

2020/21 冬季大范围低温寒潮过程中一种典型的 平流层-对流层耦合演变模态

虞越越^{1*}, 李亚飞^{3,2}, 任荣彩^{2,1}, 崔正飞¹

1. 南京信息工程大学大气科学学院/气象灾害教育部重点实验室 (KLME) / 气象与环境联合研究中心 (ILCEC) / 气象灾害预报预警与评估省部共建协同创新中心 (CIC-FEMD), 南京 210044;
2. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029;
3. 天津市气象灾害防御技术中心, 天津 300074

* 通讯作者, E-mail: yuyy@nuist.edu.cn

摘要 平流层爆发性增温 (SSW) 超前于对流层环流异常, 是延长冬季寒潮低温预报时效的重要途径之一。然而强 SSW 事件前后地面温度响应的区域和时间存在不确定性, 其中涉及的平流层-对流层耦合过程和机理也不十分清楚。本文采用 1979–2021 年 ERA5 再分析数据集, 研究了 2020/21 冬季“偏心型”强 SSW 事件前后中高纬度地区地面温度异常的演变特征, 并分析了其与等熵大气经向质量环流平流层-对流层分支的耦合演变模态的动力联系。结果表明, 伴随此次强 SSW 事件, 亚洲和北美中纬度地区的寒潮低温事件分别在绕极西风反转为东风之前和再次恢复为西风之后发生。SSW 前后大气经向质量环流的平流层向极地暖支与对流层高层向极暖支、低层向赤道冷支之间呈现出三个阶段的耦合演变模态: 同位相“加强—加强”、反位相“加强—减弱”以及反位相“减弱—加强”。加强的质量环流对流层向赤道冷支是 SSW 前后寒潮低温事件的主要原因, 而加强的向极地平流层暖支是 SSW 发生及其伴随的北极涛动负位相持续加强的主要原因。大气经向质量环流不同的垂直耦合模态又取决于行星波槽脊在对流层顶和对流层中低层两个关键等熵面上的西倾角异常。西倾角异常表征大气波动的斜压性, 主要通过影响关键等熵面以上向极地的净质量输送和其下向赤道的净质量输送进行调控。尤其在 SSW 发生后的极涡恢复期, 对流层顶的弱斜压性会加强对流层向极地暖支, 进而加强向赤道冷支, 有利于寒潮低温的发生。本次 SSW 事件前后大气经向质量环流三支的耦合演变模态, 与历年北半球环状模 (NAM) 负事件中极区平流层温度异常信号下传滞后的平流层-对流层耦合演变类型相一致, 其在波动尺度方面也存在共同特征, 即 SSW 事件或 NAM 负事件前期对流层一波加强且上传, 后期对流层二波加强但较难上传。

关键词 平流层爆发性增温, 寒潮低温, 等熵大气经向质量环流, 平流层-对流层耦合

文章编号:

文章 DOI 编码 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2206.21250

收稿日期 2021-12-24; **网络与出版日期**

作者简介 虞越越, 女, 1987 年出生, 博士, 主要从事寒潮低温的机理和预报、平流层-对流层相互作用研究。
E-mail: yuyy@nuist.edu.cn

通讯作者 虞越越, E-mail: yuyy@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划资助 2019YFC1510201, 江苏省自然科学基金资助 BK20211288, 国家自然科学基金面上项目资助 42075052, 42088101,

Funded by the National key research and development program (Grant 2019YFC1510201), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grants No. BK20211288), and National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 42075052 and 42088101).

**A Typical Evolution Mode of Stratosphere-Troposphere Coupling During Cold Air Outbreak
Events in 2020/21 Winter**

Yueyue Yu^{1,2*}, Yafei Li^{3,2}, Rongcai Ren^{2,1}, Zhengfei Cui¹

¹Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International
Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on
Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD) / Institute for Climate and Application
Research (ICAR), Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, 210044, China

²LASG, Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing, 100029, China

³Tianjin Meteorological Disaster Defense Technology Centre, Tianjin, 300074, China

Stratospheric sudden warming (SSW) events are one of the important predictability sources of extended-range prediction of cold air outbreaks (CAO) because of their temporal lead information relative to tropospheric circulation changes. Nevertheless, there is large uncertainty in the region and time of surface air temperature response to SSW events, and the stratosphere-troposphere coupling process and mechanism involved are not very clear yet. Using ERA5 reanalysis data from 1979 to 2021, this study focuses on the "displacement"-type strong SSW event in the 2020/21 winter and investigates the characteristics of extratropical surface air temperature anomalies, the evolution of coupling mode of the poleward warm air stratospheric branch (WB_ST), poleward warm air tropospheric branch (WB_TR) and equatorward cold branch (CB) of isentropic meridional mass circulation (IMC), and the related wave dynamics. Results show that associated with this strong SSW event, the CAO events over Eurasia occurred before the subpolar westerly became easterly, while and the CAO event over North America took place after the subpolar westerly recovered. This was mainly the result of three-stage coupling modes between the three IMC branches during the stratospheric polar vortex oscillation, i.e., in-phase strengthening of WB_ST and WB_TR/CB, out-of-phase with a strengthened WB_ST but a weakened WB_TR/CB, and out-of-phase with a weakened WB_ST but a strengthened WB_TR/CB. The stronger CB resulted in the CAOs associated with SSW, while the stronger WB_ST dominantly contributed to the occurrence of SSW and the continuous strengthening of the negative phase of Arctic Oscillation. The coupling mode of the three IMC branches depended on the westward tilt of waves at the two critical level, namely the tropopause level and the middle and lower tropospheric level. Anomalous strong westward tilt caused net poleward mass transport above this level and net equatorward transport below it and vice versa. Especially in the period of polar vortex recovery, the anomalously weak baroclinicity near the tropopause strengthens the WB_TR, and then strengthens the CB due to the mass continuity, which is conducive to the occurrence of CAOs. The coupling evolution mode of IMC around SSW in 2020/21 winter is found to be highly consistent with that during the negative Northern Annular Mode (NAM) events over the past years, which are characterized by lagged downward propagation of the polar stratospheric temperature anomaly to the lower troposphere. Their common features in terms of wave scale are found, that is, the wavenumber-1 waves tend to be stronger and

66 propagate upward in the early stage of SSW event or negative NAM event, and the wavenumber-2 waves
67 are strengthened but restrained within the troposphere after SSW.
68 **Key words:** Stratospheric sudden warming, Cold air outbreak, Isentropic atmospheric meridional mass
69 circulation, Stratosphere-Troposphere coupling

创新点和重要意义：冬季北半球平流层极涡具有显著的次季节尺度变化，且覆盖中高纬度地区，其最剧烈的异常信号——平流层爆发性增温往往具有向下影响，在中高纬度地区超前于对流层环流异常，因此是延长冬季寒潮低温预报时效的预报因子之一。然而，要将平流层极涡信号真正应用到延伸期业务预报中仍存在难点，主要表现在：强 SSW 事件前后地面温度响应的区域和时间存在不确定性，其中涉及的平流层-对流层耦合过程和机理仍不十分清楚。本文针对 2020/21 冬季连续爆发的大陆尺度寒潮低温事件，研究了 2020/21 冬季“偏心型”强 SSW 事件前后中高纬度地区地面温度异常的演变特征，分析了其与等熵大气经向质量环流平流层-对流层分支的耦合演变模态的动力联系，并进一步探讨了本次冬季大范围低温寒潮过程中的平流层-对流层耦合演变模态是否具有典型性，为平流层信号在寒潮低温延伸期预报中的应用提供依据。

创新点如下：

1. 本文抓住 2020/21 冬季的典型性和特殊性（多次连续爆发的寒潮低温事件以及持续时间异常偏长的平流层爆发性增温事件），将其作为典型个例，对平流层-对流层相互作用研究具有重要参考价值；
2. 应用了有机连接对流层与平流层、中纬度与极区的等熵大气经向质量环流框架，提出了在“偏心型”平流层爆发性增温事件前后质量环流高低分支的耦合演变模态，从冷暖空气质量收支角度定量揭示了平流层极区增温和中纬度异常低温之间的内在联系及其物理机制；
3. 证明了本次平流层爆发性增温事件前后质量环流三支耦合演变模态具有典型性，提出了这类平流层极涡异常事件在波动尺度方面的指示性特征，为平流层极涡信号在寒潮低温延伸期预报中的应用提供科学依据。

随着探测手段的进步和观测资料的丰富,许多科学家开始注意到,平流层不仅被动地接受对流层行星尺度扰动上传的影响 (Matsuno, 1970; Limpasuvan et al., 2004, 2005; Polvani and Waugh, 2004),而且平流层的一些变化可通过与对流层的相互作用过程对季节内尺度的对流层环流和天气变化产生重要影响 (黄荣辉等, 2018)。最受关注的当属平流层极涡异常信号的“向下传播”。Baldwin et al. (1999) 和 Baldwin and Thompson (2001) 发现在季节内尺度上,较强的平流层北半球环状模 (Northern Annular Mode, NAM) 异常信号可以向下传播到地面,表现为同位相的北极涛动 (Arctic Oscillation, AO)。而与表征弱极涡的 NAM 负位相对应的 AO 负位相又往往伴随大气环流经向性和波活动的加强,有利于大范围寒潮低温的发生 (e.g., Balling and Lawson, 1982; Thompson and Wallace, 1998, 2001; Moritz et al., 2002; 陈文和康丽华, 2006)。因此,弱极涡或平流层爆发性增温 (Stratospheric Sudden Warming, SSW) 事件 (Ricard and Hering, 1959; Frederick and Sidney, 1964; 邓淑梅和陈月娟, 2006) 发生前后 1-2 个月往往伴随着中纬度大范围极端低温事件的发生 (Thompson et al., 2002; Kolstad et al., 2010; 胡永云, 2006; 顾雷等, 2008; 陈文和魏科, 2009; 向纯怡等, 2009; 李琳等, 2010; 杨光等, 2012; 陈文等, 2013; Chen et al., 2015; Yu et al., 2015b; Zhou et al., 2020)。平流层极涡的形状、位置可进一步影响寒潮或极端低温发生的时间和区域,比如:在极涡偏心型 SSW 事件前/后 2-3 周,美国东南部偏暖/偏冷,欧亚偏冷/偏暖;而在极涡分裂型 SSW 事件前后 1 个月内,两个大陆同时偏冷的概率显著增加 (Mitchell et al., 2013; Kidston et al., 2015; Lehtonen and Karpechko, 2016);平流层极涡向欧亚大陆、北美大陆和大西洋偏移的事件分别使欧亚、北美和格陵兰异常偏冷,极涡偏向欧亚大陆时往往伴随 AO 负位相持续时间偏长、强度偏大 (Huang et al., 2018; Lu et al., 2021)。这一系列研究将 NAM 和 AO 这两个环状模态的天气指示意义提上了一个新高度,平流层-对流层耦合过程的存在为平流层信号在冬季中、短期预测中的应用提供了可能。

关于平流层向下影响对流层的机制,主要有波流相互作用理论 (Matsuno, 1970; Kuroda and Kodera, 1999)、波折射理论 (Limpasuvan et al., 2004; Haynes, 2005)、非局地地位势涡度响应 (Hartley et al., 1998; Ambaum and Hoskins, 2002; Black, 2002) 以及等熵大气经向质量环流冷暖支耦合理论 (Johnson, 1989; Cai and Ren, 2007; Ren and Cai, 2008; Yu et al., 2014, 2015a, b, c, 2018a; Cai et al., 2016; Yu and Ren, 2019)。波流相互作用理论 (Charney and Drazin, 1961; Kuroda and Kodera, 1999; Shindell et al., 1999; Hartmann, 2000) 认为只有较大尺度的行星波在基流速度略大于波相速度的条件下才能上传至平流层。对流层波动上传影响平流层基流后,平流层西风基流的减弱可反过来影响对流层波动的垂直传播,使得波动可以上传到的临界高度逐渐降低,形成纬向风、位势高度等环流异常从平流层到对流层的向下传播特征。波折射理论强调了平流层环流“波折射性”对行星波传播的调控作用,认为对流层罗斯贝波通量的上传,可将对流层 AO/NAM 的变化信号传递给平流层,但该波动通量会受到平流层低层基流的折射性质影响而改变方向 (Hartmann, 2000; Limpasuvan and Hartmann, 2000),形成行星波上传进入平流层的向赤道和向极地传播的两支波导,以及在平流层高层反射向

122 对流层的波动传播路径 (Perlwitz and Harnik, 2003)。非局地位势涡度响应机制 (Hartley et al., 1998;
123 Ambaum and Hoskins, 2002; Black, 2002) 是指平流层低层的位势涡度异常可激发瞬时经向环流, 从
124 而引起对流层温度、风场等的同步变化。

125 近年来, 等熵大气经向质量环流理论为平流层-对流层动力耦合及其天气气候效应相关的物理
126 过程和机制研究提供了新思路和新视角。等熵大气经向质量环流是以位温 (或熵) 作为垂直坐标用
127 于研究大气环流分布的理论框架 (Johnson, 1989; Cai and Shin, 2014)。在等熵面上定义的经向质量环
128 流可以更直接、更客观地量化各纬度带内的冷暖空气输送。西风带大气斜压波的存在, 决定了等
129 熵大气经向质量环流呈现为半球尺度的单圈环流, 由热带地区的上升支、高层由赤道向极地的暖
130 支、中高纬度地区的下沉支以及低层由极区向赤道的冷支组成。高层暖支表征低纬度暖空气向极
131 输送的强度, 主导着平流层 NAM 和平流层极涡的强度变化 (Yu et al., 2018a), 而低层冷支则表征了
132 极区冷空气向南输送或冷空气南侵的强度及其路径, 从而与中纬度的寒潮爆发和极端低温的发生
133 紧密相关 (Iwasaki and Mochizuki, 2012; Iwasaki et al., 2014; Yu et al., 2015a, b; Liu and Chen, 2021; Liu
134 et al., 2021)。

135 等熵大气经向质量环流向极暖支和向赤道冷支之间的耦合变化, 反映了平流层-对流层动力耦
136 合的过程 (Cai and Ren, 2006, 2007; Ren and Cai, 2006, 2007, 2008; Yu and Ren, 2019)。伴随平流层极
137 涡振荡或 NAM 事件的向下影响以及异常信号的系统性经向传播, 可由等熵大气经向质量环流向极
138 暖支和向赤道冷支之间的先后同位相变化来解释。例如, SSW 发生前的大气行星波活动及经向交
139 换加强, 首先表现为经向质量环流暖支的自上而下逐层异常加强, 反映在环流异常场上即为动力
140 和热力异常信号的同时向下和系统性向极传播 (Cai and Ren, 2006, 2007; Ren and Cai, 2006, 2007,
141 2008); 由于质量环流暖支逐层加强及其所造成的 SSW 发生时的平流层极区逐层异常增暖, 往往领
142 先于对流层质量环流向赤道冷支的异常加强, 高层的暖异常因而与对流层极区的冷异常相对应,
143 即呈垂直反位相变化。换言之, 大多数情况下平流层向下传播的暖异常信号实际并不能下传到对
144 流层 (Ren and Cai, 2007)。Yu and Ren (2019) 的研究进一步指出, 大气经向质量环流高层向极地暖
145 支和低层向赤道冷支之间的不同的耦合变化, 决定了平流层-对流层环流动力耦合的特征。当平流
146 层暖支与对流层冷暖支呈同位相变化时, 对流层温度异常信号则滞后于平流层信号而呈向下传播
147 特征, 反之亦然。等熵大气经向质量环流平流层向极暖支和对流层低层向赤道冷支之间的耦合关
148 系存在多个主导演变模态, 决定了平流层向下影响的不确定性 (Yu and Ren, 2019)。此外, 平流层
149 NAM 与地面 AO 之间的同位相关系也可用等熵大气质量环流理论解释。对质量与温度异常的定量
150 分析表明, 在 AO 负位相的冬季, 等熵大气经向质量环流往往异常偏强, 早冬高层暖支将更多的暖
151 空气向极区输送, 导致平流层出现异常暖高压 (NAM 负位相), 平流层暖支的加强略早于低层向赤
152 道冷支, 使得整层气柱质量盈余, 低层极区也出现高压 (AO 负位相), 形成极区看似“正压”的结构
153 (Cai and Ren, 2007; Yu et al., 2014)。总之, 大气经向质量环流高低层支之间的耦合变化, 决定了平
154 流层与对流层的动力耦合特征, 关注大气质量环流的异常变化, 是理解平流层向下影响对流层寒
155 潮低温的重要途径。

2020/21 年冬季，发生了一次偏心型强 SSW 事件，持续时间较长，且在其发生前后伴有多次破纪录的寒潮低温事件在东亚和北美发生。本文拟围绕该典型个例，通过分析等熵大气质量以及经向质量环流的变化特征和相关的动力过程，厘清以下三个问题: 1) 此次强 SSW 事件前后中高纬度大范围地面温度的异常演变特征是怎样的? 2) 等熵大气经向质量环流平流层向极暖支和对流层向赤道冷支的耦合模态如何? 3) 平流层极涡异常是如何通过等熵大气质量异常与中高纬度大范围地面温度建立紧密联系的?

2. 资料与方法

2.1 资料

本文使用欧洲中期预报中心提供的 ERA5 逐小时再分析资料集，时间从 1979 年 1 月 1 日至 2021 年 2 月 28 日。水平分辨率为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ ，垂直方向共有 32 层，分别从 1000 hPa 到 10 hPa。文中使用的要素场包括: 地面温度场、地面风场和三维位势高度场、温度场、风场。本文首先对 24 小时逐时数据进行日平均处理得到逐日要素原始场; 再将 1 月 1 日至 12 月 31 日每天的要素原始场进行多年平均 (1980-2020)，得到气候平均场; 最后从要素原始场中去除气候平均场，得到各要素的距平场。

2.2 方法

2.2.1 冷面积指数

为表征不同地区整体的冷暖情况，本文使用 Cai (2003) 和 Yu et al. (2015a) 定义的冷面积指数，即: 某区域地面温度距平 (SAT') 低于 -0.5 倍局地标准差 (LSD) 的格点数占该区域所有格点数的百分比。表达式如下所示:

$$C(t, yr) = \frac{\iint_A H(0.5LSD(\lambda, \varphi, t) - SAT'(\lambda, \varphi, t, yr)) dA}{\iint_A dA} \quad (2.1)$$

$$LSD(\lambda, \varphi, t) = \sqrt{\frac{\sum_{yr=1980}^{yr=2010} SAT'(\lambda, \varphi, t, yr)}{31}} \quad (2.2)$$

其中 λ, φ 为经度与纬度， $H(x)$ 为赫维赛德函数，即 $H(x) = \begin{cases} 0, & x \leq 0 \\ 1, & x > 0 \end{cases}$; $\iint_A dA$ 项中，积分区域 A 的纬度范围分别取 $60^\circ N - 90^\circ N$ 、 $25^\circ N - 60^\circ N$ ，用于定义高、中纬度冷面积指数， A 的经度范围分别取 $0 - 360^\circ$ 、 $0 - 60^\circ E$ 、 $60^\circ E - 120^\circ E$ 、 $120^\circ W - 60^\circ W$ ，用于定义北半球所有经度范围、欧洲、亚洲、北美地区的冷面积指数; t 表示日，范围从第 1 天到第 365 天，2 月取 28 天; yr 表示年。

179 2.2.2 等熵层内的大气质量和经向质量通量

180 参照 Pauluis et al. (2008, 2010, 2011) 和 Yu et al. (2014, 2015a, b, c) 计算等熵大气经向质量环流的方法, 首先利用 σ 坐标系将各气象要素插值到从 $\sigma=1$ (地表) 到 $\sigma=0$ (大气层顶) 等分为 200 份的等 σ 面上, 两个相邻等 σ 面之间的单位面积空气质量可表示为:

$$\delta m_{\sigma}(\lambda, \varphi, t) = P_s(\lambda, \varphi, t) \frac{\delta \sigma}{g} \quad (2.3)$$

183 这里 $\delta \sigma = 1/200$; P_s 是逐日地面气压; g 是重力加速度 (9.8 m/s^2)。其次, 取 16 个标准等熵面 ($\Theta_n = 250\text{K}, 260\text{K}, 270\text{K}, 280\text{K}, 290\text{K}, 300\text{K}, 315\text{K}, 330\text{K}, 350\text{K}, 370\text{K}, 400\text{K}, 450\text{K}, 550\text{K}, 650\text{K}, 850\text{K}, 1200\text{K}$)。将相邻等 σ 面间位温落在两个等熵面 Θ_n 和 Θ_{n+1} 中的空气块质量或经向质量通量累加, 可得到某个格点上等熵面 Θ_n 和 Θ_{n+1} 之间等熵层内的空气质量与经向质量通量, 记在该层的下等熵面 Θ_n 上, 公式如下:

$$\begin{cases} m(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_{\sigma}(\lambda, \varphi, t) \cdot Y[\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \Theta_n, \Theta_{n+1}] d\sigma \\ mv(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_{\sigma}(\lambda, \varphi, t) \cdot v(\lambda, \varphi, \sigma, t) \cdot Y[\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t), \Theta_n, \Theta_{n+1}] d\sigma \end{cases}, (2 \leq n \leq 15) \quad (2.4)$$

189 这里 t 是时间; $v(\lambda, \varphi, \sigma, t)$ 是经向速度; 当 $\Theta_n \leq \theta < \Theta_{n+1}$ 时, $Y(\theta, \Theta_n, \Theta_{n+1})=1$, 否则 $Y(\theta, \Theta_n, \Theta_{n+1})=0$ 。由于逐日地面最低位温可能低于 260K, 大气层顶位温可能高于 1200K, 本文计算了低于 260K、高于 1200K 的等熵空气质量与经向质量通量, 分别记在 250K 等熵面和 1200K 等熵面上:

$$\begin{cases} m(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_{\sigma}(\lambda, \varphi, t) \cdot H[\Theta_{n+1} - \theta(\lambda, \varphi, \sigma, t)] d\sigma \\ mv(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_{\sigma}(\lambda, \varphi, t) \cdot v(\lambda, \varphi, \sigma, t) \cdot H[\Theta_{n+1} - \theta(\lambda, \varphi, \sigma, t)] d\sigma \end{cases}, (n = 1) \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} m(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_{\sigma}(\lambda, \varphi, t) \cdot H[\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t) - \Theta_n] d\sigma \\ mv(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) = \int_0^1 \delta m_{\sigma}(\lambda, \varphi, t) \cdot v(\lambda, \varphi, \sigma, t) \cdot H[\theta(\lambda, \varphi, \sigma, t) - \Theta_n] d\sigma \end{cases}, (n = 16) \quad (2.6)$$

194 纬圈积分的等熵大气质量 (M)、经向质量通量 (MF) 由式 (2.7) – (2.8) 计算可得:

$$\begin{cases} M(\varphi, \Theta_n, t) = \sum_{\lambda=0}^{\lambda=360^\circ} m(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) \cdot A_{\varphi} \\ MF(\varphi, \Theta_n, t) = \frac{\sum_{\lambda=0}^{\lambda=360^\circ} mv(\lambda, \varphi, \Theta_n, t) \cdot A_{\varphi}}{R \Delta \varphi} \end{cases}, \quad (2.7)$$

195 其中 A_{φ} 为格点面积, 其表达式如下:

$$A_{\varphi} = \begin{cases} R^2 \Delta \varphi \left[\Delta \lambda \cdot \frac{\cos(\varphi - \frac{1}{2\Delta \varphi}) + \cos(\varphi + \frac{1}{2\Delta \varphi})}{2} \right], & (90^\circ S < \varphi < 90^\circ N) \\ \frac{\pi(R - \frac{1}{2\Delta \varphi})^2}{n_x}, & (\varphi = 90^\circ S \text{ or } 90^\circ N) \end{cases}, \quad (2.8)$$

196 R 为地球半径, 取 6378 千米, $\Delta \lambda$ 、 $\Delta \varphi$ 表示两格点之间的经、纬度差; n_x 为纬向格点数。

197 在北半球各个纬度, 大气低层总有 MF 负值, 表示有净的向南冷空气质量输送, 被称为向赤道冷支 (CB), 与寒潮低温紧密相关 (Cai and Shin, 2014; Yu et al., 2014, 2015a, b, c); 而在对流层高层和平流层总有 MF 正值, 表示净的向北暖空气质量输送, 被称为向极地暖支 (WB), 是引起高层极涡振荡变化的主导因素 (Yu et al., 2018a)。向赤道冷支与向极地暖支的分界等熵面 $\Theta_{n^*}(t)$, 则定义为

从 Θ_n 等熵面处向下积分的质量流函数的负极值所在层。经计算,对于冬季逐日资料来说,冷暖支分界面的变化范围维持在270–290K之间。而Iwasaki and Mochizuki (2012)和Iwasaki et al. (2014)将低于280K的空气质量定义为冷空气质量;Cai and Shin (2014)给出的冬季平均状态下 60°N 左右的冷暖支分界面是280K;Cai et al. (2016)、Yu et al. (2018a, b, c)用400K以上的经向质量通量表征与SSW紧密相关的平流层中上层环流强度。结合计算结果与前人工作,本文关注 60°N 的大气经向质量环流,用280K以下、280K–315K、400K以上三个等熵层内的总经向质量通量表征冷支、对流层暖支、平流层暖支的强度。进一步采用傅立叶变换方法,将经向风速分解,取代原始风速场代入公式(2.4)–(2.6),计算可得大气经向质量环流各分支强度的1波和2波分量。

2.2.3 行星波振幅和倾斜度计算

参照Zhang et al. (2013)的研究,行星波振幅(WA)的计算公式如下:

$$\text{WA}(\phi, p, t) = \left\{ \left[\overline{z(\lambda, \phi, p, t) - \overline{z(\lambda, \phi, p, t)}^\lambda}^2 \right]^\lambda \right\}^{1/2} \quad (2.9)$$

其中 λ 、 ϕ 和 p 分别表示经度、纬度和气压; z 表示位势高度场; $\overline{(\)}^\lambda$ 是纬向平均算子。WA正距平表征位势高度场的纬向非对称性偏高或波动振幅偏大,而负距平则表征位势高度场的纬向对称性偏高或波动振幅偏小。

参照Cai et al. (2014)的方法,计算行星波西倾角度(WT)指数的公式如下所示:

$$\text{WT}(\phi, p, t) = -\arcsin \left[\frac{r_{z,T}(\phi, p, t; j=1) - r_{z,T}(\phi, p, t; j=-1)}{2 \sin(K(\phi, p, t) \cdot \Delta\lambda)} \right] \quad (2.10)$$

这里 z 和 T 分别代表位势高度场、温度场, $r_{z,T}$ 代表位势高度和温度场在经度上超前/滞后 $j\Delta\lambda$ 的相关系数,其表达式如下:

$$r_{f,g}(\phi, p, t) = \frac{\overline{f(\lambda, \phi, p, t) \cdot g(\lambda + j\Delta\lambda, \phi, p, t)}^\lambda}{\left[\overline{f^2(\lambda, \phi, p, t)}^\lambda \cdot \overline{g^2(\lambda, \phi, p, t)}^\lambda \right]^{1/2}}; \quad (2.11)$$

式(2.10)中的 $K(\phi, p, t)$ 表示位势高度场的有效波数,其表达式为:

$$K(\phi, p, t) = \frac{\arccos[r_{z,z}(\phi, p, t; j=1)] + \arccos[r_{z,z}(\phi, p, t; j=-1)]}{2\Delta\lambda} \quad (2.12)$$

其中, $r_{z,z}$ 是高度场在经度上超前/滞后 $j\Delta\lambda$ 的自相关系数。行星波西倾角度为正/负值时表示行星波向西/东倾斜,波动斜压性偏强/弱,有利于行星波向上/下传播。 60°N 附近西倾角度指数的冬季气候平均为正值,这意味着中高纬度地区冬季天气气候主要受结构呈垂直向西倾斜的斜压不稳定波动控制。

3. 2020/21 冬季 SSW 爆发前后平流层环流与地面温度的演变特征

在 2020/21 冬季, 北极发生了一次持续时间较长的强 SSW 事件。为了探究其环流特征, 图 1 给出了 2020 年 12 月–2021 年 1 月平流层 10 hPa 极区平均温度场和极夜急流核心纬度带纬向平均纬向风随时间的演变以及 2020 年 12 月 26 日、2021 年 1 月 5 日和 15 日 10 hPa 位势高度及其距平的水平分布。由图 1a 可以看出, 绕极纬向风与极区温度之间呈明显的反相关关系, 相关系数高达-0.814。从 12 月 24 日开始, 10 hPa 极区快速升温, 于次年 1 月 4 日达到峰值, 较 24 日而言, 温度增幅达 50 K。同时, 10 hPa 纬向西风自 12 月 24 日起迅速减弱, 并在 1 月 5 日转为东风, 东风持续到 1 月 20 日。若以 10 hPa 绕极东风自出现到结束作为 SSW 持续阶段(在图 1d 中用紫色阴影标出), 此次 SSW 事件自 1 月 5 日始, 至 1 月 20 日止, 持续 16 天, 相比往年偏长。从位势高度场的变化可知, 前期(12 月 26 日)有高压中心从白令海峡侵入极区, 使得极涡中心向大西洋和欧洲偏移(图 1b), 随着高压中心进一步侵入极区, 1 月 5 日低压中心一分为二(图 1c), 分别位于欧洲和北美上空, 随后主要负位势高度异常中心移至欧亚大陆北部地区上空, 正位势高度异常中心偏向北美(图 1d)。本次 SSW 期间的极涡形态结构表现为“两极”分布的位势高度场, 绕极东风主要位于欧亚一侧, 属于典型的偏心型增温事件(Charlton et al., 2007)。关于本次 SSW 具体特征, 前人工作(Lee, 2021; Lu et al., 2021; Zhang Y. X., et al., 2022)已作详细描述。

图 1 (a) 2020/21 冬季 10 hPa 60°N 纬向平均纬向风(单位: m/s) 和 60°N–90°N 平均温度(单位: K) 时间序列(伴随 SSW 爆发的绕极西风转为东风时段由紫色阴影标出; 二者相关系数标于右上角); (b) 2020 年 12 月 26 日、(c) 2021 年 1 月 5 日、(d) 2021 年 1 月 15 日 10 hPa 位势高度(等值线, 单位: gdm) 及其距平(填色, 单位: gdm)。

Figure 1. (a) Time series of zonal average zonal wind at 60°N (units: m/s) and temperature averaged over 60°N–90°N (units: K) at 10 hPa during 2020/21 winter (the purple shaded box indicates the period when the subpolar westerly became easterly; correlation is shown in the top-right) and geopotential height (contours, units: gdm) and its anomaly (shadings, units: gdm) at 10 hPa on (b) December 26, 2020, (c) January 5, 2021 and (d) January 15, 2021.

绕极纬向风、极区平均高度场及其距平的高度-时间演变特征(图 2a–b)表明, 此次强 SSW 事件前后存在显著的平流层-对流层耦合过程。首先, 高度场与风场在平流层与对流层环流呈现出相似的异常特征。就绕极纬向风而言, 伴随 SSW 事件的绕极东风可下延至 50 hPa, 纬向风负距平从 2020 年 12 月底至 2021 年 2 月中旬一直持续存在于 300 hPa 以上的对流层高层和平流层中, 对流层中低层也由纬向风负距平所主导(除 1 月 10 日、15 日、2 月 5 日附近有弱西风异常之外)。同时, 极区平均的位势高度正距平基本与绕极纬向风负距平相对应, 二者均有显著的向下延伸特征, 地面北极涛动呈负位相(图 6d)。其次, 平流层与对流层环流异常之间存在一定的超前滞后关系, 可能与对流层向上和平流层向下的双向影响过程有关。具体地, 在 SSW 发生前(12 月中下旬), 对流层的纬向风负距平和极区高度正距平略早于 SSW 的爆发时间(即: 1 月 5 日绕极西风转东风), 反映对流层大尺度波动向上传播从而削弱平流层极涡的过程。而次年 1 月起, 平流层纬向风与位势高度距平大值时段则略早于对流层大值时段(即: 1 月中下旬–2 月上旬), 可能对应于平流层弱极涡异常信号的向下影响过程。这种伴随 SSW 的平流层极区环流异常相对于对流层大尺度环流具有 2–3

周的超前性, 验证了陆春晖和丁一汇 (2013) 以及 Baldwin and Dunkerton (1999, 2001) 的结论。但需要注意的是, 相比于平流层, 对流层绕极纬向风负距平与极区位势高度正距平的变化明显偏快, 其中 1 月中下旬-2 月上旬的同号异常信号再次加强, 这有可能受平流层调控, 但不排除对流层自身变率的重要作用。

虽然绕极纬向风与极区平均高度距平场存在看似下传的特征, 但从极区平均的温度和冷暖空气质量距平的演变 (图 2c-d) 来看, 平流层极涡异常信号并非从平流层直接下传到地面。在 SSW 发生的 1 月, 极区积分的各等熵层空气质量距平由上到下表现为正 (平流层, 315K 以上)、负 (对流层中高层, 290-315K)、正 (对流层低层, 270K 以下) 的“三明治”垂直结构。在平流层, 暖空气质量正距平信号存在显著的向下传播特征, 但这种传播到对流层顶即结束。而极区温度取决于相对更暖的空气总质量 (即: 某等熵面以上的空气质量总和, 如图 2d 等值线所示) 或者等熵面上凸/下凹形变 (Cai and Ren, 2007; Yu and Ren, 2019), 因而温度异常信号可从平流层向下到达对流层高层。如图 2c 所示, 高层有温度正距平在 1 月呈现下传特征, 传至对流层高层 (300 hPa), 而以下层次有弱的温度负距平, 呈现“高低层相反”的极区温度距平垂直结构。这种等熵大气质量在垂直方向上的“三明治”结构及其与温度的关系在 SSW 事件前期和后期也有清楚体现, 可归纳为: 平流层暖空气质量的负距平对应于极区平流层温度偏低; 对流层中高层暖空气质量的正距平和低层冷空气质量的负距平, 对应于对流层中低层极区温度偏高。这种极区温度“高低层反相”、大气等熵面质量“三明治”的垂直结构特征在极涡振荡过程中十分常见, 表明平流层异常信号并不直接下传, 而可能是大气经向质量环流向极地暖支和冷支耦合变化的结果 (Cai and Ren, 2007; Yu and Ren, 2019)。

由于本次强 SSW 事件前后包含了平流层与对流层双向影响的复杂过程, 且平流层与对流层环流的阶段特征不同, 需要分别确定关键研究时段。平流层关键阶段可重点关注 SSW 发生时段, 而对流层关键阶段则根据 300hPa 以下层次的极区平均温度和对流层内 (315K 以下) 等熵质量距平的演变特征进行划分 (图 2c, d), 分别为前期 (12 月 21 至 1 月 14 日)、中期 (1 月 15 日至 2 月 9 日)、后期 (2 月 10 至 2 月 28 日)。

图 2 (a) 60°N 纬向平均纬向风 (单位: m/s)、60-90°N 极区平均的 (b) 位势高度 (单位: gpm) 和 (c) 温度 (单位: K) (等值线) 及其距平 (阴影), 以及 (d) 60-90°N 积分的等熵大气质量距平 (填色, 单位: 10^{14} kg) 和各层向上积分的质量距平 (等值线, 单位: 10^{14} kg) 的时间-高度剖面。黑色粗横实线表征最接近于对应纬度冬季气候平均对流层顶气压的等压面 (150hPa) 及等熵面 (315K); (c) 和 (d) 中的演变廓线分别为 300hPa 以下平均的极区温度距平以及 280K 以下冷空气的总质量距平 (紫色阴影同图 1d, 黑色竖虚线为基于对流层温度及空气质量距平的时间分段)

Figure 2. Time-height profiles of total field (contours) and anomaly field (shadings) of (a) 60°N zonal average zonal wind (units: m/s), (b) geopotential height (units: gpm) and (c) temperature (units: K), and (d) isentropic mass anomaly (shadings, units: 10^{14} kg) and accumulated mass anomaly (contours, units: 10^{14} kg) above each isentropic level integrated over 60°N-90°N. The time series of polar mean temperature anomaly averaged over isobaric levels below 300hPa and cold air mass anomaly below 280K are superimposed in (c) - (d)

图 3 2020/21 年 SSW 事件各阶段平均的 20°N-90°N 地面 2m 温度距平 (阴影, 单位: °C, 紫色等值线为 0°C 线) 和低于 280K 的冷空气质量距平 (等值线, 单位: 10^{12} kg, 蓝/红色表示正/负距平) 的水平分布。

(a) 12 月 21 至 1 月 14 日、(b) 1 月 15 至 2 月 9 日、(c) 2 月 10 至 2 月 28 日
Figure 3. Spatial distribution of 2m temperature anomaly (shadings, unit: $^{\circ}\text{C}$, purple isoline is 0°C line) and cold air mass anomaly vertically integrated below 280K (contours, unit: 10^{12}kg , blue/red contours indicate positive/negative values) averaged over each period of SSW event in 2020/21 winter: (a) December 21–January 14, (b) January 15–February 9, and (c) February 10–February 28.

本次 SSW 事件前期和后期的极区低层偏暖与中纬度大范围寒潮低温事件紧密相关。由三个阶段平均的中高纬地面温度距平水平分布 (图 3) 可知, 在前期 (图 3a), 伴随在巴伦支海-喀拉海及其北部极地地区的显著正温度距平, 亚洲大陆和西欧地区基本处于负温度距平的控制之下, 0°C 等温线南至 30°N , 对应于发生在东亚地区 2020 年 12 月 29 日–31 日和 2021 年 1 月 6 日–8 日的 2 次连续“霸王级”寒潮, 均达到极端低温标准 (Dai et al., 2021; Zhang, X. D. et al., 2021)。这一中高纬地面温度的异常分布也被称为“暖北极-冷欧亚”模态 (Zhang, Y. J. et al., 2021)。而此时北美大陆以正温度距平为主, 欧亚地区以负温度距平为主, 即地面温度呈一波型分布。在中期 (图 3b), 欧亚大陆中纬度地区开始回暖, 而次极地 (60°N – 75°N) 温度负距平加大, 北美地区的温度负距平控制了包括阿拉斯加在内的西海岸北部地区。后期 (图 3c), 伴随北冰洋地区显著的温度正距平, 北美大陆的温度负距平沿落基山脉长驱直下, 席卷了除东海岸之外的北美洲大部分地区, 加拿大和美国出现了百年一遇的超级降温和极端低温事件, 与此同时的极区和欧亚中纬度地区则以温度正距平为主, 呈现出“暖北极-冷北美”模态。三个阶段平均的 280K 以下累积冷空气质量距平场 (图 3 等值线) 与地面温度距平场存在显著负相关, 再次验证了冷空气质量增多/减少可直接导致近地温度的降低/升高。

为了更加清楚地呈现大陆尺度低温事件的时间演变特征, 图 4 分别给出了中纬度、高纬度地区大陆所有经度范围、欧洲范围、亚洲范围和北美范围内冷、暖面积指数的时间序列。由图 4a 可知, 在此次 SSW 事件前后, 北半球整个中纬度地区的冷面积指数并无显著高于气候态的时段, 高纬度与中纬度的冷/暖面积指数反相变化特征除前期之外也不明显。这是因为伴随此次 SSW 事件的地面温度距平具有显著的区域性特征: 亚洲中纬度地区的冷面积指数在前期偏高, 从 12 月 23 日开始显著上升, 在 12 月 31 日达到峰值 80%, 从 1 月 7 日开始回落, 与之对应的是同样显著升高的同经度范围内高纬度地区暖面积指数 (图 4c); 北美中纬度冷面积指数则在前期偏低, 中后期显著上升, 在 2 月 16 日达到峰值 60%, 22 日回落至气候态水平, 高纬度地区暖面积指数的变化与之基本一致 (图 4d); 欧洲中纬度地区的冷面积指数分别在 1 月中旬、2 月中旬有短暂高于气候态的情况发生 (图 4b), 但持续时间和极值远小于亚洲和北美地区。

综上, 位于此次 SSW 事件前期和后期的两个极区地面异常偏暖时段, 分别对应着 12 月底–1 月初连续 2 次亚洲寒潮爆发和 2 月中旬北美寒潮爆发。这种地面温度时空演变特征可以说是偏心型 SSW 事件或一波主导的弱极涡事件伴随的经典天气气候特征 (Mitchell et al., 2013; Kidston et al., 2015; Lehtonen and Karpechko, 2016; Yu et al., 2018b, c)。但与往年不同的是, 此次 SSW 过程中, 亚洲寒潮和北美寒潮的爆发时间间隔近 2 个月, 较往年偏心型 SSW 事件对应的寒潮爆发时间间隔偏长。这可能与本次强 SSW 事件持续时间异常偏长有关, 因为若以 SSW 事件的开始日期和结束日期计

算, 则在本次 SSW 事件绕极纬向风转为东风前的 1–2 周发生亚洲寒潮, 在 SSW 事件绕极纬向风恢复为西风后的 2–3 周北美寒潮爆发, 这与往年结果是一致的。

图 4 2020/21 冬季 (a) 北半球大陆地区、(b) 欧洲、(c) 亚洲和 (d) 北美经度范围内的中纬度冷、暖面积指数(CM、WM) 和高纬度冷、暖面积指数 (CH、WH) 的时间序列 (单位: %)。紫色阴影表征伴随 SSW 的东风期间, 指数均做了 5 天滑动平均处理。黑色虚线为各指数的气候平均值。黑色竖虚线同图 2c, 紫色阴影同图 1a。

Figure 4. Time series of 5-day running mean midlatitude cold and warm area index (CM and WM, units: %) and high-latitude cold and warm area index (CH and WH, units: %) within longitude range of (a) northern hemisphere continent, (b) Europe, (c) Asia and (d) North America in 2020/21 winter. Purple box represents the easterly period during SSW event.

4. SSW 爆发前后等熵大气经向质量环流异常变化特征

上述SSW伴随的极区平流层增暖与“暖极地-冷中纬大陆”地面温度异常模态, 均与60°N 等熵大气经向质量环流的异常变化紧密相关。因此, 本节将考查此次SSW事件爆发前后质量环流的绝热经向分量异常变化, 揭示环流的平流层暖支和对流层冷暖支的耦合模态演变, 探究其调控冷暖空气质量、进而影响平流层极涡和中纬度大范围低温的可能机制。

北半球冬季纬圈积分的等熵大气质量经向通量的气候态特征如图 5a 所示, 向极地暖支与向赤道冷支清晰可见。由 SSW 事件前后平流层向极地暖支强度的事件演变图 (图 5b) 可知: 在 SSW 爆发前 2 周, 平流层向极地暖支持续偏强。平流层持续偏强的中纬度暖空气向极地输送, 使得平流层极区暖空气总质量正距平和中纬度暖空气质量负距平在落后约半个月时达到极大值, 导致极区显著增温、气压和温度在中高纬度间呈跷跷板式变化、西风减弱, 最终导致 SSW 爆发。在 SSW 爆发后, 平流层向极地暖支仍维持正距平, 且在 1 月 8 日附近有显著峰值, 对应于其 1~2 天后的 10hPa 纬向平均纬向风场的第二次显著下降 (图 1a)。这次 SSW 爆发后平流层向极地暖支的二次加强可能是因为, 此次 SSW 事件爆发后欧亚地区转为东风的同时北美地区仍长期维持西风, 使得对流层行星波仍有上传窗口, 波动驱动的向极地质量输送加强, 进一步减弱极涡 (Yu et al., 2022), 这可能是导致本次 SSW 持续时间偏长的原因。1 月 15 日, 平流层暖支中的 MF 开始转为以负距平为主, 导致极区暖空气质量的持续减少, 极涡逐渐恢复。因此, 持续偏强的平流层暖支是 SSW 事件爆发的重要动力原因。

对流层中高层的向极暖支与对流层低层的向赤道冷支基本同步变化, 呈现三个阶段的特征, 略微超前但分别对应于地面温度距平的三个阶段, 这说明等熵大气质量环流向赤道冷支加强/减弱是暖极地-冷中纬/冷极地-暖中纬地面温度异常分布型的本质原因 (Yu et al., 2015a, b)。具体地, 12 月下旬–1 月 13 日, 亦即 SSW 事件前期和爆发后 10 天内, 对流层向极地暖支和向赤道冷支持续偏强, 与平流层向极地暖支同位相耦合 (此处的“耦合”表示质量环流各支强度异常的同期配置)。对流层冷暖支极值出现在 12 月 28 日、12 月 31 日, 另一个极值出现在 12 月中旬, 使得中纬度地区冷空气质量正距平逐步上升, 地面温度降低, 对应于发生于东亚的 1 次寒潮和 2 次极端低温事件。

此后较长一段时间内, 对流层冷暖支与平流层向极地暖支呈反位相变化关系: 1月14日–23日, 平流层向极地暖支依然偏强, 但对流层冷暖支异常偏弱; 2月1日–26日, 亦即SSW事件爆发1–2个月, 此时平流层向极地暖支已异常偏弱, 但对流层冷暖支再次偏强, 导致中纬度冷空气质量增多, 对应于在极涡恢复期爆发的北美寒潮低温事件。由于大气经向质量环流异常引起的是大气质量和温度的日倾向变化, 是温度的超前指示因子, 因此基于大气经向质量环流的平流层-对流层支耦合/非耦合配置而划分的三个特征阶段, 在时间上要略超前于基于冷暖空气质量和温度距平划分的三个阶段, 分别为前期(12月21日–1月13日)、中期(1月14日–23日)、后期(2月1日–26日)。

以上分析表明, 此次SSW事件前后, 大气经向质量环流平流层向极地暖支、对流层向极地暖支和向赤道冷支的异常变化可通过调控冷暖空气质量异常变化, 从而成为搭建平流层极涡强度-中纬度寒潮低温有机连接的重要途径。

虽然本节尚未探讨大气经向质量环流三支出现不同耦合配置的动力原因以及平流层在其中所起的作用, 但可以看出平流层向极地暖支对北极涛动具有重要的调控作用。由图6可知, 平流层向极地暖支主导的平流层极区大气质量异常, 与整层气柱大气质量异常变化基本同位相; 而对流层暖支和冷支带来的质量异常变化虽然量级大, 但反号抵消。因此, 持续偏强的平流层暖支通过增加平流层大气质量对1–2月北极涛动负位相的维持和加强起着重要贡献, 为大陆尺度寒潮爆发提供了有利的背景环流条件。

图5 (a) 冬季气候平均各纬度圈积分的经向大气质量通量(MF, 单位: 10^9 kg/s) 以及 2020/21 冬季大气经向质量环流、(b) 平流层向极地暖支(WB_ST, 400K 以上)、(c) 对流层向极地暖支(WB_TR, 280–315K)、(d) 对流层向赤道冷支(CB, 280K 以下) 内的 60°N MF 距平(柱状, 量级: 10^9 kg/s) 和中纬度、高纬度地区等熵大气质量距平(MM 和 HM, 曲线, 量级: 10^{15} kg) 时间序列。图(b)–(d)中的黑色竖虚线同图2c, 紫色阴影同图1a, 指数均做了5天滑动平均处理, 图(b)/(d)中的红/蓝色“+”表示WB_ST/CB异常偏强, “-”表示WB_ST/CB异常偏弱。

Figure 5. (a) Winter (December–February) climatological mean zonally integrated meridional mass flux (MF, units: 10^9 kg/s) at each latitude and isentrope; time series of 5-day running mean 60°N MF anomaly (bars, units: 10^9 kg/s) and isentropic mass anomaly (MM and HM, curves, units: 10^{15} kg) within (b) stratospheric poleward warm air branch (WB_ST) and (c) tropospheric poleward warm air branch WB_TR, (d) tropospheric equatorward cold air branch CB of the isentropic meridional mass circulation in 2020/21 winter. The purple box in panels (b)–(d) represents the easterly period with SSW, and 5-day running mean has been applied to all the indexes. In panels (b) and (d), red/blue “+” indicates that WB_ST/CB is anomalously strong, while “-” indicates that WB_ST/CB is anomalously weak.

图6 2020/21 冬季 (a) 高纬度、(b) 中纬度地区各层质量距平(单位: 10^{16} kg) 以及 (c、d) 整层气柱内的总质量距平(柱状, 单位: 10^{15} kg) 和北极涛动(AO)指数(曲线)的时间序列。指数均做了5天滑动平均处理, 对流层冷支内的质量距平往往与对流层暖支内的质量距平变化相反, 故绘制的是反号后的量值。

Figure 6. Time series of 5-day running mean mass anomaly in (a) high latitudes (b) midlatitudes, integrated within three branches of atmospheric meridional mass circulation (units: 10^{16} kg), and the total column mass anomaly in (c) high latitudes and (d) midlatitudes (bars, unit: 10^{15} kg) in 2020/21 winter. Arctic Oscillation (AO) index is overlaid in panels (c)–(d). The mass anomaly in CB is often opposite to that in WB_TR, so the sign of the former one has been reversed.

5. SSW 爆发前后的行星波活动异常及其与等熵大气经向质量环流异常的关系

本节将进一步探究为何本次强 SSW 事件中，等熵大气经向质量环流的三支会呈现如上所述的耦合演变模态。根据大气经向质量环流理论 (Johnson, 1989)，中纬度地区斜压不稳定波的罗斯贝波活动是热带外经向质量环流形成和维持的主要原因。如图 7 所示，斜压不稳定波动往往伴随温度场落后于高度场的温压配置 (图 7a)。在高度槽的后部，温度槽 (冷) 使等熵面上凸，更多/少空气质量位于低/高层；而在高度槽的前部，温度脊 (暖) 使得等熵面下凹，使更多/少的空气质量位于高/低层。在高层，槽前南风引起的向极质量输送大于槽后北风引起的向赤道质量输送，从而形成净的向极地质量输送 (向极地暖支)；而在低层，槽前南向极地的质量输送则小于槽后北风引起的向赤道质量输送，从而形成净的向赤道质量输送 (向赤道冷支)。因此，某等熵面上的波动振幅越大、西倾越明显，该等熵面以上的层次将有更多的向极地输送的大气质量，同时该等熵面以下将有更多的向赤道输送的大气质量。以下将考查本次 SSW 事件前后平流层与对流层波动振幅和西倾角的异常变化，探究其对等熵大气经向质量环流三支耦合变化的作用，从而理解 SSW 事件与寒潮低温的内在联系。

图 7 斜压不稳定波动对应的位势高度、位势温度以及经向风场及其引起大气经向质量输送机制。

此处为由低层等熵面 θ_e 、中层等熵面 θ_m 以及高层等熵面 θ_u 组成的两层模型。其中 (a) 为经度-纬度剖面，(b) 为与其对应的经度-垂直剖面，经向准地转风 V_g 符号在图中标出，斜直虚线分隔槽与脊。

Figure 7. Schematic diagram of geopotential height, potential temperature and meridional wind field corresponding to baroclinically amplifying waves, which drives an isentropic meridional mass transport. This is a two-layer model composed of low-level isentropic surface, middle-level isentropic surface and high-level isentropic surface. Panel (a) shows the longitude-latitude cross section, and (b) shows the corresponding longitude-vertical cross section. The quasi-geostrophic meridional wind is marked, and the oblique straight dotted line separates the trough and ridge.

图 8 60°N 波动西倾角距平 (单位: °) 和波动振幅距平 (单位: km) 的气压-时间剖面 (a、b) 及其关键层的时间序列 (c、d)。图 (a、b) 中等值线为 5 天滑动平均场，填色为 31 天滑动平均；图 (c) 中红色/蓝色“+”表示与平流层暖支/对流层冷支相关的 150hPa/700hPa 波动西倾角异常偏大，“-”表示波动西倾角异常偏小。

Figure 8. (a, b) Pressure-time diagram of 5-day running mean 60 °N wave westward tilt angle anomaly (contours, units: °), wave amplitude anomaly (contours, units: km) and their 31-day running means (shadings), and (c, d) the time series of their daily values at key isobaric levels.

Red/blue "+" in panel (c) indicates that the wave westward tilt at 150hPa /700hPa that related to WB_ST/CB is anomalously large, while "-" indicates that the westward tilt is anomalously small.

图 9 60°N 准地转纬向平均位涡梯度距平(单位: 10^3 s^{-1}) 的气压-时间剖面。等值线为 5 天滑动平均场, 填色为 31 天滑动平均场; 正值/负值表示该层环流条件有/不利于波动的上传。

Figure 9. Pressure-time diagram of 5-day running mean fields of 60°N quasi-geostrophic zonal mean potential vorticity (PV) gradient anomaly (contours, units: 10^3 s^{-1}), and its 31-day running means (shadings). The positive values correspond to the circulation condition easier for waves to propagate upward, while the negative values tend to be favorable to wave reflection and/or absorption.

60°N 波动振幅的时间演变 (图 8b, d) 显示, 波动振幅距平的变化尺度相对较慢, 与大气经向质量环流平流层暖支变化基本一致, 但与对流层冷暖支的变化并不十分一致 (图 5b-d)。在 50 hPa 以上, 波动振幅在强 SSW 事件发生前偏大, 在其发生后偏小, 从 1 月初开始也展现出逐渐向下传播的特征, 但传到对流层顶附近 (150–200 hPa) 时传播停止。对流层内, 12 月下旬到 1 月上旬, 对流层中低层有波动振幅正距平, 有利于向赤道冷支的加强。但 1 月 8 日之后, 波动振幅持续偏小, 说明波动振幅在 2 月份向赤道冷支的加强中并不起主导作用。

反映波动斜压性的 60°N 波动西倾角距平 (图 8a, c) 则呈现出清晰的三阶段特征, 其三个阶段的时间与基于等熵大气经向质量环流平流层-对流层支异常变化划分的三个特征阶段基本一致, 略微超前几天。结果表明, 波动西倾角距平是上述等熵大气经向质量环流在本次 SSW 事件前后三种耦合模态的主要驱动因子。以下将结合表征波动上传环流条件的准地转纬向平均位涡梯度 (图 9), 具体考查每个阶段关键层上表征波动斜压性的波动西倾角距平与等熵大气经向质量环流三支耦合演变模态的联系:

12 月 24 日到 1 月 9 日期间, 对流层顶 (150 hPa 附近) 和对流层中低层 (700 hPa 附近) 均被波动西倾角的正距平所占据, 对流层低层西倾角峰值在 12 月下旬, 略微超前于对流层顶峰值出现的时间 (1 月 5 日–6 日), 说明波动斜压性首先在对流层低层发展, 由于当时有利的波动上传条件即从对流层到平流层基本一致的准地转纬向平均位涡梯度正距平 (图 9), 波动斜压性也逐渐在平流层低层发展 (图 8a, c)。此种西倾角异常配置对大气经向质量环流三支的影响如图 10a 所示。在对流层顶附近的波动异常西倾可以加强其上层次 (即平流层) 内向极地的暖空气输送, 从而加强平流层向极暖支; 同时可以加强其下层次 (即: 对流层高层) 内向赤道的空气输送, 从而对对流层向极暖支具有一定的减弱作用。而对流层中低层波动的异常西倾, 则有利于加强其上层次 (即对流层中高层) 内向极地的暖空气输送以及其下层次 (即: 对流层低层) 内向赤道的冷空气输送, 对对流层暖支和冷支具有加强作用。值得注意的是, 虽然对流层顶和对流层中低层的波动西倾正异常对对流层向极暖支的作用是相反的, 但因为空气质量集中在低层, 所以对流层中低层波动西倾角的加强作用占主导。综上, 在这一阶段, 对流层顶和对流层中低层一致的西倾角正距平本质上是平流层斜压波的发展和上传, 驱动了平流层暖支和对流层冷暖支的同位相加强 (图 9b), 进而使得低层寒潮频发的同时平流层极涡持续削弱。

1 月 10 日–22 日期间, 对流层中低层 (700 hPa 附近) 的西倾角距平转为负值 (图 8a, c), 说明此时对流层中低层的波动斜压性已偏弱, 不利于对流层冷、暖支的加强, 而同期对流层顶附近仍被

上传的斜压发展波动（西倾角正距平）所占据，加强平流层暖支的同时减弱对流层暖支。该阶段的西倾角配置 (图 9f) 较好解释了平流层暖支偏强和对流层冷、暖支偏弱的反位相变化 (图 9g)。

在 SSW 后期 (2 月)，对流层中低层又有波动西倾角正距平出现，量值与前期相当，但此时受平流层极涡影响的准地转纬向平均位涡梯度在平流层呈负距平 (图 9)，说明在平流层极涡逐渐恢复过程中波动较难上传，因而对流层顶以波动西倾角负距平为主 (图 8a, c)，即为图 10k 的西倾角配置。此时对流层顶的波动西倾角负距平，可以使得其上层次 (即平流层) 内向极地的暖空气输送和其下层次 (即：对流层高层) 内向赤道的空气输送均减弱，从而在减弱平流层暖支的同时加强对流层暖支。对流层暖支的加强，可引起更多暖空气在极区堆积，由于质量连续性，即刻加强低层向赤道冷支。此时若配合取决于对流层自身变率的对流层中低层西倾角正距平，则会出现平流层暖支偏弱、对流层冷支和暖支显著偏强的平-对流层反相耦合模态 (图 10l)。虽然另一个影响大气质量环流强度的波动振幅在该阶段的对流层内异常偏小 (图 8b, d)，但对流层冷支强度却与 12 月底-1 月初相当 (图 5d)。这说明了伴随平流层极涡恢复，对流层顶波动西倾角负距平或偏弱斜压性对对流层冷暖支的加强起了不可忽视的正贡献，有利于寒潮低温事件在此阶段的发生。这也解释了极端低温为何容易出现在 SSW 爆发后的 1-2 个月内 (e.g., Thompson and Wallace, 1998, 2001)。

图 10 2020/21 冬季 SSW 事件前后三个阶段内波动西倾角以及大气经向质量环流三支强度异常、极区等熵大气质量与温度异常垂直结构的概念图。

(WT、 MF' 、 $(dM/dt)'$ 、 M' 、 T' 分别表示 60°N 波动西倾角、60°N 经向质量通量距平、极区等熵质量距平的日倾向变化、极区等熵质量距平、极区温度距平；第一列组图中实线表示本次事件时段西倾角度，虚线表示冬季气候态西倾角，“ $\otimes$ ”/“ $\odot$ ”符号表示西倾角驱动的向极地/赤道质量输送距平；第二列组图中向右箭头表示异常向极地质量输送，向左箭头表示异常向赤道质量输送；第三-五列组图中“+”/“-”表示正/负距平；针对极区等熵质量与温度的三个阶段（右侧）相比于针对 60°N 大气经向质量环流与波动特征的三个阶段（左侧）存在一定的滞后，这是因为大气经向质量环流异常即刻引起的是质量与温度的日倾向变化，超前于质量与温度本身)

Figure 10. Conceptual diagram of the variations of westward tilt angle of waves, the anomalies of the intensity of three branches of atmospheric meridional mass circulation, and the vertical structure of polar isentropic atmospheric mass and temperature anomalies at three stages around the SSW event occurred in 2020/21 winter

(WT, MF' , $(DM/DT)'$, M' and T' respectively represent the wave westward tilt angle at 60 °N, meridional mass flux anomaly at 60 °N, daily tendency of polar isentropic mass anomaly, polar isentropic mass anomaly and polar temperature anomaly; in the first columns, the solid line represents the westward tilt angle during each period, while the dotted line represents the climatological winter mean westward tilt angle, and symbol " $\otimes$ " / " $\odot$ " indicates the poleward/equatorward mass transport anomaly driven by the anomalous westward tilt angle; the right/left arrow in the second columns indicates the stronger poleward/equatorward mass transport; "+" / "-" in the third-fifth columns indicates the positive/negative

anomaly values; note that the timing of the three stages (right side) of isentropic mass and temperature anomalies in the polar region lag behind the timing of the three stages (left side) of meridional mass circulation and wave properties at 60 °N, because the anomalous meridional mass circulation immediately causes the daily tendency of mass and temperature anomalies, which is ahead of the mass and temperature anomalies themselves)

6. 结论与讨论

6.1 结论

本文从有机连接平流层和对流层、定量解释冷空气和暖空气变化的等熵大气经向质量环流角度, 采用 1979–2021 年 ERA5 再分析数据集, 对 2020/21 冬季“偏心型”强 SSW 事件前后中高纬度地区地面温度异常 (尤其是中纬度大范围异常低温) 演变特征进行了分析, 同时深入探究了对平流层-对流层耦合动力过程在其中的作用, 尤其是平流层极涡的向下影响。主要结论如下:

- (1) 此次强 SSW 事件前后, 连续、多次出现大陆尺度寒潮低温事件: 寒潮低温事件以“冷中纬-暖极地”的近地温度异常分布型为主要特征; 12 月下旬–1 月初亚洲出现 2 次寒潮低温事件, 2 月份北美出现 1 次寒潮低温事件, 其中亚洲寒潮低温事件出现在绕极纬向风反转为东风前 2 周内, 北美寒潮低温事件则出现在绕极纬向风恢复成西风后 2–3 周。
- (2) 平流层极区温度异常以及对流层中纬度近地温度异常, 主要归因于 60°N 附近大气经向质量环流异常带来的经向冷暖空气质量异常交换: 在平流层, 当大气经向质量环流平流层向极地暖支异常偏强时, 向极地平流层持续输送暖空气增多, 使得平流层极区暖空气累积、温度升高; 在对流层, 当大气经向质量环流对流层向极地暖支和向赤道冷支同时偏强时, 极地冷空气向南输送和中纬度暖空气向极地输送均加强, 导致以“冷中纬-暖极地”近地温度异常分布为主要特征的寒潮低温事件发生。
- (3) 60°N 大气经向质量环流平流层向极地暖支与对流层冷、暖支的耦合演变模态是理解伴随 SSW 事件的地面温度异常变化的关键: 伴随 SSW 事件前后的平流层极涡异常演变, 大气经向质量环流三支呈现出“三阶段”的耦合演变特征, 这与波动在对流层顶以及对流层中低层的西倾角或斜压性密切相关。SSW 事件前期, 对流层中低层斜压波的发展及其上传, 使得质量环流三支均加强, 使得对流层向赤道冷支异常偏强, 亚洲寒潮低温爆发; 平流层向极暖支异常持续偏强, 极涡快速减弱。SSW 事件中期, 平流层分支仍偏强, 但对流层暖支和冷支转为偏弱。SSW 事件后期, 对流层斜压波无法上传, 平流层暖支异常偏弱, 极涡逐渐恢复, 但对流层冷、暖支此时异常偏强, 使得北美地区发生寒潮低温。

需要强调的是, 虽然对流层本身的波动斜压性在 SSW 事件期间是对流层质量环流冷、暖支的重要驱动因子, 但不可否认平流层环流异常对对流层的重要作用。首先, 由大气经向质量环流平流层暖支强度主导的平流层质量异常, 可以决定地面北极涛动的位相, 从而调控环流的经向性和大尺度极区冷空气的向南爆发。其次, 当 SSW 后期有对流层斜压波发展时, 极涡恢复阶段的平流

层基流不利于波动上传，对流层顶和平流层低层的波动西倾角异常偏小，使得其下方（对流层高层）向赤道质量输送比 SSW 发生前期弱得多，从而为对流层暖支的增强提供有利条件，而质量连续性又进一步导致对流层冷支同时加强，有利于极地冷空气的向南爆发 (Yu et al., 2015a, b, c)。因此，本文从大气经向质量环流角度揭示了平流层 SSW 事件或 NAM 负事件后 1–2 个月内容易发生大范围低温事件的可能原因，即平流层的向下影响。

6.2 讨论

本文所提出的 2020/21 冬季大范围低温寒潮过程中的平流层-对流层耦合演变模态是否具有典型性，其对寒潮事件预报有没有一定的理论和应用价值，值得深入探讨。Yu and Ren (2019) 统计归纳了北半球环状模 (NAM) 正负事件中最为常见的大气经向质量环流平流层-对流层分支耦合演变型。经对比不难发现，本次 SSW 事件过程前后，中高纬度地区的温度、大气经向质量环流三支耦合演变特征及其主要驱动因子——波动西倾角上下配置，与 Yu and Ren (2019) 提出的 NAM 负位相事件中极区平流层温度下传滞后的平流层-对流层耦合类型（即：ST_EOF1+&WBCB_EOFn-, n=1~4）十分相似，此类事件信息如表 1 所示。这些以极区平流层温度下传滞后为主要特征的弱极涡事件具有重要的预报意义，因为平流层质量环流信号往往可以超前于极区的异常增暖和寒潮低温事件。

那么，此类弱极涡事件有无显著的前兆信号（如：阻塞高压、波动来源和波动尺度）？这是需要进一步探究的重要工作。本文针对波动尺度，做了初步研究。从本次 SSW 事件前后一波和二波波动驱动的大气经向质量环流分量的演变特征（图 10a, b）来看，在 SSW 前期和中期平流层向极地暖支偏强主要由一波分量贡献。一波上传引起大气经向质量环流平流层暖支、对流层冷暖支共同加强的主导尺度波动。一波的加强往往伴随向极暖空气从东亚进入极区平流层、冷空气从极地向东亚爆发 (Yu et al., 2022; Liberato et al., 2007; Martius et al., 2009; Castanheira and Barriopedro, 2010; Kuttippurath and Nikulin, 2012)，有利于偏心型 SSW 事件和东亚寒潮低温的爆发。这种经向质量通量一波分量的加强与秋季海冰的异常偏少以及中纬度东北太平洋的异常偏暖紧密相关 (Zhang et al., 2021; Yu et al., 2022)。后期，对流层向赤道冷支的加强则主要由二波分量贡献（图 10b）。但与此同时，平流层暖支的二波分量偏弱，表明尺度稍小的对流层二波此时似乎无法上传，无法同时起到加强平流层暖支、减弱对流层暖支的作用。也就是说，平流层作用类似于一个盖子，主要将二波波动限制在对流层，使其波动能量集中用于驱动对流层低层的冷暖空气交换和寒潮爆发。进一步考查以极区平流层温度下传滞后为主要特征的 NAM 负事件超前滞后合成分析结果可知，这类 NAM 负事件在主导驱动大气经向质量环流变化的波动尺度方面与本次 SSW 事件具有一定的共性（图 11c, d vs. 图 11a, b）。将弱极涡峰值日（图 11c, d 中的 0 天）和本次 SSW 事件东风峰值日 2021 年 1 月 15 日对齐比较可知，在弱极涡峰值日之前，均有一波分量的异常偏强，二波分量有阶段性偏强，但其驱动平流层暖支和冷支内的质量通量二波分量远小于一波分量；在弱极涡峰值日后 15–30 天，对流层二波波动加强且不能上传到平流层，使得冷支内的质量通量二波分量主导冷支的加强。综上，前期一波加强、后期二波加强的弱极涡事件，往往更易出现如本次 SSW 事件前后的寒潮低温特征。其它前兆信号将在未来工作中做针对性研究。

表 1 极区平流层温度下传滞后的平流层-对流层耦合类型 (ST_EOF1+&WBCB_EOFn-, n=1~4) 的 NAM 负位相事件

序号	峰值日	类型 ST_EOF1+&()
1	1979/11/21	WBCB_EOF 2-
2	1980/03/15	WBCB_EOF 4-
3	1981/02/19	WBCB_EOF 3-, WBCB_EOF 4-
8	1984/03/09	WBCB_EOF 2-
10	1985/04/01	WBCB_EOF 3-
12	1987/02/03	WBCB_EOF 2-, WBCB_EOF 4-
13	1987/11/14	WBCB_EOF 2-
14	1988/03/25	WBCB_EOF 1-, WBCB_EOF 2-
15	1989/03/06	WBCB_EOF 4-
16	1991/02/05	WBCB_EOF 3-
18	1992/04/04	WBCB_EOF 1-, WBCB_EOF 4-
23	1996/12/04	WBCB_EOF 1-
29	2001/02/17	WBCB_EOF 1-, WBCB_EOF 4-
30	2002/01/07	WBCB_EOF 1-, WBCB_EOF 2-
33	2004/01/06	WBCB_EOF 1-, WBCB_EOF 3-, WBCB_EOF 4-
35	2006/01/24	WBCB_EOF 4-
37	2009/02/06	WBCB_EOF 1-
38	2009/11/22	WBCB_EOF 3-, WBCB_EOF 4-
39	2010/02/10	WBCB_EOF 2-

图 11 2020/21 冬季 (a) 平流层向极地暖支、(b) 对流层向赤道冷支内 60°N 的经向质量通量距平(柱状)及其 1 波分量 (实线)、2 波分量 (虚线) 的时间序列 (单位: 10^9kg/s)。 (c) – (d) 同 (a) – (b), 但为 1979–2011 历年冬季极区平流层温度下传滞后的平-对流层耦合类型的 NAM 负位相个例合成。指数均做了 5 天滑动平均处理。

Figure 11. Time series of 5-day running mean 60°N MF anomaly (bars, units: 10^9kg/s) and its wavenumber-1 component (solid line) and wavenumber-2 component (dashed line) within (a) WB_ ST, and (b) CB in 2020/21 winter. Panels (c) – (d) are the same as (a) – (b), but it is composite mean MF anomaly in the period from 40 days before to 40 days after the peak time of negative Northern Annular Mode (NAM) events of the stratosphere-troposphere coupling type with a clear lag of downward propagation of polar stratospheric temperature anomaly to the lower troposphere in 1979–2011 winters.

参考文献:

- 陈文, 魏科. 2009. 大气准定常行星波异常传播及其在平流层影响东亚冬季气候中的作用. 地球科学进展, **24**, 272–285.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用. 大气科学, **30(005)**, 863–870.
- 陈文, 魏科, 王林, 等. 2013. 东亚冬季风气候变异和机理以及平流层过程的影响. 大气科学, **37(002)**, 425–438.
- 邓淑梅, 陈月娟. 2006. 平流层爆发性增温的时空分布特征. 中国科学技术大学学报, **36(4)**, 445–452.
- 顾雷, 魏科, 黄荣辉. 2008. 2008 年 1 月我国严重低温雨雪冰冻灾害与东亚季风系统异常的关系. 气候与环境研究, **13**, 405–418.
- 黄荣辉, 陈文, 魏科, 王林, 皇甫静亮. 2018. 平流层大气动力学及其与对流层大气相互作用的研究: 进展与问题. **42**, 463–487.
- 胡永云. 2006. 关于平流层异常影响对流层天气系统的研究进展. 地球科学进展, **21**, 713–720.
- 李琳, 李崇银, 谭言科, 陈超辉. 2010. 平流层爆发性增温对中国天气气候的影响及其在 ENSO 影响中的作用. 地球物理学报, **53**, 1529–1542.
- 陆春晖, 丁一汇. 2013. 平流层爆发性增温对阻塞高压的响应及其对对流层反馈的观测. 科学通报, **58**, 653–663.
- 杨光, 李崇银, 李琳. 2012. 平流层爆发性增温及其影响研究进展. 气象科学, **32**, 694–708.
- 向纯怡, 何金海, 任荣彩. 2009. 2007/2008 年冬季平流层环流异常及平流层-对流层耦合特征. 地球科学进展, **24**, 338–348.
- Ambaum, M. H. P. and B. J. Hoskins, 2002: The NAO troposphere-stratosphere connection. *J. Climate*, **15**, 1969–1978.
- Baldwin, M. P., T. J. Dunkerton, 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J. Geophys. Res.*, **104**, 30937–30946.
- Baldwin, M. P., T. J. Dunkerton, 2001: Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, **294**, 581–584.
- Balling Jr, R. C. and M. P. Lawson, 1982: Twentieth century changes in winter climatic regions. *Climatic Change*, **4**, 57–69.
- Black, R. X., 2002: Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic Oscillation. *J. Climate*, **15**, 268–277.
- Cai, M., 2003: Potential vorticity intrusion index and climate variability of surface temperature. *Geophys. Res. Lett.*, **30**, 1119.
- Cai, M., R.-C. Ren, 2007: Meridional and downward propagation of atmospheric circulation anomalies. Part I: Northern Hemisphere cold season variability. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 1880–1901.
- Cai, M., Y.-Y. Yu, Y. Deng, Huug M. van den Dool, R.-C. Ren, S. Saha, X.-R. Wu, J. Huang, 2016: Feeling the Pulse of the Stratosphere: An Emerging Opportunity for Predicting Continental-scale Cold Air Outbreaks One Month in Advance, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **97**, 1475–1489.
- Cai, M., R.-C. Ren, 2006: 40–70 day meridional propagation of global circulation anomalies. *Geophys. Res. Lett.*, **33**, L06818.
- Cai, M. and C.-S. Shin, 2014: A total flow perspective of atmospheric mass and angular momentum circulations: Boreal winter mean state. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2244–2263.
- Castanheira, J. M., and D. Barriopedro, 2010: Dynamical connection between tropospheric blockings and stratospheric polar vortex. *Geophys. Res. Lett.*, **37**, L13809, doi:10.1029/2010GL043819.

- Charney, J. G. and P. G. Drazin, 1961: Propagation of planetary-scale disturbances from the lower into the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, **66**, 83–109.
- Charlton, A. J., and L. M. Polvani, 2007: A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: climatology and modeling benchmarks. *J. Clim.*, **20**, 449–469.
- Chen, Q.-L., L. Xu, H. Cai, 2015: Impact of Stratospheric Sudden Warming on East Asian Winter Monsoons. *Adv. in Meteorol.*, **640912**.
- Dai, G. K., C. X. Li, Z. Han, D. H. Luo, and Y. Yao, 2021: The nature and predictability of the east asian extreme cold events of 2020/21. *Adv. Atmos. Sci.*, <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1057-3>.
- Frederick G F, Sidney T., 1964: The mid-winter 1963 stratospheric warming and circulation change. *J. Appl. Meteor.*, **3**(1), 1–15. doi:10.1175/1520-0450(1964)003<0001:TMWSWA>2.0.CO;2
- Hartmann, 2000: The key role of lower-level meridional shear in baroclinic wave life cycles. *J. Atmos. Sci.*, **57**, 389–401.
- Hartley, D. E., J. T. Villarín, R. X. Black, et al., 1998: A new perspective on the dynamical link between the stratosphere and troposphere. *Nature*, **391**, 471–474.
- Haynes, P., 2005: Stratospheric Dynamics. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, **37**, 263–293.
- Huang, J., and W. Tian, L. J. Gray, J. Zhang, Y. Li, J. Luo, and H. Tian, 2018: Preconditioning of Arctic stratospheric polar vortex shift events. *J. Climate*, **31**, 5417–5436, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0695.1>.
- Iwasaki, T. and Y. Mochizuki, 2012: Mass-weighted isentropic zonal mean equatorward flow in the northern hemispheric winter. *SOLA*, **8**, 115–118.
- Iwasaki, T., and T. Shoji, Y. Kanno, et al., 2014: Isentropic analysis of polar cold air mass streams in the northern hemispheric winter. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 2230–2243.
- Johnson, D. R., 1989: The forcing and maintenance of global monsoonal circulations: An isentropic analysis. *Adv. in Geophys.*, **31**, 43–316.
- Kidston, J., A. A. Scaife, S. C. Hardiman, D. M. Mitchell, N. Butchart, M. P. Baldwin, L. J. Gray, 2015: Stratospheric influence on tropospheric jet streams, storm tracks and surface weather. *Nature Geoscience*, **8**, 433–440.
- Kolstad, E. W., T. Breiteig, and A. A. Scaife, 2010: The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, **136**, 886–893.
- Kuroda, Y., K. Kodera, 1999: Role of Planetary Waves in the Stratosphere-troposphere Coupled Variability in the Northern Hemisphere Winter. *J. Geophys Res.*, **26**, 2375–2378.
- Kuttippurath, J., and G. Nikulin, 2012: A comparative study of the major sudden stratospheric warmings in the Arctic winters 2003/2004–2009/2010. *Atmos. Chem. Phys.*, **12**, 8115–8129, doi:10.5194/acp-12-8115-2012.
- Lee, S. H., 2021: The January 2021 sudden stratospheric warming. *Weather*, **76**, 135–136. doi: 10.1002/wea.3966.
- Lehtonen, I., and A. Y. Karpechko, 2016: Observed and modeled tropospheric cold anomalies associated with sudden stratospheric warmings. *J. Geophys. Res.*, **121**, 1591–1610.
- Liberato, M. L. R., J. M. Castanheira, L. de la Torre, et al., 2007: Wave energy associated with the variability of the stratospheric polar vortex. *J. Atmos. Sci.*, **64**, 2683–2694.
- Limpasuvan, V., and D. L. Hartmann, 2000: Wave-maintained Annular Modes of climate variability. *J. Climate*, **13**, 4414–4429.
- Limpasuvan, V., D. W. J. Thompson and D. L. Hartmann, 2004: The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings. *J. Climate*, **17**, 2584–2596.
- Limpasuvan, V., D. L. Hartmann and D. W. Thompson, 2005: Stratosphere-troposphere evolution during polar vortex intensification. *J. Geophys. Res.*, **110**, D24101.
- Liu, Q., G.-X. Chen, 2021: Zonal shift in the cold air mass stream of the East Asian winter monsoon. *Environ. Res. Lett.*, **16**, 124028, doi: 10.1088/1748-9326/ac36f5.

- Liu, Q., G.-X. Chen, L. Wang, Y. Kanno, and T. Iwasaki, 2021: Southward Cold Airmass Flux Associated with the East Asian Winter Monsoon: Diversity and Impacts, *J. Climate*, **34**(8), 3239–3254.
- Lu, Y., W. Tian, Zhang, J. Huang, R. Zhang, T. Wang, M. Xu, 2021: The Impact of the Stratospheric Polar Vortex Shift on the Arctic Oscillation. *J. Climate*, **34**, 4129–4143.
- Matsuno, T., 1970: Vertical propagation of stationary planetary waves in the winter Northern Hemisphere. *J. Atmos. Sci.*, **27**, 871–883.
- Martius, O., L. M. Polvani, and H. C. Davies, 2009: Blocking precursors to stratospheric sudden warming events. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L14806, doi:10.1029/2009GL038776.
- Mitchell, D. M., L. J. Gray, J. Anstey, et al., 2013: The influence of stratospheric vortex displacements and splits on surface climate. *J. Climate*, **26**, 2668–2682.
- Moritz, R. E., C. M. Bitz and E. J. Steig, 2002: Dynamics of recent climate change in the Arctic. *Science*, **297**, 1497–1502.
- Pauluis, O., A. Czaja and R. Korty, 2008: The global atmospheric circulation on moist isentropes. *Science*, **321**, 1075–1078.
- Pauluis, O., A. Czaja and R. Korty, 2010: The global atmospheric circulation in moist isentropic coordinates. *J. Climate*, **23**, 3077–3093.
- Pauluis O., T. Shaw and F. Lalibert  , 2011: A Statistical Generalization of the Transformed Eulerian-Mean Circulation for an Arbitrary Vertical Coordinate System. *J. Atmos. Sci.*, **68**, 1766–1783.
- Perlwitz, J. and N. Harnik, 2003: Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection, *J. Climate*, **16**, 3011–3026.
- Polvani, L. M., and D. W. Waugh, 2004: Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. *J. Climate*, **17**, 3548–3554.
- Ren, R.-C., M. Cai, 2007: Meridional and vertical out-of-phase relationships of temperature anomalies associated with the Northern Annular Mode variability. *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L07704.
- Ren, R.-C., M. Cai, 2008: Meridional and downward propagation of atmospheric circulation anomalies. Part II: Southern Hemisphere cold season variability. *J. Atmos. Sci.*, **65**, 2343–2359.
- Ren, R.-C. and M. Cai, 2006: Polar Vortex Oscillation Viewed in an Isentropic Potential Vorticity Coordinate. *Adv. Atmos. Sci.*, **23**, 884–890.
- Richard A C, Hering W S., 1959: The stratospheric warming of January-February 1957. *J. Meteor.*, **16**, 91–108. DOI:10.1175/1520-0469(1959)016<0091:TSWOJF>2.0.CO;2
- Shindell, D. T., R. L. Miller, G. A. Schmidt, et al., 1999: Simulation of recent northern winter climate trends by greenhouse-gas forcing. *Nature*, **399**, 452–455.
- Thompson, D. W. J., M. P. Baldwin, J. M. Wallace, 2002: Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: Implications for prediction. *J. Clim.*, **15**, 1421–1428.
- Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 1998: The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys. Res. Lett.*, **25**, 1297–1300.
- Thompson, D. W. J. and J. M. Wallace, 2001: Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode. *Science*, **293**, 85–89.
- Yu, Y.-Y., R.-C. Ren, J.-G. Hu, G.-X. Wu, 2014: A mass budget analysis on the interannual variability of the polar surface pressure in the winter season. *J. Atmos. Sci.*, **71**, 3539–3553.
- Yu, Y.-Y., M. Cai, R.-C. Ren, H. M. van den Dool, 2015a: Relationship between warm air mass transport into upper polar atmosphere and cold air outbreaks in winter. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 349–368.
- Yu, Y.-Y., R.-C. Ren, M. Cai, 2015b: Dynamical linkage between cold air outbreaks and intensity variations of the meridional mass circulation. *J. Atmos. Sci.*, **72**, 3214–3232.
- Yu, Y.-Y., R.-C. Ren, M. Cai, 2015c: Comparison of the mass circulation and AO indices as indicators of cold air outbreaks in northern winter. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 2442–2448.
- Yu, Y.-Y., M. Cai, R.-C. Ren, 2018a: A stochastic model with a low-frequency amplification feedback for the stratospheric north- ern annular mode. *Clim. Dyn.*, **50**, 3757–3773.

- 733 Yu, Y.-Y., M. Cai, R.-C. Ren, J. Rao 2018b: A closer look at the relationships between meridional mass
734 circulation pulses in the stratosphere and cold air outbreak patterns in Northern Hemispheric winter. *Clim.*
735 *Dyn.*, **51**, 3125–3143.
- 736 Yu, Y.-Y., M. Cai, C.-H. Shi, R.-C. Ren, 2018c: On the linkage among strong stratospheric mass circulation,
737 stratospheric sudden warming, and cold weather events. *Mon. Wea. Rev.*, **146**, 2717–2739.
- 738 Yu, Y.-Y., R.-C. Ren, 2019: Understanding the variation of stratosphere–troposphere coupling during
739 stratospheric northern annular mode events from a mass circulation perspective. *Clim. Dyn.*, **53**, 5141–
740 5164.
- 741 Yu, Y.-Y., Y.-F. Li, R.-C. Ren, M. Cai, Z.-Y. Guan, and W. Huang, 2022: An isentropic mass circulation
742 view on the extreme cold events in 2020/21 Winter. *Adv. Atmos. Sci.*, 39(4), 643–657,
743 <https://doi.org/10.1007/s00376-021-1289-2>
- 744 Zhang, Q., C.-S. Shin, H. van den Dool, M. Cai, 2013: CFSv2 prediction skill of stratospheric temperature
745 anomalies. *Clim. Dynam.*, **41**, 2231–2249.
- 746 Zhang, X.-D., Y.-F. Fu, J. E. Overland, A. Rinke, T. Han, T. Vihma, and M.Y. Wang, 2021: Extreme Cold
747 Events from East Asia to North America in Winter 2020/21: Comparisons, Causes, and Future
748 Implications. *Adv. Atmos. Sci.*, doi:10.1007/s00376-021-1229-1.
- 749 Zhang, Y.-J., Z.-C. Yin, H. J. Wang, S. P. He, 2021: 2020/21 Record-breaking Cold Waves in East of China
750 Enhanced by the 'Warm Arctic-Cold Siberia' Pattern, *Environ. Res. Lett.*, **16**, 094040. doi: 10.1088/1748-
751 9326/ac1f46
- 752 Zhang, Y. -X., D. Si, Y.-H. Ding, D.-B. Jiang, Q.-Q. Li, and G.-F. Wang, 2022: Influence of major
753 stratospheric sudden warming on the unprecedented cold wave in East Asia in January 2021. *Adv. Atmos.*
754 *Sci.*, **39(4)**, 576–590, <https://doi.org/10.1007/s00376-022-1318-9>
- 755 Zhou, X., Q.-L. Chen, Z. Wang, M. Xu, S. Zhao, Z. Cheng, F. Feng, 2020: Longer duration of the weak
756 stratospheric vortex during extreme El Niño events linked to spring Eurasian coldness. *J. Geophys. Res.*,
757 **125**, e2019JD032331.

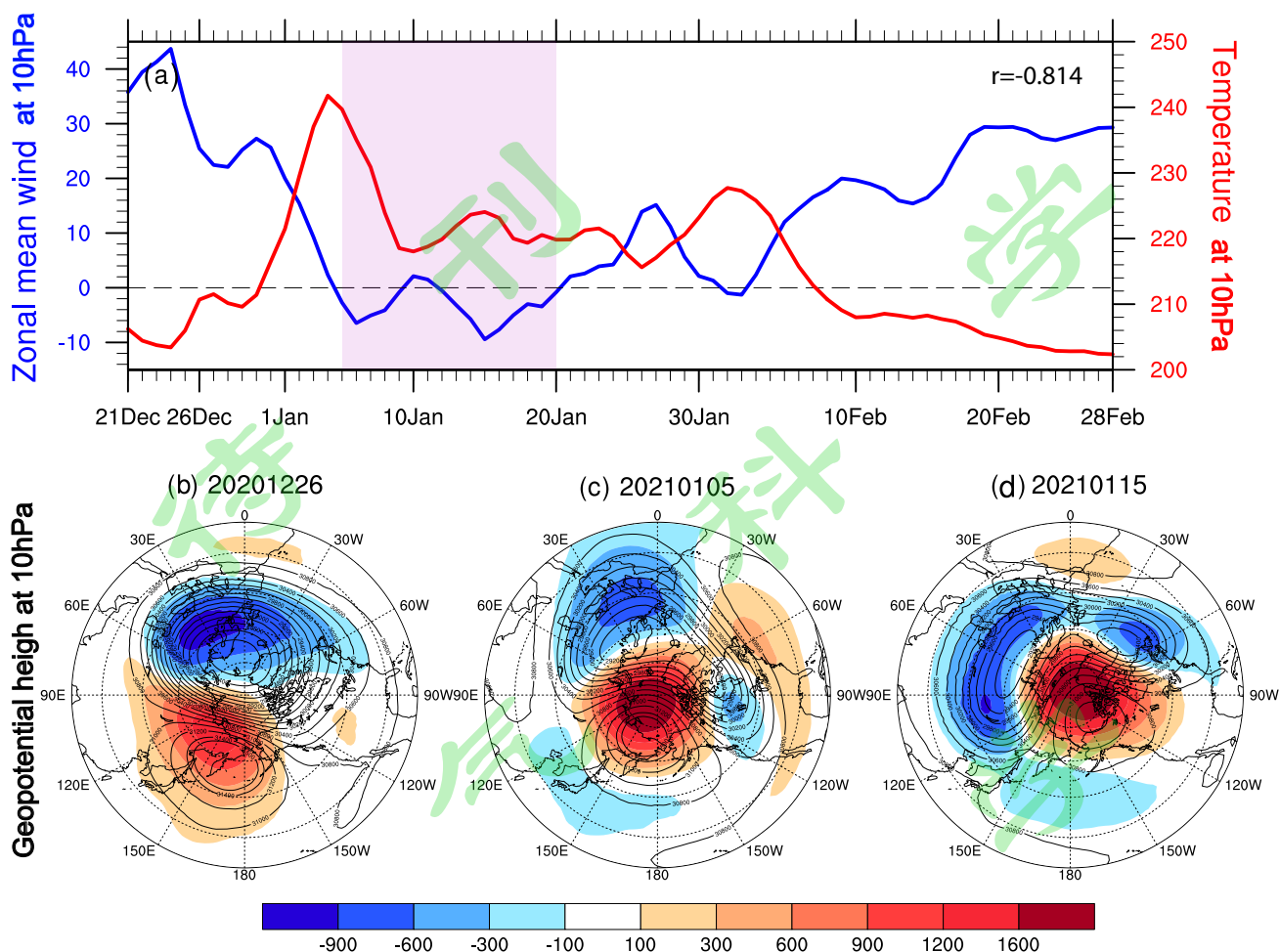


图 1 (a) 2020/21 冬季 10 hPa 60°N 纬向平均纬向风 (单位: m/s) 和 60°N–90°N 平均温度 (单位: K) 时间序列 (伴随 SSW 爆发的绕极西风转为东风时段由紫色阴影标出; 二者相关系数标于右上角); (b) 2020 年 12 月 26 日、(c) 2021 年 1 月 5 日、(d) 2021 年 1 月 15 日 10 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gdm) 及其距平 (填色, 单位: gdm)。

Figure 1. (a) Time series of zonal average zonal wind at 60°N (units: m/s) and temperature averaged over 60°N–90°N (units: K) at 10 hPa during 2020/21 winter (the purple shaded box indicates the period when the subpolar westerly became easterly; correlation is shown in the top-right) and geopotential height (contours, units: gdm) and its anomaly (shadings, units: gdm) at 10 hPa on (b) December 26, 2020, (c) January 5, 2021 and (d) January 15, 2021.

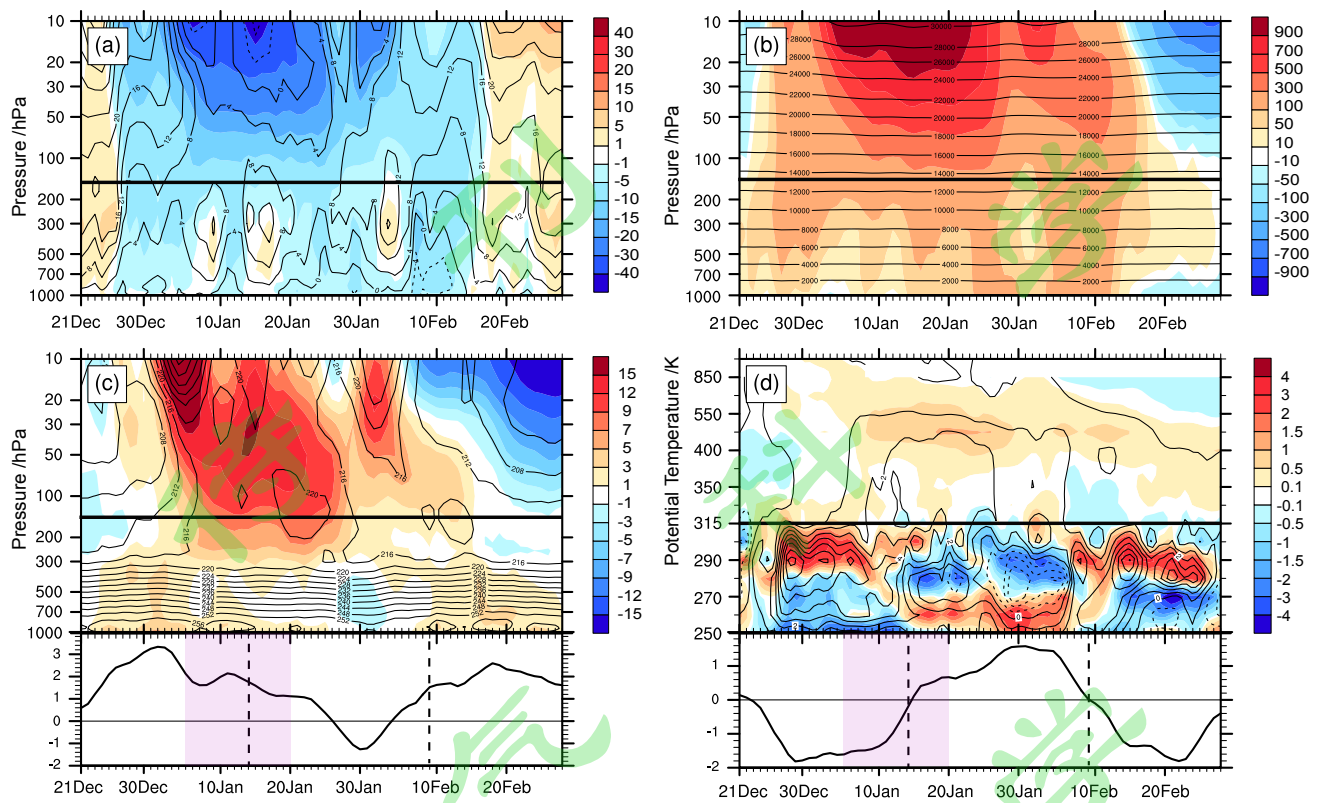


图 2 (a) 60°N 纬向平均纬向风(单位: m/s)、60–90°N 极区平均的 (b)位势高度(单位: gpm)和(c) 温度 (单位: K) (等值线) 及其距平 (阴影), 以及(d) 60–90°N 积分的等熵大气质量距平(填色, 单位: 10^{14}kg)和各层向上积分的质量距平(等值线, 单位: 10^{14}kg) 的时间-高度剖面。黑色粗横实线表征最接近于对应纬度冬季气候平均对流层顶气压的等压面 (150hPa) 及等熵面 (315K); (c) 和 (d) 中的演变廓线分别为 300hPa 以下平均的极区温度距平以及 280K 以下冷空气的总质量距平 (紫色阴影同图 1d, 黑色竖虚线为基于对流层温度及空气质量距平的时间分段)

Figure 2. Time-height profiles of total field (contours) and anomaly field (shadings) of (a) 60 °N zonal average zonal wind (units: m/s), (b) geopotential height (units: gpm) and (c) temperature (units: K), and (d) isentropic mass anomaly (shadings, units: 10^{14}kg) and accumulated mass anomaly (contours, units: 10^{14}kg) above each isentropic level integrated over 60°N–90 °N. The time series of polar mean temperature anomaly averaged over isobaric levels below 300hPa and cold air mass anomaly below 280K are superimposed in (c) – (d)

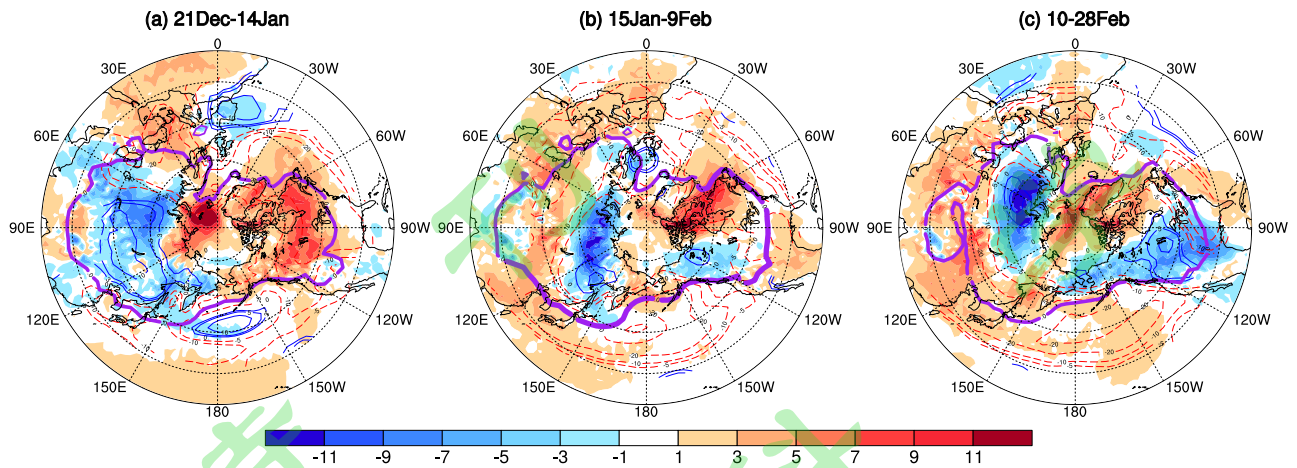


图 3 2020/21 年 SSW 事件各阶段平均的 20°N – 90°N 地面 2m 温度距平(阴影, 单位: $^{\circ}\text{C}$, 紫色等值线为 0°C 线)和低于 280K 的冷空气质量距平(等值线, 单位: 10^{12}kg , 蓝/红色表示正/负距平)的水平分布。

(a) 12 月 21 至 1 月 14 日、(b) 1 月 15 至 2 月 9 日、(c) 2 月 10 至 2 月 28 日

Figure 3. Spatial distribution of 2m temperature anomaly (shadings, unit: $^{\circ}\text{C}$, purple isoline is 0°C line) and cold air mass anomaly vertically integrated below 280K (contours, unit: 10^{12}kg , blue/red contours indicate positive/negative values) averaged over each period of SSW event in 2020/21 winter: (a) December 21–January 14, (b) January 15–February 9, and (c) February 10–February 28.

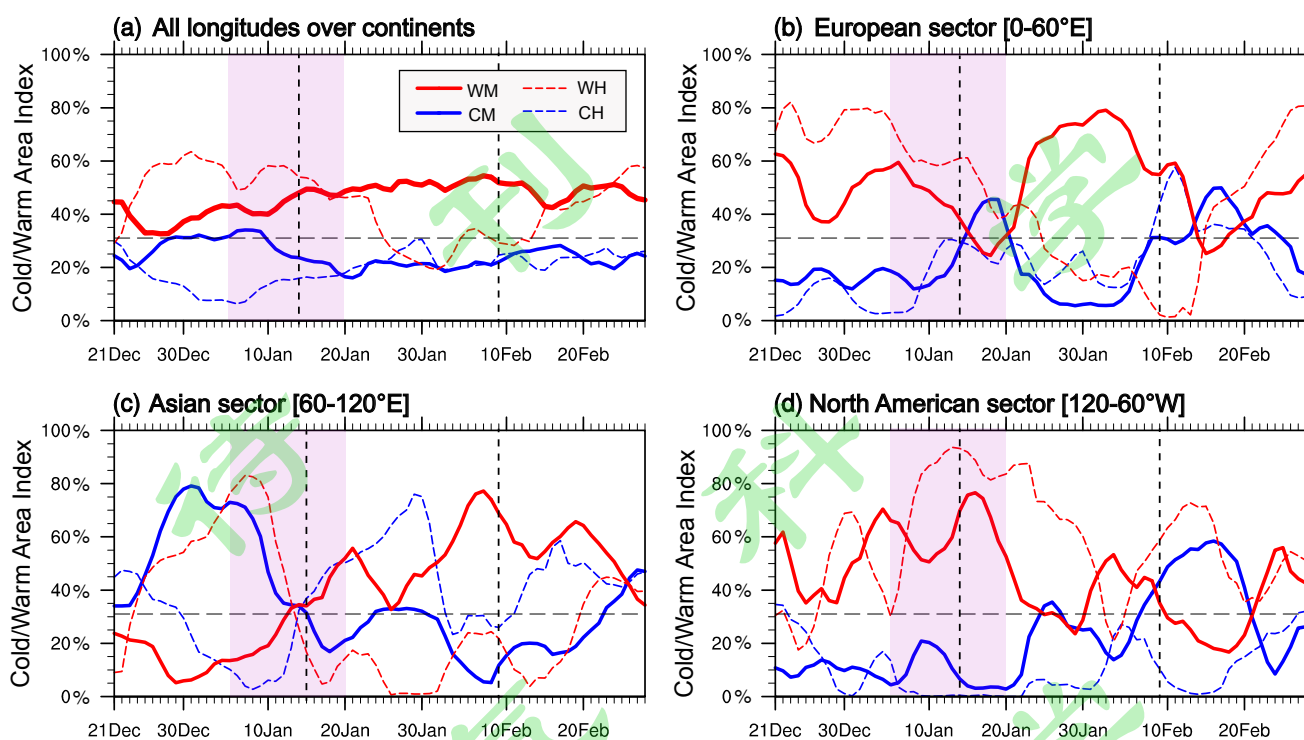


图 4 2020/21 冬季 (a) 北半球大陆地区、(b) 欧洲、(c) 亚洲和 (d) 北美经度范围内的中纬度冷、暖面积指数 (CM、WM) 和高纬度冷、暖面积指数 (CH、WH) 的时间序列 (单位: %)。紫色阴影表征伴随 SSW 的东风期间, 指数均做了 5 天滑动平均处理。黑色虚线为各指数的气候平均值。黑色竖虚线同图 2c, 紫色阴影同图 1a。

Figure 4. Time series of 5-day running mean midlatitude cold and warm area index (CM and WM, units: %) and high-latitude cold and warm area index (CH and WH, units: %) within longitude range of (a) northern hemisphere continent, (b) Europe, (c) Asia and (d) North America in 2020/21 winter. Purple box represents the easterly period during SSW event.

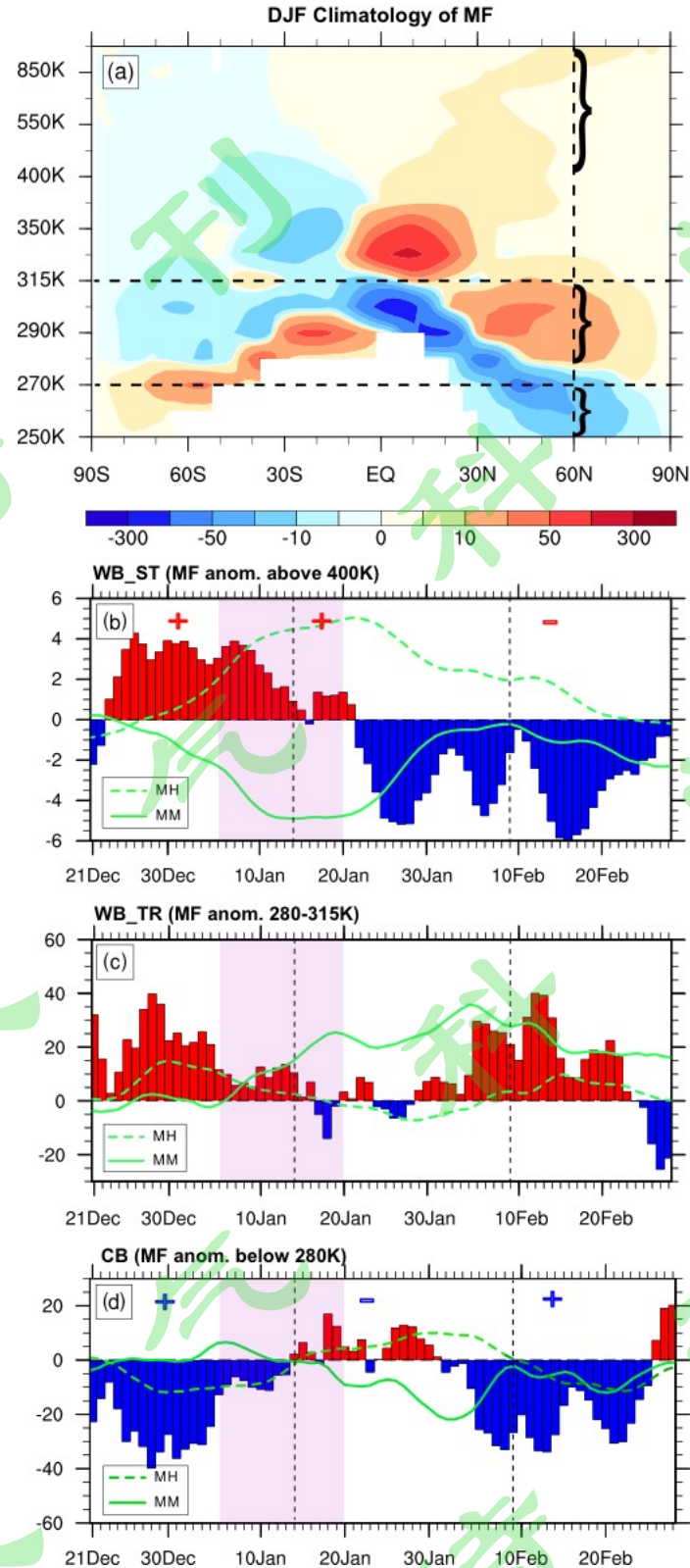


图5 (a) 冬季气候平均各纬度圈积分的经向大气质量通量 (MF, 单位: 10^9 kg/s) 以及 2020/21 冬季大气经向质量环流、(b) 平流层向极地暖支 (WB_ST, 400K 以上)、(c) 对流层向极地暖支 (WB_TR, 280–315K)、(d) 对流层向赤道冷支 (CB, 280K 以下) 内的 60°N MF 距平 (柱状, 量级: 10^9 kg/s) 和中纬度、高纬度地区等熵大气质量距平 (MM 和 MH, 曲线, 量级: 10^{15} kg) 时间序列。图(b) – (d) 中的黑色竖虚线同图 2c, 紫色阴

影同图 1a，指数均做了 5 天滑动平均处理，图 (b)/(d) 中的红/蓝色“+”表示 WB_ST/CB 异常偏强，“-”表示 WB_ST/CB 异常偏弱。

Figure 5. (a) Winter (December-February) climatological mean zonally integrated meridional mass flux (MF, units: 10^9 kg/s) at each latitude and isentrope; time series of 5-day running mean 60°N MF anomaly (bars, units: 10^9 kg / s) and isentropic mass anomaly (MM and HM, curves, units: 10^{15} kg) within (b) stratospheric poleward warm air branch (WB_ST) and (c) tropospheric poleward warm air branch WB_TR, (d) tropospheric equatorward cold air branch CB of the isentropic meridional mass circulation in 2020/21 winter. The purple box in panels (b) – (d) represents the easterly period with SSW, and 5-day running mean has been applied to all the indexes. In panels (b) and (d), red/blue "+" indicates that WB_ST/ CB is anomalously strong, while "-" indicates that WB_ST / CB is anomalously weak.

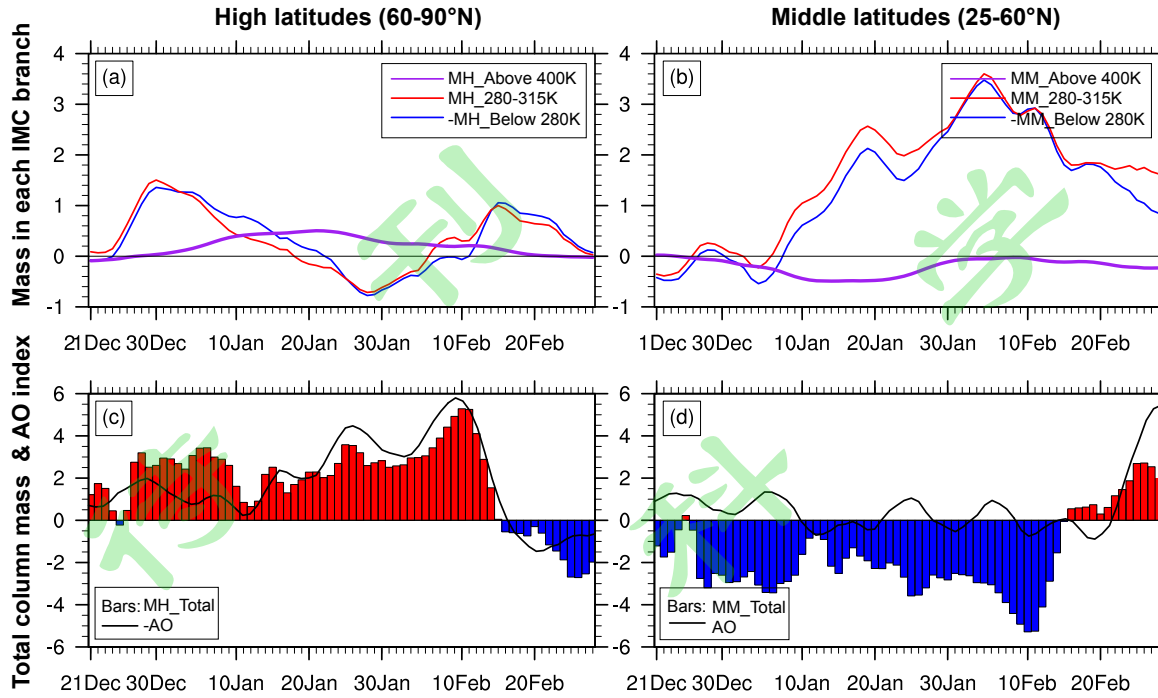


图 6 2020/21 冬季 (a)高纬度 、 (b) 中纬度地区各层质量距平(单位: 10^{16} kg) 以及 (c、d) 整层气柱内的总质量距平 (柱状, 单位: 10^{15} kg) 和北极涛动 (AO) 指数 (曲线) 的时间序列。指数均做了 5 天滑动平均处理, 对流层冷支内的质量距平往往与对流层暖支内的质量距平变化相反, 故绘制的是反号后的量值。

Figure 6. Time series of 5-day running mean mass anomaly in (a) high latitudes (b) midlatitudes, integrated within three branches of atmospheric meridional mass circulation (units: 10^{16} kg), and the total column mass anomaly in (c) high latitudes and (d) midlatitudes (bars, unit: 10^{15} kg) in 2020/21 winter. Arctic Oscillation (AO) index is overlaid in panels (c) – (d). The mass anomaly in CB is often opposite to that in WB_TR, so the sign of the former one has been reversed.

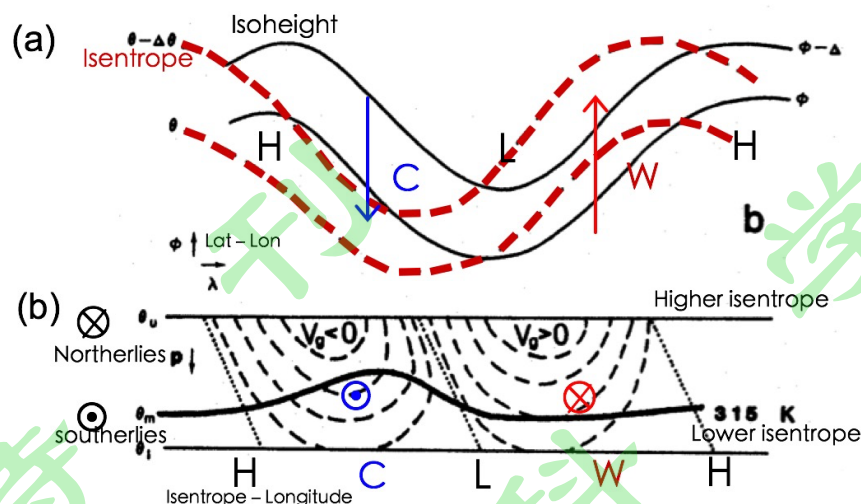


图 7 斜压不稳定波动对应的位势高度、位势温度以及经向风场及其引起大气经向质量输送机制。此处为由低层等熵面 θ_e 、中层等熵面 θ_m 以及高层等熵面 θ_u 组成的两层模型。其中(a)为经度-纬度剖面，(b) 为与其对应的经度-垂直剖面，经向准地转风 V_g 符号在图中标出，斜直虚线分隔槽与脊。

Figure 7. Schematic diagram of geopotential height, potential temperature and meridional wind field corresponding to baroclinically amplifying waves, which drives an isentropic meridional mass transport.

This is a two-layer model composed of low-level isentropic surface, middle-level isentropic surface and high-level isentropic surface. Panel (a) shows the longitude-latitude cross section, and (b) shows the corresponding longitude-vertical cross section. The quasi-geostrophic meridional wind is marked, and the oblique straight dotted line separates the trough and ridge.

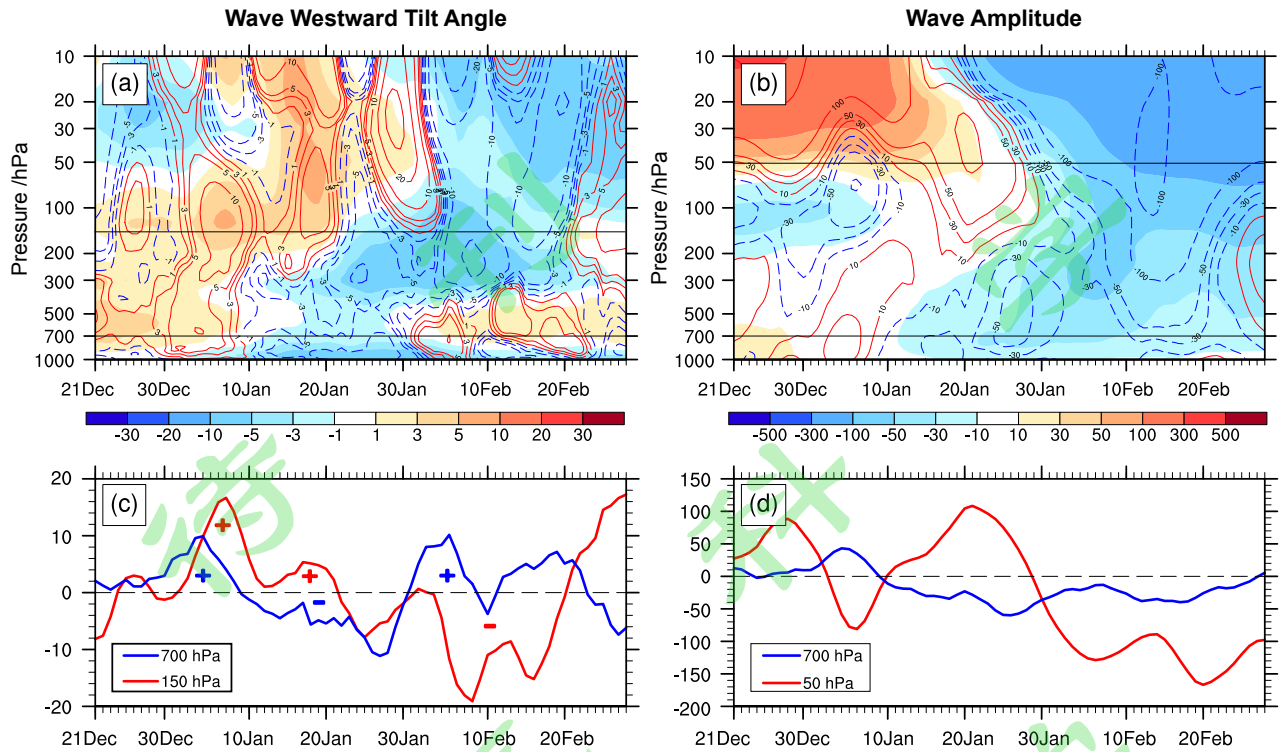


图 8 60°N 波动西倾角距平 (单位: °) 和波动振幅距平 (单位: km) 的气压-时间剖面 (a、b) 及其关键层的时间序列 (c、d)。图(a、b) 中等值线为 5 天滑动平均场, 填色为 31 天滑动平均; 图(c)中红色/蓝色“+”表示与平流层暖支/对流层冷支相关的 150hPa/700hPa 波动西倾角异常偏大, “-”表示波动西倾角异常偏小。

Figure 8. (a, b) Pressure-time diagram of 5-day running mean 60 °N wave westward tilt angle anomaly (contours, units: °), wave amplitude anomaly (contours, units: km) and their 31-day running means (shadings), and (c, d) the time series of their daily values at key isobaric levels. Red/blue "+" in panel (c) indicates that the wave westward tilt at 150hPa /700hPa that related to WB_ST/CB is anomalously large, while "-" indicates that the westward tilt is anomalously small.

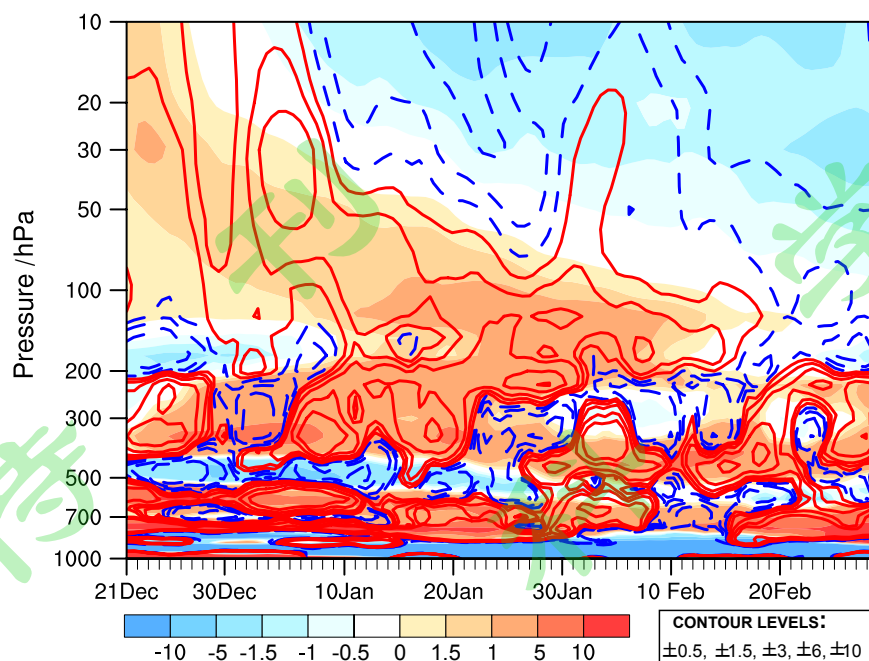


图 9 60°N 准地转纬向平均位涡梯度距平(单位: 10^3 s^{-1}) 的气压-时间剖面。等值线为 5 天滑动平均场, 填色为 31 天滑动平均场; 正值/负值表示该层环流条件有/不利于波动的上传。

Figure 9. Pressure-time diagram of 5-day running mean fields of 60°N quasi-geostrophic zonal mean potential vorticity (PV) gradient anomaly (contours, units: 10^3 s^{-1}), and its 31-day running means (shadings). The positive values correspond to the circulation condition easier for waves to propagate upward, while the negative values tend to be favorable to wave reflection and/or absorption.

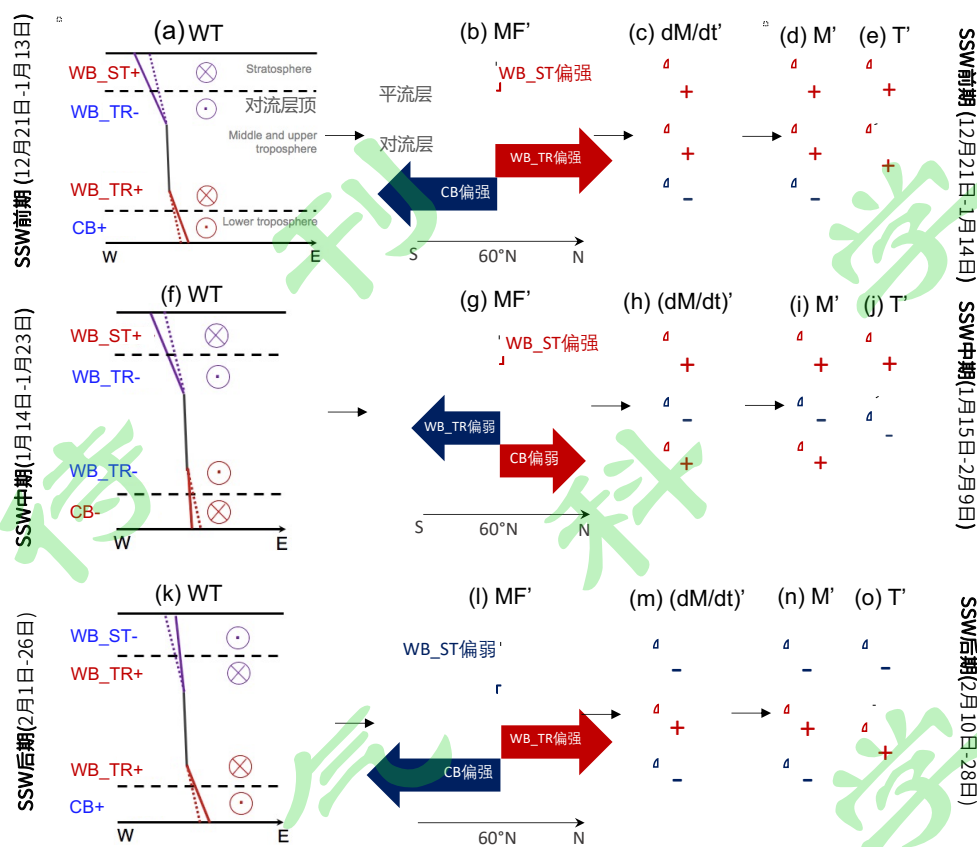


图 10 2020/21 冬季 SSW 事件前后三个阶段内波动西倾角以及大气经向质量环流三支强度异常、极区等熵大气质量与温度异常垂直结构的概念图。

(WT、MF'、 $(dM/dt)'$ 、 M' 、 T' 分别表示 60°N 波动西倾角、 60°N 经向质量通量距平、极区等熵质量距平的日倾向变化、极区等熵质量距平、极区温度距平；第一列组图中实线表示本次事件时段西倾角度，虚线表示冬季气候态西倾角，“ $\otimes$ ”/“ $\odot$ ”符号表示西倾角驱动的向极地/赤道质量输送距平；第二列组图中向右箭头表示异常向极地质量输送，向左箭头表示异常向赤道质量输送；第三–五列组图中“+”/“-”表示正/负距平；针对极区等熵质量与温度的三个阶段（右侧）相比于针对 60°N 大气经向质量环流与波动特征的三个阶段（左侧）存在一定的滞后，这是因为大气经向质量环流异常即刻引起的是质量与温度的日倾向变化，超前于质量与温度本身）

Figure 10. Conceptual diagram of the variations of westward tilt angle of waves, the anomalies of the intensity of three branches of atmospheric meridional mass circulation, and the vertical structure of polar isentropic atmospheric mass and temperature anomalies at three stages around the SSW event occurred in 2020/21 winter (WT, MF', $(DM/DT)'$, M' and T' respectively represent the wave westward tilt angle at 60°N , meridional mass flux anomaly at 60°N , daily tendency of polar isentropic mass anomaly, polar isentropic mass anomaly and polar temperature anomaly; in the first columns, the solid line represents the westward tilt angle during each period, while the dotted line represents the climatological winter mean westward tilt angle, and symbol " $\otimes$ " / " $\odot$ " indicates the poleward/equatorward mass transport anomaly driven by the anomalous westward tilt angle; the right/left arrow in the second columns indicates the stronger poleward/equatorward mass transport; "+" / "-" in the third–fifth columns indicates the positive/negative anomaly values; note that the timing of the three stages (right side) of isentropic mass and temperature anomalies in the polar region lag behind the timing of the three stages (left side) of meridional mass circulation and wave properties at 60°N , because the anomalous meridional mass circulation immediately causes the daily tendency of mass and temperature anomalies, which is ahead of the mass and temperature anomalies themselves)

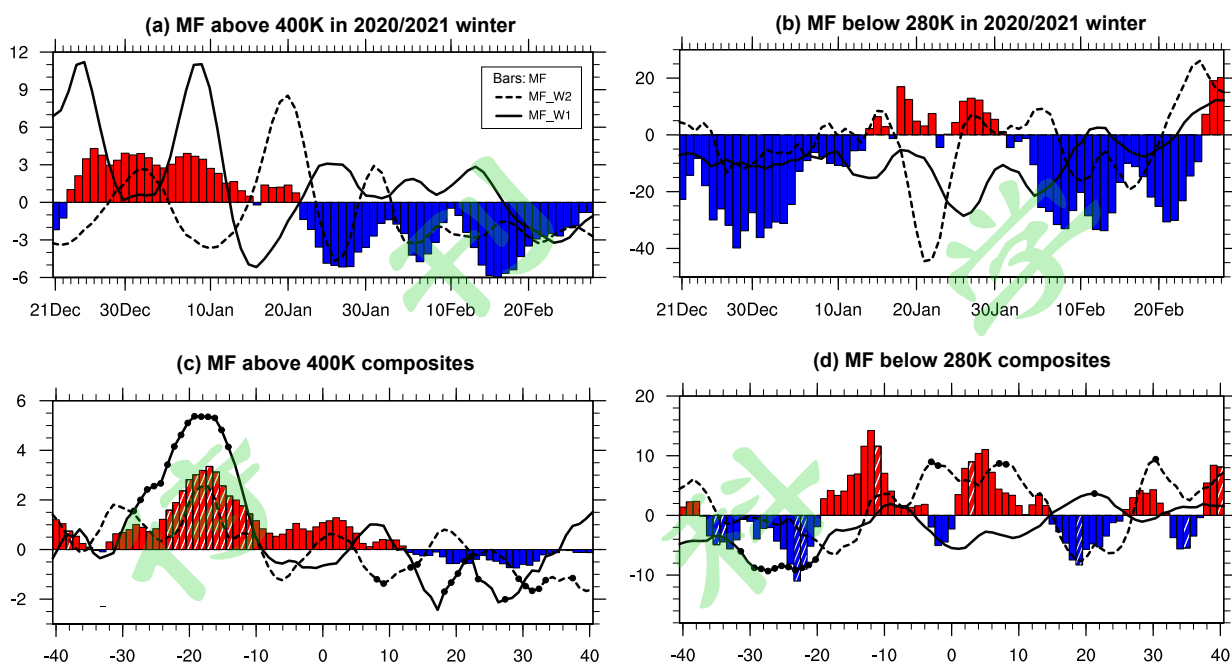


图 11 2020/21 冬季 (a) 平流层向极地暖支、(b) 对流层向赤道冷支内 60°N 的经向质量通量距平(柱状)及其 1 波分量 (实线)、2 波分量 (虚线) 的时间序列 (单位: 10^9kg/s)。 (c) – (d) 同 (a) – (b), 但为 1979–2011 历年冬季极区平流层温度下传滞后的平-对流层耦合类型的 NAM 负位相个例合成。指数均做了 5 天滑动平均处理。

Figure 11. Time series of 5-day running mean 60°N MF anomaly (bars, units: 10^9kg/s) and its wavenumber-1 component (solid line) and wavenumber-2 component (dashed line) within (a) WB_ST, and (b) CB in 2020/21 winter. Panels (c) – (d) are the same as (a) – (b), but it is composite mean MF anomaly in the period from 40 days before to 40 days after the peak time of negative Northern Annular Mode (NAM) events of the stratosphere-troposphere coupling type with a clear lag of downward propagation of polar stratospheric temperature anomaly to the lower troposphere in 1979–2011 winters.