

1 稿件时间：2020-06-02T10: 25

2 **投 稿 信**

3 **尊敬的审稿专家和《大气科学》编辑部：**

4 您好！感谢您于百忙之中接收和审阅稿件。本人受所有作者委托，提交论文《冬季全国
5 性持续低温事件过程中的平流层—对流层相互作用》，希望能够在贵刊发表。

6 **文章的创新点和重要意义在于：**

7 研究我国冬季极端冷事件过程中的环流异常特征对提高我国寒潮灾害的预测预警能力
8 有重要意义。随着 2008 年 1 月、2009 年 12 月、2012 年 1 月在欧亚大陆范围出现的持续性
9 极端低温事件，其环流特征、成因机制以及动力学问题引起了国际上的普遍关注。此前学者
10 或针对冷事件个例，分析了相关的对流层、平流层环流异常，或通过合成分析指出其与普通
11 寒潮事件在环流场上的差异，旨在理解持续性冷事件发生的环流背景和独有特征。但以往的
12 研究大都局限于影响我国持续性低温事件的对流层环流系统，即使涉及到平流层，也仅关注
13 平流层环流异常的向下影响，对持续性极端低温事件发生发展过程中平流层—对流层的相互
14 作用过程研究相对较少。

15 本文选取 1959–2017 年冬季发生的全国性持续低温事件，利用 ERA40/ERA-Interim 逐
16 日再分析资料，系统分析了该类持续性冷事件发生发展过程中对流层和平流层的环流变化特
17 征，并着重阐述了其中的平流层—对流层相互作用过程。结果表明，冷空气开始堆积前，由
18 于对流层以 2 波为主的行星波异常上传，平流层环流由极涡减弱型向 2 波异常型调整，主要
19 体现对流层的向上影响；随后，平流层环流向 1 波异常型调整，极涡强度开始恢复，以 2 波
20 为主的对流层行星波上传受到抑制，在欧洲一带出现的异常向下反射对应大型斜脊/横槽的
21 形成和维持，有利于冷空气在中西伯利亚地区的堆积，主要体现平流层的向下影响；发展强
22 盛的大型槽脊使得以 1 波为主的行星波再次异常上传，对应平流层极涡再次减弱，而随着大
23 型横槽转竖引起冷空气爆发，南北温度梯度减弱，槽脊崩溃。

24

冬季全国性持续低温事件过程中的平流层—对流层相互作用

吴嘉惠^{1,3}, 任荣彩^{1,2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

3 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用 1959–2017 年 ERA40/ERA-Interim 逐日再分析资料和国家气候中心的逐日站点资料, 针对发生在冬季(NDJFM)的全国性持续低温事件(EPECEs), 分析了热带外环流的变化特征, 以及平流层—对流层相互作用。结果表明, 全国性 EPECEs 可划分为冷空气在乌拉尔山–西伯利亚关键区堆积和冷空气爆发以及消亡三个阶段, 分别与对流层中层乌拉尔山–西伯利亚一带大型斜脊的建立、发展和崩溃以及平流层极涡强度的恢复、维持和再次减弱相对应, 其中伴随着显著的平流层—对流层相互作用。首先, 以大西洋地区异常扰动为主的热带外对流层形成 2 波型行星波异常, 并上传影响平流层; 随后在平流层 2 波调整为 1 波型的过程中, 出现了行星波的异常下传以及平流层极涡强度的恢复, 在对流层形成的 1 波型的高度正异常中心位于东欧地区, 有利于乌拉尔山高度脊的建立以及源于北冰洋的冷空气在高压脊前形成堆积; 随后由于平流层极涡强度维持, 对流层行星波上传持续受到抑制, 并主要在欧洲一带出现显著的异常向下反射, 对应对流层 1 波型高度正异常中心逐步东移至中西伯利亚地区, 从而有助于乌拉尔山脊向下游发展成一个横跨西伯利亚地区的大型斜脊, 冷空气堆积区也东移到中西伯利亚地区。进入冷空气爆发阶段, 随着斜脊前的大型横槽与上游移来的短波槽形成阶梯槽形势, 横槽很快转竖引导低层冷空气向我国大范围爆发; 同时大型斜脊的维持也使行星波再次出现 1 波型异常上传, 影响平流层极涡再次减弱。最后, 随着冷空气爆发, 大型槽脊迅速崩溃, 对流层波动减弱, 低层气团的经向输送也随之减弱, EPECEs 消亡。

关键词 全国性持续极端低温 大型斜脊 平流层—对流层相互作用

文章编号 2020125B

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.20125

Stratosphere-troposphere interactions during nationwide extensive and persistent extreme cold events in boreal winter

WU Jiahui^{1,3}, REN Rongcai^{1,2}

收稿日期 2020-06-01; **网络预出版日期** xxxx-xx-xx

作者简介 吴嘉惠, 女, 1995 年出生, 硕士研究生, 主要从事 EPECE 研究。E-mail: wujiahui@lasg.iap.ac.cn

通讯作者 任荣彩, E-mail: rrc@lasg.iap.ac.cn

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) 项目 XDA17010105, 国家自然科学基金项目 91837311
Funded by “Strategic Priority Research Program” of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA17010105), National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grant 91837311)

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on 1959–2017 ERA40/ERA-interim daily-mean reanalysis data and National Climate Center daily station data, this study diagnoses the extratropical circulation anomalies and stratosphere-troposphere interaction processes during nationwide extensive and persistent extreme cold events (EPECEs). The results show that nationwide EPECEs experience three stages from the cold-accumulation in Urals-Siberia, the cold-outbreak to the cold-decay, which corresponds to the formation, development and collapse of the Urals-Siberia tilted ridge in the middle troposphere, and the recovering, persisting and re-weakening of the stratospheric polar vortex. Meanwhile, prominent stratosphere-troposphere interactions are seen in the mid- and high latitudes. Firstly, the wavenumber-2-type anomaly appears in extratropical troposphere because of dominant disturbance in the Atlantic, and propagates upwards to affect stratospheric circulation. Subsequently, anomalous planetary waves propagate downwards and the stratospheric polar vortex recovers when the wavenumber-2-type anomaly is adjusted to the wavenumber-1-type anomaly. The wavenumber-1-type anomaly appears in the troposphere afterwards and the positive center is located in eastern Europe, which leads the Ural blocking to form and cold air from the Arctic Ocean to accumulate in front of the blocking. Thereafter, the anomalous upward tropospheric planetary waves continue to be restrained and reflected downwards mainly over Europe due to the persisting of stratospheric polar vortex. The reflected planetary waves favor the positive center of the wavenumber-1-type anomaly gradually shifting eastwards to central Siberia while the blocking develops downstream into a large-scale tilted ridge arching across the Siberia. The accumulation area of cold wave also moves eastwards to central Siberia. For the outbreak of cold wave, the large-scale transversal trough in front of the ridge, involving an upstream short-wave trough, leads to a trench structure. As the transversal trough turns into be vertical, extensive areas of China are in the grip of cold outbreak. Concurrently, the wavenumber-1-type anomaly propagates upwards again owing to the maintenance and development of the large-scale tilted ridge, which weakens the stratospheric polar vortex again. Finally, the blocking and trough collapse as cold wave bursts out. Tropospheric planetary wave and meridional transport of lower atmosphere are decreased, which suggests decay of the EPECEs.

Key words Nationwide EPECEs, Large-scale tilted ridge, Stratosphere-troposphere interaction

1 引言

寒潮是中国冬半年主要的天气过程之一,可造成霜冻、急剧降温、暴雪、冻雨和大风等灾害性天气,给农牧业生产、交通运输、国民经济和人民生命财产等造成严重的损失(康志明等, 2010; Gao et al., 2019; 阎琦等, 2019)。中央气象台将单站降温(即冷空气影响过程中日平均气温的最高值与最低值之差)达 10°C 及以上,且温度距平(即冷空气影响过程中最低日平均气温与该日所在旬的多年旬平均气温之差)超过 -5°C 的过程定义为寒潮(朱乾根等, 2007)。研究指出,影响中国大陆的寒潮冷空气主要源于新地岛以西和以东的北冰洋洋面,以及冰岛以南的大西洋洋面,冷空气一般经西伯利亚寒潮关键区($45^{\circ}\text{--}65^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{E}$),可从西路、中路和东路三条路径爆发南下(陶诗言, 1957; 丁一汇, 1990; 张培忠等, 1999)。乌拉尔山阻塞高压被认为是欧亚大陆及我国寒潮爆发的关键系统,其发展北伸可引起大气经向输送增强,使极区冷空气持续在脊前堆积,而其崩溃则伴随大规模寒流南下和寒潮事件发生(叶笃正等, 1962; Ding, 1990; 李艳等, 2010)。除了乌拉尔山阻塞高压外,位于北大西洋和北太平洋上空的大洋高压脊也与我国寒潮爆发有关联,大洋脊向极区的延伸可导致极涡分裂,分裂的极涡中心向东亚地区的偏移可导致寒潮爆发(仇永炎, 1985)。

与普通寒潮事件相比,有一类寒潮事件的冷空气强度更强且持续时间更长,影响范围更广,这类寒潮事件一般称为大范围持续性低温事件(extensive and persistent extreme cold events, 简称 EPECEs)。例如,普通寒潮事件的持续时间一般在 5 天左右,而 EPECEs 的持续时间通常可达 15 天左右;在冷空气发展阶段,普通寒潮冷空气一般只影响叶尼塞河至贝加尔湖之间的小范围区域,而 EPECEs 的冷空气可覆盖从欧洲东部至贝加尔湖的广阔区域(Peng and Bueh, 2012)。普通寒潮事件一般以乌拉尔山地区的区域性高压脊(总体范围不超过 30 经距)为主要关键系统,而 EPECEs 的发生多伴随一个横跨欧亚大陆的大型斜脊,该斜脊可从乌拉尔山一直向东延伸至贝加尔湖地区,呈现西南-东北向倾斜,纬向跨度可达 60 个经距左右,在其维持阶段,前部经常有一个东西向“横脊”存在;该大型斜脊多由两大洋高压脊和乌拉尔山弱脊的合并而形成(符仙月, 2011; Bueh et al., 2011; Xie and Bueh, 2017; 布和朝鲁等, 2018)。

北半球冬季的中高纬地区是平流层-对流层耦合的关键区域,也是平流层向下影响的关键区域。平流层环流变化缓慢,异常信号通过向下传播及动力耦合过程与对流层的北极涛动(Arctic Oscillation, AO)及北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO)密切相关(Baldwin and Dunkerton, 1999; Ren and Cai, 2007; Cai and Ren, 2007),对中纬度的寒潮事件发生有一定的指示作用(Plumb and Semeniuk, 2003; Perlwitz and Harnik, 2003; Kolstad et al., 2010; Wang and Chen, 2010; Yu et al., 2018)。统计结果表明,在平流层爆发性增温事件(sudden stratospheric warming, SSW)发生前后,北半球寒潮冷空气的爆发更为频繁(Thompson and Wallace, 2001; Thompson et al., 2002; Cai, 2003; Woo et al., 2015)。我国学者在研究中国寒潮时发现,平流层强 SSW 所激发的中高纬温度及位势高度异常场,可

形成 AO 型振荡并向下传播,与地面西伯利亚高压增强、阿留申低压加深以及东亚大槽位置偏西和加深有关,可对寒潮在我国北部地区爆发产生影响(李琳等,2010;孔文文和胡永云,2014)。

2008 年初我国南方的极端冷事件即是一次典型的 EPECEs 过程,仅仅根据对流层环流的异常,难以解释长江中下游地区持续 1 个月的暴雪天气过程,而考虑平流层环流异常信号对对流层环流系统变化的影响则可以更加清楚地阐述这次典型 EPECE 的冷空气爆发过程。例如,刘毅等(2008)的研究指出,平流层极涡从 2007 年 12 月上旬即开始出现变形且强度增强,并向欧亚大陆伸出槽线,这一高度负异常随高度自上而下、自西向东影响对流层环境且一直持续到次年的 1 月份,造成了东亚大槽主体北部偏强、位置偏东,为 2008 年 1 月中旬南方地区的极寒雪灾天气提供了有利的环流背景。向纯怡等(2009)进一步发现,从 2007 年 10 月份开始,来自热带平流层太平洋地区的位势高度负异常信号,即开始逐步向极传播,使冬季 12 月份开始平流层极涡异常偏强并向东亚地区偏心。上述平流层异常信号的向下传播,有利于对流层乌拉尔山阻塞高压和鄂霍次克海低槽的发展,并有利于在东亚副热带地区形成并维持西高-东低的环流形势,从而有利于在亚洲大陆中高纬地区形成北风异常,使得强冷空气不断沿蒙古高原东侧南下入侵我国华中、华东和华南地区。Nath et al. (2014)以及 Nath and Chen (2016)在研究中还发现,冷事件前期巴芬岛以及拉布拉多海岸附近行星波 1 波的上传和东移,通过平流层波动反射作用,在欧亚大陆西部以及俄罗斯和中国的中南部地区出现 1 波下传,引起近地面热对流发展,使得乌拉尔山-西伯利亚地区的阻塞高压迅速增强,从而有利于 2008 年 1 月我国南部地区持续性冷空气的大面积爆发。上述证据表明,发生在我国的 EPECEs 过程,可能与平流层环流的调整 and 变化有重要联系。施宁和布和朝鲁(2015)通过位势涡度(potential vorticity, PV)反演和分析即发现,巴伦支海附近平流层中低层的正 PV 异常的向下发展,有助于对流层中上层乌拉尔山高度脊及贝加尔湖以东低压槽的发展和维持,从而可对全国性 EPECEs 的爆发起促进作用。

因此,要理解 EPECEs 这类持续冷事件的发生机理和过程,不能忽视平流层环流异常及平流层-对流层相互作用过程。前人关于 EPECEs 的研究多针对个例过程,对其中平流层过程的分析也仅局限于平流层环流异常的向下影响,而对平流层环流的异常变化,特别是 EPECEs 发生发展过程中平流层-对流层的相互作用关注较少。本文拟通过客观定义 EPECEs 过程,系统分析 EPECEs 前后平流层-对流层相互作用的总体特征,为进一步把握 EPECEs 发生提供具有普遍意义的证据。分析结果不仅将有助于我们把握 EPECEs 发生的过程和机理以及提高对此类事件的预警预测水平,而且也将有利于提升我们对平流层向下影响以及平流层-对流层相互作用过程在区域性极端气候事件发生过程中的作用等的认识水平。

2 资料和方法

2.1 资料

本文采用的日平均气温数据来自国家气候中心整编的 1959–2017 共 59 年的冬季 11 月

份到次年 3 月份(NDJFM)全国 824 个站点资料;逐日再分析资料来自欧洲中长期天气预报中心提供的 ERA40 (1959–1978) 叠加 ERA-Interim (1979–2017) 等压面数据集,包括位势高度场、温度场和风场等,垂直方向从 1000 hPa 到 1 hPa 共 23 层,水平分辨率为 $1.5^{\circ} \times 1.5^{\circ}$,还包括这两套再分析资料的 2 m 温度场、海平面气压场以及 10 m 风场等地表资料。下文中所用到的气候平均态即是基于该资料 1959–2017 年的气候平均场所得到的。

2.2 EPECEs 的界定及分类

a) 界定

参考陈峪等(2009)和 Peng and Bueh (2011)对极端事件的定义方法,我们对 EPECEs 的界定分为三个步骤:

i) 测站极端低温阈值:对于每一个测站,以某日及其前后各 2 天,取每年这 5 天的气温资料,得到一个样本数为 5 天 $\times$ 59 年=295 的时间序列。将该序列以升序排列,取第 10 个百分点值作为该站在这一天达到极端低温的阈值。

ii) 极端低温面积:鉴于站点资料空间分布的不均匀性,我们以 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 经纬网格覆盖全国,将每天全国极端低温台站所覆盖的网格数,定义为该日的极端低温面积指数(以下简称 S)。当单日 S 超过全国总网格数(1012 个)的 10% 时,即认为这一天我国境内发生了大范围极端低温事件。

iii) 持续性:当 S 维持 10% 以上网格数达到 8 天以上(中间允许有连续不超过 2 天少于 10%)且 S 峰值超过 20% 全国总网格数,则确定为一次大范围极端低温事件。 S 超过(少于)10% 全国总网格日即定为事件的开始日(结束日)。

根据上述界定标准,在 1959–2017 年的 59 个冬季中,共有 40 次 EPECEs 发生。

b) 分类

尽管每次 EPECEs 的影响范围都比较大,但各个事件的影响范围和区域仍有明显差异。我们参照 Peng and Bueh (2011) 的做法,将 40 次 EPECEs 峰值日当作一个序列,对 40 次峰值日的标准化日平均气温距平做 EOF 分析,所得到的第一主导模态(可解释方差达 42.1%)表现为全国一致型(本文统一称该类 EPECEs 为全国性 EPECEs,见图 1)。由图 1 可见,在全国性 EPECEs 峰值日,相对于 40 次 EPECEs 峰值日的站点标准化日平均气温来说,极端低温区集中在除青藏高原、东北北部之外的中国绝大多数地区。上述 EOF 分析的第二和第三模态则分别表现为西北–江南分布型和中国东部分布型,西北–江南型的极端低温区分为长江以南以及河套以西的南北两支,而东部型的极端低温区包括东北、华北、华南以及西南地区东部呈经向带状分布(图略,发生情况见表 1)。由表 1 可知,全国性 EPECEs 的发生次数相对最多(17/40),占总事件数的 42.5%,冷空气影响范围相对最大(平均影响我国 617 个站点/次),持续天数也最多(平均持续 19 天)。另外两类 EPECEs 发生的频数仅为 9/40 和 8/40,冷空气影响范围也小得多(分别平均影响我国 502 和 534 个站点/次),持续时间也相对短得多(分别平均持续 15 天和 13 天)。由于不同类型 EPECEs 发生的环流过程差异较大,

本文将主要针对全国性 EPECEs 进行分析，而对于另外两种次主导型 EPECEs，将在后续研究中另文阐述。

图 1 40 个 EPECEs 峰值日我国 824 站标准化日均气温异常 EOF 第一特征向量分布。其中蓝空心圆表示冷异常站点，颜色越深表示异常的绝对值越大。

Fig. 1 The spatial pattern of the first leading EOF eigenvector of the normalized daily mean temperature anomalies at 824 stations in China on the 40 EPECEs peak days. Blue open circles represent the extremely cold stations, and the deeper colors the colder of the stations.

表 1 40 次冬季 EPECEs 的起讫时间、峰值时间、峰值站点数（单位：个）、持续天数和类型。

Table 1 List of the beginning date, the peak date, and the end date of each of the 40 EPECEs. The number of stations on the peak day, duration (in days), and EPECE types they belong to are also shown.

序号	起讫日期	峰值时间	峰值站点数	持续天数	类型
1	1959. 1. 4–1959. 1. 12	1959. 1. 10	464	9	西北-江南型
2	1960. 11. 22–1960.12. 1	1960. 11. 26	547	10	东部型
3	1962. 3. 21–1962. 3. 29	1962. 3. 22	401	9	西北-江南型
4	1962. 11. 20–1962.12. 6	1962. 11. 29	484	17	西北-江南型
5	1964. 1. 25–1964. 2. 27	1964. 2. 21	591	33	全国型（性）
6	1966.12. 20–1967. 1. 17	1966. 12. 27	570	29	中东部型
7	1967.11. 26–1967.12. 15	1967. 11. 30	595	20	全国型（性）
8	1967. 12. 21–1967.12. 30	1967. 12. 29	545	10	东部型
9	1968. 1. 30–1968. 2. 24	1968. 2. 6	573	26	全国型（性）
10	1969. 1. 28–1969. 2. 7	1969. 2. 4	610	11	全国型（性）
11	1969. 2. 14–1969. 3. 4	1969. 2. 21	581	19	东部型
12	1970. 2. 25–1970. 3. 25	1970. 3. 13	533	29	全国型（性）
13	1971. 2. 28–1971. 3. 14	1971. 3. 7	433	15	东部型
14	1972. 2. 3–1972.2. 11	1972. 2. 8	516	9	中东部型
15	1974. 12. 3–1974. 12. 21	1974. 12. 14	416	19	西北-江南型
16	1975. 12. 7–1975. 12. 23	1975. 12. 12	627	17	西北-江南型
17	1976. 11. 10–1976.11. 28	1976. 11. 14	663	19	全国型（性）
18	1976. 12. 25–1977. 1. 15	1976. 12. 27	663	22	全国型（性）
19	1977. 1. 26–1977. 2. 17	1977. 1. 30	687	23	全国型（性）
20	1978. 2. 9–1978. 2. 18	1978. 2. 15	543	10	全国型（性）
21	1979. 11. 11–1979.11. 29	1979. 11. 18	646	19	全国型（性）
22	1980. 1. 29–1980. 2. 10	1980. 2. 5	665	13	全国型（性）
23	1981. 11. 1–1981. 11. 11	1981. 11. 8	721	11	全国型（性）
24	1983. 12. 23–1984. 1. 1	1983. 12. 29	431	10	南方型
25	1984. 1. 18–1984. 2. 10	1984. 2. 6	463	24	东部型
26	1984.12. 16–1984.12. 30	1984.12.24	634	15	全国型（性）
27	1985. 3. 3–1985. 3. 21	1985.3.9	556	19	全国型（性）
28	1985. 12. 6–1985. 12. 17	1985. 12. 11	565	12	东部型
29	1987. 3. 24–1987. 3. 31	1987. 3. 25	548	8	东部型

序号	起讫日期	峰值时间	峰值站点数	持续天数	类型
30	1987. 11. 26–1987. 12. 8	1987. 11. 29	670	13	全国型（性）
31	1988. 2. 26–1988. 3. 8	1988. 3. 3	566	12	西北-江南型
32	1991. 12. 25–1992. 1. 1	1991. 12. 28	572	9	西北-江南型
33	1993. 1. 14–1993. 1. 24	1993. 1. 16	561	13	中东部型
34	1993. 11. 17–1993. 11. 24	1993. 11. 21	590	8	东部型
35	1996. 2. 17–1996. 2. 24	1996. 2. 20	512	10	西北-江南型
36	2000. 1. 24–2000. 2. 2	2000. 2. 1	457	10	中东部型
37	2008. 1. 13–2008. 2. 15	2008. 2. 1	479	34	西北-江南型
38	2009. 11. 10–2009. 11. 22	2009. 11. 17	704	13	全国型（性）
39	2011. 1. 1–2011. 1. 21	2011. 1. 16	431	22	全国型（性）
40	2012. 12. 30–2013. 1. 9	2013. 1. 4	464	11	中东部型

2. 3 诊断方法

为了研究 EPECEs 过程中平流层—对流层环流的变化特征，本文以 17 个全国性事件峰值日为参考日，进行前后 30 天的超前/滞后合成分析（本文所有图中标示的 0d 表示峰值日，-n/n d 表示峰值前/后第 n 天，图题中不再赘述），并利用 t 检验方法对合成结果进行了统计显著性检验。为了描述 EPECEs 发生、发展过程中平流层—对流层相互作用发生的区域分布特征，我们采用三维的波通量（Plumb, 1985）诊断欧亚大陆各个地区的波动能量传播情况，公式如下：

$$\mathbf{F}_s = \begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{pmatrix} = p \cos \Phi \begin{pmatrix} \frac{1}{2a^2 \cos^2 \Phi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] \\ \frac{1}{2a^2 \cos \Phi} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \phi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \phi} \right) \\ \frac{2\Omega^2 \sin^2 \Phi}{N^2 a \cos \Phi} \left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial z} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial z} \right) \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中 F_x 、 F_y 和 F_z 分别表示纬向、经向和垂直方向的波活动通量分量（单位： $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ）， p 、 ψ' 分别为气压和准地转流函数的纬向偏差， Ω 为地球自转角速度， λ 为经度。

为了说明全国性 EPECEs 发生发展过程中行星波的活动情况，我们还利用二维 E-P 通量（Andrews and McIntyre, 1976），诊断了纬向平均波活动通量的分布和演变，其表达式如下：

$$\begin{cases} F_{(y)} = -a \cos \Phi \overline{u'v'} \\ F_{(z)} = a \cos \Phi \frac{Rf}{HN^2} \overline{v'T'} \end{cases} \quad (2)$$

其中 $F_{(y)}$ 、 $F_{(z)}$ 分别表示标准化后的 E-P 通量的经向分量和垂直分量（单位： $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ ）。 u 、 v 分别为纬向风和经向风， Φ 为纬度， R 为气体常数， a 为地球半径， H 为标高常数， N^2 为浮力频率， T 为大气温度（单位：K）。“ $\bar{}$ ”、“ $'$ ”分别表示纬向平均和纬向偏差。

文中合成的波通量异常场均为 59 年中每天波活动通量场减去冬季（NDJFM）相应每天这 59 年平均的气候态场得到的 59 年每天的波活动通量异常场，再根据 17 个全国性 EPECE 峰值日时间对这些异常场进行合成。

3 全国性 EPECEs 基本特征

图 2 给出了全国性 EPECEs 峰值前后地面温度异常场及海平面气压场分布。由图可见，EPECEs 冷空气峰值前 15 日，乌拉尔山附近开始出现低温异常并迅速增强，在峰值前 12 日，与峰值前 21 日即在中西伯利亚地区存在的温度负异常区合并形成宽广的冷空气堆，西伯利亚地面高压在该时间段内没有明显增强，但其覆盖范围明显向东扩展（图 2a~c）；随后峰值前 12 日到 6 日，地面温度异常中心向东移动到中西伯利亚地区且随之强度迅速增强，同时地面高压中心强度也相应地在贝加尔湖西侧发展增强（图 2c~d）；从 EPECEs 峰值前 6 日开始，冷异常中心与地面高压中心一致向南压，首先影响到我国新疆及内蒙古北部地区（图 2d），随后逐步在我国绝大多数地区形成 EPECEs（图 2f）。在峰值日后，冷异常中心强度和西伯利亚地面高压中心强度均明显减弱，峰值后 6 日时我国地面气温逐步接近气候平均值，地面高压中心的强度也接近气候平均值（图 2f~h）。

图 2 全国性 EPECEs 峰值（0d）前后海平面气压（等值线，单位：hPa，间隔 5 hPa）及地表温度异常（阴影，单位：K）的合成分布。粗实线为 1030hPa 等值线，打点区表示地表温度异常合成分析通过 95%信度检验。

Fig. 2 Composite sea level pressure (contours, units: hPa, interval: 5 hPa) and surface air temperature anomalies (shadings, units: K) for the 17 nationwide EPECEs. The bold line is the 1030 hPa isoline. The dotted area indicates the composite surface air temperature anomalies above 95% significance level.

从造成全国性 EPECEs 的冷异常中心的逐日移动路径图（图 3a）可以看出，该冷空气主要源于新地岛以东的北冰洋洋面，起初沿超极地路径，在贝加尔湖西侧的中西伯利亚地区有一个堆积增强的阶段（峰值前 12 日到峰值前 6 日），而后于峰值前 5 日到 2 日在新疆以北地区短暂停留后，沿西北路径，经内蒙古地区影响全国大部分地区。为了清楚地表征冷空气的堆积和爆发，我们将中西伯利亚地区（45–70°N, 60–120°E）冷空气堆积关键区（见图 3b）和我国地面温度异常的时间变化进行对比，可更加清楚地表示，在 EPECEs 峰值前 7 日以前，中西伯利亚关键区平均地面温度异常持续增强，而此时我国国内地面温度没有明显的异常变化，说明中西伯利亚地区的冷气团堆积在峰值前 7 日达到了极大值，至此完成了冷空气在关键区的堆积阶段。而从 EPECEs 峰值日前 6 日开始，我国地面温度负异常开始明显增强，同时对应对应着西伯利亚关键区温度负异常的显著减弱，表明平均而言，在 EPECEs 峰值前一周左右，冷空气已离开关键区南下侵入我国，而峰值前 6 日至峰值日正好对应冷空气在我国的爆发阶段。EPECEs 峰值日后，关键区及我国境内地面温度负异常同时减弱，表明冷空气的爆发阶段已经结束，进入衰减阶段。总之，全国性 EPECEs 的发生包括冷空气在关键区的堆积阶段（即峰值前 6 日以前）、冷空气爆发阶段（即峰值前 6 日至峰值日）以及爆发后的衰减阶段（即峰值日后）。下面，我们将围绕这三个阶段，诊断分析其中的平流层—对流层相互作用过程。

图3 (a) 全国性 EPECEs 峰值前地面温度冷异常中心逐日移动路径, (b) EPECEs 峰值前后我国范围 (实线) 及西伯利亚冷空气堆积关键区 (45–70°N, 60–120°E) (点划线) 地面平均温度异常的时间演变。(a) 中蓝色点颜色越深表示冷异常强度越强, 红框表示西伯利亚冷空气堆积关键区。

Fig. 3 (a) Daily routes of cold anomaly centers for the 17 nationwide EPECEs before their/the peak days, (b) the temporal evolution of the mean surface air temperature anomalies in the China (solid line) and that over the Siberia key region (45–70°N, 60–120°E) (dot-dash line) from day -20 to day 10 during EPECEs. Deeper colors in (a) denote colder temperature, and the red box denotes the Siberia key region.

4 全国性 EPECEs 过程中平流层—对流层环流异常及相互作用

4.1 东亚地区对流层中层大型斜脊的建立、发展和崩溃

图4给出了 EPECEs 峰值前后对流层中层 (500hPa) 位势高度及其异常场的合成分布。由图可见, 自 EPECEs 峰值前 18 日到峰值前 12 日, 欧亚大陆北部为位势高度正异常所主导, 中心位于新地岛附近, 此时有一位势高度脊开始在乌拉尔山附近 (60–90°E) 建立 (图 4a~b)。从 EPECEs 峰值前 12 日到峰值前 6 日, 位势高度正异常北缘向东伸展, 之前沿乌拉尔山南北伸展的天气尺度高压脊逐渐演变成一条从乌拉尔山向东北方向延伸至中西伯利亚高原北侧的西南—东北向大型斜脊, 且中心强度在此期间也持续增强, 并在贝加尔湖附近形成一条东西向伸展的横槽 (图 4c), 对应着来自极区的大量冷空气在斜脊前的中西伯利亚地区积聚 (如前面图 2d 所示)。EPECEs 峰值前 6 日, 有一条中低纬短波槽在伊朗附近生成, 峰值前 3 日时与南压到我国新疆北部至贝加尔湖一带的大型横槽形成阶梯槽形势 (图 4d)。随着横槽槽后北风转为西北风, 横槽在峰值日转竖 (图 4e), 结束冷空气的堆积, 对应低层冷空气在全国范围内爆发。峰值日后, 大型斜脊及转竖低槽的强度均开始明显减弱 (图 4f), 对应影响我国冷空气的强度也相应减弱。由此我们发现, EPECEs 地面冷空气的堆积、爆发和衰亡三个阶段, 分别与对流层中层乌拉尔山至西伯利亚一带大型斜脊的建立、发展和崩溃相对应。

图4 全国性 EPECEs 峰值前后 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm, 间隔: 100 gpm) 及位势高度异常 (阴影, 单位: gpm) 的合成分布。黄色虚线表示脊线, 棕色实线表示槽线, (b) 中紫框表示斜脊形成区 (60–90°E, 60–75°N)。打点区表示合成分析通过 95% 信度检验。

Fig. 4 Composite 500 hPa geopotential height (contours, units: gpm, interval: 100 gpm) and its anomalies (shadings, units: gpm) during the 17 nationwide EPECEs. The yellow dash line denotes the ridge line and the brown solid line denotes the ridge line. The purple box in (b) denotes the broad tilted height ridge (60–90°E, 60–75°N). The dotted area indicates the composite geopotential height anomalies above 95% significance level.

4.2 平流层环流的阶段性调整

为了考察在 EPECEs 中平流层环流的变化特征,我们在图 5 中给出了对流层 500 hPa 大型斜脊形成区 ($60^{\circ}\text{--}75^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{E}$) 和平流层 10 hPa 极区 ($60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\text{--}360^{\circ}$) 平均位势高度异常的时间演变。由图可见,大型斜脊形成建立—增强发展—减弱崩溃的演变过程,恰好对应了平流层纬向平均的极涡总体强度异常偏弱—逐渐恢复—再次减弱的变化过程,且后期弱极涡事件强度要明显强于前期的事件。亦即, EPECEs 冷空气的堆积、爆发和衰亡以及对流层大型斜脊的建立、维持和崩溃过程中,对应着平流层纬向平均的极涡总体强度恢复、维持和再次减弱,说明此期间平流层环流也发生了阶段性的调整。

图 5 500hPa 斜脊形成区 ($60^{\circ}\text{--}75^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{E}$) 位势高度异常 (实线) 和极区 ($60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\text{--}360^{\circ}$) 10 hPa 位势高度异常 (点划线) 的时间演变。

Fig. 5 The temporal evolution of the 500 hPa geopotential height anomalies averaged over the broad tilted height ridge ($60^{\circ}\text{--}75^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{E}$) (solid line) and that of the 10hPa geopotential height anomalies averaged over the polar region ($60^{\circ}\text{--}90^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ}\text{--}360^{\circ}$) (dot-dash line) around the peak day of EPECEs.

上述热带外平流层环流型的阶段性调整,由 EPECEs 各阶段的平流层 10hPa 位势高度及其异常分布 (图 6) 也可以更加清楚地看到。具体地,峰值前 27 日,中高纬地区的位势高度异常场为一致的正异常,表明平流层极涡异常偏弱 (图 6a)。随后从峰值前 21 日开始,太平洋中低纬地区高度负异常中心向高纬地区伸展并增强,大西洋地区的位势高度负异常也有一定程度的增强,位势高度异常场由极区一致型正异常转变为了 2 波型异常 (图 6b)。随后,位于欧亚大陆上的位势高度正异常中心开始出现缓慢西退,到峰值前 15 日时西退到新地岛附近;同时,太平洋上空的位势高度负异常中心向北美大陆扩张,位势高度异常场又逐步转变为了 1 波型,新的正负异常中心分别位于欧亚大陆和北美大陆北部上空 (图 6c)。峰值前 9 日,1 波型位势高度异常场维持,但伴随正负异常中心的缓慢向东移动,其中的正异常中心逐步移动到西伯利亚地区上空,负异常中心则逐步移动到大西洋地区上空 (图 6d)。在峰值前 3 日至峰值日,平流层正、负高度异常中心均迅速减弱,整个中高纬地区不再表现出明显的波动型异常 (图 6e~f)。直到峰值日后,大西洋中高纬地区出现的位势高度正异常向极伸展并逐渐影响整个极区,对应极涡再次呈现极区一致减弱型 (图 6g~h)。

图 6 全国性 EPECEs 峰值前后 10 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm, 间隔: 200 gpm) 及位势高度异常 (阴影, 单位: gpm) 的合成分布。打点区表示合成分析通过 90% 信度检验。

Fig. 6 Composite 10 hPa geopotential height (contours, units: gpm, interval: 200 gpm) and its anomalies (shadings, units: gpm) during the 17 nationwide EPECEs. The dotted area indicates the composite geopotential height anomalies above 90% significance level.

为了进一步阐释 EPECEs 峰值前后平流层中高纬地区环流异常型的调整情况,图 7 给出了 $60^{\circ}\text{--}75^{\circ}\text{N}$ 纬度带平均的平流层 10 hPa 位势高度及其异常场的 Hovmöller 图。由图可见,

在地面冷空气堆积阶段前期,平流层中高纬地区位势高度异常场经历了由一致正异常型向 2 波型,再向 1 波型变化的两次环流调整,对应平流层纬向平均的弱极涡逐渐进入总体强度恢复阶段的过程(图 5 中 EPECEs 峰值前 12 日以前)。在冷空气堆积阶段后期,位势高度 1 波异常型维持并东移,对应极涡的强度变化不显著,始终处于极涡总体强度的恢复阶段(图 5 中 EPECEs 峰值前 12 日~6 日)。在冷空气爆发阶段,位势高度 1 波异常型转变为纬向一致的位势高度正异常,对应极涡由再次逐渐向弱极涡型转变(图 5 中 EPECEs 峰值前 6 日后)。

图 7 全国性 EPECEs 峰值前后 60–75°N 纬度带平均 10 hPa 位势高度(等值线,单位: gpm, 间隔: 200 gpm)及位势高度异常(阴影,单位: gpm)的合成 Hovmöller 图。打点区表示合成分析通过 90%信度检验。
Fig. 7 Composite Hovmöller diagram of 10 hPa zonal mean geopotential height (contours, units: gpm, interval: 200 gpm) and its anomalies (shadings, units: gpm) over 60–75°N during the 17 nationwide EPECEs. The dotted area indicates the composite geopotential height anomalies above 90% significance level.

4.3 平流层—对流层相互作用

a) 波活动异常垂直传播

为了说明上述平流层环流调整与对流层环流变化的联系,我们在图 8 中给出了全国性 EPECEs 峰值前后北半球 60–75°N 纬度带平均的冬季(NDJFM)气候态位势高度纬向偏差、高度异常以及波活动通量异常的高度-经度合成分布。由图可见,在冷空气堆积阶段前期,大约 EPECEs 峰值前三周以前,在对流层大西洋地区出现显著的位势高度负异常,在其下游的西欧至乌拉尔山地区有位势高度正异常,这有利于大西洋地区的高压脊位置略向东偏移;同时,在欧亚大陆东岸的位势高度负异常则有利于东亚大槽的加深(图 8a~b)。对流层波动在欧亚地区异常增强,此时平流层极涡及绕极西风处于较弱的状态(如图 5 所示),有利于对流层扰动能量向平流层上传,尤其是大西洋高压脊前部异常向上的波活动通量清楚展示了波动能量的上传。随后,平流层形成了 2 波型位势高度异常形势(图 8c~d)。EPECEs 峰值前 18 日至 12 日,随着北太平洋东岸至北美大陆西岸的平流层位势高度负异常的增强,以及东亚地区的位势高度正异常中心西退到东欧地区,平流层异常 2 波型开始向 1 波型调整。但我们注意到,异常行星波与气候态的行星波动基本呈反位相叠加,在中西太平洋地区,行星波表现出明显的异常下传信号,表明了平流层行星波活动异常偏弱,极涡强度开始恢复(图 5 中 EPECEs 峰值前 18 日~12 日)。与平流层行星波分布相联系,对流层太平洋西岸的位势高度正异常中心开始逐步向乌拉尔山附近西退并有增强,使得对流层环流异常也逐步从 2 波型向 1 波型演变,这有利于大西洋高压脊加强(图 8e~g)。

在冷空气堆积阶段后期(即 EPECEs 峰值前 12 日~6 日),平流层异常 1 波缓慢东移;对流层位势高度正异常中心也东移至中西伯利亚地区,有利于该区域高度脊的增强。同时,波动能量异常上传区也随该高压脊而相应地东移。但此时平流层极涡维持在总体强度恢复阶段(图 5 中 EPECEs 峰值前 12 日~6 日),上传背景的不同,使得波动能量上传在大西洋至西欧一带出现向下反射,对应着西伯利亚地区的平流层位势高度正异常信号的向下传播,有

利于乌拉尔山至西伯利亚地区大型斜脊的进一步发展（图 8g~i）。关于平流层通过反射上传波动的方式，向下影响对流层的机制在 Nath and Chen（2016）中有详细讨论。在冷空气爆发前后（即峰值前 3 日后），发展强盛的对流层大型槽脊的存在，代表对流层波动最强，波动能量在大型斜脊上下游地区均表现为一致的异常上传，随后平流层波动增强，极夜急流区东风异常发展，对应极涡的再次且更显著地减弱（图 5 中峰值日后）。而在对流层，乌拉尔山至西伯利亚一带发展强盛的大型斜脊则开始逐渐减弱（图 8j~l），预示着低层冷空气即将爆发。为了进一步证实各阶段中行星波活动的变化，下面我们给出北半球 60–75°N 纬度带平均的 E-P 通量垂直分量异常以及其中 1 波和 2 波分量异常的演变情况。

图 8 全国性 EPECEs 峰值前后 60–75°N 纬度带平均的冬季（NDJFM）气候态位势高度纬向偏差（等值线，单位：gpm，间隔：100 gpm）、异常（阴影，单位：gpm）及波活动通量异常（箭头，单位： m^2/s^2 ，垂直分量已被放大 100 倍，且 150 hPa 以上的通量异常已被放大 3 倍）的高度-经度合成剖面图。打点区表示合成分析通过 90%信度检验。

Fig. 8 Composite height-longitude cross section of mean zonal deviation of geopotential height in winter (NDJFM) climatology(contours, units: gpm, interval: 100 gpm), mean geopotential height anomalies (shadings, units: gpm) and mean 3-D wave flux anomalies (vectors, units: m^2/s^2 , the vertical component is enlarged 100 times and the flux anomalies over 150 hPa are enlarged 3 times)over 65°–75°N during the 17 nationwide EPECEs. The dotted area indicates the composite geopotential height anomalies above 90% significance level.

b) 行星波 1 波/2 波贡献

图 9 中给出了北半球 60–75°N 平均的 100 hPa 的 E-P 通量垂直分量总异常以及 1 波和 2 波分量异常的时间演变。由图可见，在冷空气堆积阶段前期，中高纬地区向上的 E-P 通量异常增强，其中 2 波分量上传异常增强而 1 波分量上传异常减弱，但前者的增强幅度超过后者的减弱幅度，因此的确是 2 波分量决定了该阶段 E-P 通量整体异常上传的特征（与图 8a~d 所示一致）。在冷空气堆积阶段后期，E-P 通量表现为异常下传，虽然在峰值前 15 天前后，1 波、2 波分量下传异常均较弱，对流层表现出的 1 波型的高度正异常中心出现在东欧地区，有利于乌拉尔山位势高度脊的形成（与图 8f 所示一致），但由于前期对流层上传波动以 2 波异常为主，平流层向下反射的波动在峰值前 9 日前后转变为以 2 波异常为主导，此时对应对流层中西伯利亚大型斜脊的维持（与图 8h 所示一致）。从冷空气爆发阶段开始，E-P 通量再次表现出显著的上传异常，1 波和 2 波分量均对此上传异常有贡献，但此时以 1 波的贡献为主（与图 8j~l 所示一致）。

图 9 全国性 EPECEs 峰值前后 60–75°N 纬度带平均 100 hPa 的 E-P 通量垂直异常分量，1 波和 2 波 E-P 通量垂直异常分量（单位： $10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ）的时间演变。正值为上传异常分量。

Fig. 9 The temporal evolution of the vertical component of E-P Flux anomalies, and the wavenumber-1, wavenumber-2 components (units: $10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$) at 100 hPa and averaged in 65°–75°N during the 17 nationwide

EPECEs. The positive value denotes upward wave propagation and vice versa.

总之，对应冷空气开始堆积前，对流层首先出现第一次环流调整，即随着对流层 2 波主导的行星波异常上传，平流层从 2 波型环流异常向 1 波型转变，主要体现对流层对平流层的向上影响；随后平流层极涡强度恢复并维持，对流层行星波持续上传受到抑制，在欧洲出现异常向下反射，对流层大型斜脊建立并维持，有利于冷空气在中西伯利亚地区形成堆积，主要体现平流层的向下影响；冷空气的爆发源于对流层大型横槽转竖，受对流层波动异常上传影响，平流层极涡再次减弱，该阶段主要是对流层的向上影响。

5、总结和讨论

本文通过对 EPECEs 中发生频率最高、持续时间最长、影响范围最大的全国性 EPECEs 发生、发展过程中地面冷空气、对流层槽脊系统以及平流层环流异常特征的分析，揭示了此过程中平流层和对流层之间的相互作用过程。结果表明，全国性 EPECEs 可划分为冷空气在中西伯利亚的堆积、冷空气爆发以及衰亡三个阶段。此期间平流层出现阶段性环流调整，极涡强度经历减弱、恢复并维持及再次减弱三阶段，与对流层乌拉尔山向东一直延伸至勒拿河的大型斜脊的建立、维持和崩溃相关联，伴随各阶段不同的平流层—对流层相互作用。

表 2 全国性 EPECEs 的阶段划分以及各阶段中对流层、平流层环流异常特征和平流层—对流层相互作用。
Table 2 The stage division of the nationwide EPECEs, the characteristics of circulation anomalies troposphere and stratosphere, and the stratosphere-troposphere interaction of each stage.

阶段	堆积阶段		爆发阶段	衰亡阶段
	前期	后期		
时间	峰值前 12 日前	峰值前 12-6 日	峰值前 6 日至峰值日	峰值日后
对流层	大型斜脊生成	大型斜脊发展 大型横槽生成	斜脊南压 横槽转竖	斜脊崩溃 横槽转为 东亚大槽
平流层	极涡一致减弱转高度异常 2 波，再转为 1 波	1 波缓慢东移，高度正异常移至斜脊上方	1 波快速东移 减弱	高度场由 1 波异常型转为弱极涡
相互作用	波动能量先上传后下传	波动能量下传	波动能量上传	

具体地，在冷空气堆积阶段前期，平流层极涡强度较弱，以大西洋地区异常扰动为主的热带外对流层形成 2 波型行星波异常，并上传影响平流层也调整为 2 波型环流异常。随后，平流层位于北美大陆的位势高度负异常中心加强，极涡强度开始恢复，行星波出现以 2 波为主的异常下传。东亚沿岸位势高度正异常中心逐步西退至东欧地区，平流层 2 波型环流异常调整为 1 波型，行星波异常下传减弱，对应对流层转变为 1 波型环流异常，影响对流层在欧洲大陆东部形成位势高度正异常中心，有利于乌拉尔山脊建立及来自北冰洋的冷空气在脊前出现堆积。此后，由于平流层波活动减弱，极涡强度进一步恢复并继续抑制对流层波动上传，

与波反射相联系的异常向下影响主要出现在欧洲地区, 对应对流层位势高度正异常中心向西伯利亚地区东移, 乌拉尔山脊向东北方向发展形成一条横跨整个西伯利亚的大型横槽, 从而冷空气堆积中心也相应东移至中西伯利亚地区。随着冷空气进入爆发阶段, 发展强盛的对流层大型槽脊再次引起 1 波型行星波异常上传, 平流层波动增强, 极涡再次减弱, 而此时大型斜脊东南方向的横槽与上游短波槽形成阶梯槽, 随后横槽转竖, 槽后西北气流引导脊前堆积的冷空气在我国大范围爆发。随着冷空气的爆发, 大型槽脊开始明显减弱崩溃, 低层影响我国境内的冷空气随之逐步衰亡。为了更清楚说明上述三个阶段中的平流层—对流层相互作用, 表 2 列出了各阶段对流层和平流层环流异常变化主要特征以及相互作用的特征。

总之, 本文对历年来全国性 EPECEs 的综合分析结果, 指出了发生 EPECEs 前后的平流层—对流层相互作用的基本特征, 结果进一步说明了平流层—对流层相互作用过程对把握 EPECEs 的重要性, 尽管对于不同的个例事件, 上述特征可能略有差异, 但本文结果依然为利用平流层向下影响过程, 对全国性 EPECEs 做出可能的早期预判以及预测提供了有意义的科学依据。

参考文献 (References)

- Andrews D G, McIntyre M E. 1976. Planetary waves in horizontal and vertical shear: the generalized Eliassen-Palm relation and the mean zonal acceleration[J]. *J. Atmos. Sci.*, 33(11): 2031–2048.
- Baldwin M P, Dunkerton T J. 1999. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere[J]. *J. Geophys. Res.*, 104(D24): 30937–30946.
- 布和朝鲁, 彭京备, 谢作威, 等. 2018. 冬季大范围持续性极端低温事件与欧亚大陆大型斜脊槽系统研究进展[J]. *大气科学*, 42 (3): 656–676. Bueh Cholaw, Peng Jingbei, Xie Zuowei, et al. 2018. Recent progresses on the studies of wintertime extensive and persistent extreme cold events in China and large-scale tilted ridges and troughs over the Eurasian Continent [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 42 (3): 656–676.
- Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China[J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4(4): 235–241.
- Cai M. 2003. Potential vorticity intrusion index and climate variability of surface temperature[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30(3): 1119.
- Cai M, Ren R C. 2007. Meridional and downward propagation of atmospheric circulation anomalies. Part I: Northern Hemisphere cold season variability[J]. *J. Atmos. Sci.*, 64(6): 1880–1901.
- 陈峪, 任国玉, 王凌, 等. 2009. 近 56 年我国暖冬气候事件变化[J]. *应用气象学报*, 20(5): 539–544. Chen Yu, Ren Guoyu, Wang Ling, et al. 2009. Temporal change of warm winter events over the last 56 years in China[J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 20 (5): 539–544.
- 丁一汇. 1990. 东亚冬季风的统计研究[J]. *热带气象*, 6: 119–128. Ding Yihui. 1990. A statistical study of winter monsoons in East Asia[J]. *J. Trop Meteor.* (in Chinese), 6: 119–128.
- Ding Yihui. 1990. Build-up, air mass transformation and propagation of Siberian high and its relation to cold surge in East Asia[J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 44: 281–292.
- 符仙月. 2011. 中国大范围持续性低温事件的大气环流特征[D]. 中国科学院大气物理研究所硕士学位论文.

- Fu Xian Yue. 2011. Key circulation features typical of the extensive persistent low temperature events in China[D]. M. S. thesis (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences.
- Gao W L, Duan K Q, Li S S. 2019. Spatial-temporal variations in cold surge events in northern China during the period 1960–2016[J]. *J. Geogr. Sci.*, 29(6): 971–983
- 康志明, 金荣花, 鲍媛媛. 2010. 1951–2006 年期间我国寒潮活动特征分析[J]. *高原气象*, 29(2): 420–428.
- Kang Zhiming, Jin Ronghua, Bao Yuanyuan. 2010. Characteristic analysis of cold wave in China during the period of 1951–2006[J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 29(2): 420–428.
- Kolstad E W, Breiteig T, Scaife A A. 2010. The association between stratospheric weak polar vortex events and cold air outbreaks in the Northern Hemisphere[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 136(649): 886–893.
- 孔文文, 胡永云. 2014. 平流层 NAM 异常对乌拉尔山阻塞高压的影响[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 50(3): 445–455.
- Kong Wenwen, Hu Yongyun. 2014. Influence of stratospheric NAM anomalies on the Ural Blocking High[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis: Natural Science (in Chinese)*, 50(3): 445–455.
- 李琳, 李崇银, 谭言科, 等. 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[J]. *地球物理学报*, 53(7): 1529–1542.
- Li Lin, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2010. Stratospheric sudden warming impacts on the weather/Climate in China and its role in the influences of ENSO[J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 53(7): 1529–1542.
- 李艳, 马敏劲, 王式功, 等. 2012. 阻塞高压与低温持续性降水之间的关系[J]. *干旱气象*, 30(4): 539–545.
- Yan, Ma Minjin, Wang Shigong, et al. 2012. Analysis of relationship between blocking highs and consecutive precipitation during the durative low temperature, snowfall and freezing period in China[J]. *J. Arid Meteor. (in Chinese)*, 30(4): 539–545.
- 刘毅, 赵燕华, 管兆勇. 2008. 平流层环流异常对 2008 年 1 月雪灾过程的影响[J]. *气候与环境研究*, 13(4): 548–555.
- Liu Yi, Zhao Yanhua, Guan Zhaoyong. Influences of stratospheric circulation anomalies on tropospheric weather of the heavy snowfall in January 2008[J]. *Climatic Environ. Res.*, 13(4): 548–555.
- Nath D, Chen W, Lin W, et al. 2014. Planetary wave reflection and its impact on tropospheric cold weather over Asia during January 2008[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31(4): 851–862.
- Nath D, Chen W. 2016. Impact of planetary wave reflection on tropospheric blocking over the Urals–Siberia region in January 2008[J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 33(3): 309–318.
- Peng Jingbei, Bueh Cholaw. 2011. The definition and classification of extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 4(5): 281–286.
- Peng J B, Bueh C. 2012. Precursory signals of extensive and persistent extreme cold events in China[J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 5(3): 252–257.
- Perlwitz J, Harnik N. 2003. Observational evidence of a stratospheric influence on the troposphere by planetary wave reflection[J]. *J. Climate*, 16(18): 3011–3026.
- Plumb R A. 1985. On the three-dimensional propagation of stationary waves[J]. *J Atmos. Sci.*, 42(3): 217–229.
- Plumb R A, Semeniuk K. 2003. Downward migration of extratropical zonal wind anomalies[J]. *J. Geophys. Res.*, 108(D7): 4223.
- 仇永炎. 1985. 中期天气预报. 北京: 科学出版社.
- Qiu Yongyan. 1985. Medium-range forecast [M]. Beijing: Science Press.
- Ren R C, Cai M. 2007. Meridional and vertical out-of-phase relationships of temperature anomalies associated with

the Northern Annular Mode variability[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34(7): L07704.

施宁, 布和朝鲁. 2015. 中国大范围持续性极端低温事件的一类平流层前兆信号[J]. *大气科学*, 39 (1): 210–220. Shi Ning, Bueh Cholaw. 2015. A specific stratospheric precursory signal for the extensive and persistent extreme cold events in China [J]. *Chinese J. Atmos. Sci.* (in Chinese), 39 (1): 210–220.

陶诗言. 1957. 东亚冬季冷空气活动的研究[G]. 见: 中央气象局编. 短期预报手册. Tao Shiyan. 1957. A study of activities of cold airs in East Asian winter[G]. *Handbook of Short-term Forecast* (in Chinese), Chinese Meteorological Administration.

Thompson D W, Wallace J M. 2001. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode[J]. *Science*, 293(5527): 85–89.

Thompson D W, Baldwin M P, Wallace J M. 2002. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: implications for prediction[J]. *J. Climate*, 15(12): 1421–1428.

Wang L, Chen W. 2010. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009[J]. *Geophys. Res. Lett.*, 37(9): 707–711.

Woo S H, Kim B M, Kug J S. 2015. Temperature variation over East Asia during the lifecycle of weak stratospheric polar vortex[J]. *J. Climate*, 28(14): 5857–5872.

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[J]. *地球科学进展*, 24(3): 338–348. Xiang Chunyi, He Jinhai, Ren Rongcai. 2009. Stratospheric oscillation and stratosphere-troposphere coupling in 2007/2008 winter[J]. *Adv. Earth Sci.* (in Chinese), 24(3): 338–348.

Xie Z W, Bueh C. 2017. Blocking features for two types of cold events in East Asia[J]. *J. Meteor. Res.*, 31(2): 309–320.

阎琦, 崔锦, 赵梓淇, 等. 2019. 辽宁“11·24”强寒潮过程分析[J]. *沙漠与绿洲气象*, 13(1): 39–43. Yan Qi, Cui Jin, Zhao Ziqi, Li Shuang, et al. 2019. Causes of the strongest cold wave process over Liaoning Province on November 24th of 1999[J]. *Desert Oasis Meteor.* (in Chinese), 13(1): 39–43.

叶笃正. 1962. 北半球冬季阻塞形势的研究[M]. 北京: 科学出版社. Ye Duzheng. 1962. Study on the situation of blocking in the Northern Hemisphere winter [M]. Beijing: Science Press.

Yu Y Y, Cai M, Shi C H, et al. 2018. On the linkage among strong stratospheric mass circulation, stratospheric sudden warming, and cold weather events[J]. *Mon. Wea. Rev.*, 146: 2717–2739.

张培忠, 陈光明. 1999. 影响中国寒潮冷高压的统计研究. *气象学报*[J], 57(4): 493–501. Zhang Peizhong, Chen Guangming. 1999. A statistical analysis of the cold wave high which influences on China[J]. *Acta Meteor. Sin.* (in Chinese), 57(4): 493–501.

朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法 (第四版) [M]. 北京: 气象出版社, 266pp. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2007. *Principle and Methods of Synoptic Meteorology* (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 266pp.

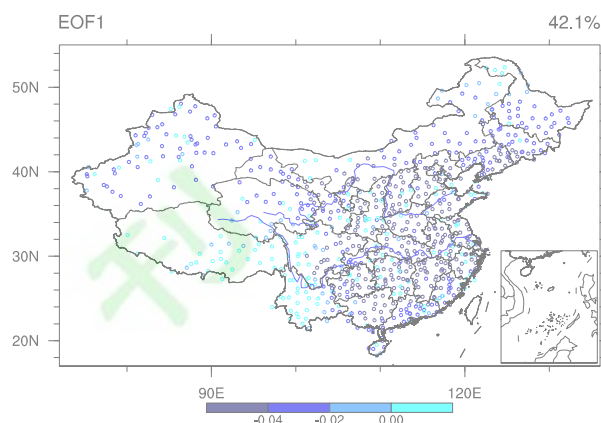


图1 40个EPECEs峰值日我国824站标准化日均气温异常EOF第一特征向量分布。其中蓝空心圆表示冷异常站点，颜色越深表示异常的绝对值越大。

Fig. 1 The spatial pattern of the first leading EOF eigenvector of the normalized daily mean temperature anomalies at 824 stations in China on the 40 EPECEs peak days. Blue open circles represent the extremely cold stations, and the deeper color the colder of the stations.

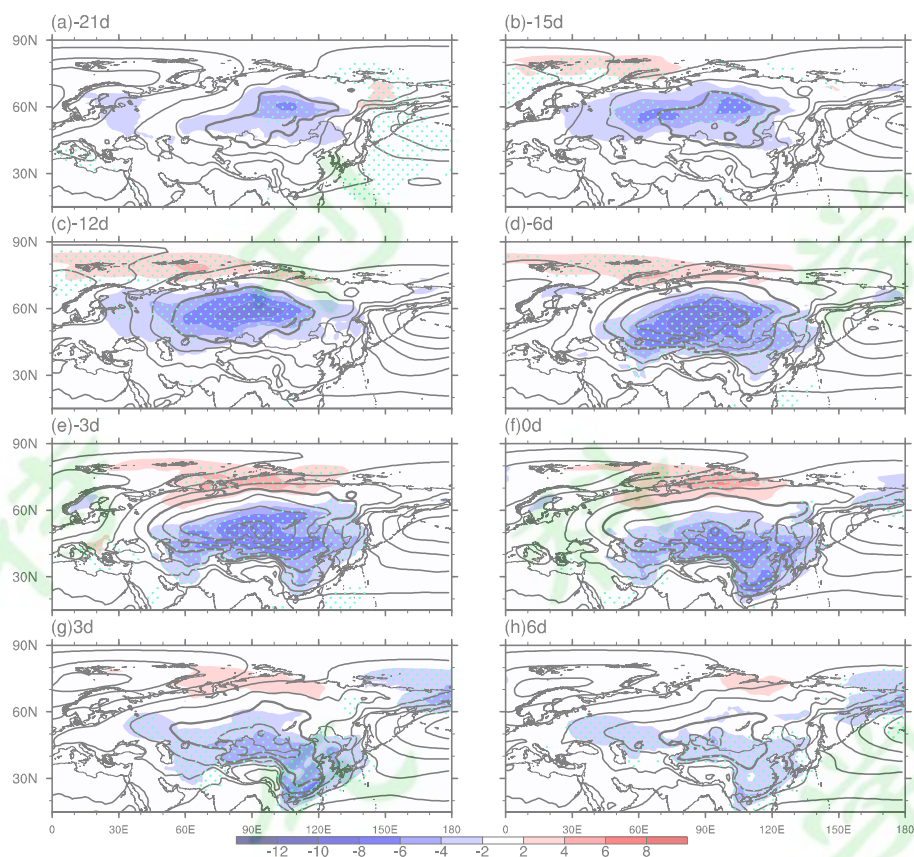


图2 全国性EPECEs峰值日(0 d)前后海平面气压(等值线, 单位: hPa, 间隔 5 hPa)及地表温度异常(阴影, 单位: K)的合成分布。粗实线为 1030 hPa 等值线, 打点区表示地表温度异常合成分析通过 95% 信度检验。

Fig. 2 Composite sea level pressure (contours, units: hPa, interval: 5 hPa) and surface air temperature anomalies (shadings, units: K) for the 17 nationwide EPECEs. The bold line is the 1030 hPa isoline. The dotted area indicates the composite surface air temperature anomalies above 95% significance level.

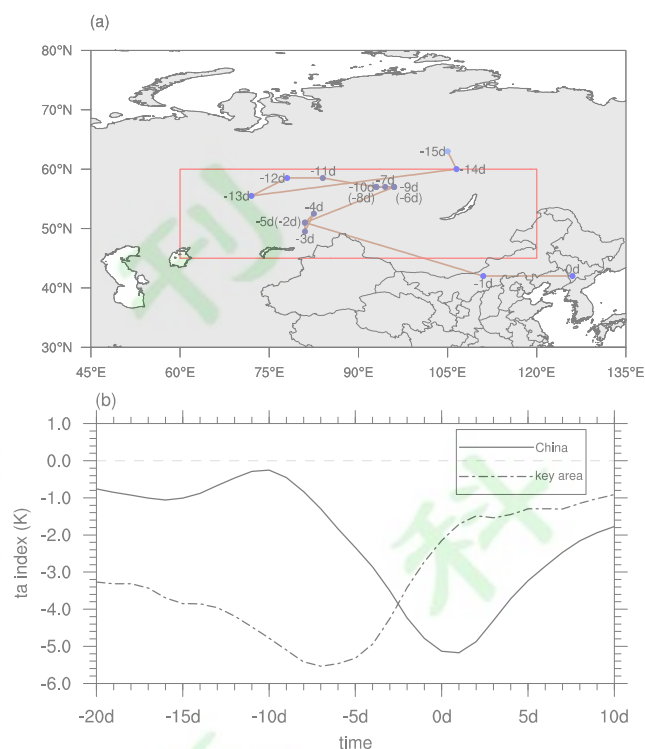


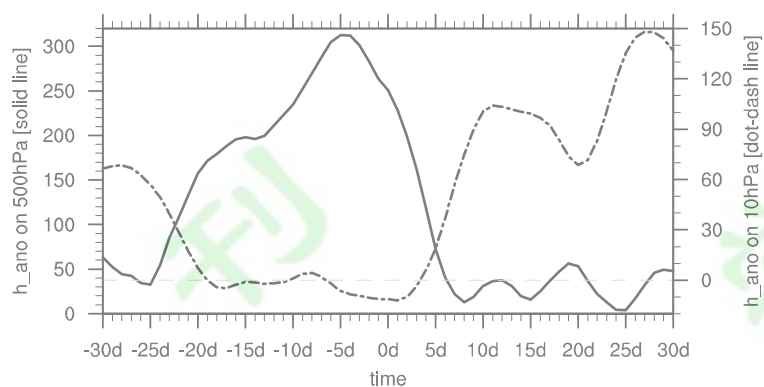
图3 (a) 全国性 EPECEs 峰值前地面温度冷中心逐日移动路径, (b) EPECEs 峰值前后我国范围 (实线) 及西伯利亚冷空气堆积关键区 (45–70°N, 60–120°E) (点划线) 地面平均温度异常的时间演变。(a) 中蓝色点颜色越深表示冷异常强度越强, 红框表示西伯利亚冷空气堆积关键区。

Fig. 3 (a) Daily routes of cold centers for the nationwide type of EPECEs before its peak day, (b) the temporal evolution of the mean surface air temperature anomalies in the China (solid line) and that over Siberia key region (45–70°N, 60–120°E) (dot-dash line) from day -20 to day 10 during EPECEs. Deeper colors in (a) denote colder temperature, and the red box denotes the Siberia key region.



图 4 全国性 EPECEs 峰值前后 500 hPa 位势高度（等值线，单位：gpm，间隔：100 gpm）及位势高度异常（阴影，单位：gpm）的合成分布。黄色虚线表示脊线，棕色实线表示槽线，（b）中紫框表示斜脊形成区（60-90°E，60-75°N）。打点区表示合成分析通过 95%信度检验。

Fig. 4 Composite 500 hPa geopotential height (contours, units: gpm, interval: 100 gpm) and its anomalies (shadings, units: gpm) during the 17 nationwide EPECEs. The yellow dash line denotes the ridge line and the brown solid line denotes the the ridge line. The purple box in (b) denotes the broad tilted height ridge (60-90°E, 60-75°N).The dotted area indicates the composite geopotential height anomalies above 95% significance level.



565

566 图 5 500 hPa 斜脊形成区 (60-90°E, 60-75°N) 位势高度异常 (实线) 和 10 hPa 极区 (60-90°N) 位势高度
567 异常 (点划线) 的时间演变。

568 Fig. 5 The temporal evolution of the averaged 500 hPa geopotential height anomalies in the broad tilted height ridge
569 (60-90°E, 60-75°N) (dot-dash line) and that of the averaged polar (60-90°N) geopotential height anomalies at 10
570 hPa (solid line) around the peak day of EPECEs.

571

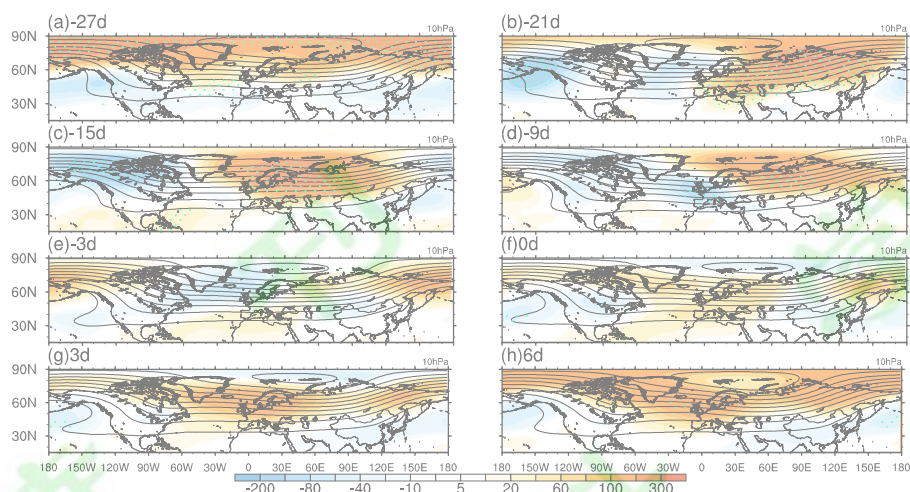
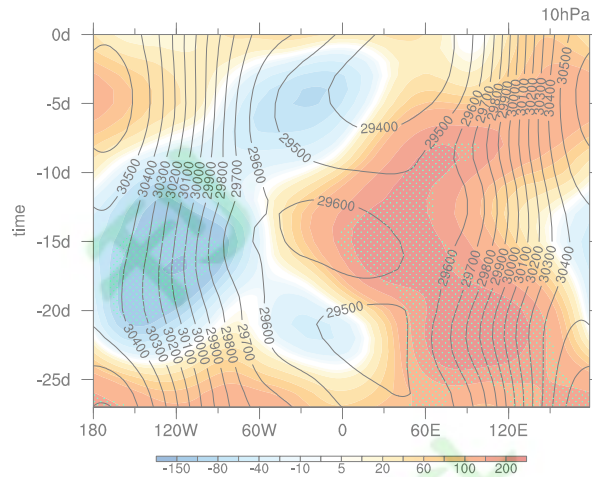


图 6 全国性 EPECEs 峰值前后 10 hPa 位势高度（等值线，单位：gpm，间隔：200 gpm）及位势高度异常（阴影，单位：gpm）的合成分布。打点区表示合成分析通过 90%信度检验。

Fig. 6 Composite 10 hPa geopotential height (contours, units: gpm, interval: 200 gpm) and its anomalies (shadings, units: gpm) during the 17 nationwide EPECEs. The dotted area indicates the composite geopotential height anomalies above 90% significance level.



579

580 图 7 全国性 EPECEs 峰值前后 60-75°N 纬度带平均 10 hPa 位势高度（等值线，单位：gpm，间隔：100 gpm）

581 及位势高度异常（阴影，单位：gpm）的合成 Hovmöller 图。打点区表示合成分析通过 90%信度检验。

582 Fig. 7 Composite Hovmöller diagram of 10 hPa zonal mean geopotential height (contours, units: gpm, interval: 100

583 gpm) and its anomalies (shadings, units: gpm) over 65°–75°N during the 17 nationwide EPECEs. The dotted area

584 indicates the composite geopotential height anomalies above 90% significance level.

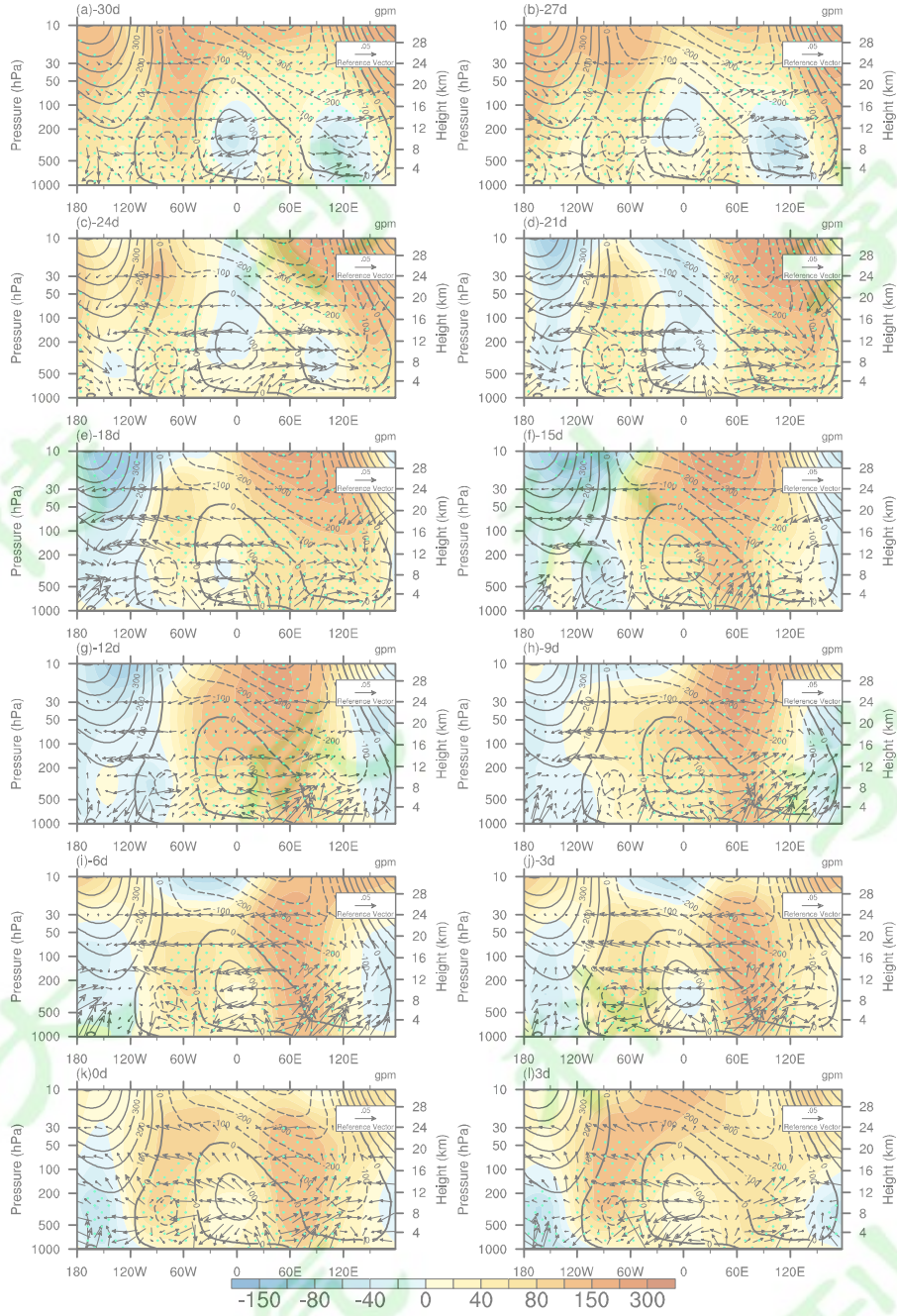
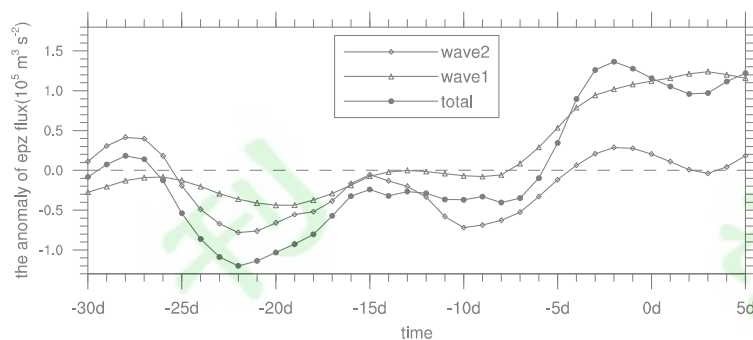


图 8 全国性 EPECEs 峰值前后 60–75°N 纬度带平均的冬季 (NDJFM) 气候态位势高度纬向偏差 (等值线, 单位: gpm, 间隔: 100 gpm)、异常 (阴影, 单位: gpm) 及波活动通量异常 (箭头, 单位: m^2/s^2 , 垂直分量已被放大 100 倍, 且 150 hPa 以上的通量异常已被放大 3 倍) 的高度-经度合成剖面图。打点区表示合成分析通过 90% 信度检验。

Fig. 8 Composite height-longitude cross section of mean zonal deviation of geopotential height in winter (NDJFM) climatology (contours, units: gpm, interval: 100 gpm), mean geopotential height anomalies (shadings, units: gpm) and mean 3-D wave flux anomalies (vectors, units: m^2/s^2 , the vertical component is enlarged 100 times and the flux anomalies over 150 hPa are enlarged 3 times) over 65°–75°N during the 17 nationwide EPECEs. The dotted area indicates the composite geopotential height anomalies above 90% significance level.



595

596 图9 全国性 EPECEs 峰值前后 60–75°N 纬度带平均的 100 hPa E-P 通量垂直异常分量，1 波和 2 波 E-P 通
597 量异常分量（单位： $10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$ ）的时间演变。正值为上传异常分量。

598 Fig. 9 The temporal evolution of the vertical component of E-P Flux anomalies, and the wavenumber-1,
599 wavenumber-2 components (units: $10^5 \text{ m}^3/\text{s}^2$) at 100 hPa and averaged in 65°–75°N during the 17 nationwide
600 EPECEs. The positive value denotes upward wave propagation and vice versa.

601