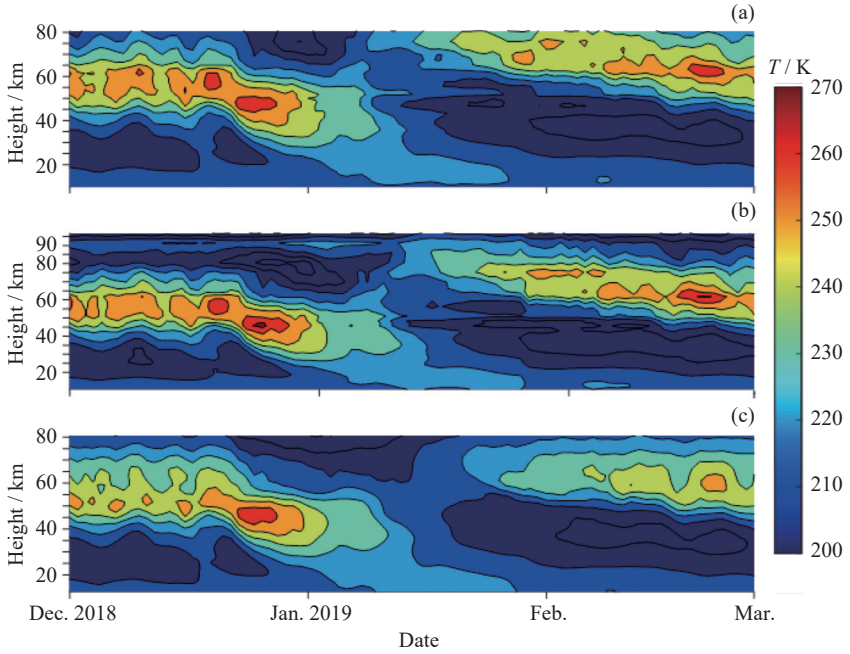


图 1　从 MERRA-2 再分析数据 (a)、MLS(b) 和 ERA5(c) 得到的 70°N 纬向平均日均温度的时间–高度剖面

Fig. 1　Time-height sections of zonal-mean and daily-mean temperature at 70°N obtained from MERRA-2(a), MLS(b), and ERA5 (c)

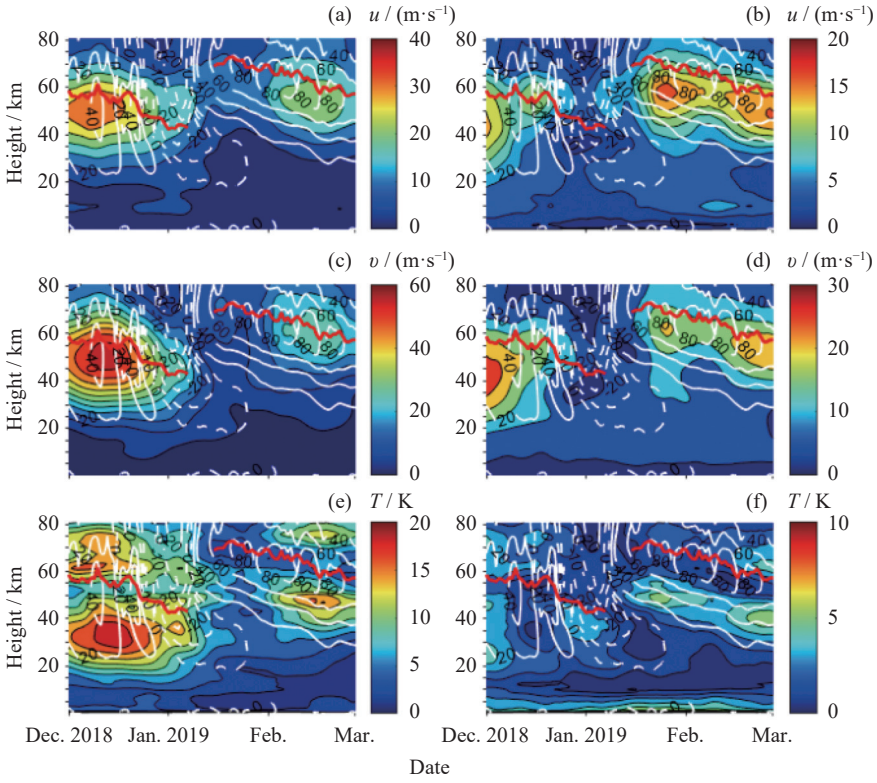


图 2 从 MERRA-2 数据中提取的波数为 1(左列) 和波数为 2(右列) 的准定常行星波纬向风速、经向风速和温度分量在 70°N 处的高度–时间分布 (红色实线代表平流层顶, 白色实线代表东向的纬向平均纬向风速, 而白色虚线则代表西向的纬向平均纬向风速)

Fig. 2 Altitude-time distributions of SPW1 (left) and SPW2 (right) for zonal wind, meridional wind and temperature at 70°N, extracted from MERRA-2 data (The solid red line in the figure represents the stratopause, the solid white line represents the eastward zonal-mean zonal winds, and the dashed white line represents the westward zonal-mean zonal winds)

幅比 SPW2 的振幅大 2～3 倍. 因此, 本文推测 SPW1 是导致 ES 发生之前, 平流层和中间层下部背景风由东向西反转的主要原因. 而在风反转后, SPW1 和 SPW2 的振幅大致相等. 也就是说, 从波强度上看, SPW1 在这个阶段不再占主导地位.

行星波在传播的过程中可以与背景风场相互作用, 从背景风场中吸收能量导致振幅增加或者将能量释放到背景风场中导致振幅减小. 为了确定准定常行星波与背景风场是否发生了相互作用, 在图 3 中给出了从 MERRA-2 数据中得到的纬向平均涡度的经向梯度 ($\overline{q}_\varphi$) 在 70°N 处随高度和时间的变化情况.

$\overline{q}_\varphi$在球坐标系中的表达式如下[34]:

$$\overline{q}_\varphi = 2\Omega\cos\varphi - \left[\frac{(\overline{u}\cos\varphi)_\varphi}{a\cos\varphi}\right]_\varphi - \frac{af_0^2}{\rho_0}\left(\frac{\rho_0}{N^2}\overline{u}_z\right)_z. \quad (2)$$

其中, a为地球半径, φ为纬度, $\overline{u}$为平均纬向风速, ρ_0为大气密度, f_0为科里奥利力参数, N为浮力频率. 下标z和φ分别代表沿高度和纬度方向的偏导. 式右边第二项代表正压不稳定性, 第三项代表斜压不稳定性. $\overline{q}_\varphi$的正负变化是背景流正压/斜压不稳定性发生的必要条件, 因此零等值线能够很好地标示不稳定性的发生.

在 2018 年 12 月 10 日至 2019 年 1 月 1 日高度为 60～70 km 区域内, 以及 2018 年 12 月 20 日至 2019 年 1 月 20 日高度为 20～50 km 的区域内, 纬向平均涡度的经向梯度一直处于正负变化中, 表明正压/斜压不稳定存在.

为了探究准定常行星波在 ES 发生期间与背景的作用情况, 图 4 给出了从 MERRA-2 数据中提取的 70°N 处 SPW1 的 EP 通量散度在各个高度上的逐日变化.

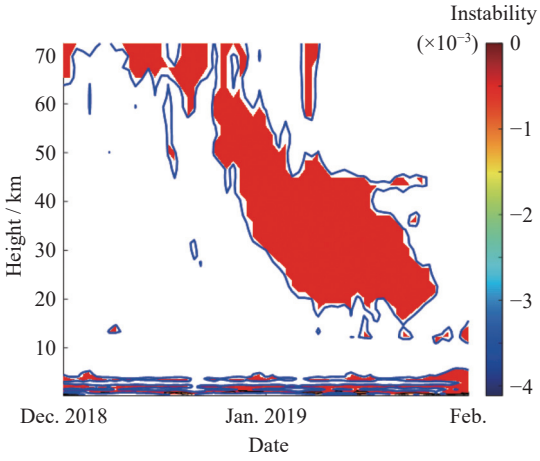


图 3　从 MERRA-2 数据中提取的 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 2 月 1 日 70°N 处准定常行星 1 波纬向平均涡度的经向梯度 (蓝色实线代表零刻度线)

Fig. 3　Time-altitude sections of the potential vorticity gradient for SPW1 at 70°N for 1 December 2018 to 1 February 2019, extracted from MERRA-2 data (Solid blue line in the graph represents the zero line)

利用球坐标下准地转近似条件下的纬向变换欧拉平均动量方程来分析 Eliassen-Palm (EP) 通量及其散度[23,35–37]. EP 通量 $\boldsymbol{F}=(0,F^{(\varphi)},F^{(z)})$是一个矢量. EP 通量的经向分量 ($F^{(\varphi)}$) 和垂直分量 ($F^{(z)}$) 的计算公式如下:

$$F^{(\varphi)}=\rho_0 a\cos\varphi\left(\frac{\overline{v'\theta'}}{\overline{\theta}_z}\overline{u}_z-\overline{u'v'}\right), \tag{3}$$

$$F^{(z)}=\rho_0 a\cos\varphi\left\{\left[f_0-\frac{(\overline{u}\cos\varphi)_\varphi}{a\cos\varphi}\right]\frac{\overline{v'\theta'}}{\overline{\theta}_z}-\overline{u'w'}\right\}. \tag{4}$$

其中, u,v,w和θ分别表示纬向风速、经向风速、垂直风速和位势温度, 上横线表示纬向平均, 上角撇表示相应变量的扰动量, 下标表示偏导数. 由于与$\overline{v'\theta'}/\overline{\theta}_z$成比例的项在垂直分量中占主导地位, 所以计算时忽略了与$\overline{u'w'}$成比例的项.

EP 通量的散度表达式如下:

$$\nabla\cdot F=\frac{1}{a\cos\varphi}\frac{\partial}{\partial\varphi}\left(F^{(\varphi)}\cos\varphi\right)+\frac{\partial}{\partial z}F^{(z)}. \tag{5}$$

在 2019 年 1 月 2 日之前, SPW1 对大气背景的拽力很强, 且为负 (西向). 之后, 平流层与中间层的负加速度迅速减小并消失, 表明该区域的正压/斜压不稳定减弱了平流层与中间层的西向强迫, 导致西向风迅速减弱并消失.

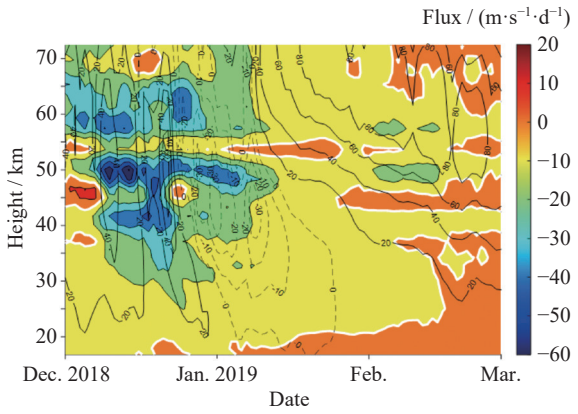


图 4　从 MERRA-2 数据中提取的 2018 年 12 月 1 日至 2019 年 2 月 28 日 70°N 处准定常行星波 1 的 EP 通量散度 (白色实线代表零刻度线,黑色实线代表东向的纬向平均纬向风速, 黑色虚线则代表西向的纬向平均纬向风速)

Fig. 4　EP flux divergence for SPW1 at 70°N from 1 December 2018 to 28 February 2019 extracted from MERRA-2 data (Solid white line in the graph represents the zero line, the solid white line represents the eastward zonal-mean zonal winds, and the dashed white line represents the westward zonal-mean zonal winds)

在 ES 形成后, SPW1 的对背景的东向加速度比较弱, 这说明在 ES 事件开始后, 该波没有参与高高度处平流层顶的维持以及逐渐下降的过程, 前人的研究将其归功于重力波强迫所驱动的下降流引起的绝热加热[7].

2018 年 12 月 15－20 日, 在中间层 65～70 km 处出现了东向的拽力, 为了探究 SPW1 在这片区域的作用, 本文计算了 MERRA-2 数据在 2018 年 12 月 15－20 日, 21－26 日, 2018 年 12 月 27 日至 2019 年 1 月 1 日纬度范围 0°－80°N 和高度范围 0～80 km 内 SPW1 的 EP 通量和 EP 通量散度并在图 5 中给出. 为能够更清晰显示波作用通量在平流层上层以及中间层的传输, 图 5 中所有的 EP 通量矢量都进行了处理, 即$\{F^{(\varphi)},F^{(z)}\}/(\rho_0 a)\times\sqrt{\dfrac{1000}{p}}$. 这里 p 表示大气压强, 单位为 hPa.

从图 5 可以看出, 平流层高纬的 SPW1 是从对流层向上传播而来的, 到达平流层之后在向上传播的同时, 从高纬向低纬传播. 传播到平流层中上部的 SPW1 伴随着大量向上输送的涡动热通量和向低纬输送的动量通量, 为北半球冬季平流层增温提供能量

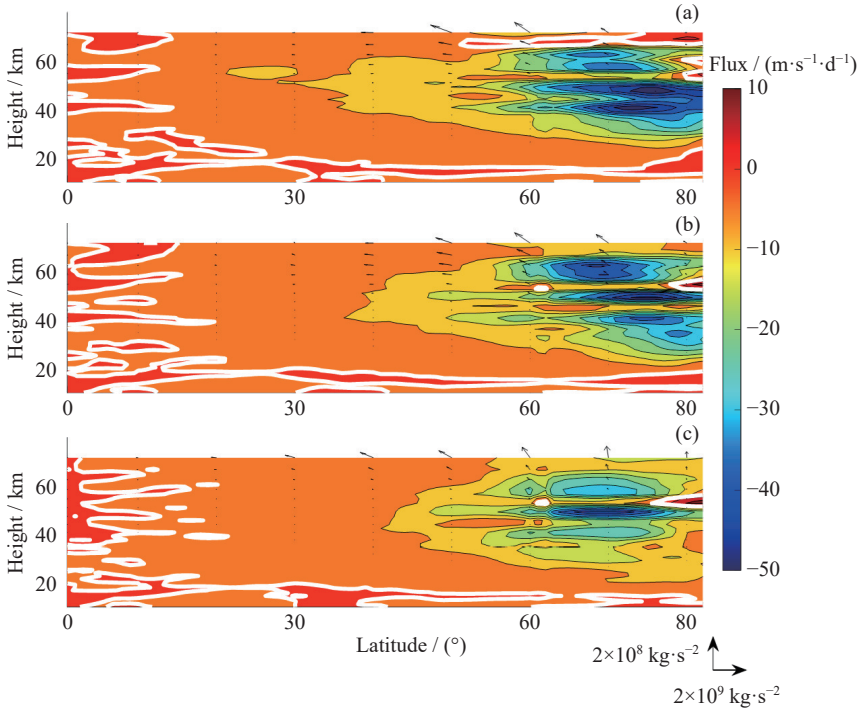


图 5 从 MERRA-2 数据中提取的 2018 年 12 月 15－20 日 (a)、21－26 日 (b) 和 2018 年 12 月 27 日至 2019 年 1 月 1 日 (c) 准定常行星 1 波的 EP 通量 (矢量) 和 EP 通量散度 (彩色阴影) 的纬度–高度剖面

Fig. 5 Latitude-height sections of EP flux (vectors) and EP flux divergence (color shading) for SPW1 for 15－20 (a), 21－26 (b) December, and 27 December 2018 to 1 January 2019 (c), extracted from MERRA-2 data

条件. 同时, 可以看到 60°N－80°N 和 30～65 km 范围内出现很强的辐合区, 说明在这里 SPW1 对背景风施加了西向的拽力, 有利于背景纬向风的西向加速.

在 12 月 15－20 日期间, 在 60～80 km 处, 60°N 以北以及 50～60 km, 77°以北, 行星波强迫为正, 如图 5 (a) 所示. 可能是由于正压/斜压不稳定, 在局地激发了行星波, 新的行星波使对背景的拽力由西向转为了东向. 在 12 月 21 日至 26 日, 位于高纬地区平流层顶与中间层的区域已经恢复了负波强迫, (80°N, 50 km) 处的正波强迫逐渐增强, 70 km 处波向上的传递略微增强. 2018 年 12 月 27 日至 2019 年 1 月 1 日, 高纬地区存在负波强迫的区域减小, (80°N, 50 km) 处的正波强迫进一步增强, 更高处波向上的传递也进一步增强, 甚至在 80°N 能量垂直向上传递, 不再向低纬地区传递. 由图中的 EP 通量矢量可知, 在 12 月 20 日以后, 高纬地区中间层的行星波逐渐增强, 并且向中间层上部传播, 这种持续增强的向上传播的能量, 导致了高纬地区, 90 km 处的温度增强, 形成一个相对弱的温度最大值的特征结构 MIL. 然而, 来自低层大气的大部分行星波在该区域下方向赤道方向强烈折射, 因此推断 SPW1 参与了 MIL 的形成过程, 而参与 MIL 形成的准定常行星波可能来自 12 月 15－20 日的正压/斜压不稳定. 此外, 根据 Okui 等[18] 的推论, MIL 可能影响了风反转后的东向急流的高度, 而东向急流又影响了重力波和行星波在极地 MLT 中的传播以及强迫, 导致了 ES 事件的形成, 所以 MIL 可能会影响 ES 的高度.

图 6 为 MERRA-2 数据中提取的 1996－1997 年 (a) 和 2018－2019(b) 年 70°N 处的准定常行星 2 波的 EP 通量散度在各个高度上的逐日变化. 北半球 1996－1997 年的冬季非常平静, 没有发生 SSW 事件和 ES 事件[7]. 在整个冬季, SPW2 对背景的拽力以西向强迫为主, 主要集中在 30～70 km 高度, 最大值位于平流层顶约 50 km 处, 最大西向加速度达到 –14 m·s^{-1}·d^{-1}. 相比之下, 2018－2019 年的冬季, 在 12 月 10 日以后, SPW2 对背景的拽力迅速由西向强迫转变为东向强迫, 高度集中在 37～67 km 处, 东向加速度最大值位于 60 km 左右, 约为 6 m·s^{-1}·d^{-1}. 在 12 月 27 日以后, 随着 MIL 的形成, 整个平流层以及中间层下部的东向强迫迅速减弱并且消失. 在 1 月

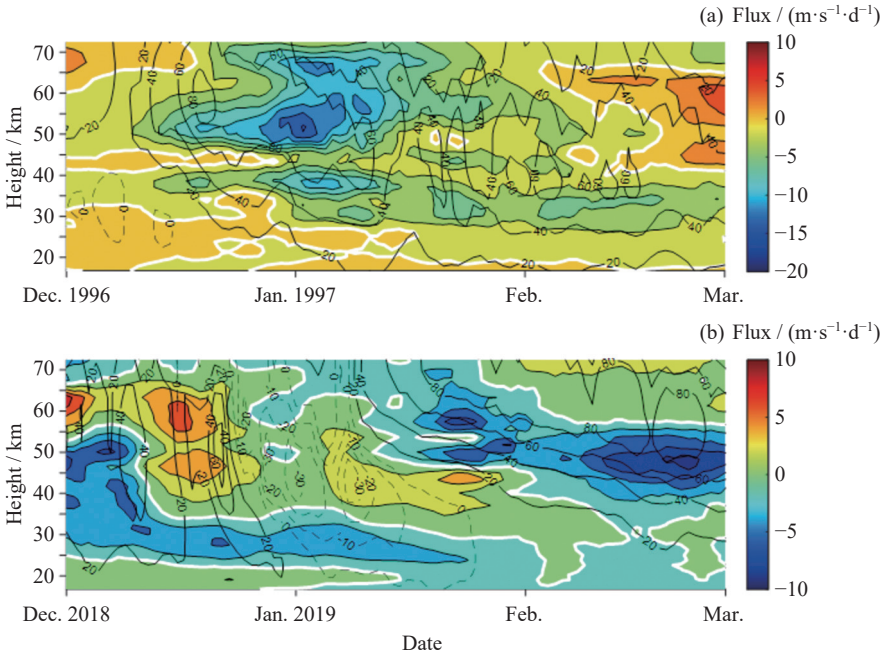


图 6　从 MERRA-2 数据中提取的 1996－1997 年 (a) 和 2018－2019 年 (b)70°N 处的准定常行星 2 波的 EP 通量散度在各个高度上的逐日变化 (白色实线代表零刻度线, 黑色实线代表东向的纬向平均纬向风速, 而黑色虚线则代表西向的纬向平均纬向风速)

Fig. 6　Daily variations of the EP flux divergence of the SPW2 at 70°N at various altitudes for the years 1996－1997 (a) and 2018－2019 (b) ,extracted from MERRA-2 data (The solid white line in the graph represents the zero line, the solid white line represents the eastward zonal-mean zonal winds, and the dashed white line represents the westward zonal-mean zonal winds)

10 日平流层顶消失以后, EP 的东向强迫在 35～55 km 处重新出现并迅速下降. 在 1 月 15－31 日期间, 东向强迫的整体高度维持在 35～45 km 左右. 在 1 月 15 日前后, 平流层顶重新形成以后, SPW2 的西向强迫在 50～65 km 高度重新形成, 并且随着时间逐渐下降. 2 月 15 日, SPW2 的西向强迫的整体高度下降到 35～50 km. 2 月 21 日, 准定常行星 2 波的西向强迫达到最大值 (约–8 m·s^{-1}·d^{-1}). 在 1 月 15 日平流层顶重新形成以后, SPW2 的西向强迫中心随时间下降的趋势与平流层顶保持一致. 为了探究 SWP2 在这片区域的作用, 本文计算了 MERRA-2 数据在 2019 年 1 月 20－25 日, 2 月 13－18 日, 19－24 日纬度范围 0°－80°N 和高度范围 0～80 km 内的 SPW2 的 EP 通量和 EP 通量散度, 并在图 7 中给出. 对 EP 通量矢量的处理方法同图 5. 从图 7 可以看到, 在 1 月 20－25 日期间, 高纬地区 (70°－80°N) 有少量的 SPW2 从平流层向中间层传输 (见图 7a), 但是在 2 月 13－24 日期间, 在 50 km 以上, 60°N 以北, SPW2 的传输方向发生了反转, 变为从中间层向平流层向极地传输, 说明在这段时间内, SPW2 没有向平流层顶区域 (50～70 km) 输送涡动热通量. 在 1 月 17 日至 2 月 28 日期间, 平流层区域的 SPW2 的西向强迫持续存在, 平流层顶的温度保持在 250 K 左右. 在 3 月 1 日以后, 平流层的 SPW2 的西向强迫迅速减弱并消失, 同时平流层顶开始逐渐增温, 最大振幅在 3 月 18 日左右达到了 272 K. 这些迹象表明, 准定常行星 2 波参与了平流层顶在高高度重新形成以后的平稳下降过程, 并在其中起到了不可忽视的作用.

在 12 月 10－27 日期间, 高纬地区的 SPW2 (70°N) 在整个平流层及中间层下部出现较强的辐散区, 会对那里的背景纬向风产生东向加速. SPW1 波在平流层出现的强辐合区, 证明 SPW1 波在 ES 发生前的 SSW 主增温事件及纬向风反转事件中占主导地位. 在 12 月 24 日至 1 月 10 日期间, SPW2 波在平流层出现的辐散区, 可能是平流层及中间层高纬地区部分经度地区并未发生纬向风反转的原因 (见图 7).

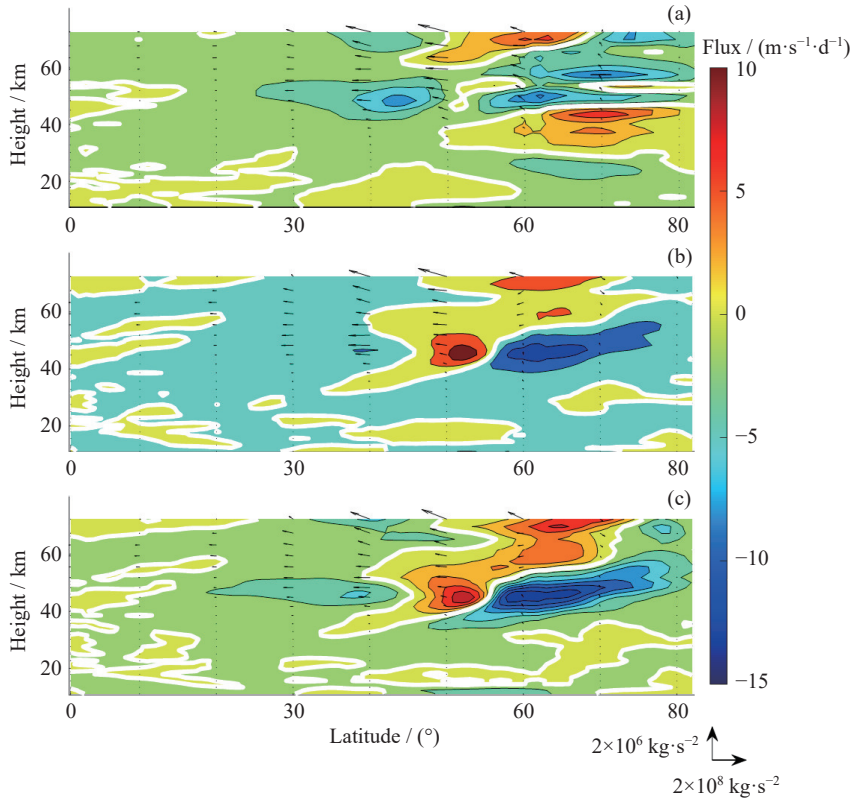


图 7 从 MERRA-2 数据中提取的 2019 年 1 月 20－25 日 (a)、2 月 13－18 日 (b) 和 19－24 日 (c) 准定常行星 2 波的 EP 通量 (矢量) 和 EP 通量散度的纬度-高度剖面

Fig. 7 Latitude-height sections of EP flux (vectors) and EP flux divergence for SPW2 for 20－25 January (a), 13－18 February (b), and 19－24 February (c), 2019 extracted from MERRA-2 data

为了验证时间平均背景纬向风对经度的依赖性, 沿 80°N 的纬圈以 45°的经向间隔, 观察 8 个不同经度处的背景纬向风. 图 8 给出了从 MERRA-2 数据中提取的 80°N 纬圈上背景纬向风在不同经度处的逐日变化. 其中, 背景纬向风是在 30 天的滑动窗内利用时间平均来求取的. 在 105°W, 150°W, 165°E 处可以观察到, 在纬向平均纬向风发生反转的时间范围内 (2018 年 12 月 24 日至 2019 年 1 月 10 日) 由时间平均求取的背景纬向风并没有发生反转. 这种高纬度纬向风沿纬圈的不一致性可能会导致部分在对流层产生的行星波, 传播到平流层后能够继续向上传播直至中间层, 从而参与 MIL 的形成.

3 结论

利用 MLS, ERA5 和 MERRA-2 的温度数据, 分析了 2018－2019 年北半球冬季 (2018 年 12 月至 2019 年 2 月) 高纬地区 (70°) 发生的 ES 事件. MLS 温度数据验证了以往的研究, 在 ES 发生之前, 高纬地区在 90 km 高度上出现了中间层逆温层. 利用 MERRA-2 的温度、经向风速和纬向风速数据, 分析了 SPW1 和 SPW2 在 ES 事件期间的活动情况[18].

在 ES 事件发生前后, 两种波动在平流层和低中间层非常活跃. 在 ES 事件发生之前的原平流层顶下降阶段, SPW1 占主导地位. 从温度和水平风中提取的 SPW1 的振幅是 SPW2 的 2～3 倍. 在原平流层顶消失、高高度平流层顶形成阶段以及其后的高高度平流层顶的下降阶段, SPW2 占主导地位.

利用球坐标下准地转近似条件下的纬向变换欧拉平均动量方程分析了准定常行星 1 波在 2018 年 12 月 15 日至 2019 年 2 月 15 日的 EP 通量以及 EP 通量散度. 在 ES 发生之前, EPSPW1 对背景大气显示出强烈的西向强迫, 强烈的西向强迫使平流减速并且发生了风反转. 在 2018 年 12 月 15－20 日期间, 65～70 km 处存在东向强迫, 据推断是由于正压/斜压不稳定减弱了西向行星波强迫, 导致了行星波的

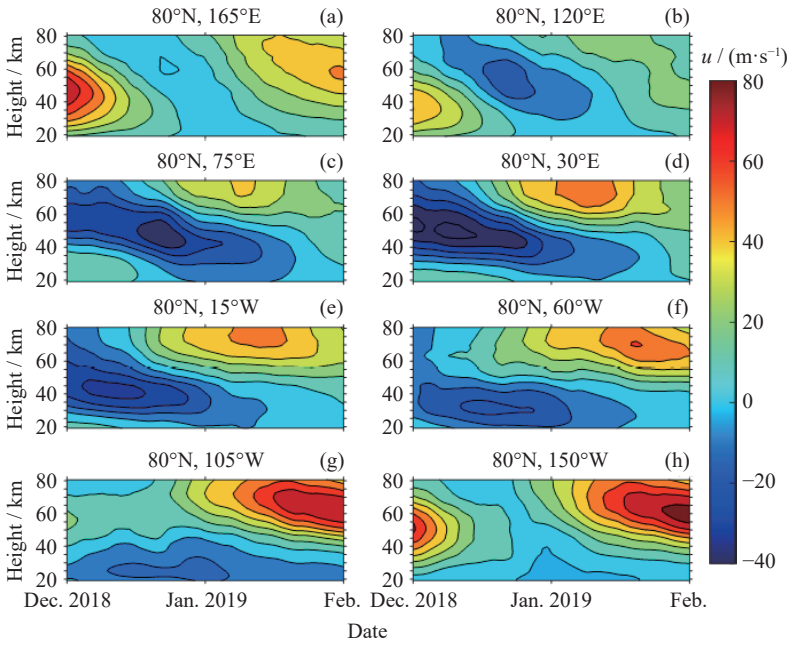


图 8　从 MERRA-2 数据中提取的 2018—2019 年在 80°N 不同经度位置的时间平均纬向风的时间高度剖面

Fig. 8　Time-height sections of time averaged zonal wind at 80°N and different longitude from 2018 to 2019, extracted from MERRA-2 data

局地激发, 从而形成了该地区的东向波强迫. 除此之外, 在当地激发的行星波持续向上传输能量, 参与了约 90 km 高度处 MIL 的形成. 在 50 km 高度处的 1 月 1 日以后, 同样有东向波强迫出现, 这是由于正压/斜压不稳定激发的行星波使扰动位涡拟能减小, 对平流施加向东的加速度, 从而导致了反转的背景西风减弱, 东向风重新形成. 在平流层顶在高高度上重新形成以后 (1 月 15 日), SPW1 的对背景的加速度迅速减弱, 说明其没有参与其后的高高度的平流层顶的维持与下降阶段.

与平静 (没有 ES 和 SSW 事件发生) 年份相比 (1996—1997 年), 发生 ES 事件年份 (2018—2019 年) 的 SPW2 在原平流层顶的下降阶段对背景大气施加了强烈的东向波强迫. 这种东向波强迫一直持续到原平流层顶消失. SPW2 的东向波强迫使得背景纬向风向东加速, 造成了高纬度地区纬向风反转的沿纬圈的不一致性. 在 ES 发生以后, SPW2 对背景大气的强迫转为西向, 并且随时间下降, 在 2 月 21 日达到最大值, 正好对应着高高度平流层顶的重新形成之后的下降, 在 SPW2 的西向强迫存在期间, 平流层顶的温度最大振幅在 255 K 左右, 而 SPW2 的西向强迫消失以后, 平流层顶迅速增温, 温度的最大振幅达到 272 K. 这说明在较高高度的平流层顶的重新形成与下降过程中, 并不只有重力波参与, SPW2 同样起到了不可忽视的作用, SPW2 维持了平流层顶温度在这个阶段的稳定.

参考文献

[1] WAUGH D W, RANDEL W J. Climatology of arctic and antarctic polar vortices using elliptical diagnostics[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1999, **56**(11): 1594-1613

[2] MANNEY G L, KRÜGER K, PAWSON S, *et al*. The evolution of the stratopause during the 2006 major warming: satellite data and assimilated meteorological analyses[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D11): D11115

[3] MANNEY G L, SCHWARTZ M J, KRÜGER K, *et al*. Aura Microwave Limb Sounder observations of dynamics and transport during the record-breaking 2009 Arctic stratospheric major warming[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**(12): L12815

[4] DE LA TORRE L, GARCIA R R, BARRIOPEDRO D, *et al*. Climatology and characteristics of stratospheric sudden warmings in the Whole Atmosphere Community Climate Model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D4): D04110

[5] FRANCE J A, HARVEY V L. A climatology of the stratopause in WACCM and the zonally asymmetric elevated

stratopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(5): 2241-2254

[6] CHANDRAN A, COLLINS R L, GARCIA R R, *et al*. A case study of an elevated stratopause generated in the Whole Atmosphere Community Climate Model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, **38**(8): L08804

[7] CHANDRAN A, COLLINS R L, GARCIA R R, *et al*. A climatology of elevated stratopause events in the whole atmosphere community climate model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(3): 1234-1246

[8] CHANDRAN A, GARCIA R R, COLLINS R L, *et al*. Secondary planetary waves in the middle and upper atmosphere following the stratospheric sudden warming event of January 2012[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, **40**(9): 1861-1867

[9] HITCHCOCK P, SHEPHERD T G. Zonal-mean dynamics of extended recoveries from stratospheric sudden Warmings[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2013, **70**(2): 688-707

[10] LIMPASUVAN V, ORSOLINI Y J, CHANDRAN A, *et al*. On the composite response of the MLT to major sudden stratospheric warming events with elevated stratopause[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, **121**(9): 4518-4537

[11] ORSOLINI Y J, LIMPASUVAN V, PÉROT K, *et al*. Modelling the descent of nitric oxide during the elevated stratopause event of January 2013[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2017, **155**: 50-61

[12] REN S Z, POLAVARAPU S, BEAGLEY S R, *et al*. The impact of gravity wave drag on mesospheric analyses of the 2006 stratospheric major warming[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2011, **116**(D19): D19116

[13] SISKIND D E, ECKERMANN S D, MCCORMACK J P, *et al*. Case studies of the mesospheric response to recent minor, major, and extended stratospheric warmings[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2010, **115**(D3): D00N03

[14] YAMASHITA C, ENGLAND S L, IMMEL T J, *et al*. Gravity wave variations during elevated stratopause events using SABER observations[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(11): 5287-5303

[15] STRAY N H, ORSOLINI Y J, ESPY P J, *et al*. Observations of planetary waves in the mesosphere-lower thermosphere during stratospheric warming events[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2015, **15**(9): 4997-5005

[16] ORSOLINI Y J, ZHANG J R, LIMPASUVAN V. Abrupt change in the lower thermospheric mean meridional circulation during sudden stratospheric warmings and its impact on trace species[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2022, **127**(20): e2022JD037050

[17] SHEPHERD M G, MEEK C E, HOCKING W K, *et al*. Multi-instrument study of the mesosphere-lower thermosphere dynamics at 80°N during the major SSW in January 2019[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2020, **210**: 105427

[18] OKUI H, SATO K, KOSHIN D, *et al*. Formation of a mesospheric inversion layer and the subsequent elevated stratopause associated with the major stratospheric sudden warming in 2018/19[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2021, **126**(18): e2021JD034681

[19] SCHEFFLER J, AYARZAGÜENA B, ORSOLINI Y J, *et al*. Elevated stratopause events in the current and a future climate: a chemistry-climate model study[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2022, **227**: 105804

[20] RHODES C T, LIMPASUVAN V, ORSOLINI Y. The composite response of traveling planetary waves in the middle atmosphere surrounding sudden stratospheric warmings through an overreflection perspective[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2023, **80**(11): 2635-2652

[21] SISKIND D E, ECKERMANN S D, COY L, *et al*. On recent interannual variability of the Arctic winter mesosphere: implications for tracer descent[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, **34**(9): L09806

[22] THURAIRAJAH B, BAILEY S M, CULLENS C Y, *et al*. Gravity wave activity during recent stratospheric sudden warming events from SOFIE temperature measurements[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, **119**(13): 8091-8103

[23] TOMIKAWA Y, SATO K, WATANABE S, *et al*. Growth of planetary waves and the formation of an elevated stratopause after a major stratospheric sudden warming in a T213L256 GCM[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2012, **117**(D16): D16101

[24] WATANABE S, KAWATANI Y, TOMIKAWA Y, *et al*. General aspects of a T213L256 middle atmosphere general circulation model[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D12): D12110

[25] SMITH A K. Longitudinal variations in mesospheric winds: evidence for gravity wave filtering by planetary waves[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1996, **53**(8): 1156-1173

[26] SMITH A K. The origin of stationary planetary waves in the upper mesosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2003, **60**(24): 3033-3041

[27] LIEBERMAN R S, RIGGIN D M, SISKIND D E. Stationary waves in the wintertime mesosphere: evidence for gravity wave filtering by stratospheric planetary waves[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, **118**(8): 3139-3149

[28] SATO K, NOMOTO M. Gravity wave-induced anomalous potential vorticity gradient generating planetary waves in the winter mesosphere[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2015, **72**(9): 3609-3624

[29] SATO K, YASUI R, MIYOSHI Y. The momentum budget in the stratosphere, mesosphere, and lower thermosphere. Part I: contributions of different wave types and *in situ*

generation of Rossby waves[J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2018, **75**(10): 3613-3633

[30] RIENECKER M M, SUAREZ M J, GELARO R, *et al*. MERRA: NASA's modern-era retrospective analysis for research and applications[J]. *Journal of climate*, 2011, **24**(14): 3624-3648

[31] BOSILOVICH M G, LUCCHESI R, SUAREZ M. MERRA-2: file specification [R], 2015

[32] LIVESEY N, READ W, WAGNER P, *et al*. EOS MLS Version 4.2 × Level 2 data quality and description document [J]. *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA*, 2015, **15**: D-33509

[33] PANCHEVA D, MUKHTAROV P, MITCHELL N J, *et al*. Planetary waves in coupling the stratosphere and mesosphere during the major stratospheric warming in 2003/2004[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2008, **113**(D12): D12105

[34] ANDREWS D G, Holton J R, Leovy C B. Middle Atmosphere Dynamics[M]. Orlando: Academic Press, 1987

[35] HARADA Y, HIROOKA T. Extraordinary features of the planetary wave propagation during the boreal winter 2013/2014 and the zonal wave number two predominance[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(21): 11,374-311,387

[36] CHEN W, GRAF H F, TAKAHASHI M. Observed interannual oscillations of planetary wave forcing in the Northern Hemisphere winter[J]. *Geophysical research letters*, 2002, **29**(22): 30-31-34-34

[37] RODAS C, PULIDO M. A climatology of Rossby wave generation in the middle atmosphere of the Southern Hemisphere from MERRA reanalysis[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2017, **122**(17): 8982-8997

作者简介



苏　伟　男, 1997 年 4 月出生于湖北省荆州市, 武汉大学 2021 级空间物理系硕士. 目前研究方向为中高层大气动力学.
E-mail: 849162319@qq.com



黄春明（通信作者）　女, 武汉大学电子信息学院空间物理系教授, 博士生导师. 多年从事大气动力学研究, 在中高层大气波动的数值模拟和观测研究方面做出了较好的工作, 主持了多项国家自然科学基金面上项目和国家 863 项目.
E-mail: huangcm@whu.edu.cn