1	2020/2021 年冬季三次全国型强冷空气过程及其低频特征
2	袁媛1 申乐琳1 晏红明2* 洪洁莉1
3	1. 国家气候中心,气候研究开放实验室,北京 100081
4	2. 云南省气候中心,昆明 650032
5	摘要 2020/2021 年冬季,东亚地区的强冷空气过程多次爆发,持续强降温及伴随
6	的大风、雨雪天气给人民生产生活造成了严重影响。利用日尺度大气环流格点数
7	据和地面气温站点资料,从次季节变化角度揭示了西伯利亚高压的低频振荡特征
8	及对三次全国型强冷空气过程(2020年12月13-15日、2020年12月29日-2021
9	年1月1日、2021年1月6-8日)的重要影响。研究显示, 2020/2021年冬季,
10	西伯利亚高压和中国东部地区气温变化都表现出明显的准双周(10-30d)和 30-
11	60d低频振荡特征,并且低频特征在冬季前期明显强于冬季后期。但是,三次强
12	冷空气过程中低频振荡的特征各不相同,其中,第一次过程中准双周振荡有显著
13	的正贡献,但 30-60 d 低频振荡为负贡献;而第二次和第三次过程兼有准双周和
14	30-60d 低频振荡的共同作用,尤其第三次过程处于这两个低频波段的最强时期,
15	这也导致第三次冷空气过程的降温幅度最大、低温影响范围最广,西伯利亚高压
16	也发展最强。10-30 d 低频西伯利亚高压的增强超前一候(5 天)左右对冷空气
17	爆发和中国东部地区强降温均有显著的负相关关系,其中与冷空气爆发的关系超
18	前 1-2 天最显著,与中国东部地区低温的关系超前 2-3 天最为显著。
19	关键词 西伯利亚高压 准双周 30~60d 低频振荡 全国型强冷空气 低温事件
20	Three Cold Surges in China during the Winter of 2020/2021 and Their
21	Low-frequency Features
22	YUAN Yuan <sup>1</sup> , SHEN Lelin <sup>1</sup> , YAN Hongming <sup>2</sup> , and HONG Jieli <sup>1</sup>
23	1. Laboratory of Climate Studies, National Climate Center, CMA, Beijing 100081, China
24	2. Yunnan Climate Center, Kunming 650032, Yunnan, China
25	
26	Abstract During the winter of 2020/2021, strong cold air processes broke out

资助课题:国家自然科学基金项目(U1902209,41776039)共同资助

\*通讯作者:晏红明,女,1966年出生,主要从事短期气候预测研究。E-mail: yanhongming2013@163.com

第一作者: 袁媛, 女, 1981 年出生, 主要从事短期气候预测研究。E-mail: yuany@cma.gov.cn

27 frequently in East Asia, which caused persistently low temperature, strong wind, heavy snow and rainfall, as well as serious impacts on people's production and life in China. 28 Using daily atmospheric circulation grid data and station temperature data, this paper 29 revealed the low-frequency characteristics of the Siberian High (SH) and its significant 30 impact on the three strong cold surges in China (Dec 13-15 2020, Dec 29 2020-Jan 1 31 2021, and Jan 6-8 2021). Both the SH and the temperature in eastern China showed 32 significant quasi-biweekly (10-30d) and 30-60d low-frequency oscillation (LFO) 33 34 features, which were stronger in the earlier winter than in the later winter of 2020/2021. However, the specific LFO features were totally different among three cold surges. In 35 the first one, the quasi-biweekly oscillation had a significant positive contribution, 36 while the 30-60d LFO showed a negative contribution. However, the second and third 37 cold surges had a combined effect of quasi-biweekly and 30-60d LFO. In particular, the 38 third one was in the strongest period of the above two LFO waves, which also lead to 39 the largest cooling range and the widest range of low temperature in China, and the 40 strongest development of SH. The enhancement of the quasi-biweekly SH had a 41 42 significant impact on the cold air outbreak and the strong cooling in eastern China by about one pentad (5 days) ahead, with its impact on the cold air outbreak (low 43 temperature in eastern China) the most significant by 1-2 (2-3) days earlier. 44

Keywords: Siberian High, quasi-biweekly oscillation (10-30d), 30-60d low-frequency
oscillation, cold surge, low temperature event

47 1 引言

2020/2021 年冬季前期(2020 年 12 月至 2021 年 1 月上旬),中国极端冷事 48 件频繁发生。其中,2021年1月6-8日,中国中东部大部地区遭遇全国型寒潮袭 49 击,过程降温幅度大、影响范围广、低温极端性强、大风持续时间长;华北、黄 50 淮等地 50 余个国家级气象观测站的最低气温达到或突破建站以来最低纪录,北 51 京大部地区最低气温在-24~-18℃,南郊观象台最低气温达-19.6℃,为 1951 年 52 以来第3低;北方部分地区出现中到大雪,局地暴雪,南方多省出现低温雨雪冰 53 冻天气。但在 2021 年 2 月 19-21 日,中国中东部大部地区气温回暖迅速,华北 54 南部及其以南大部地区日最高气温普遍超过 20℃,全国超过 25%的市县(621 个) 55

日最高气温突破2月历史极值(引自国家气候中心《重要气候信息》)。一方面, 56 2020/2021 年冬季发展达到盛期的拉尼娜事件和 2020 年秋季异常偏少的北极海 57 冰减弱了赤道-极地温差,为该年冬季前期的极端冷事件频发和欧亚中高纬典型 58 的经向环流提供了重要的气候背景(Lu et al., 2021; Wang et al., 2021; Zheng et 59 al., 2021)。另一方面, 中高纬大气环流的阶段性调整是造成上述气温剧烈转折 60 的直接原因,主要包括乌拉尔山阻塞前期活跃、后期崩溃,西伯利亚高压和东亚 61 冬季风前期异常偏强、后期明显减弱,北极极涡主体前期偏向东半球导致冷空气 62 异常活跃,而后期偏向西半球导致欧亚中高纬纬向环流发展持续等(韩荣青等, 63 2021)。除此之外, 2020/2021年冬季气候异常的大气季节内低频振荡特征也值得 64 我们进一步关注。 65

大气低频振荡(Low-Frequency Oscillation, LFO)首先由 Madden 和 Julian 66 (1971)发现于热带地区,是热带大气在季节内时间尺度上的主要变化特征,而 67 赤道附近地区的大气季节内振荡又常被称为 MJO (Madden-Julian Oscillation)。 68 后来许多研究表明不仅在热带地区(Madden and Julian, 1972; Wen et al., 2010), 69 而且在副热带(李崇银, 1990; Mao et al., 2010; Wen et al., 2011)和中高纬 70 71 (Anderson and Rosen, 1983; Li and Wu, 1990; 肖子牛和李崇银, 1992), 甚至 全球大气都存在低频振荡的周期变化现象(李崇银和张勤,1991;李崇银等,1995; 72 李崇银等, 2003; Kikuchi and Wang, 2009; Yang, 2009)。然而, 全球大气以热 73 带地区和高纬度地区的低频振荡最为显著和重要,并且中高纬(尤其是高纬度) 74 地区的 LFO 比热带地区活动强,且在冬半年更强(李崇银, 1991;李崇银等, 75 1995; 邱明宇等, 2006)。关于热带大气 LFO 对东亚夏季风活动 (林爱兰, 1998; 76 琚建华等,2005)和季风降水(琚建华和赵尔旭,2005;梁萍等,2008;占瑞芬 77 等,2008; Zhang et al., 2009)的影响已有相当多的研究成果。近些年的研究表 78 明,东亚冬季风活动和欧亚中高纬大气环流系统(如极涡、东亚大槽、乌拉尔山 79 阻塞、西伯利亚高压、东北冷涡等)也具有显著的低频振荡特征,并且它们与冬 80 季寒潮爆发、持续性低温、雨雪冰冻灾害等天气气候事件有密切关系(朱毓颖和 81 江静, 2013; 杨双艳等, 2014; 齐冬梅等, 2015; 刘樱等, 2016; Yao et al., 2016; 82 谭桂容和张文正, 2018; 李文慧和谭桂容, 2020; 马宁等, 2020; 杨秋明, 2021)。 83 一些个例分析更加清楚地揭示了中高纬大气 LFO 对不同区域冬季气候异常的重 84

要影响: 2004/2005 年冬季乌拉尔山阻塞 10-20d 低频波动导致两次强寒潮天气过 85 程(马晓青等, 2008), 2007/2008 年冬季西伯利亚高压 10-20d 和 30-60d 低频振 86 荡导致云南持续低温(任菊章等,2015),2008年初中国南方低温雨雪冰冻天气 87 与 30-60d 和 10-20d 低频振荡及 MJO 活动密切相关(马宁等, 2011; 李艳等, 88 2018), 2010/2011 年冬季东亚冬季风准双周低频振荡导致西南地区冬季持续低温 89 (齐冬梅等, 2016), 2011/2012 年冬季寒潮和强降温过程均表现出 10-30d 的低 90 频振荡(苗青等, 2016a), 2012/2013 年冬季中国东北极端低温事件受到北半球 91 中高纬环流 10-30d 低频波列的重要影响(苗青等, 2016b),等等。 92

前面提到, 2020/2021 年冬季前期频繁的强冷空气过程给人民生产生活造成 93 了严重影响,我们及时分析了大尺度环流背景及拉尼娜和北极海冰等外强迫因子 94 (Zheng et al., 2021),以及该年冬季前期和后期冷暖转折的大气环流异常和阶段 95 性变化特征(韩荣青等, 2021),特别强调在 2020/2021 年冬季前期,欧亚中高纬 96 呈现典型的经向型环流特征,乌拉尔山高压脊异常偏强、阻塞活跃,东亚大槽强 97 度偏强、位置偏西,北极涛动呈现持续负位相、且极涡偏移至东北亚地区,地面 98 西伯利亚高压持续偏强,由此共同导致前冬东亚冬季风偏强、中国中东部大部气 99 温较常年同期明显偏低。众所周知, 西伯利亚高压对东亚冬季风环流的发展维持 100 具有重要作用(Ding and Krishnamurti, 1987; 丁一汇等, 1991; 谢安等, 1992), 101 其强弱对中国冬季气温变化有显著的直接影响(郭其蕴, 1994; 郭其蕴等, 2002; 102 王遵娅和丁一汇,2006; 孙晓娟等,2010; 蓝柳茹和李栋梁,2016), 因此也是 103 国家气候中心监测预测业务中的一个重要的东亚冬季风指标。本文将延续前期的 104 工作,从大气季节内低频振荡角度重点分析西伯利亚高压的次季节变化特征及其 105 对这一特殊冬季几次全国型强冷空气过程的影响,以期更加全面清晰地认识 106 2020/2021 年冬季中国气温冷暖转折在不同时间尺度上的变化特征和物理机理, 107 为季节和次季节短期气候预测提供更多有价值的科学信息。 108

109 2 数据和方法

110 本文用到的数据包括:1)全国逐日台站气温资料取自中国气象局国家气象
111 信息中心发布的《中国国家级地面气象站基本气象要素日值数据集(V3.0)》(任
112 芝花等,2012),该数据集已在业务和科研中得到广泛应用;2)日尺度大气环流
113 再分析资料来自美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR),包

114 括海平面气压、风场、位势高度场、地面 2m 气温等,分辨率为 2.5°×2.5° (Kistler
115 等,2001)。上述所有数据选取 1981-2010 年平均作为常年值计算得到相应的距平
116 场。本文中冬季指的是当年 12 月至次年 2 月,即 2020/2021 年冬季指的是 2020
117 年 12 月 1 日至 2021 年 2 月 28 日的平均。

本文中,西伯利亚高压指数定义为海平面气压在西伯利亚高压监测区(40° 118 -60°N, 80°-120°E)的区域面积加权平均值(Gong et al., 2001; Wu and Wang, 2002)。 119 本文所使用的分析方法包括功率谱周期分析、小波变换、傅里叶滤波、超前滞后 120 相关等。为剔除滤波和周期分析等对边界可能造成的影响,将冬季时间序列扩展 121 至 2020 年 11 月 1 日至 2021 年 3 月 31 日,并去除其季节变化趋势。在计算日指 122 数序列的超前滞后相关时,由于其较高的自相关性,我们重新计算了有效自由度, 123  $N_{dof} = N(1-r_1r_2)/(1+r_1r_2)$ ,其中 $N_{dof}$ 是有效自由度, $r_1$ 及 $r_2$ 是每一个时间序列的 124 超前滞后一个时次的自相关系数,再通过 $t = r \sqrt{N_{dof} - 2} / \sqrt{1 - r^2}$ 进行检验(Bretherton 125 et al., 1999)。另外,参考谭桂容和张文正(2018),将低频滤波序列的方差除以 126 原始序列的方差再乘以100作为低频方差贡献的百分比。 127

## 128 3 2020/2021 年冬季中国气温次季节变化与三次全国型强冷空气过程

2020/2021 年冬季,中国陆地平均气温为-2.5℃,较常年同期(-3.4℃) 偏高 129 0.9℃;空间分布上,除了新疆北部、内蒙古中东部和东北北部气温较常年同期偏 130 低外,全国其余大部地区气温较常年同期偏高 1~2℃。但在次季节时间尺度上, 131 该年冬季气温经历了前冬极冷、后冬极暖的剧烈转折(图见韩荣青等,2021)。 132 从中国平均气温的逐日演变可以看出,冬季有三次明显的强降温过程,气温分别 133 在 2020 年 12 月 15 日、2020 年 12 月 30 日和 2021 年 1 月 7 日降到谷值(图 1 134 中的蓝色三角形)。国家气候中心监测显示,2020/2021年冬季中国共发生9次不 135 同强度的冷空气过程(中国气象局, 2017),其中有三次全国型强冷空气过程就 136 分别发生在 2020 年 12 月 13-15 日 (P1), 2020 年 12 月 29 日-2021 年 1 月 1 日 137 (P2)和2021年1月6-8日(P3)(分别对应了图1中气温的三次波谷),而后 138 两次也是这个冬季仅有的两次全国型寒潮天气过程(韩荣青等, 2021)。从这三 139 次冷空气过程的最大过程降温幅度和气温距平的空间分布来看,这三次冷空气过 140 程影响范围广、强度大,中国除青藏高原、四川西部和云南等地外其余大部地区 141 都有明显降温且气温均较常年同期明显偏低。其中,降温幅度在8℃以上的区域 142

143 都主要位于中国中东部大部地区(图 2 左栏),并且该区域的气温距平也基本低
144 于-3℃(图 2 右栏)。综合这三次全国型强冷空气过程影响的降温幅度最大的区
145 域及低温最显著的区域,选取中国东部地区 20-43°N, 105-123°E 作为关键区域



IN



155

156 图 2 2020/2021 年冬季三次全国型强冷空气过程中全国最大过程降温幅度(左栏)和气温
157 距平(右栏)空间分布(红框表示中国东部地区 20-43°N, 105-123°E)。(a)(b)为第一
158 次过程 P1(全国型强冷空气,2020年12月13-15日),(c)(d)为第二次过程 P2(全国
159 型寒潮,2020年12月29日-2021年1月1日),(e)(f)为第三次过程 P3(全国型寒潮,
160 2021年1月6-8日),单位: ℃

Fig. 2 Spatial distribution of the maximum temperature drop (left column) and the temperature anomaly (right column) for the three cold surges in China during the winter of 2020/2021 [red boxes indicate the region of eastern China (20-43° N, 105-123° E)]. (a) and (b) for the first cold surge (P1, 13<sup>th</sup>-15<sup>th</sup> Dec 2020), (c) and (d) for the second cold surge (P2, 29<sup>th</sup> Dec 2020-1<sup>st</sup> Jan 2021), and (e) and (f) for the third cold surge (P3, 6<sup>th</sup>-8<sup>th</sup> Jan 2021), units: °C

166 4 西伯利亚高压的低频变化及对强冷空气过程的影响

## 167 4.1 西伯利亚高压和区域气温的低频变化特征

图 1a 在全国平均气温逐日演变的基础上叠加了西伯利亚高压指数的逐日变 168 化(图1中红色曲线),可以清楚的看出,与气温变化的三次谷值相对应,西伯 169 利亚高压有三次峰值,分别发生在 2020 年 12 月 13 日、2020 年 12 月 28 日、 170 2021年1月5日(图1中红色圆点)。从这三次过程来看,西伯利亚高压的每一 171 次峰值刚好超前于气温的每一次谷值大约2天。为了进一步证明这个关系,计算 172 了该年冬季西伯利亚高压指数与中国平均气温的超前滞后相关,在重新计算样本 173 有效自由度的情况下,西伯利亚高压从超前气温6天开始它们的负相关系数能够 174 通过 95%的显著性检验, 在超前 2 天时相关系数 (-0.77) 的绝对值达到最大 (图 175 3 中黑色曲线)。具体看西伯利亚高压与中国东部关键区域气温(站点气温平均) 176 的超前滞后关系,可以看出西伯利亚高压的增强对东部地区气温的降低有超前大 177 约4天左右的显著相关,并且也是在超前2天时达到最强(负相关系数的绝对值 178 达到最大,图3中蓝色曲线),其负相关系数的绝对值较全国平均气温的情况略 179 偏大,表明西伯利亚高压对中国东部地区气温的影响更为显著。 180



181 182

183

184 185

图 3 2020/2021 年冬季西伯利亚高压距平指数(SHI)分别与全国平均气温距平 (T\_China,黑色实线)和中国东部地区平均气温距平(T\_EastChina,蓝色实线)的超前 滞后相关,红色实线同蓝色实线,但为准双周(10-30d)低频尺度上的相关系数,横坐标 负(正)值表示西伯利亚高压超前(滞后)气温变化的天数



188 2020/2021. The red line is similar to the blue line, but for the quasi-biweekly (10-30d) oscillation.

The negative (positive) value on the X-axis indicates the days that the SHI leads (lags) the temperature.

为排除天气尺度波动的影响,对西伯利亚高压距平指数及中国东部关键区域 191 的气温距平序列都进行 5d 滑动平均,再做小波变换。可以看出,西伯利亚高压 192 指数(图 4a)和东部地区气温(图 4b)的低频变化表现出相似的特征,不仅都 193 包括准双周(10-30d)和 30-60d 低频变化,并且这两个波段的低频强度在 2020 194 年 12 月-2021 年 1 月较强, 而在 2021 年 2 月明显偏弱。 对比准双周和 30-60d 低 195 频波动的贡献大小,从表1可以看出:对于2020/2021年冬季平均情况来说,西 196 伯利亚高压准双周和 30-60d 的方差贡献分别为 32.5%和 24.0%,表明这两个波段 197 的贡献大小相差不大,但准双周的贡献略大,并且两个波段的累计方差贡献超过 198 50%,更进一步证明了该年冬季西伯利亚高压的低频特征非常显著,且兼有准双 199 周和 30-60d 低频特征; 而中国东部地区气温的准双周低频振荡的方差贡献明显 200 大于 30-60d 低频振荡,尽管这两个波段的累计方差贡献没有达到 50%,但其准 201 双周的方差贡献与西伯利亚高压的情况更为接近。 202



203

204	图 4 2020/2021 年冬季(a) 西伯利亚高压距平指数和(b) 中国东部地区气温距平序列的
205	小波变换
206	Fig. 4 The wavelet transform of (a) the SHI and (b) the temperature anomaly in eastern China
207	
208	表 1 2020/2021 年冬季西伯利亚高压和中国东部地区气温的准双周(10-30d)和 30-60d 低
209	频方差贡献
210	Table 1 Variance contribution of the quasi-biweekly (10-30d) and 30-60d low frequency
211	oscillation variability of the SHI and the temperature anomaly averaged in eastern China during
212	the winter of 2020/2021
	准双国 (10,204) 30,604

		TE/X/词(10-30d)	50-00 <b>u</b>
she	西伯利亚高压	32.5%	24.0%
(6)	东部地区气温	22.6%	7.1%

图 5 给出西伯利亚高压指数和中国东部地区气温的逐日演变以及它们准双 213 周和 30-60d 滤波的结果,并将前面提到的三次全国型强冷空气过程(P1、P2、 214 P3)用灰色柱状标注在图 5 中。对比可以看出, P1 过程中西伯利亚高压处于准 215 双周低频波动的波峰和 30-60d 低频波动的波谷 (图 5a), 东部地区气温变化则处 216 于准双周低频波动的波谷和 30-60d 低频波动的上升期(图 5b)。这表明 P1 过程 217 中准双周振荡对西伯利亚高压的增强和东部地区的强降温都有正向贡献,而 30-218 60d 低频振荡的贡献是反向的。P2 和 P3 过程的发生时间比较接近,从低频波动 219 来看,西伯利亚高压在 P2 和 P3 过程都处于准双周和 30-60d 波动的正位相,其 220 中, P3 过程的西伯利亚高压处于准双周和 30-60d 波动的波峰, 而 P2 过程处于 221 准双周和 30-60d 的发展阶段(图 5a)。因此,在 P2 和 P3 过程中,由于兼有准双 222 周和 30-60d 两个低频波段的共同作用,导致这两个过程中的西伯利亚高压强度 223 明显强于仅有准双周作用的 P1 过程中西伯利亚高压的强度; 而对比 P2 和 P3, 224 同时处于准双周和 30-60d 正位相峰值时期的 P3 过程中的西伯利亚高压也要略 225 强于处于两个波段发展时期的 P2 过程中的强度;由此更加清楚的表明了大气低 226 频振荡对 2020/2021 年冬季西伯利亚高压强度的重要作用。与此相对应,中国东 227 部地区气温的低频变化也有类似的特征(图 5b), P2 和 P3 两次强降温过程都处 228 于 30-60d 负位相时期,并且由于 P3 过程同时处于准双周和 30-60d 负位相的谷 229 值,导致 P3 过程的降温幅度最大,东部地区气温也下降到整个冬季时段的最低 230 点; 而 P2 过程中由于兼有准双周和 30-60d 低频波动的共同作用, 其降温幅度也 231 达到了寒潮标准。后文将着重对比 P1 和 P3 这两次强冷空气过程在低频尺度上 232 的发展演变情况的差异。 233

纵向对比西伯利亚高压和中国东部关键区域气温两个低频波段的变化,还可 234 以看出该年冬季西伯利亚高压和东部地区气温大约有 5 次完整的准双周低频波 235 动,其中以 P1 和 P3 这两次过程最强(西伯利亚高压发展最强、东部地区降温幅 236 度最大),后期逐渐减弱;并且西伯利亚高压每一次低频峰值都超前于东部地区 237 低频气温的谷值(图 5c)。计算整个冬季西伯利亚高压与东部地区气温在准双周 238 低频尺度上的超前滞后相关,可以看出低频西伯利亚高压超前低频气温变化大约 239 2-3 天(9天)的负相关(正相关)最显著(图3中红色实线)。超前9天左右的 240 显著正相关是受到 10-30d 滤波的影响,这与准双周周期变化是一致的(马宁等, 241 2020)。而超前 2-3 天的显著负相关表明西伯利亚高压的增强对其后 2-3 天东部 242 地区气温的降低有显著影响,这与前文分析的原始距平指数的变化关系也是一致 243 的(图 3)。在 30-60d 低频变化上, 西伯利亚高压和东部地区气温大约有 2 次完 244 整的波动,并且都表现出前冬波动较强,后冬波动明显减弱(图 5d)的特征,与 245 前面小波分析的结果一致(图4);同时,从P3过程中西伯利亚高压波峰和东部 246 地区气温波谷的对应情况来看,西伯利亚高压的增强同样超前于气温的降低(图 247 5d)。 248





256

图 5 2020/2021 年冬季 5d 滑动平均的(a)西伯利亚高压距平指数(SHI,黑色曲线,单位:hPa)和(b)中国东部地区气温距平序列(T\_EastChina,黑色曲线,单位:℃)以及
它们的准双周(蓝色曲线)和 30-60d(红色曲线)低频变化。(c)和(d)分别为西伯利亚
高压距平指数(红色曲线)、中国东部地区气温距平序列(蓝色曲线)的准双周(10-30d)
和 30-60d 低频变化。图中灰色柱状分别表示三次全国型强冷空气过程 P1、P2、P3
Fig. 5 (a) Daily variation of the 5d-mean SHI (black line, units: hPa) with its quasi-biweekly (blue

line) and 30-60d (red line) low-frequency oscillation in the winter of 2020/2021. (b) is the same as

- (a), but for the temperature anomaly (units: °C) averaged in eastern China (T\_EastChina). (c)
  quasi-biweekly (10-30d) and (d) 30-60d low-frequency variation of SHI (red line) and the
  temperature anomaly averaged in eastern China SWC (blue line). Grey bars indicate three cold
  surges in China during the winter.
- 261

## 262 4.2 低频尺度上西伯利亚高压对两次强冷空气的影响过程

263 下面,我们将具体分析西伯利亚高压在低频时间尺度上的变化及对前冬两次
264 全国型强冷空气过程的影响。在第一次过程中(P1),西伯利亚高压在低频尺度
265 上于 2020 年 12 月 15 日达到峰值,因此以这一天为第 0 天(Day0),图 6 给出
266 超前 4 天(Day-4)、2 天(Day-2)、当天 Day0 和滞后 2 天(Day+2)、4 天(Day+4)
267 的海平面气压及距平(图 6a1-a5 和 c1-c5)、东亚地区地面 2m 气温距平和 850hPa
268 距平风场(图 6b1-b5 和 d1-d5)分别在准双周和 30-60d 低频尺度上的逐日空间
269 分布。

首先看准双周低频变化。Day-4,西伯利亚高压监测区域(图 6a 中蓝色框) 270 为海平面气压负距平控制,表明西伯利亚高压明显偏弱,同时中国大部地区海平 271 面气压也明显偏弱, 而在中亚和俄罗斯大部地面高压则明显偏强 (图 6a1); 与此 272 同时,中亚和俄罗斯大部气温偏低,而中国大部地区为 850 hPa 南风距平控制, 273 274 气温总体接近常年同期到偏高,尤其长江以南大部地区气温偏高超过 4℃(图 6b1)。Day-2,中亚和俄罗斯的地面高压合并加强向东、向南扩展,导致西伯利 275 亚高压略有增强(图 6a2);中国西北地区和东北地区北风距平开始发展,黄河以 276 北的大部地区气温转为较常年同期偏低2℃以上,部分地区偏低超过4℃(图6b2)。 277 Day0, 西伯利亚高压发展达到最强, 1030 hPa 等值线控制了俄罗斯中南部和中国 278 北方大部地区,监测区气压正距平超过 12 hPa (图 6a3);偏北风距平从俄罗斯东 279 部一直向南延伸至长江中下游,反映出强冷空气爆发的显著特征,中国北方大部 280 地区气温较常年同期偏低 4℃以上, 部分地区甚至超过 8℃, 同时长江中下游气 281 温也由前期接近常年转为偏低(图 6b3)。Day+2,西伯利亚高压中心强度略有减 282 弱但明显向南扩张,1030hPa 等值线南扩至长江中下游(图 6a4);偏北风距平也 283 继续南扩至中国南海,导致中国中东部自北向南为一致的西北风或东北风距平控 284 制;中国气温偏低的范围也继续扩大,尤其西北地区和中东部大部地区气温都较 285 常年同期偏低4℃以上(此时中国东部地区低温范围达到最大、强度也达到最强), 286 而东北地区北部气温开始回升(图 6b4)。Day+4,西伯利亚高压已明显减弱,南 287

288 扩的高压正距平仅在长江以南地区继续维持(图 6a5);中国北方大部地区风场接
289 近常年,同时气温回升也至接近常年,但黄河以南地区仍受北风距平控制、气温
290 仍较常年同期偏低,尤其西南地区东部和华南西部的北风距平仍然很强、部分地
291 区气温仍较常年同期偏低 6℃以上(图 6b5)。

准双周低频过程与原始距平空间分布(图略)对比来看,低频西伯利亚高压 292 的强度与原始距平接近,中亚地区海平面气压增强并东传的特征也与原始演变情 293 况相似,但俄罗斯附近海平面气压的低频特征更强;中国低温低频发展演变特征 294 与原始距平也比较类似,但强度偏弱。而 30-60d 的低频过程基本没有表现出西 295 伯利亚高压增强的情况(图 6c1-6c5),高压监测区(蓝色框)为一致的地面气压 296 负距平持续控制;中国中东部大部地区也为持续的南风距平控制、气温总体较常 297 年同期偏高(图 6d1-6d5)。由此进一步表明西伯利亚高压对第一次全国型强冷空 298 气过程的影响主要表现为准双周低频振荡特征,并且西伯利亚高压的增强略超前 299 中国东部地区气温的降低大约 2-3 天,与前文的分析结果一致。 300





802 图 6 第一次冷空气过程中(a1-a5)(c1-c5)海平面气压(等值线,单位:hPa)和距平
 303 (阴影)(图中蓝色方框表示西伯利亚高压监测区)及(b1-b5)(d1-d5)近地面 2m 气温距
 304 平(阴影,单位: ℃)和 850hPa 距平风场(矢量,单位: m/s)的(a1-a5)(b1-b5)准双

305	周和(c1-c5)(d1-d5)30-60d 低频逐日变化(基于距平数据做的低频滤波)
306	Fig. 6 Daily evolutions of (a1-a5) (b1-b5) quasi-biweekly and (c1-c5) (d1-d5) 30-60d filtered sea
307	level pressure (SLP), 2m temperature and 850-hPa wind anomaly during the first cold air process
308	(P1) in China. (a1-a5) and (c1-c5) for SLP (contours, units: hPa) and anomaly (shading), with the
309	blue box indicating the monitoring region of SHI. (b1-b5) and (d1-d5) for 2m temperature
310	(shading, units: $^{\circ}$ C) and 850-hPa wind (vector, units: m/s) anomaly.

13

1g













XX

ŔΧ



图 6 续 Fig.6 Continued

在第三次过程(P3)中,低频西伯利亚高压在大约2021年1月5日达到最 314 强,因此以这一天为 Day0,同样给出两个低频波段从超前 4 天到滞后 4 天的逐 315 日演变(图 7)。首先看准双周低频变化。Day-4,西伯利亚高压基本接近常年, 316 中国大部地区的海平面气压也接近常年同期,而在中亚地区地面高压则显著偏强, 317 正距平中心超过 12 hPa (图 7a1);中亚和俄罗斯西部为 850 hPa 偏北风距平控 318 制、气温较常年同期明显偏低,而中国中东部大部地区为南风距平控制、气温接 319 近常年到偏高(图 7b1)。Day-2,中亚地区的高压向东扩展,西伯利亚高压略有 320 增强,中国北方大部地区为高压正距平控制(图 7a2);新疆大部转为东北风距 321 平、气温明显下降至较常年同期偏低4℃以上,而中国中东部大部地区仍为低层 322 偏南风距平控制,除内蒙古中部气温偏低外其余地区气温仍接近常年同期,但已 323 较前期有所下降(图 7b2)。Day0,西伯利亚高压发展达到最强,1030 hPa 等值 324 线控制中国北方大部地区(与 P1 对应的 Day0 情况相似),但高压位置较 P1 略 325 偏西、高压强度较 P1 略偏弱 (图 7a3);中国黄河流域及以北大部地区为偏北风 326 距平控制、气温较常年同期偏低 2℃以上,尤其西北地区气温偏低超过 4℃,而 327 南方大部仍为偏南风距平控制、气温略偏高(图7b3)。Day+2,西伯利亚高压开 328 始减弱,并南扩至长江中下游(图7a4);相应的,低层偏北风距平也南扩至长江 329 流域,长江以北大部地区气温较常年同期偏低2℃以上,此时华北地区低频气温 330 负距平达到最强(图 7b4)。Day+4,西伯利亚高压已明显减弱,监测区转为海平 331 面气压负距平,1030hPa的范围也明显收缩,但西南地区东部和华南西部仍为高 332 压正距平控制(图 7a5);低层偏北风距平继续向南扩展至中国南海,黄河以南大 333 部气温较常年同期偏低,尤其西南地区东部和江汉等地气温偏低超过4℃,而内 334 蒙古中东部和东北地区气温转为较常年同期偏高(图 7b5)。 335

再看 P3 对应的 30-60d 低频变化。与准双周低频过程类似的是,30-60d 低频
尺度上也表现出西伯利亚高压逐渐增强并南扩(图 7c1-7c5),以及与之相伴随的
对流层低层北风距平的不断加强和南扩、低温区范围逐渐扩大并在中国自北向南
逐渐南移(图 7d1-7d5)的过程,细节不再赘述。与 P3 对应的准双周低频过程不
同的是,其 30-60d 低频变化较为缓慢(这与 30-60d 这一波段的滤波计算方法有
关),并且 30-60d 西伯利亚高压主体在俄罗斯中部并自西北向东南方向移动加强,
而准双周低频高压主体则是从中亚自西向东传播;另外,中国东部地区 30-60d 低







低频变化为主,P3 过程则有准双周和 30-60d 的共同作用,这在一定程度上解释 351 了 P1 过程中西伯利亚高压的强度以及中国东部地区的降温幅度都不及 P3 过程 352 强。另一方面,这三次强冷空气过程(第二次过程图略)无论原始距平数据还是 353 低频滤波结果都表现出西伯利亚高压自西向东发展加强和自北向南扩张逐步导 354 致冷空气爆发和中国北方、南方区域依次降温的过程,西伯利亚高压发展增强超 355 前于中国东部地区低温发展的特征也在这三次过程中均有体现。为此,图8给出 356 该年冬季西伯利亚高压监测区附近海平面气压距平沿纬向和经向传播的特征。可 357 以清楚的看出前冬中高纬地区海平面气压三次明显的传播过程: 2020年12月中 358 旬前期、2020年12月底-2021年1月初、2021年1月上旬中期(图 8a 和 8b), 359 与前面分析的三次强冷空气的爆发依次对应。对比来看,第二次和第三次过程中 360 西伯利亚高压自西向东的纬向传播更强(图 8a),第二次过程中西伯利亚高压自 361 北向南的经向传播最强(图 8b)。从准双周和 30-60d 低频信号来看,第一次过程 362 有明显的准双周低频东传(图 8c)和低频南传(图 8d)特征,但在 30-60d 低频 363 尺度上海平面气压为持续负距平(图 8e 和 8f); 第二次和第三次过程的时间间隔 364 比较短,在准双周(图 8c 和 8d)和 30-60d(图 8e 和 8f)低频尺度表现为一次 365 明显的自西向东和自北向南的传播(图 8d 和 8d)。 366



368 图 8 2020/2021 年冬季海平面气压距平的(a)时间-经度和(b)时间-纬度剖面,虚线箭
 369 头表示传播特征。(c)和(d)及(e)和(f)分别同(a)和(b),但分别为准双周和 30 370 60d 低频特征,单位: hPa

Fig. 8 (a) Time-longitude and (b) time-latitude profile of SLP anomaly during the winter of
2020/2021, with the dashed arrows for the propagation features. (c) and (d), (e) and (f) are the
same as (a) and (d), but for the quasi-biweekly and 30-60d low-frequency oscillation, respectively.
Units: hPa

375 伴随着三次中高纬地区海平面气压的发展加强及其纬向和经向传播,850
376 hPa 经向风在中国东部地区也有显著的自北向南的传播特征,清楚地反映了三次
377 强冷空气向南爆发的过程(图9)。图9a为原始距平数据的结果,可以看出三次
378 过程分别发生在2020年12月中旬后期、2020年12月底-2021年1月初、以及
379 2021年1月上旬后期。从准双周和30-60d低频传播与原始距平数据的对比来看,
380 第一次过程也是主要表现为准双周低频特征,而第二次过程和第三次过程兼有准
381 双周和 30-60d低频特征,尤其第三次过程同时处于准双周和 30-60d低频传播最

强的时期(图 9b 和 9c),这与西伯利亚高压不同波段的低频发展演变特征基本 382 是一致的(图8)。同时还可以看出,无论是原始距平数据还是低频滤波结果,这 383 三次经向风的南传(图9)都分别滞后于每一次西伯利亚高压的增强和南扩(图 384 8),更进一步证明了西伯利亚高压增强对三次强冷空气爆发的显著影响。图 9d 385 给出了西伯利亚高压距平指数与中国东部北方地区(35°-40°N, 110°-120°E)区 386 域平均 850 hPa 经向风距平指数的超前滞后相关,可以看出对于原始距平指数来 387 说,从0天开始到滞后西伯利亚高压3天,负相关系数都能通过95%的显著性检 388 验,其中在滞后1天的时候负相关系数的绝对值达到最大,反映了西伯利亚高压 389 对冷空气爆发和持续的显著影响。在准双周低频尺度上,它们的负相关系数的绝 390 对值更大,在重新计算有效自由度的情况下区域低层经向风从滞后西伯利亚高压 391 1 天到3 天仍然可以持续通过95%的显著性检验,更好地证明了在低频时间尺度 392 上西伯利亚高压对 2020/2021 年冬季冷空气活动的显著影响。 393



394

395 图 9 (a) 2020/2021 年冬季中国东部地区(110°-120°E 平均) 850hPa 经向风的时间-纬度
396 剖面,(b)和(c)同(a),但分别为准双周和 30-60d 低频变化,虚线箭头表示经向传播
397 特征,单位:m/s。(d)西伯利亚高压距平指数与华北地区(35°-40°N,110°-120°E)
398 850hPa 经向风的超前滞后相关,蓝色曲线为原始距平指数,红色曲线为准双周滤波序列的
399 结果,横坐标正(负)值表示经向风滞后(超前)西伯利亚高压

Fig. 9 (a) Time-latitude profile of 850-hPa meridional wind anomaly in eastern China (averaged in 110°-120° E) during the winter of 2020/2021, with the dashed arrows for the propagation features.
(b) and (c) are the same as (a), but for the quasi-biweekly and 30-60d low-frequency oscillation,

respectively. Units: m/s. (d) Lead-lag correlation between the SHI and 850hPa meridional wind
anomaly (v850) averaged in northern part of eastern China (35° -40° N, 110° -120° E), with blue
(red) line for the anomaly (quasi-biweekly oscillation) indices and the positive (negative) value on
the X-axis indicates the days that the meridional wind lags (leads) the SHI

407

## 408 5 结论和讨论

2020/2021 年冬季,东亚地区的强冷空气过程频繁爆发,大风降温、持续低 409 温、北方雪灾、南方冰雨雪等灾害性天气气候事件对人民生产生活造成了严重影 410 响。我们及时分析了该年冬季前期和后期冷暖转折的大气环流异常和阶段性变化 411 特征(韩荣青等, 2021),以及秋冬季发展达到盛期的拉尼娜事件和秋季异常偏 412 少的北极海冰所提供的大尺度气候背景(Zheng et al., 2021)。本文延续前期的工 413 作,从大气环流在次季节时间尺度上的低频振荡角度出发,详细分析了西伯利亚 414 高压的低频变化及对该年冬季三次全国型强冷空气过程(2020年12月13-15日、 415 2020年12月29日-2021年1月1日、2021年1月6-8日)的影响,主要得出以 416 下几点结论: 417

418 (1) 2020/2021 年冬季,西伯利亚高压和中国东部地区气温变化都表现出明
419 显的准双周(10-30d)和 30-60d 低频振荡,并且这样的低频波动在冬季前期较后
420 期明显偏强。其中,西伯利亚高压的准双周和 30-60d 方差贡献基本相当,且累
421 积贡献超过 50%;而东部地区气温变化的准双周低频振荡明显强于 30-60d 低频
422 振荡。

(2) 冬季的三次全国型强冷空气过程表现出不同的低频振荡特征。其中, 423 第一次过程中准双周振荡有正贡献而 30-60d 振荡为负贡献,表明第一次过程以 424 准双周低频波动为主。而第二次和第三次过程兼有准双周振荡和 30-60d 振荡的 425 正贡献作用,尤其第三次过程同时处于准双周和 30-60d 低频振荡发展的最强时 426 期。这些不同特征在西伯利亚高压的增强、中高纬度海平面气压纬向和经向的传 427 播、中国东部地区对流层低层经向风的南传、以及东部地区低温过程的发展加强 428 等方面均有一致的表现。由于兼有准双周和 30-60d 低频振荡的共同作用, 第三 429 次过程中的西伯利亚高压强度和东部地区低温强度都明显超过前两次过程,清楚 430 体现了大气低频振荡在其中起到的重要作用。 431

432 (3)无论是原始数据还是在准双周低频时间尺度上,西伯利亚高压的增强433 超前一候(5天)左右与冷空气爆发和关键区域气温的降低都有显著相关,其中

434 对冷空气爆发的影响超前 1-2 天最显著,对中国东部地区低温的影响超前 2-3 天435 最为显著。

需要指出的是,本文只是针对 2020/2021 年冬季这一次个例的分析结果,不 436 同年冬季的低频特征各不相同。例如,2008年1月中国南方冰冻雨雪天气有四 437 次过程,其中前两次过程中10-20d和30-60d都有重要影响,而后两次过程仅有 438 30-60d 起重要作用 (马宁等, 2011); 2010 年冬季东亚冬季风则有 7d、12d、30d 439 左右的低频振荡周期(齐冬梅等, 2016); 2011年冬季寒潮则主要表现 10-30d 的 440 低频周期(苗青等, 2016)。马宁等(2020)对1981-2015年冬季做了统计分析, 441 指出冬季京津冀气温和西伯利亚高压均存在 10-30d 的显著低频周期,并且两者 442 的低频分量有显著的超前滞后相关。本文的个例分析结果与之并不矛盾,并且在 443 10-30d 低频时间尺度上西伯利亚高压超前中国东部气温变化 2 天左右的显著相 444 关关系也是一致的。但与统计结果不同的是, 2020/2021 年冬天不仅有 10-30d 的 445 低频贡献, 30-60d 对后两次强寒潮过程也有重要作用。 446

2020/2021 年冬季前期频繁强冷空气和持续低温除了受到偏强的西伯利亚高 447 压的影响,还与北极涛动持续负位相、乌拉尔山阻塞活动、偏强偏西的东亚大槽 448 等环流系统密切相关(韩荣青等, 2021; Zheng et al., 2021),并且前人的研究也 449 指出这些欧亚中高纬环流系统也具有大气季节内低频振荡的特征(朱毓颖和江静, 450 2013;杨双艳等,2014;齐冬梅等,2015;刘樱等,2016;Yao et al.,2016;谭桂 451 容和张文正, 2018; 李文慧和谭桂容, 2020; 马宁等, 2020; 杨秋明, 2021)。为 452 此,我们也进一步分析了该年冬季乌拉尔山高压脊和东亚大槽的低频振荡特征, 453 它们同样具有显著的准双周振荡周期,并且都对这三次强冷空气过程的爆发有显 454 著影响(图略)。从低频尺度上各环流系统的相互关系来看,乌拉尔山高压脊的 455 发展略超前于西伯利亚高压 2-3 天,而东亚槽的加深略滞后于西伯利亚高压 3-4 456 天(图略)。然而,欧亚中高纬 500hPa 低频槽脊的传播兼有东传和西传的过程, 457 其低频演变特征较为复杂,后期我们将针对这几个环流系统在低频时间尺度上的 458 相互配置和相互作用做更加细致深入的研究工作。 459

460 2020/2021年中国冬季气候最显著的特征就是气温冷-暖急转,泾渭分明,气
461 温前期持续异常偏低、后期快速回暖并较常年同期持续异常偏高,这样的变化与
462 历史上绝大多数年冬季阶段性冷、暖波动交替变化的特征很不一样,因此,这也

是我们从不同角度详细研究该年冬季气候异常的重要原因。然而,关于该年冬季 463 气温冷-暖转换的具体物理机制,目前还没有明确的结论。从本文大气季节内低 464 频振荡的分析来看,西伯利亚高压的 30-60d 低频波动表现出前冬明显强于后冬 465 的特征,这也许是导致气温冷-暖转换的原因之一。另外,研究团队也注意到2021 466 年1月初,平流层发生了一次偏移型爆发性增温(韩荣青等,2021),导致了北 467 极涛动持续负位相、且极涡主体偏向西半球,强冷空气在北美爆发并造成得克萨 468 斯州历史罕见的暴风雪天气(Lu et al., 2021)。与此同时,这次平流层爆发性增 469 温也是导致欧亚中高纬经向环流突然转变并进而引起中国气温冷-暖急转的重要 470

- 471 原因 (Yan et al., 2022)。
- 472
- 473

a 7 a	シャート
4/4	<b>一 一 一 一 一 一 </b>

- Anderson J R, Rosen R D. 1983. The latitude-height structure of 40-50 day variations
  in atmospheric angular momentum [J]. J Atmos Sci, 40 (6): 1584-1591
- Bretherton C, Widmann M, Dymnikov V P, et al. 1999. The effective number of spatial
  degrees of freedom of a time-varying field [J]. J. Climate, 12: 1990-2009
- 479 Ding Y H, Krishnamurti T N. 1987. Heat budget of the Siberian high and winter
  480 monsoon [J]. Mon. Wea. Rev., 115 (10): 2428-2449
- 481 丁一汇,温市耕,李运锦.1991. 冬季西伯利亚高压动力结构的研究[J]. 气象学报,
- 49 (4): 430-439. Ding Y H, Wen S G, Li Y J. 1991. A study of dynamic structures
  of the Siberian High in winter [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 49 (4): 430439
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation
  [J]. Geophys. Res. Lett., 28 (10): 2073-2076
- 487 龚道溢,朱锦红,王绍武. 2002. 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析[J]. 高
  488 原气象, 21(1): 8-14. Gong D Y, Zhu J H, Wang S W. 2002. The influence of
  489 Siberian High on large-scale climate over Continental Asia [J]. Plateau Meteor. (in
- 490 Chinese), 21(1): 8-14
- <sup>491</sup> 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系[J]. 应用气象学报, 5 (2):
  <sup>492</sup> 218-225. Guo Q Y. 1994. The relationship between the change of the east Asian
  <sup>493</sup> winter monsoon and temperature in China [J]. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 5 (2):
- 494 218-225
- 495 韩荣青,石柳,袁媛. 2021. 2020/2021 年冬季中国气候冷暖转折成因分析[J]. 气
  496 象, 47(7): 880-892. Han R Q, Shi L, Yuan Y. 2021. Analysis on the causes of cold
  497 and warm transition in China during the winter of 2020/2021 [J]. Meteor. Mon. (in
  498 Chinese), 47(7): 880-892
- Kikuchi K, Wang B. 2009. Global perspective of the quasi-biweekly oscillation [J]. J.
  Climate, 22: 1340-1359
- Kistler R, Collins W, Saha S. 2001. The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: monthly
  means CD-ROM and documentation [J]. Bull Amer. Meteor. Soc., 82(2): 247-268
  蓝柳茹, 李栋梁. 2016. 西伯利亚高压的年际和年代际异常特征及其对中国冬季

504	气温的影响[J]. 高原气象, 35 (3): 662-674. Lan L R, Li D L. 2016. Interannual
505	and interdecadal anomaly features of Siberian high and their impact on winter
506	temperature of China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 35 (3): 662-674
507	Li C Y, Wu P L. 1990. An observational study of the 30-50 day atmospheric oscillations.
508	Part I: Structure and propagation [J]. Adv. Atmos. Sci., 7 (3): 294-304
509	李崇银. 1990. 赤道以外热带大气中 30-60d 振荡的一个动力学研究[J]. 大气科学,
510	14(1): 83-92. Li C Y. 1990. A kinetic study on the 30-60 d oscillation in the tropical
511	atmosphere beyond the Equator [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 14
512	(1): 83-92
513	李崇银. 1991. 30-60 天大气振荡的全球特征[J]. 大气科学, 15(3): 66-76. Li C Y.
514	1991. Global characteristics of 30-60-day atmospheric oscillation [J]. Chinese
515	Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 15 (3): 66-76
516	李崇银, 张勤. 1991. 全球大气低频遥相关[J]. 自然科学进展, 4: 330-334. Li C Y,
517	Zhang Q. 1991. Global atmospheric low frequency teleconferencing [J]. Progress
518	in Natural Science (in Chinese), 4: 330-334
519	李崇银,曹文忠,李桂龙. 1995. 基本气流对中高纬度大气季节内振荡不稳定激
520	发的影响[J]. 中国科学: 化学, 25(9): 978-985. Li C Y, Cao W Z, Li G L. 1995.
521	Influences of basic flow on unstable excitation of intraseasonal oscillation in mid-
522	high latitudes [J]. Sci. China: Ser. B (in Chinese), 38 (9):1135-1145
523	李崇银, 龙振霞, 穆明权. 2003. 大气季节内振荡及其重要作用[J]. 大气科学,
524	27(4): 518-535. Li C Y, Long Z X, Mu M Q. 2003. Atmospheric intraseasonal
525	oscillation and its important effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences
526	(in Chinese), 27 (4): 518-535
527	李文慧, 谭桂容. 2020. 中国冬季气温的次季节尺度振荡及其与年际异常的关系
528	[J]. 高原气象, 39 (1): 110-119. Li W H, Tan G R. 2020. Sub-seasonal scale
529	oscillation of winter temperature in China and the relationship with interannual
530	anomalies [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 39 (1): 110-119
531	李艳, 张金玉, 李旭, 等. 2018. 两次典型极端低温过程低频特征分析[J]. 高原气
532	象, 37 (5): 1341-1352. Li Y, Zhang J Y, Li X, et al. 2018. Low-frequency features
533	during the two typical extreme cold events in China [J]. Plateau Meteorology (in

- 534 Chinese), 37 (5): 1341-1352
- 535 梁萍, 陈隆勋, 何金海. 2008. 江淮夏季典型旱涝年的水汽输送低频振荡特征[J].
- 高原气象, 27(S): 84-91. Liang P, Chen L X, He J H. 2008. Features of low
  frequency oscillation for moisture transport during typical drought/flood year over
  Yangtze-Huaihe Basins [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 27(S): 84-91
- 539 林爱兰. 1998. 南海夏季风的低频特征[J]. 热带气象学报, 14(2): 113-118. Lin A L.
- 540 1998. The characteristics of low frequency oscillation over South China Sea [J]. J.
  541 Trop. Meteor. (in Chinese), 14(2): 113-118
- 542 刘樱, 郭品文, 冯涛. 2016. 华北地区冬季持续性异常低温事件与大气低频振荡
  543 活动的关系[J]. 大气科学学报, 39 (3): 370-380. Liu Y, Guo P W, Feng T. 2016.
  544 The relationship between winter persistent abnormal low temperature in North
  545 China and atmospheric low-frequency oscillation activities [J]. Trans Atmos. Sci.
  546 (in Chinese), 39 (3): 370-380
- Lu Q, Rao J, Liang Z Q, et al. 2021. The sudden stratospheric warming in January 2021
  [J]. Environ. Res. Lett., 16, 084029, https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac12f4
- 马宁,李跃凤, 琚建华. 2011. 2008 年初中国南方低温雨雪冰冻天气的季节内振荡
  特征[J]. 高原气象, 30 (2): 318-327. Ma N, Li Y F, Ju J H. 2011. Intraseasonal
  oscillation characteristics of extreme cold, snowy and freezing rainy weather in
  southern China in early 2008 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (2): 318327
- 马宁,何丽烨,梁苏洁,等. 2020. 京津冀冬季冷空气过程的低频特征及西伯利亚
  高压低频变化的影响[J]. 地理学报, 75 (3): 45-56. Ma N, He L Y, Liang S J, et
  al. 2020. Low-frequency characteristics of winter-time cold air activity in the
  Beijing-Tianjin-Hebei region and the impacts of low-frequency variation of the
  Siberian High [J]. Acta Geographics Sinica (in Chinese), 75 (3): 45-56
- 559 马晓青,丁一汇,徐海明,等. 2008. 2004/2005 年冬季强寒潮事件与大气低频波动
  关系的研究[J].大气科学,32 (2): 380-394. Ma X Q, Ding Y H, Xu H M, et al.
  2008. The relation between strong cold waves and low-frequency waves during
  the winter of 2004/2005 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
  32 (2): 380-394

- Madden R A, Julian P R. 1971. Detection of a 40-50 day oscillation in the zonal wind
  in the tropical Pacific [J]. J Atmos Sci, 28 (5): 702-708
- Madden R A, Julian P R. 1972. Description of global-scale circulation cells in the
  tropics with a 40-50 day period [J]. J Atmos Sci, 29 (6): 1109-1123
- Mao J Y, Sun Z, Wu G X. 2010. 20-50 day oscillation of summer Yangtze rainfall in
  response to intraseasonal variations in the subtropical high over the western North
  Pacific and South China Sea [J]. Climate Dyn., 34 (5): 747-761
- 571 苗青, 巩远发, 白自斌. 2016a. 2011/2012 年冬季寒潮低频特征及其与 500 hPa 低频系统的耦合关系[J]. 大气科学学报, 39 (5): 608-619. Miao Q, Gong Y F, Bai Z B. 2016. Characteristics of low-frequency oscillations during cold waves in winter 2011/2012 and its coupling with the low-frequency system at 500 hPa [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 39 (5): 608-619
- 苗青, 巩远发, 邓锐捷, 等. 2016b. 北半球中高纬度低频振荡对 2012/2013 年冬季
  中国东北极端低温事件的影响[J]. 大气科学, 40 (4): 817-830. Miao Q, Gong Y
  F, Deng R J, et al. 2016. Impacts of the low-frequency oscillation over the extratropics of the Northern Hemisphere on the extreme low temperature event in
  Northeast China in the winter of 2012/2013 [J]. Chinese Journal of Atmospheric
  Sciences (in Chinese), 40 (4): 817-830
- 齐冬梅, 李跃清, 唐信英, 等. 2015. 东亚冬季风月内活动的主要时间尺度及其振
  荡特征[J]. 高原山地气象研究, 35 (4): 42-47. Qi D M, Li Y Q, Tang X Y, et al.
  2015. Main submonthly timescales of the East Asian winter monsoon and its
  oscillation characteristics [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research (in
  Chinese), 35 (4): 42-47
- 齐冬梅,李跃清,陈永仁,德庆. 2016. 2010 年东亚冬季风月内尺度振荡特征及其
  与西南地区冬季气温的关系[J].热带气象学报, 32 (1): 19-30. Qi D M, Li Y Q,
  Chen Y R, et al. 2016. Submonthly timescales oscillation characteristics of the
  East Asian winter monsoon and its effect on the temperature in Southwest ChinaA case study in 2010 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 32 (1): 1930

- 593 琚建华, 钱诚, 曹杰. 2005. 东亚夏季风的季节内振荡研究[J]. 大气科学, 29(2):
  187-194. Ju J H, Qian C, Cao J. 2005. The intraseasonal oscillation of East Asian
  summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
  29(2): 187-194
- 597 琚建华,赵尔旭. 2005. 东亚夏季风区的低频振荡对长江中下游旱涝的影响[J].
  598 热带气象学报, 21(2): 164-171. Ju J H, Zhao E X. 2005. Impacts of the low
  599 frequency oscillation in east Asian summer monsoon on the drought and flooding
  600 in the middle and lower valley of the Yangtze River [J]. J. Trop. Meteor. (in
  601 Chinese), 21(2): 164-171
- Peng C, Yao S X, Sun Q F, Huang Q. 2016. The 10-30-day intraseasonal variation of
  the East Asian winter monsoon: the temperature mode [J]. Dyn. Atmos. Oceans,
  75: 91-101
- 605 邱明宇, 陆维松, 王尚荣. 2006. ENSO 事件与北半球中高纬低频振荡[J]. 热带气
  606 象学报, 22 (5): 454-460. Qiu M Y, Lu W S, Wang S R. 2006. ENSO episodes and
  607 low-frequency oscillation in the extra-tropical latitude of the Northern Hemisphere
  608 [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 22 (5): 454-460
- 任菊章,郑建萌,许彦艳,等. 2015. 2007 年冬季西伯利亚高压季节内变化对云南
  气温的影响[J]. 云南大学学报(自然科学版),37(3): 386-398. Ren J Z, Zheng
  J M, Xu Y Y, et al. 2015. The inter-seasonal oscillation of Siberian High influenced
  on the winter temperature of Yunnan in 2007 [J]. Journal of Yunnan University
  (Natural Sciences Edition) (in Chinese), 37 (3): 386-398
- 614 任芝花,余予,邹凤玲,等. 2012. 部分地面要素历史基础气象资料质量检测[J].
  615 应用气象学报, 23 (6): 739-747. Ren Z H, Yu Y, Zou F L, et al. 2012. Quality
  616 detection of surface historical basic meteorological data [J]. Journal of Applied
  617 Meteorological Science (in Chinese), 23 (6): 739-747
- 618 孙晓娟, 王盘兴, 智海, 等. 2010. 蒙古高压若干环流指数及与我国冬季气温异常
  619 相关的分析和比较[J]. 高原气象, 29(6): 1493-1500. Sun X J, Wang P X, Zhi H,
  620 et al. 2010. Analysis and comparison of several Mongolian High circulation
  621 indices and their relationship with temperature anomaly of China in Winter [J].
  622 Plateau Meteor. (in Chinese), 29(6): 1493-1500

- 谭桂容,张文正.2018.中国冬季地面气温 10-30 d 低频变化及其与乌拉尔山环流 623
- 的关系[J]. 大气科学学报, 41 (4): 502-512. Tan G R, Zhang W Z. 2018. The 10-624
- 30 d low-frequency variation of winter surface air temperature in China and its 625
- relationship with Ural mountain circulation [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 626 41 (4): 502-512

- Wang C Z, Yao Y L, Wang H L, et al. 2021. The 2020 summer floods and 2020/21 628 winter extreme cold surges in China and the 2020 typhoon season in the western 629 North Pacific [J]. Adv. Atmos. Sci., 38 (6): 896-904 630
- 王遵娅、丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 大气科学, 631
- 30 (6): 1068-1076. Wang Z Y, Ding Y H. 2006. Climate change of the cold wave 632 frequency of China in the last 53 years and the possible reasons [J]. Chinese J. 633 Atmos. Sci. (in Chinese), 30 (6): 1068-1076 634
- Wen M, Li T, Zhang R H, et al. 2010. Structure and origin of the quasi-biweekly 635 oscillation over the tropical Indian Ocean in boreal spring [J]. J. Atmos. Sci., 67 636 (6): 1965-1982 637
- Wen M, Yang S, Higgins W, et al. 2011. Characteristics of the dominant modes of 638 atmospheric quasi-biweekly oscillation over tropical-subtropical Americas [J]. J. 639 Climate, 24 (15): 3956-3970 640
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic oscillation, Siberian High and East Asian winter 641 monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 29 (19): 1897. DOI: 10.1029/2002GL015373 642
- 肖子牛, 李崇银. 1992. 大气对外强迫低频遥响应的数值模拟 I: 对赤道东太平洋 643
- SSTA 的响应[J]. 大气科学, 16(6): 707-717. Xiao ZN, Li CY. 1992. Numerical 644 simulation of the atmospheric low-frequency teleresponse to external forcing. Part 645 I: Anomalous SSTA in the equatorial eastern Pacific Ocean [J]. Chinese J. Atmos. 646 Sci. (in Chinese), 16 (6): 707-717 647
- 谢安, 卢莹, 陈受钧. 1992. 冬季风爆发前西伯利亚高压的演变[J]. 大气科学, 16 648 (6): 677-685. Xie A, Lu Y, Chen S J. 1992. The evolution of Siberian High prior 649 to the outbreak of cold air [J]. Chinese J Atmos. Sci. (in Chinese), 16 (6): 677-685 650 Yan H M, Yuan Y, Tan G R, et al. 2022. Possible impact of sudden stratospheric 651 warming on the intraseasonal reversal of the temperature over East Asia in winter 652 31

- 653 2020/21. Atmospheric Research, doi.org/10.1016/j.atmosres.2022.106016
- Yang Q M. 2009. The 20-30-day oscillation of the global circulation and heavy
   precipitation over the lower reaches of the Yangtze River valley [J]. Sci. China Ser.

656 D-Earth Sci., 52 (10): 1485-1501

- 657 杨秋明. 2021. 冬季长江下游地区气温低频振荡和低温天气的延伸期预报研究[J].
- 大气科学, 45 (1): 21-36. Yang Q M. 2021. Extended-range forecast for the lowfrequency oscillation of temperature and low-temperature weather over the lower
  reaches of the Yangtze River in winter [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 45
  (1): 21-36
- 杨双艳,武炳义,张人禾,等. 2014. 冬季欧亚中高纬大气低频振荡的传播及其与
  欧亚遥相关型的关系[J]. 大气科学, 38 (1): 121-132. Yang S Y, Wu B Y, Zhang
  R H, et al. 2014. Propagation of low-frequency oscillation over Eurasian mid-high
  latitude in winter and its association with the Eurasian teleconnection pattern [J].
  Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 38 (1): 121-132
- 667 占瑞芬,孙国武,赵兵科,等. 2008. 中国东部副热带夏季风降水的准双周振荡及
  668 其可能维持机制[J]. 高原气象, 27 (S): 98-108. Zhan R F, Sun G W, Zhao B K,
  669 et al. 2008. Quasi-biweekly oscillation of the subtropical summer monsoon rainfall
  670 over East China and its possible maintaining mechanism [J]. Plateau Meteor. (in
- 671 Chinese), 27(S): 98-108
- Zhang L N, Wang B Z, Zeng C Q. 2009. Impacts of the Madden-Julian oscillation on
  summer rainfall in southeast China [J]. J. Climate, 22: 201-216
- Zheng F, Yuan Y, Ding Y H, et al. 2021. The 2020/21 extremely cold winter in China
  influenced by the synergistic effect of La Nina and warm Arctic [J]. Adv. Atmos.
  Sci., DOI: 10.1007/s00376-021-1033-y
- 677 中国气象局. 2017. 中华人民共和国气象行业标准: 冷空气过程监测指标: QX/T
- 678 393—2017 [S]. 北京: 气象出版社. China Meteorological Administration. 2019.
  679 Meteorological Industry Standard of People's Republic of China: Monitoring
  680 indices of cold air processes: QX/T 393—2017 [S]. Beijing: China Meteorological
  681 Press.

582 朱毓颖, 江静. 2013. 中国冬季持续性低温事件的低频特征以及中低纬大气低频
振荡对其的影响[J]. 热带气象学报, 29 (4): 649-655. Zhu Y Y, Jiang J. 2013.
The intraseasonal characteristics of wintertime persistent cold anomaly in China
and the role of low frequency oscillation in the low latitude and midlatitude [J].
Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 29 (4): 649-655

