

# 北疆冬季持续性极端低温事件的延伸期环流异常特征\*

马丽云<sup>1</sup>, 陈平<sup>1</sup>, 胡景高<sup>2</sup>, 姚俊强<sup>1</sup>, 毛炜峰<sup>1\*</sup>

(1.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所, 新疆 乌鲁木齐 830002)

(2.南京信息工程大学 气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/  
气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044)

**摘要:** 本文利用 1951~2019 年国家气象信息中心逐日站点数据和 NCEP/NCAR 再分析资料, 分析了冬季新疆北部持续性极端低温事件 (PECE) 频次的时空分布特征, 并探讨了平流层与对流层在事件发生发展过程中的作用。分析表明: 年代际尺度上, 北疆 PECE 在 20 世纪 60 年代发生频次最多, 此后逐渐减少, 表明北疆区域发生该事件的概率在降低。空间分布上, 无论是极端低温频次还是冷空气强度, 极值中心皆在额尔齐斯河流域一线。北疆 PECE 发展过程中, 平、对流层环流皆发生了阶段性的调整。延伸期阶段, 距事件爆发前 25 日时, 平流层 I 区极涡 (30° E-120° E) 首先开始了由强到弱的转变 (欧亚弱极涡型)。行星波向下游频散, 东南支波列携带能量影响新疆北部。对流层极涡随后也表现出强度减弱, 冷空气分裂南下。此后进入短期阶段, 来自北冰洋的冷空气在乌拉尔山高压脊前堆积, 有利于大型斜脊加强并维持, 地面冷空气在中西伯利亚地区形成堆积态势, 随后对流层大型横槽斜脊引导冷空气南下, 地面西伯利亚高压发展强盛向南爆发, 3 日后冷空气影响北疆地区。

**关键词:** 新疆北部; 持续性极端低温事件; 关键影响系统; 平流层-对流层过程

**中图分类号:** P434+.3 + P468.0+22

---

\* 收稿日期 2022-02-08; 网络预出版日期

作者简介: 马丽云 (1995-), 女, 硕士, 新疆博乐人, 实习研究员, 主要从事大气环流异常与极端天气气候异常的研究。E-mail: mlynuist@163.com

通讯作者: 毛炜峰 (1969-), 男, 河南淮阳人, 研究员, 主要从事短期气候预测、区域气候变化等研究。E-mail: mao6991@vip.sina.com

资助项目: 中国沙漠气象科学研究基金 (Sqj2021004), 第二次青藏高原综合科学考察研究项目 (2019QZKK0102)

# Extended range circulation anomalies of the winter Persistent

## Extreme Cold Events in northern Xinjiang

Liyun Ma<sup>1</sup>, Ping Chen<sup>1</sup>, Jinggao Hu,<sup>2</sup> Junqiang Yao<sup>1</sup>, Weiyi Mao<sup>1</sup>

*(1. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi 830002, China*

*2.Key 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), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)*

**Abstract:** In this paper, the daily station observational datasets from the National Climate Center and NCEP/NCAR reanalysis datasets during 1951-2019 were used to analyze the temporal and spatial distribution of the persistent extremely cold events (PECE) in northern Xinjiang, and to discuss the role of the stratosphere and troposphere during the occurrence and development of PECE events. The results show that on the interdecadal scale, the frequency of PECE in northern Xinjiang peaked in the 1960s, and gradually decreased since that time, which means that the frequency of the PECE in northern Xinjiang is decreasing. In terms of spatial distribution, the center of both the frequency of PECE and the intensity of cold air locates along the Irtysh River Basin. During the development of PECE, both the stratospheric and tropospheric circulations have adjusted. In the extension stage, 25 days before the outbreak of the event, the polar vortex ( $30^{\circ}$  E- $120^{\circ}$  E) in the stratosphere began to change from strong to weak (Eurasian weak polar vortex type). The planetary wave is dispersed downstream, and the southeastern branch wave train carries energy and affects the northern part of Xinjiang. The tropospheric polar vortex then also showed signs of weakening, with cold air splitting southwards. After that, it entered a temporary stage. The cold air from the Arctic accumulated in front of the high-pressure ridge of the Ural Mountains, which was conducive to the strengthening and maintenance of the large inclined ridge. Meanwhile, the cold air at the surface formed an accumulation in the Central Siberia. Finally, accompanied by the strongly developed Siberian high pressure, the large tropospheric trough and

49 inclined ridge lead the cold air to the south, which affected northern Xinjiang three days later.

50 **Key words:** Northern Xinjiang, Persistent extremely cold events, Critical circulation system,  
51 Stratosphere-troposphere interaction

## 53 1 引言

54 在全球变暖背景下,极区增暖速度为全球平均的两倍左右,这一现象被称为“北极放大”。  
55 有研究指出北极放大效应会导致四季出现更多极端天气 (Mori et al., 2012; Smith et al., 2019)。  
56 20 世纪 90 年代末以来,发生在欧亚大陆的冬季极端寒冷事件频率增加,与此同时,北半球  
57 中高纬大陆冬季地面温度也呈变冷趋势 (Francis et al., 2017; Overland and Wang, 2018; Cohen  
58 et al., 2020)。而在中国区域,近年来研究表明:持续性极端低温事件的频次在我国不同地区  
59 有着不同的变化特征 (Zhou et al., 2016; 李尚锋等, 2018)。21 世纪以后华北持续性异常低温  
60 事件增多 (刘樱等, 2016); 20 世纪 90 年代以前东北极端低温呈减少态势, 90 年代以后逐渐  
61 增加 (唐孟琪和曾刚, 2017; 李尚锋等, 2018); 西北和西南都呈现出不同程度的频次下降 (付  
62 冬雪等, 2011); 新疆寒潮频次总体呈现出减少趋势 (白松竹等, 2015; 博尔楠, 2019), 但极  
63 端冷事件的持续时间没有明显缩短 (陈颖等, 2022); 空间分布上, 个别山区寒潮频次有显著  
64 增加趋势 (江远安等, 2018; 索朗塔杰等, 2020), 此外区域极端冷事件的发生范围在扩大 (陈  
65 颖等, 2022)。与普通寒潮天气有所不同, 持续的大范围极端低温对交通运输、能源供应和人  
66 民生命财产安全造成的影响更为严重, 2008 年南方发生冰冻雨雪事件, 持续时间长, 致灾  
67 严重, 引起学者的高度重视, 此后众多学者相继开展了该类事件持续性成因的研究, 进一步  
68 为延伸期预报提供理论支持 (丁一汇等, 2008; 布和朝鲁等, 2008; 纪立人等, 2008; 王晓娟等,  
69 2013, 吴嘉蕙和任荣彩, 2021)。

70 极端低温事件的发生与大气环流形势密切相关, 大气环流异常是天气气候变化的直接原  
71 因 (Zhou et al., 2016), 西伯利亚高压、乌拉尔山脊、东亚大槽、极涡系统的强弱对我国冬  
72 季降温有很大影响 (麻巨慧等, 2009; 马丽云等, 2021)。此外极端低温事件还与能量传播等  
73 密切相关 (傅慎明等, 2012; Nath and Chen, 2014, 2016; 李刚等, 2020; Xu and Liang, 2020)。  
74 2008 年南方冰冻雨雪事件的两大特征是大范围和持续性, 这与普通寒潮有着一定差异, 其局  
75 地的环流系统是否存在新的特征引起学者的思考, 为区别于普通寒潮, 将此类事件定义为大  
76 范围持续性极端低温事件 (extensive and persistent extreme cold events, 简称 EPECE), 并进  
77 行了大量研究 (布和朝鲁等, 2008; 彭京备和孙淑清, 2017, 2019; 李亚飞和任荣彩, 2019; 艾

78 雅雯等, 2020)。有研究发现 EPECE 的中层影响系统多为一横跨欧亚大陆的大型斜脊, 该斜  
79 脊可从乌拉尔山向东延伸至贝加尔湖地区, 纬向跨度可达 60 个经度 (Bueh et al., 2011; 布和  
80 朝鲁等, 2018)。

81 此类事件的持续性特征, 使得平流层的作用被进一步重视。有研究表明, 平流层环流异  
82 常可通过下传及动力耦合过程, 对流层 AO/NAO 环流型产生影响 (Sun et al., 2016;  
83 Kretschmer et al., 2018), 使得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  
84 西和加深有关, 可对寒潮在我国北部地区爆发产生影响。Nath 等 (2016) 在研究中还发现,  
85 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  
86 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,  
87 使得乌拉尔山的阻塞高压迅速增强, 从而有利于 2008 年 1 月我国南方持续性冷空气的大面  
88 积爆发 (Nath et al., 2014)。因此, 平流层环流异常、平流层-对流层相互作用过程在持续性  
89 极端低温事件中的作用与意义仍有必要进一步探索。

90 持续性极端低温事件对气候变化敏感和脆弱的地区影响更为显著。新疆位于我国西北地  
91 区, 地域辽阔, 地形地貌复杂多样, 气候差异明显, 气象灾害频发。其中强冷空气和寒潮过  
92 程则是新疆重大灾害性天气之一 (江远安等, 2018), 其发生频率高, 对生产生活特别是农、  
93 林牧业影响重大。且南北疆事件发生频次及机理也有所差异, 其中北疆及南部偏北地区、山  
94 区等极端低温事件频数相较更多 (张太西等, 2020)。前人有关新疆极端低温的研究中, 一部  
95 分着重分析寒潮个例, 寻找影响寒潮的重要因素。谭艳梅等 (2009) 分析了连续锋生对持续  
96 性降温和剧烈天气的作用, 庄晓翠等 (2016) 也讨论了冷、暖锋对寒潮事件的影响。牟欢和  
97 赵克明 (2011) 则发现南北两支槽发展形成阶梯槽, 有利于冷事件的发生。李海燕 (2012)  
98 则讨论了寒潮过程的环流异常, 乌拉尔山脊异常增强, 欧亚环流经向性加强, 西西伯利亚低  
99 涡西退南压, 槽脊配置导致冷空气向南爆发 (陈颖等, 2011; 肉孜等, 2013; 李如琦等, 2015)。  
100 此外还有一部分研究了寒潮的气候特征。庄晓翠等 (2010) 统计分析影响了影响寒潮的主要环流  
101 型, 分别为欧洲脊类, 乌山脊类, 纬向型和西西伯利亚脊类这四类。张俊兰等 (2015) 同样  
102 分析了影响寒潮的三类环流型, 乌拉尔山长脊类, 欧洲脊衰退类, 南欧脊东移发展类。刘精  
103 等 (2018) 研究了新疆塔里木盆地的寒潮频次与乌拉尔山位势正异常发展密切相关。

104 可以看到, 前人研究大抵确立了新疆上游高压脊对降温的重要作用, 环流经向加强有利  
105 于冷空气南下, 但对冷事件持续时间及极端程度划分的整理相对缺乏, 针对事件持续性、极  
106 端性成因的讨论较少。因此本文拟通过客观定义新疆北部持续性极端低温事件, 系统分析该  
107 区域此类事件的平流层、对流层关键影响系统, 进一步探讨事件前后平流层-对流层过程的

108 总体特征。分析结果不仅有助于理解北疆持续性极端低温事件的机理、提高对此类事件的预  
109 报水平，同时也将进一步揭示平流层-对流层相互作用过程在区域性极端气候事件发生过程  
110 中的作用。

111

## 112 2 资料与方法

### 113 2.1 研究资料

114 本文所用资料包括：(1) 中国地面气候资料日值数据集，包含了中国 824 个基准、基本  
115 气象站气温的日值数据。考虑到 1951 年以来资料的连续性，本文选取新疆北部（天山以北，  
116 即 43° N 以北）站点共 32 站。(2) NCEP/NCAR 日平均再分析资料，包括位势高度场、风  
117 场、海平面气压场、温度场，水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，垂直方向为 1000-10 hPa 共 17 层。  
118 本文冬季为当年 12 月、次年 1 月和 2 月。所有资料长度为 1951-2019 年(Kalnay et al., 1996)。

### 119 2.2 北疆持续性极端低温事件的定义

120 参考布和朝鲁等 (2018) 和李尚锋等 (2018) 对极端事件的定义方法，本文对北疆持续  
121 性极端低温事件 (persistent extreme cold events, 简称 PECE) 进行定义：

122 (1) 确定测站极端低温阈值：对于每个测站，提取其当日及前后 2 日共 5 日的气温  
123 序列，得到一个样本数为 5 日  $\times$  69 年 = 345 日的气温序列，将此序列升序排列，  
124 取第 10 个百分点值作为该站当日达到极端低温的阈值。

125 (2) 确定极端低温面积：北疆区域达到上述条件的站点数超过该区域总站点数的  
126 50%，则认为该日北疆发生了极端低温事件。

127 (3) 确定持续性：北疆发生极端低温事件的日数达 5 日及以上（寒潮平均持续日数  
128 为 4.6 天），则确定为一次持续性的极端低温事件。定义第一日达到极端低温事  
129 件标准的日期为事件起始日期，达到阈值测站数目最多日为峰值日期。

130 根据上述界定标准，在 1951-2019 年的 69 个冬季中，共有 31 次 PECE 事件发生 (表 1)。

131

132 表 1 1951-2019 年冬季北疆 31 次 PECE 事件的开始日期、峰值日期、影响范围、持续时间和过程强度

133 Table 1 The onset date, peak date, influence range, duration and process intensity of 31 winter PECE events from

134

1951 to 2019					
序号	开始日期	峰值日期	峰值日站点数	持续时间	过程均温/°C
1	1959-01-08	1959-01-09	25	8	-27.15
2	1959-12-19	1959-12-22	26	6	-28.76

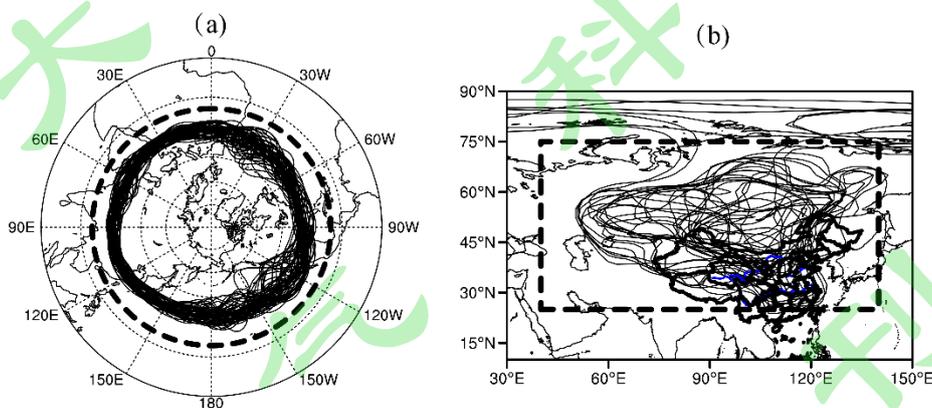
3	1960-01-19	1960-01-23	27	6	-28.62
4	1961-01-09	1961-01-11	27	6	-26.79
5	1964-02-04	1964-02-08	29	8	-27.87
6	1964-02-13	1964-02-17	24	7	-25.79
7	1966-01-23	1966-01-26	28	5	-26.98
8	1966-12-18	1966-12-20	27	5	-29.53
9	1966-12-28	1967-01-06	30	14	-28.91
10	1968-02-04	1968-02-07	25	5	-26.77
11	1969-01-02	1969-01-05	30	6	-28.1
12	1969-01-25	1969-01-30	30	7	-30.95
13	1969-02-12	1969-02-14	28	12	-28.83
14	1972-02-03	1972-02-06	27	5	-27.91
15	1974-02-21	1974-02-24	29	5	-30.09
16	1976-12-23	1976-12-25	31	8	-29.67
17	1977-01-24	1977-01-31	30	12	-27.24
18	1978-02-06	1978-02-07	28	5	-27.35
19	1980-02-01	1980-02-02	21	6	-25.62
20	1981-01-22	1981-01-24	31	6	-28.08
21	1984-01-22	1984-01-26	28	7	-26.74
22	1984-12-14	1984-12-27	32	17	-29.86
23	1988-02-12	1988-02-13	30	6	-28.94
24	1994-01-16	1994-01-17	26	5	-26.57
25	1996-01-12	1996-01-14	23	5	-26
26	1998-01-16	1998-01-18	23	6	-26.47
27	2005-01-26	2005-01-28	27	9	-27.06
28	2006-01-03	2006-01-05	30	5	-28.3
29	2008-01-20	2008-01-21	27	6	-27.03
30	2011-01-02	2011-01-04	29	10	-29.11

135

136 **2.3 环流指数**

137 为了定量描述 PECE 发生发展过程中，关键环流影响系统的演变，本文将利用王盘兴等  
 138 (2010) 方法对环流系统进行指数定义，用指数变化来表征系统演变情况。与现有的环流指  
 139 数计算方法相比，本文采用的方法动力学意义更为明确，数学定义更加严格，详细证明请参  
 140 考王盘兴等 (2010)。

141 王盘兴等 (2010) 提出，闭合系统逐日的面积指数  $S(t)$  是  $t$  日系统特征等值线  $f_0$  在搜索  
 142 区  $\Omega$  上围成的区域  $D(t)$  的面积 (图 1 给出以第一次 PECE 为例的极涡系统和西伯利亚高压  
 143 系统特征等值线及搜索区示意图)，注意搜索区  $\Omega$  的选定既要保证逐日  $\Omega$  内存在  $f_0$ ，又要保  
 144 证  $f_0$  包围区域的主要部分落在  $\Omega$  内； $f(t)$  表示第  $t$  日搜索区  $\Omega$  内的位势高度值 (气压值)，强  
 145 度指数  $P(t)$  是高度差 (压差)  $f(t) - f_0$  在  $D(t)$  上的面积加权平均值；中心位置指数  $(\lambda_c, \phi_c)$  是  $f(t) - f_0$   
 146 对应的重力场的重心位置。据此求得了 PECE 期间的逐日环流指数  $S$ 、 $P$ 、 $(\lambda_c, \phi_c)$ ，用以研究  
 147 影响系统的延伸期演变过程。根据这一方法，麻巨慧等 (2009) 对 2008 年南方冰冻雨雪灾  
 148 害关键环流系统的演变进行了研究。马丽云等 (2021) 研究了 2010 年新疆持续性极端降雪  
 149 的环流异常。



150

151 **图 1** 第一次 PECE 峰值日前后关键系统逐日特征等值线  $f_0$  (黑色实线) 和搜索区  $\Omega$  (黑色虚线包围  
 152 区) 综合图: (a) 100 hPa 极涡  $f_0$  (1628 dagpm),  $\Omega$  (20°N 以北), 峰值日前 30 日-峰值日后 30 日; (b) 1000  
 153 hPa 西伯利亚高压  $f_0$  (260 gpm),  $\Omega$  (40-140°E, 25-75°N), 峰值日前 20 日-峰值日后 20 日

154 Fig.1 The daily characteristic contour  $f_0$ (solid black line) and search area  $\Omega$ (encircled by the black dotted  
 155 line) of the key system before and after the first PECE peak day: (a) 100 hPa polar vortex  $f_0$ (1628 dagpm),  
 156  $\Omega$ (north of 20°N), 30 days before the peak to 30 days after the peak; (b) Siberian high  $f_0$ (260 gpm),  $\Omega$ (40-140°E,  
 157 25-75 °N), 20 days before the peak to 20 days after the peak

158

## 159 2.4 诊断方法

160 本文以 31 次事件的峰值日为基准日，对 PECE 事件前后多日的环流进行合成分析，研  
161 究平流层、对流层环流的异常变化特征，本文插图中 0d 表示峰值日，-nd/nd 表示峰值日前  
162 （后）第 n 天，t 检验验证合成结果的显著性水平。

163 本文利用超前（滞后）相关分析，定量研究平流层、对流层各关键环流系统与地面温度  
164 的相关关系。进而挑选与温度密切相关的对流层环流指数进行多元回归，建立对流层关键系  
165 统异常指数 CAI (critical systems anomaly index)，以此为纽带，寻找对流层环流与平流层环  
166 流的联系。建立平流层极涡异常指数 PAI (polar anomaly index) 作为延伸期预测温度变化的  
167 定量指标。考虑到事件的年代际变率干扰，建立指数时将挑选 15 次过程的环流指数序列 (I  
168 区极涡强度指数 p 和中心位置指数  $\Phi$ ) 进行多元回归，挑选剩余过程环流指数序列进行验证。  
169 其中 15 次过程为挑选的第 1、3、5 等奇数次过程。每次过程时间范围为峰值日前 30 日至峰  
170 值日后 30 日，共 60 日。

171 本文利用 Takaya 和 Nakamura (2001) 定义的准地转条件下的三维波通量分析与 PECE  
172 相关的平流层波活动通量，表达式如下：

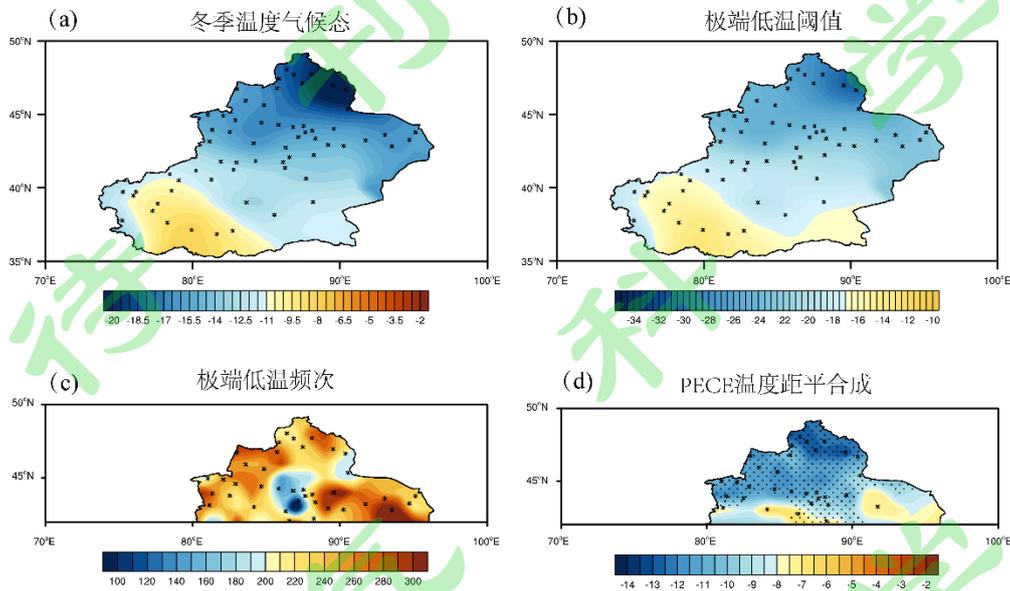
$$173 \quad W = \frac{1}{2|U|} \left\{ \begin{array}{l} U(\psi_x'^2 - \psi' \psi_{xx}') + V(\psi_x' \psi_y' - \psi' \psi_{xy}') \\ U(\psi_x' \psi_y' - \psi' \psi_{xy}') + V(\psi_y'^2 - \psi' \psi_{yy}') \\ \frac{f_0^2}{N^2} [U(\psi_x' \psi_p' - \psi' \psi_{xp}') + V(\psi_y' \psi_p' - \psi' \psi_{yp}')] \end{array} \right\} \quad (1)$$

174 其中  $U = (U, V)$  表示风场冬季气候场。  $\psi' = \frac{H'}{f_0}$ ， $H'$  为位势， $f_0$  为科氏参数，该项表示  
175 PECE 期间准地转流函数相对冬季气候场的扰动。  $N^2$  为静力稳定度参数。

## 176 3 北疆冬季 PECE 的基本特征

177 为探究新疆北部冬季持续性极端低温事件的频次特征，对其时空分布进行了分析。从其  
178 时间分布来看（表 1），20 世纪 60 年代北疆 PECE 发生频次最多，占据所有事件的 35%，此  
179 后 PECE 逐渐减少，70-80 年代频次相当各占 15%，90 年代至今 PECE 进一步减少，仅占总  
180 频次 10%。对其空间分布进行分析。由图 2a 可见，新疆冬季温度气候态呈北冷南暖的分布，  
181 极冷中心位于阿勒泰山沿线，与之相似各站极端低温阈值的分布也表现为自东北至西南逐渐  
182 减弱（增暖）的态势（图 2b）。基于各站极端低温阈值标准，给出 1951-2019 年北疆极端低  
183 温频次分布（图 2c），可以看到，额尔齐斯河流域沿线皆为极端低温高发区，频次最高的地  
184 区主要位于阿勒泰、布尔津和巴尔巴盖一带，此外温泉、博乐及精河一线也是极端低温频次

185 较高的区域。依照北疆 PECE 的定义标准，挑选出 31 次 PECE 过程（表 1），将 31 次事件  
 186 的温度异常场进行合成分析（图 2d），可以看到合成场中，北疆几乎全区都呈现出显著的冷  
 187 异常，其中冷异常大值中心依然出现在额尔齐斯河流域一线。



188

189 图 2 1951-2019 年冬季 (a) 新疆地面温度气候态 (b) 新疆极端低温阈值分布；星号为全疆站点分布 (c)  
 190 北疆极端低温频次 (d) 北疆 31 次 PECE 过程温度异常合成，打点超过 99% 显著性检验；星号为北疆站点  
 191 分布

192 Fig. 2 The distribution of (a) the climatological surface air temperature (SAT) and (b) extremely low temperature  
 193 threshold in Xinjiang province, and (c) the frequency of extremely low temperature and (d) SAT anomalies  
 194 composited for 31 PECE cases in northern Xinjiang in the winter during 1951-2019. Asterisks in (a-b) and (c-d)  
 195 are the station distributions in Xinjiang and northern Xinjiang, respectively. Dotted areas mark the 95% confidence  
 196 level.

197

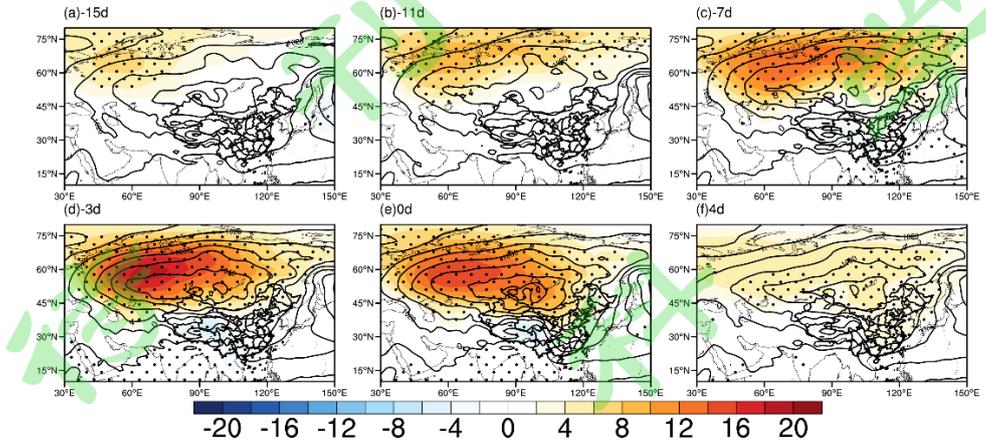
## 198 4 北疆 PECE 对流层关键系统异常特征

### 199 4.1 西伯利亚高压

200 有研究表明极区向欧亚大陆输送冷空气，在西伯利亚关键区堆积（杨冬东等, 2020; 吴  
 201 嘉蕙和任荣彩, 2021）。因而下文将对北疆 PECE 发生发展过程中，西伯利亚高压的异常变化  
 202 进行详细分析，探究西伯利亚关键区地面冷高压活动特征与冷空气堆积和爆发的关系。

203 图 3 是北疆 31 次 PECE 期间海平面气压及其异常场的合成演变。可以看到，PECE 峰  
 204 值日前 15 日（图 3a），西伯利亚高压中心位于贝加尔湖西侧，高压中心值为 1040 hPa，乌  
 205 拉尔山附近开始出现显著正异常；峰值日前 11 日至 7 日（图 3b, c），原乌拉尔山正异常逐  
 206 渐扩展至整个西伯利亚地区，西伯利亚高压也进一步增强，中心值达到 1050 hPa；至峰值日  
 207 前 3 日（图 3d），高压正异常达到最强，并南扩至我国新疆及东北地区；PECE 发生期间（图

208 3e), 高压正异常持续维持, 且南下至我国东南沿海一带, 在此期间新疆北部一直处在西伯  
 209 利亚高压异常区控制, 且处在高压大值中心南边缘; 至 PECE 后 4 日 (图 3f), 西伯利亚高  
 210 压中心强度明显减弱, 异常区缩减、强度减弱, 环流逐渐接近气候态水平。



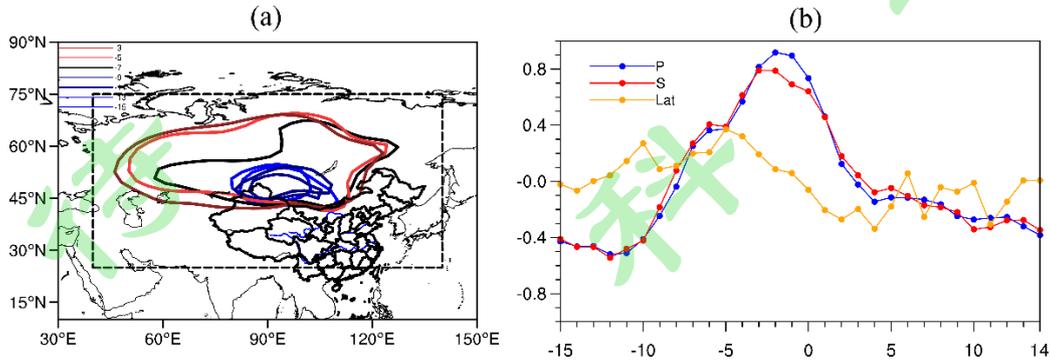
211  
 212 图 3 北疆 31 次 PECE 海平面气压 (等值线, 单位: hPa) 及海平面气压距平 (阴影) 的合成演变  
 213 打点超过 95% 显著性检验。-n d (n d) 表示峰值日前 (后) 第 n 天, 下同

214 Fig. 3 The composite evolution of sea level pressure (contour, unit: hPa) and its anomaly (shading) for 31 PECE  
 215 cases in northern Xinjiang from 15 days preceding to 7 days after the peak date. Dotted area is more than 95%  
 216 significance test.

218 上述研究表明, PECE 峰值前, 由乌拉尔山一带发展的位势高度正异常已然扩展至西  
 219 伯利亚地区, 使得西伯利亚高压显著增强。为了量化研究西伯利亚高压与 PECE 事件的关  
 220 系, 将 (25-75°N, 40-140° E) 区域确定为西伯利亚高压的主要活动区域 (图 1b), 对峰值  
 221 日前后 20 日内的西伯利亚高压系统进行搜索并计算相应的环流指数, 从而构建各个指数与  
 222 PECE 事件的内在定量联系。

223 图 4 给出了西伯利亚高压特征等值线和其各个指数的时间演变序列。由图 4a 可见,  
 224 特征线在 PECE 峰值日前 15 日至 9 日, 一直位于贝加尔湖-巴尔喀什湖一带; 至 PECE 峰值  
 225 日前 7 日, 特征等值线范围迅速扩大, 其北缘从初始阶段的 50° N 北伸至 70° N 左右; 事  
 226 件爆发前 7 至 3 日, 特征等值线西缘由 80° E 发展至 50° E, 至此特征等值线范围扩展到一  
 227 定程度, 扩展速度减缓, 表明此时西伯利亚影响范围较大、发展强盛。这与西伯利亚高压面  
 228 积指数有着很好的对应 (图 4b), 可以看到, 峰值日前 10 日开始高压面积在迅速增大, 至  
 229 前 3 日面积达到最大, 此后面积逐渐减少。西伯利亚高压强度指数与面积指数变化几乎呈同  
 230 步态势, 表明峰值前高压强度在持续增强, 至峰值日前 3 日达到最强。而由西伯利亚高压中  
 231 心位置所在纬度可以看到, 峰值日前 5 日开始, 高压中心已经开始迅速南压, 表明此时西伯  
 232 利亚高压开始向南影响。由环流指数超前于温度的时滞相关 (见表 2), 可以进一步确定以

233 上关系，高压强度指数  $P$  超前温度 0-8 天皆存在着显著的负相关，此相关关系在  $P$  超前温  
 234 度 3 日时达到最好。西伯利亚高压面积指数  $S$  有着相似的特征。高压强度中心所在纬度  $\phi$   
 235 超前温度 5-10 天为显著负相关，同期正相关达显著水平，这表明前期高压中心偏北，随后  
 236 南下影响，此时冷空气侵袭，温度降低。综上可知，前期西伯利亚高压偏强、面积偏大且中  
 237 心南移，后期温度下降，有利于北疆 PECE 的发生，这一关系可提前 8 天维持显著。



238  
 239 图 4 北疆 31 次 PECE 过程西伯利亚高压 (a) 特征等值线合成演变 (单位: gpm) (b) 强度  $P$ 、面积  $S$ 、中  
 240 心位置所在纬度  $\phi$  合成演变 (已标准化, 单位为 1)

241 Fig. 4 (a) The distribution of the characteristic contour (unit: gpm) and (b) the temporal evolution of standardized  
 242 intensity  $P$ , area  $S$ , and latitude  $\phi$  of the central position of Siberian High composite for the 31 PECE cases from 15  
 243 days preceding to 14 days after the peak date (standardized, unit is 1).  
 244

245 表 2 北疆 31 次 PECE 西伯利亚高压参数 (包括强度  $P$ 、面积  $S$  和中心纬度  $\phi$ )、乌拉尔山强度指数  $U$  超前  
 246 地面温度  $t$  的相关 ( $r_{Pt}$ ;  $r_{St}$ ;  $r_{\phi t}$ ;  $r_{Ut}$ );

247 加粗表明相关系数通过了 99% 显著性检验, 星号为相关系数最大值

248 Table 2 The correlation coefficients of the Siberian high parameters (including intensity  $P$ , area  $S$ , and central  
 249 latitude  $\phi$ ) and Ural high intensity index  $U$  leading the SAT in 31 PECE events. The Bolds indicates that the  
 250 correlation coefficient has passed the 99% significance test. Asterisk represent the maximum value of the  
 251 confidence coefficients in each line of the table.

	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
$r_{Pt}$	-0.03	-0.23	<b>-0.43</b>	<b>-0.61</b>	<b>-0.75</b>	<b>-0.84</b>	<b>-0.91</b>	<b>-0.94*</b>	<b>-0.94</b>	<b>-0.87</b>	<b>-0.71</b>
$r_{St}$	-0.06	-0.27	<b>-0.50</b>	<b>-0.68</b>	<b>-0.80</b>	<b>-0.88</b>	<b>-0.93</b>	<b>-0.95*</b>	<b>-0.92</b>	<b>-0.83</b>	<b>-0.68</b>
$r_{\phi t}$	<b>-0.54*</b>	<b>-0.52</b>	<b>-0.52</b>	<b>-0.51</b>	<b>-0.47</b>	<b>-0.43</b>	-0.33	-0.22	0.001	0.26	0.42*
$r_{Ut}$	-0.37	<b>-0.49</b>	<b>-0.60</b>	<b>-0.68</b>	<b>-0.75</b>	<b>-0.83</b>	<b>-0.91</b>	<b>-0.92*</b>	<b>-0.86</b>	<b>-0.74</b>	<b>-0.56</b>

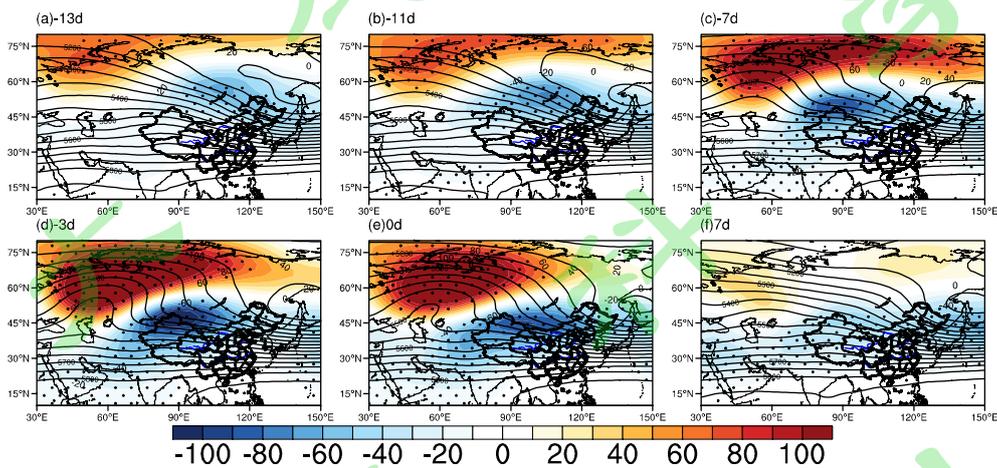
252

## 253 4.2 乌拉尔山高压脊

254 上文研究了影响 PECE 的地面关键系统西伯利亚高压的异常变化, 下文将对流层中层的  
 255 关键影响系统进行研究。图 5 为北疆 31 次 PECE 期间, 500 hPa 位势高度及其异常场的合  
 256 成演变。由 5a 图可见, PECE 峰值日前 13 日, 新地岛附近有一高压脊开始建立, 且伴有位  
 257 势高度正异常发展, 以贝加尔湖为中心的负位势异常一直延伸至东亚大槽; PECE 峰值日前

258 11 日至 7 日，正位势异常持续加强东扩，原新地岛高压脊已发展为乌拉尔山向东北方向延  
 259 伸至中西伯利亚北侧的东北-西南向高压脊，负位势异常中心已西移至贝加尔湖至巴尔喀什  
 260 湖一带，同时此区域有一东西向伸展的横槽开始建立，对应着来自极区的大量冷空气在斜脊  
 261 前的中西伯利亚地区堆积（图 5b-c, 图 3b-c）；至事件发生前 3 日，高压脊位置维持不变但  
 262 发展更为强盛，正异常范围横跨近 100 个经距，此跨度已达到布和朝鲁（2008）提出的大型  
 263 斜脊标准，负位势异常强度和范围皆达到最强，横槽加深发展（图 5d）；PECE 期间，大型  
 264 斜脊斜槽维持形态，向下游缓慢移动，西伯利亚高压携带冷空气进向东南方向扩展（图 5e, 图  
 265 3e），使得冷空气入侵我国西北，导致大幅度降温。此后大型斜脊强度逐渐减弱（图 5f），气  
 266 流恢复平直，对应影响北疆冷空气的强度也相应减弱。

267 进一步选取斜脊发生区，将该区位势高度距平加权区域平均形成一高压强度指数，将其  
 268 与温度进行相关分析，定量研究斜脊系统与 PECE 的相关关系，由表 2 第 4 行可知，斜脊系  
 269 统提前 9 日时即与温度存在显著的负相关关系，表明前期高压系统越强，后期地面温度越低，  
 270 这一关系在高压提前 3 日时达到最好。



271  
 272 图 5 北疆 31 次 PECE 合成的 500hPa 位势高度（等值线，单位：gpm）及其距平（阴影）的演变  
 273 打点超过 95%显著性检验的区域

274 Fig. 5 As in Fig. 3, but for geopotential height and its anomaly at 500 hPa

275

276 由上文可知，PECE 过程的演变与地面西伯利亚高压系统、对流层中层乌拉尔山-西伯  
 277 利亚大型斜脊的发展密切相关，二者可以认为是 PECE 发生发展的对流层关键影响系统。上  
 278 文提取了两个系统的环流指数，定量的研究了其与温度的时滞关系（表 2），为将各个指数  
 279 集约化，进一步选取两个系统与温度最为密切的环流指数，即西伯利亚高压面积指数 S 与  
 280 斜脊高压系统强度指数 U，利用多元线性回归方法，基于两个环流指数来建立冬季北疆 PECE  
 281 的对流层关键系统异常指数（CAI），具体方法见 2.4，可得：

282 
$$CAI = -0.069 - 0.083 \times S - 0.027 \times U \quad (2)$$

283 对流层 CAI 用以定量化表征 PECE 过程中对流层关键影响系统的演变，下文将以此  
284 指数为纽带，探究 PECE 过程中平流层与对流层环流系统之间的联系。

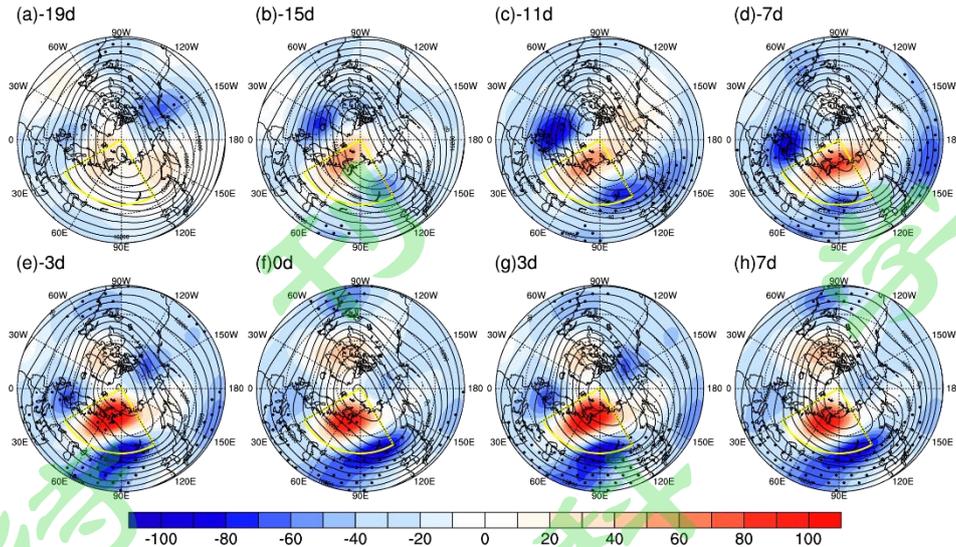
285

## 286 5 北疆 PECE 的平流层关键系统异常特征

### 287 5.1 平流层极涡

288 为了考察在 PECE 中平流层、对流层环流的异常变化的关系，下文将给出对流层关键系  
289 统异常指数和平流层 100 hPa 极涡系统环流指数的时间演变进行对比分析。但平流层极涡是  
290 位于极区的庞大闭合系统，考虑其对区域性极端事件的影响时，前人研究往往也会采取将极  
291 涡分区的方法 (Frauenfeld and Davis, 2003)。不同于常规的极涡划分范围，本文将对北疆  
292 PECE 过程中 100hPa 环流场进行合成分析，观察对比后选取最恰切的极涡分区范围，继而  
293 对 PECE 过程中各区极涡的异常演变进行探究。图 6 给出了北疆 31 次 PECE 期间，平流层  
294 100 hPa 位势高度及其异常场的合成演变。

295 可以看到，PECE 发生前 19 日至前 7 日，新地岛上空的有正位势高度异常发展，其西  
296 南的大西洋上空、以及东南的东亚上空有两负位势异常中心，且负异常在 PECE 发生前 11  
297 日已经较为显著。PECE 发生前 3 日，新地岛上空正位势异常中心开始显著，两负位势异常  
298 中心继续加强发展，此外格陵兰岛上空以及波弗特海上空分别有一弱的正负异常中心发展，  
299 极区呈明显的 2 波型异常 (“- + - +”)，依此将极涡 (50° N 以北) 做一分区，分别为极涡 I  
300 区 (30° E-120° E)，极涡 II 区 (120° E-150°W)，极涡 III 区 (150° W-60°W)，极涡 IV  
301 区 (60° W-30°E)。对四个区域的极涡进行搜索，并进行强度指数、面积指数以及中心位置  
302 指数的计算。



303  
304 图 6 北疆 31 次 PECE 合成的 100hPa 位势高度（等值线，单位：dagpm）及其距平（阴影）的演变  
305 打点超过 95%显著性检验的区域

306 Fig. 6 As in Fig. 5, but at 100 hPa

307  
308 由各区极涡环流指数超前于温度的时滞相关（见表 3）可见，I 区极涡的异常演变与  
309 温度变化最为密切，其中强度指数  $p$  与中心位置指数  $\Phi$  与温度的相关关系，在延伸期依然较  
310 为显著，面积指数  $s$  与地面温度的显著时滞相关可达 8 天。表明极涡先于温度变化的时间可  
311 达延伸期，前期极涡越弱、范围越大、中心偏南，后期地面温度越低。有鉴于此，考虑利用  
312 I 区极涡的相关指数建立一延伸期预报模型 PAI，考虑延伸期时间要求，选取强度指数  $p$  与  
313 中心位置指数  $\Phi$ ，利用多元线性回归建立，可得：

$$314 \quad \text{PAI} = -0.123 + 0.179 \times p + 0.18 \times \Phi \quad (2)$$

315 其中，在建立模型阶段任意挑选 15 次 PECE 进行推演，此后将其与地面温度进行时滞  
316 相关的合成分析，可以看到（表 3 第 18 行）二者在延伸期依然存在显著正相关，其中平流层  
317 PAI 提前温度 13 日时，相关关系达到最强为 0.63。继续利用此模型对剩余次数的 PECE  
318 进行回报检验，发现二者依然存在显著正相关，提前 14 日时，相关系数最大为 0.74（表 3  
319 第 19 行）。这表明，平流层 PAI 在延伸期对冬季北疆 PECE 过程地面气温具有一定预报意义。

320 综上可知平流层极涡系统与地面温度的时滞关系（表 3 第 18、19 行），较对流层系统与  
321 地面的时间时滞关系更为提前（表 2 第 5、6 行），因此可以认为 PECE 发生前，平流层环流  
322 先行调整，而后对流层环流随之变化。下文将继续探讨这一具体的平流层-对流层过程。

323  
324 表 3 北疆 31 次 PECE 过程 100 hPa 不同分区极涡参数（包括强度  $p$ 、面积  $s$  和中心纬度  $\Phi$ ）超前地面温度  
325  $t$  的相关系数表，以及任意 15 次平流层极涡异常指数 PAI 超前地面温度及剩余检验的相关（ $R_{PT}$ ； $Res$ ）系

326

数表：加粗表示超过 95%显著性检验

327

Table 3 The correlation coefficients of 100-hPa polar vortex parameters (including intensity p, area s, and central

328

latitude  $\phi$ ) leading surface air temperature in the 31 PECE cases in northern Xinjiang and any 15 times of

329

stratospheric polar vortex anomaly index PAI leading surface air temperature and residual test. Bold means the

330

value exceeding 95% confidence level.

	15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
极涡 I 区																
$\Gamma_{pt}$	<b>0.35</b>	<b>0.33</b>	<b>0.31</b>	<b>0.30</b>	<b>0.30</b>	<b>0.26</b>	<b>0.25</b>	0.24	0.20	0.15	0.11	0.10	0.08	0.04	-0.01	-0.11
$\Gamma_{st}$	0.25	0.18	0.08	-0.01	-0.09	-0.15	-0.21	<b>-0.25</b>	<b>-0.31</b>	<b>-0.39</b>	<b>-0.48</b>	<b>-0.54</b>	<b>-0.59</b>	<b>-0.63</b>	<b>-0.63</b>	<b>-0.61</b>
$\Gamma_{\phi t}$	0.03	0.13	0.23	<b>0.35</b>	<b>0.43</b>	<b>0.47</b>	<b>0.50</b>	<b>0.55</b>	<b>0.59</b>	<b>0.65</b>	<b>0.7</b>	<b>0.73</b>	<b>0.73</b>	<b>0.70</b>	<b>0.63</b>	<b>0.52</b>
极涡 II 区																
$\Gamma_{pt}$	-0.13	<b>-0.20</b>	<b>-0.23</b>	-0.24	-0.22	-0.10	-0.007	0.09	0.15	<b>0.17</b>	<b>0.19</b>	0.19	0.18	0.14	0.11	0.09
$\Gamma_{st}$	<b>0.04</b>	<b>-0.04</b>	<b>-0.11</b>	-0.19	-0.25	-0.22	-0.20	-0.15	<b>-0.15</b>	<b>-0.15</b>	<b>-0.13</b>	-0.09	-0.01	0.06	0.12	0.17
$\Gamma_{\phi t}$	<b>-0.23</b>	<b>-0.17</b>	<b>-0.10</b>	-0.03	0.01	-0.02	-0.07	-0.13	<b>-0.17</b>	<b>-0.19</b>	-0.22	-0.25	-0.29	-0.31	-0.30	-0.29
极涡 III 区																
$\Gamma_{pt}$	<b>-0.29</b>	-0.24	-0.17	-0.10	-0.06	-0.06	-0.10	-0.16	-0.22	<b>-0.29</b>	<b>-0.36</b>	<b>-0.40</b>	<b>-0.39</b>	<b>-0.34</b>	<b>-0.27</b>	-0.22
$\Gamma_{st}$	<b>0.26</b>	0.21	0.15	0.09	0.005	-0.13	-0.24	<b>-0.37</b>	<b>-0.46</b>	<b>-0.48</b>	<b>-0.47</b>	<b>-0.41</b>	<b>-0.34</b>	<b>-0.27</b>	-0.20	-0.19
$\Gamma_{\phi t}$	<b>-0.26</b>	-0.25	-0.21	-0.16	-0.09	<b>-0.05</b>	-0.03	-0.02	-0.01	-0.03	-0.07	-0.11	-0.13	<b>-0.17</b>	<b>-0.22</b>	<b>-0.27</b>
极涡 IV 区																
$\Gamma_{pt}$	<b>-0.37</b>	<b>-0.44</b>	<b>-0.49</b>	<b>-0.53</b>	<b>-0.54</b>	<b>-0.51</b>	<b>-0.47</b>	<b>-0.39</b>	<b>-0.29</b>	-0.17	-0.07	0.01	0.09	0.15	0.17	0.17
$\Gamma_{st}$	0.17	0.08	-0.01	-0.12	-0.18	-0.16	-0.11	-0.03	0.07	0.16	0.21	0.23	<b>0.26</b>	<b>0.28</b>	<b>0.28</b>	<b>0.30</b>
$\Gamma_{\phi t}$	-0.03	0.05	0.11	0.17	0.20	0.19	0.13	0.03	-0.05	-0.12	-0.16	-0.21	<b>-0.27</b>	<b>-0.33</b>	<b>-0.39</b>	<b>-0.46</b>
极涡 I 区																
$R_{PT}$	<b>0.59</b>	<b>0.62</b>	<b>0.63*</b>	<b>0.62</b>	<b>0.58</b>	<b>0.55</b>	<b>0.53</b>	<b>0.48</b>	<b>0.40</b>	0.30	0.20	0.11	0.01	-0.08	-0.20	-0.31
Res	<b>0.73</b>	<b>0.74*</b>	<b>0.72</b>	<b>0.66</b>	<b>0.58</b>	<b>0.48</b>	<b>0.36</b>	0.25	0.14	<b>0.04</b>	<b>-0.03</b>	-0.11	-0.21	-0.31	-0.38	-0.43

331

## 332 5.2 平流层-对流层过程

333 图 7 给出了对流层关键系统异常指数 CAI 与平流层各区极涡的环流指数在 PECE 过程

334 中的时间演变。可以看到，对流层 CAI 的演变与平流层 I 区极涡强度的变化呈相反态势。

335 对应着平流层极涡强度的异常偏弱-急剧减弱-逐渐恢复，对流层 CAI 随之表现为异常偏大-

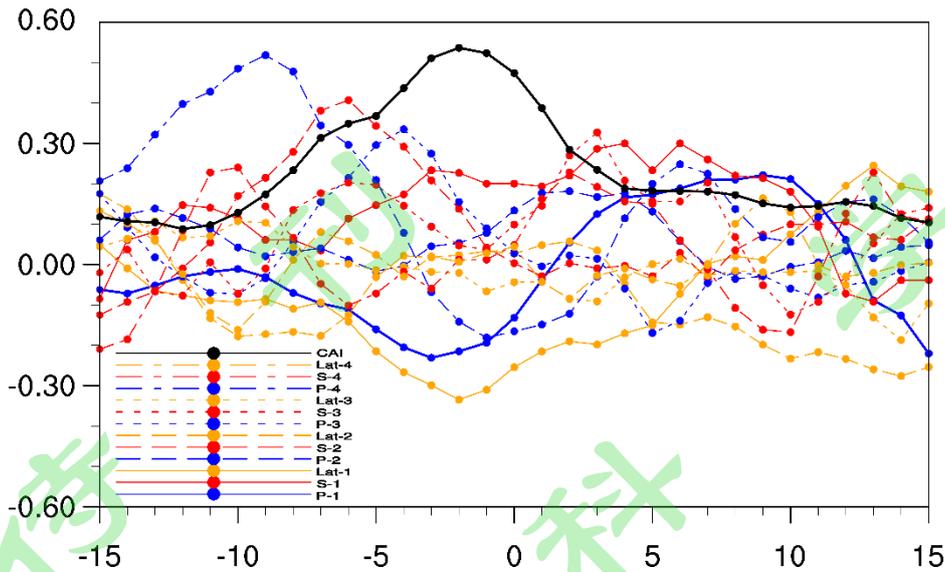
336 急剧增大-逐渐降低。意味着对流层大型斜脊和西伯利亚高压开始加强-强盛发展-崩溃消亡，

337 对应着 PECE 过程中地面冷空气堆积-爆发-减弱。进一步说明 PECE 过程中平流层环流发生

338 了阶段性的调整，且其演变与对流层的变化密切相关，从图 7 中可以看到，平流层极涡系统

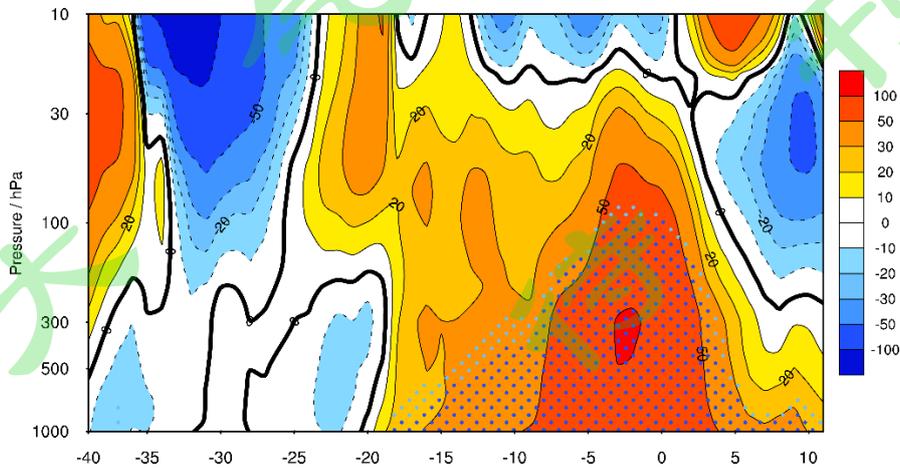
339 变化要略超前于对流层关键系统的变化，下文将继续探讨二者异常变化。

340



341 图 7 北疆 31 次 PECE 过程 100 hPa 不同分区极涡的环流指数及对流层关键系统异常指数 CAI 的合成演变  
 342  
 343 Fig. 7 The temporal evolution of the circulation index of the 100-hPa polar vortex and the CAI of the key  
 344 tropospheric system abnormal index composite for the 31 PECE cases in northern Xinjiang  
 345

346 为了更清楚的观察 PECE 过程中平流层、对流层的异常演变，图 8 给出 I 区极涡的强度  
 347 演变。将北半球  $65^{\circ}$  N 以北位势高度异常的加权区域平均值定义为极顶位势高度 PCH (polar  
 348 cap height, kim et al, 2014)，用以表征极涡强度，正异常代表着极涡偏弱，给出 PECE 峰值  
 349 日前 40 日至峰值日后 10 日 PCH 的高度-时间合成演变。由图 8 可见，PECE 峰值日前 25  
 350 日，平流层极涡首先开始减弱。至峰值日前 20 日开始，对流层也逐渐出现了显著的极涡减  
 351 弱。随着峰值日的推进，对流层显著范围也随之增大，至峰值日左右，平流层低层至对流层  
 352 有着深厚的显著弱极涡区，峰值日后平流层极涡迅速恢复，对流层依然有着微弱的弱极涡。  
 353 可以认为 PECE 过程中，平流层、对流层极涡皆存在着异常减弱过程，且平流层极涡要先于  
 354 对流层开始。



355 图 8 北疆 31 次 PECE 过程极顶位势高度 PCH 的时间-高度合成演变 (单位: dagpm)  
 356

357

浅蓝（深蓝）打点超过 95%（99%）显著性检验的区域

358

Fig. 8 The time-height composite evolution of the polar cap height in 31 PECE caese in northern Xinjiang (unit:

359

dagpm) The light blue (dark blue) dotted area is the area that exceeds the 95% (99%) significance test

360

361

下面将利用 Takaya-Nakamura (T-N) 波通量进一步诊断 PECE 过程中，平流层 I 区极

362

涡对极端低温事件的影响。图 9 给出峰值日前，极涡 I 区 100 hPa 位势高度及 T-N 波通量异

363

常场的合成演变，进而研究波动传播过程。由图 9a 可见，PECE 峰值日前 19 日，极涡 I 区

364

西部的巴伦支海至乌拉尔山一带已有位势高度正异常存在，表明极涡减弱。此处为波能量源

365

地分两路向下游频散，其中东南向的频散波列已然影响到了新疆北部。峰值日前 15 日至 7

366

日（图 b-d），正位势异常持续加强，频散至新疆北部的波通量也越来越大。至峰值日前 3

367

日（图 e），频散至新疆北部的波通量达到最大，峰值日时依然存在正能量输送（图 9f）。

368

综上所述，对应冷空气开始堆积前（峰值日前 25 日），平流层 I 区极涡开始了由强到弱

369

的转变，随后行星波开始向下游频散，东南支波列携带能量影响新疆北部。在此之后对流层

370

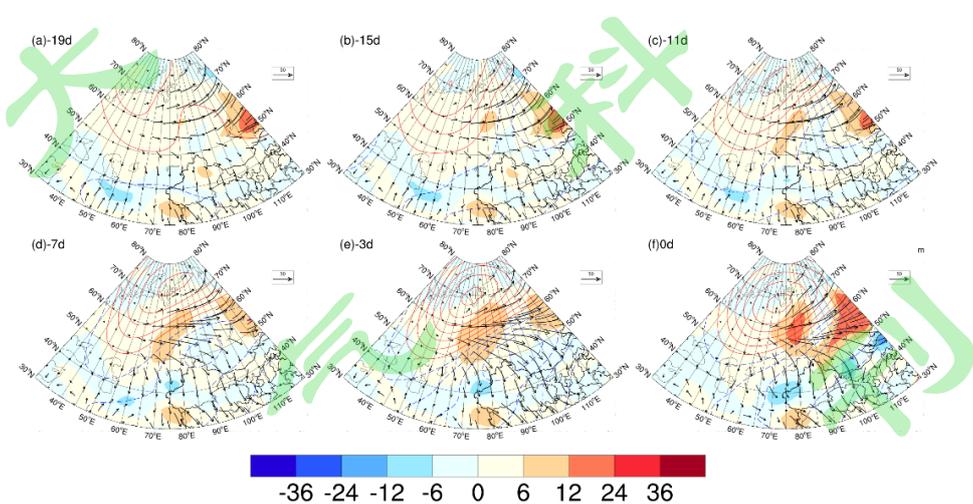
极涡随之减弱南下，有利于大型斜脊建立并维持，有利于冷空气在中西伯利亚地区形成堆积，

371

随着对流层系统发展强盛、崩溃，冷空气爆发影响新疆北部。平流层、对流层的异常环流共

372

同作用，导致了持续性的极端低温事件发生。



373

374

图 9 北疆冬季 31 次 PECE 合成的 100hPa 的 T-N 波通量（矢量，单位： $m^2/s^2$ ）、T-N 波通量散度（阴

375

影，单位： $10^{-6}m^2/s^2$ ）及位势高度异常（等值线，单位：dagpm）的合成演变

376

Fig. 9 T-N wave activity flux (vector, unit:  $m^2/s^2$ ), T-N wave activity flux divergence (shadow, unit:

377

$10^{-6}m^2/s^2$ ) and geopotential height anomaly(unit: dagpm) in 31 PECE caese in northern Xinjiang

378

## 379 6 结论

380 本文利用 1950-2019 年的国家气候中心提供的站点资料和 NCEP/NCAR 再分析资料, 给  
381 出北疆持续性极端低温事件 (PECE) 的定义, 统计北疆 PECE 的强度和频次的年代际特征,  
382 进一步寻找影响事件发生发展的对流层关键影响系统异常变化, 建立对流层关键系统异常指  
383 数, 并以此为纽带, 揭示了 PECE 过程中平流层环流的异常变化, 得到以下结论:

384 (1) 近 70 年间北疆 PECE 共发生 31 次。其中年代际尺度上, 在 20 世纪 60 年代发  
385 生频次最多, 占总数的 35%, 此后逐渐减少, 70-80 年代频次各占 15%, 90 年  
386 代至今 PECE 发生频次仅占 10%。空间分布上, 无论是 PECE 事件中的测站极  
387 端低温频次还是冷空气强度, 极值中心皆在额尔齐斯河流域一线。

388 (2) 北疆 PECE 发展过程中, 平、对流层环流皆发生了阶段性的调整。PECE 峰值  
389 日前 25 日时, 平流层 I 区极涡开始了由强到弱的转变 (欧亚弱极涡型), 面积  
390 增大且持续南压, 行星波向下游频散, 东南支波列携带能量影响新疆北部。对  
391 流层极涡随后强度减弱, 冷空气分裂南下, 来自北冰洋的冷空气在乌拉尔山脊  
392 前堆积, 有利于大型斜脊加强并维持。此后 (峰值前 10 日) 地面冷空气在中西  
393 伯利亚地区形成堆积态势, 随着对流层大型横槽斜脊引导冷空气南下, 地面西  
394 伯利亚高压发展强盛向南影响, 3 日后冷空气影响北疆地区。

395 (3) 北疆 PECE 前期的平流层环流调整可达延伸期尺度, 基于平流层环流指数建立  
396 的延伸期预报模型, 在提前温度 13 日时最为显著。PECE 的对流层环流调整基  
397 本在短期阶段。乌拉尔山高压提前 9 日时即与温度存在显著的负相关关系, 表  
398 明前期高压系统越强, 后期地面温度越低。前期西伯利亚高压偏强、面积偏大  
399 且中心南移, 后期温度下降, 这一关系可提前 8 天维持显著。

400 不同于寒潮天气过程, PECE 在时间尺度上要长于前者, 这也意味着关键影响系统的长  
401 期维持和平流层-对流层过程值得深入探究, 本文仅对历史事件的环流特征进行了初步统计  
402 分析, 给出了 PECE 发生前后的可能平流层-对流层过程。对影响 PECE 发生发展的环流系  
403 统的维持机制仍缺乏完整的理解。局地系统维持的主要原因是什么? 是否存在多尺度之间的  
404 相互作用和能量传输? 将是我们下一步工作的重点。

405

406

407

408 参考文献

- 409 [1] 艾雅雯, 孙建奇, 韩双泽, 等. 2020. 1961~2016 年中国春季极端低温事件的时空特征分  
410 析[J]. 大气科学, 44( 6): 1305-1319. Ai Yawen, Sun Jianqi, Han Shuangze, et al. 2020.  
411 Spatial and temporal characteristics analysis of spring extreme low temperature events in  
412 China from 1961 to 2016 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(6):  
413 1305-1319.
- 414 [2] 白松竹, 博尔楠·哈不都拉, 谢秀琴. 2015. 气候变暖背景下阿勒泰地区寒潮活动变化特  
415 征[J]. 冰川冻土, 37(2): 387-394. Bai Songzhu, Bo Ernan·Habudula, Xie Xiuqin. 2015.  
416 Variation characteristics of cold wave activity in Altay region under the background of  
417 climate warming [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in chinese), 37(2): 387-394.
- 418 [3] 布和朝鲁, 纪立人, 施宁. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 I: 亚  
419 非副热带急流低频波[J]. 气候与环境研究, 13(4): 419-433. Bueh Cholaw, Ji Liren, Shi  
420 Ning. 2008. Mid-term process analysis of rain and snow low temperature weather in southern  
421 my country in early 2008 I: Subtropical jet low frequency waves in Asia and Africa[J].  
422 Climate and Environmental Research (in chinese), 13(4): 419-433.
- 423 [4] 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  
424 斜脊斜槽系统研究进展[J]. 大气科学, 42(3): 656-676. Bueh Cholaw, Peng Jingbei, Xie  
425 Zuowei. 2018. Recent progresses on the studies of wintertime extensive and persistent  
426 extreme cold events in China and large-scale tilted ridges and troughs over the Eurasian  
427 Continent[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 656-676.
- 428 [5] 博尔楠. 2019. 1954-2016 年阿勒泰市春季寒潮过程频数及强度气候特征[J]. 沙漠与绿洲  
429 气象, 13(1): 79~86. Bo Ernan. 2019. The frequency and intensity of cold wave processes in  
430 spring in Altay City from 1954 to 2016 [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 13(1):  
431 79~86.
- 432 [6] Bueh C, Xian Y F U, Xie Z W. 2011. Large-Scale circulation features typical of wintertime  
433 extensive and persistent low temperature events in China[J]. Atmospheric Oceanic Science  
434 Letters, 04(4): 235-241.
- 435 [7] Cohen J, Zhang X, Francis J, et al. 2020. Divergent consensus on Arctic amplification  
436 influence on midlatitude severe winter weather[J]. Nature Climate Change, 10(1): 20-29.
- 437 [8] 陈颖, 江远安, 毛炜峰, 等. 2011. 气候变化背景下新疆北部 2009/2010 年冬季雪灾[J].

- 438 气候变化研究进展, 7(2): 104-109. Chen Ying, Jiang Yuanan, Mao Weiyi, et al. 2011. The  
439 2009/2010 winter snow disaster in northern Xinjiang under the background of climate change  
440 [J]. *Advances in Climate Change Research (in chinese)*, 7(2): 104-109.
- 441 [9] 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 2008. 中国南方2008年1月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的  
442 原因及其与气候变暖的关系[J]. *气象学报*, 66(5): 808-825. Ding Yihui, Wang Zunya, Song  
443 Yafang, et al. 2008. Reasons for the rare low-temperature rain, snow and freezing disasters in  
444 January 2008 in southern China and their relationship with climate warming [J]. *Acta  
445 Meteorologica Sinica (in chinese)*, 66(5): 808-825.
- 446 [10] Francis J A, Vavrus S J, Cohen J. 2017. Amplified Arctic warming and mid-latitude weather:  
447 new perspectives on emerging connections[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews-Climate  
448 Change*, 8(5): e474.
- 449 [11] Frauenfeld O W, Davis R E. 2003. Northern Hemisphere circumpolar vortex trends and  
450 climate change implications[J]. *Journal of Geophysical Research*, 108: 4423.
- 451 [12] 付冬雪, 孙照渤, 李忠贤, 等. 2011. 1955-2006 冬半年中国极端低温的时空变化特征[J].  
452 *气象科学*, 31(3): 274-281. Fu Dongxue, Sun Zhaobo, Li Zhongxian, et al. 2011. Temporal  
453 and spatial characteristics of extreme low temperature in China during the winter half of  
454 1955-2006 [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in chinese)*, 31(3): 274-281.
- 455 [13] 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 齐琳琳. 2012. 2004年冬季风期间一次强寒潮过程的能量收支  
456 研究[J]. *气候与环境研究*, 17(5): 549-562. Fu Shenmin, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Qi  
457 Linlin. 2012. Energy Budget of a Cold Surge Process during the Winter Monsoon Period of  
458 2004[J]. *Climatic and Environmental Research (in chinese)*, 17(5): 549-562.
- 459 [14] 纪立人, 布和朝鲁, 施宁, 等. 2008. 2008年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析  
460 III:青藏高原-孟加拉湾气压槽[J]. *气候与环境研究*, 13(4): 446-458. Ji Liren, Bueh Cholaw,  
461 Shi Ning, et al. 2008. Mid-term process analysis of rain and snow low temperature weather in  
462 southern my country in early 2008 III: Qinghai-Tibet Plateau-Bay of Bengal pressure trough  
463 [J]. *Climate and Environment Research (in chinese)*, 13(4): 446-458.
- 464 [15] 江远安, 尹宜舟, 樊静, 等. 2018. 1961-2016年新疆单站不同等级冷空气过程气候特征  
465 及变化[J]. *冰川冻土*, 40(3): 40-52. Jiang Yuanan, Yin Yizhou, Fan Jing, et al. 2018. Climate  
466 characteristics and changes of different grades of cold air processes at a single station in  
467 Xinjiang from 1961 to 2016 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology (in chinese)*, 40(3):

- 468 40-52.
- 469 [16] Kim B M, Son S W, Min S K, et al. 2014. Weakening of the stratospheric polar vortex by  
470 Arctic sea-ice loss[J]. *Nature Communications*, 5:4646.
- 471 [17] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis  
472 Project[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–472,
- 473 [18] Kretschmer M, Coumou D, Agel L, et al. 2018. More-persistent weak stratospheric polar  
474 vortex states linked to cold extremes[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*,  
475 99(1): 49-60.
- 476 [19] 李刚, 马继望, 梁湘三. 2020. 2008年1月中国南方低温雨雪期间异常阻塞高压事件的多  
477 尺度动力过程分析[J]. *气象学报*, 78(1): 18-32. Li Gang, Ma Jiwang, Liang Xiangsan. 2020.  
478 Multi-scale dynamic process analysis of abnormal blocking high pressure events during low  
479 temperature rain and snow in southern China in January 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*  
480 (in chinese), 78(1): 18-32.
- 481 [20] 李如琦, 唐冶, 肉孜·阿基. 2015. 2010年新疆北部暴雪异常的环流和水汽特征分析[J].  
482 *高原气象*, 34(1): 155-162. Li Ruqi, Tang Ye, Rouzi·Aji. 2015. Analysis of the circulation  
483 and water vapor characteristics of the blizzard anomaly in northern Xinjiang in 2010 [J].  
484 *Plateau Meteorology* (in chinese), 34(1): 155-162.
- 485 [21] 李尚锋, 姜大膀, 廉毅, 等. 2018. 冬季中国东北极端低温事件环流背景特征分析[J]. *大  
486 气科学*, 42(5): 963-976. Li Shangfeng, Jiang Dabang, Lian Yi, et al. 2018. Analysis of  
487 circulation background characteristics of extreme low temperature events in Northeast China  
488 in winter [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in chinese), 42(5): 963-976.
- 489 [22] 李亚飞, 任荣彩. 2019. 北半球冬季各阻塞系统对大范围极端温度异常的单独和协同影响  
490 [J]. *大气科学*, 43(6): 1313-1328. Li Yafei, Ren Rongcai. 2019. The Independent and  
491 Coordinative Influences of the Four Blocking Systems in the Northern Hemisphere Winter on  
492 the Occurrence of Widespread Extreme Cold Surface Temperature[J]. *Chinese Journal of  
493 Atmospheric Sciences* (in chinese), 2019, 43(6): 1313-1328.
- 494 [23] 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活动的  
495 关系[J]. *大气科学学报*, 39(3): 370-380. Liu Yin, Guo Pinwen, Feng Tao. 2016. The  
496 relationship between persistent anomalous low temperature events in winter and  
497 low-frequency atmospheric oscillations in North China [J]. *Transactions of Atmospheric*

- 498 Sciences (in chinese), 39(3): 370-380.
- 499 [24] 李海燕. 2012. 新疆一次超极地寒潮天气分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2012, 6(5): 12~19. Li  
500 Haiyan. 2012. Analysis of a superpolar cold wave in Xinjiang[J]. Desert and Oasis  
501 Meteorology (in Chinese), 2012, 6(5): 12~19.
- 502 [25] 刘精,江远安,樊静,等. 2018. 塔里木盆地区域寒潮的气候变化特征及大气环流异常分  
503 析[J].沙漠与绿洲气象, 12(4): 38~44. Liu Jing, Jiang Yuanan, Fan Jing, et al. 2018. Climate  
504 change characteristics and atmospheric circulation anomalies of cold waves in the Tarim  
505 Basin [J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 12(4): 38~44.
- 506 [26] Mori M, Watanabe M, Shiogama H, et al. 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the  
507 frequent Eurasian cold winters in past decades[J]. Nature Geoscience, 7(12): 869-873.
- 508 [27] 麻巨慧, 王盘兴, 李丽平, 等. 2009. “0801 南方雪灾”与同期蒙古高压中期活动的关系[J].  
509 大气科学学报, 32(5): 652-660. Ma Jvhui, Wang Panxing, Li Liping, et al. 2009. The  
510 relationship between the “0801 southern snow disaster” and the activities of the Mongolian  
511 high pressure during the same period [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in chinese),  
512 32(5): 652-660.
- 513 [28] 马丽云, 饶建, 孙晓娟, 等. 2021. 蒙古高压和极涡中期过程对 2010 年疆北持续性降雪  
514 的影响[J]. 高原气象, 40(2): 302-313. Ma Liyun, Rao Jian, Sun Xiaojuan, et al. 2021.  
515 Effects of Mongolian high pressure and mid-polar vortex process on persistent snowfall in  
516 northern Xinjiang in 2010 [J]. Plateau Meteorology (in chinese), 40(2): 302-313.
- 517 [29] 牟欢,赵克明. 2011. 2010 年春季新疆一次寒潮天气过程分析[J].沙漠与绿洲气象, 5(4):  
518 35~39. Mu Huan, Zhao Keming. 2011. Analysis of a cold wave weather process in Xinjiang  
519 in the spring of 2010[J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 5(4): 35~39.
- 520 [30] Nath D, Chen W, Wang L, et al. 2014. Planetary wave reflection and its impact on  
521 tropospheric cold weather over Asia during January 2008[J]. Advances in Atmospheric  
522 Sciences, 31(4): 851-862.
- 523 [31] Nath D, Chen W. 2016. Impact of planetary wave reflection on tropospheric blocking over  
524 the Urals-Siberia region in January 2008[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 33(3):  
525 309-318.
- 526 [32] Overland J E, Wang M. 2018. Resolving future Arctic/midlatitude weather connections[J].  
527 Earths Future, 6(8): 1146-1152.

- 528 [33] 彭京备, 孙淑清. 2017. 我国南方持续性低温与东亚冬季风“北弱南强”模态的关系[J].  
529 大气科学, 2017, 41(4): 691-701. Peng Jingbei, Sun Shuqing. The relationship between  
530 persistent cold spell in southern China and the variation mode of east Asian winter monsoon  
531 with opposite signs in the north and south[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in  
532 Chinese), 41(4): 691-701.
- 533 [34] 彭京备, 孙淑清. 2019. 2018 年 1 月南方雨雪天气的形成及其与冬季风异常的关系[J].  
534 大气科学, 43(6): 1233-1244. Peng Jingbei, Sun Shuqing. Formation of rainy and snowy  
535 weather in south China in January 2018 and Its relationship with the abnormal east Asian  
536 winter monsoon[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 2019, 43(6):  
537 1233-1244.
- 538 [35] 肉孜·阿基, 李如琦, 唐冶. 2013. 2011 年初北疆强寒潮过程诊断分析[J]. 沙漠与绿洲气象,  
539 7(3):7~12. Rou Zi.A Ji, Li Ruqi, Tang Ye. 2013. Diagnostic analysis of the process of strong  
540 cold wave in northern Xinjiang in early 2011[J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese),  
541 7(3): 7~12.
- 542 [36] Smith D M, Screen J A, Deser C, et al. 2019. The Polar Amplification Model  
543 Intercomparison Project (PAMIP) contribution to CMIP6: investigating the causes and  
544 consequences of polar amplification[J]. Geoscientific Model Development, 12(3):  
545 1139-1164.
- 546 [37] Sun L, Perlwitz J, Hoerling M. 2016. What caused the recent "Warm Arctic, Cold  
547 Continents" trend pattern in winter temperatures[J]. Geophysical Research Letters, 43(10):  
548 5345-5352.
- 549 [38] 索朗塔杰, 施宁, 王艺橙, 等. 2020. 我国冬季极端低温指数的年代际变化特征[J]. 大气  
550 科学, 44(5): 1125-1140. Suo Langtajie, Shi Ning, Wang Yichen, et al. 2020. Interdecadal  
551 Variation Characteristics of Extreme Low Temperature Index in Winter in China [J]. Chinese  
552 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 44(5): 1125-1140.
- 553 [39] Takaya, K, and Nakamura H. 2001: A formulation of a phase-independent wave-activity flux  
554 for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow[J].  
555 Journal of Atmospheric Sciences, 58(6): 608-627.
- 556 [40] 唐孟琪, 曾刚. 2017. 近 30 多年中国东北地区春季寒潮的年代际变化及其可能原因[J].  
557 气候与环境研究, 22(4): 473-486. Tang Mengqi, Zeng Gang. 2017. Decadal variability of

- 558 spring cold wave across northeast China in the past 30 years and its possible causes[J].  
559 Climatic and Environmental Research (in Chinese), 22(4): 473-486.
- 560 [41] 谭艳梅, 朱文娜, 张利平. 2009. 4月18寒潮天气过程中的锋生分析[J]. 沙漠与绿洲气象,  
561 3(6):13~19. Tan Yanmei, Zhu Wenna, Zhang Liping. 2009. Frontogenesis analysis during the  
562 cold wave weather on April 18[J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 3(6):13~19.
- 563 [42] 王盘兴, 赵辉, 任律, 等. 2010. 闭合气压系统中心位置指数的计算方案[J]. 大气科学学  
564 报, 33(5): 520-526. Wang Panxing, Zhao Hui, Ren Lv, et al. 2010. A calculation scheme for  
565 the central position index of a closed pressure system [J]. Transactions of Atmospheric  
566 Sciences (in chinese), 33(5): 520-526.
- 567 [43] 王晓娟, 沈柏竹, 龚志强, 等. 2013. 中国冬季区域性极端低温事件分类及其与气候指数  
568 极端性的联系 [J]. 物理学报, 62(22): 229201. Wang Xiaojuan, Shen Baizhu, Gong  
569 Zhiqiang, et al. 2013. Classification of regional extreme low temperature events in China in  
570 winter and their relationship with climate index extremes [J]. Acta Physica Sinica (in chinese),  
571 62(22): 229201.
- 572 [44] 吴嘉蕙, 任荣彩. 2021. 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  
573 [J]. 大气科学, 45(3): 558-572. Wu Jiahui, Ren Rongcai. 2021. Stratosphere-troposphere  
574 interaction during a nationwide sustained low temperature event in winter [J]. Chinese  
575 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 558-572.
- 576 [45] Xu F, Liang X S. 2020. The synchronization between the zonal jet stream and temperature  
577 anomalies leads to an extremely freezing north America in January 2019[J]. Geophysical  
578 Research Letters, 47(19): e2020GL089689.
- 579 [46] 杨冬东, 张录军, 周舒, 等. 2020. 北半球冬季极端低温事件变化及其与秋季海冰的联系  
580 [J]. 高原气象, 39(01): 102-109. Yang Dongdong, Zhang Lujun, Zhou Shu, et al. 2020.  
581 Changes of extreme low temperature events in the northern hemisphere in winter and their  
582 connection with autumn sea ice [J]. Plateau Meteorology (in chinese), 39(01): 102-109.
- 583 [47] Zhou B, Xu Y, Wu J, et al. 2016. Changes in temperature and precipitation extreme indices  
584 over China: analysis of a high-resolution grid dataset[J]. International Journal of Climatology,  
585 36(3): 1051-1066.
- 586 [48] 张太西, 江远安, 樊静, 等. 2020. 1961—2016年北疆冷空气过程变化特征及其环流指数  
587 分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 14(5): 109-116. Zhang Taixi, Jiang Yuanan, Fan Jing, et al. 2020.

588 Variation characteristics of cold air process in northern Xinjiang and its circulation index  
589 analysis from 1961 to 2016 [J]. Desert and Oasis Meteorology (in chinese), 14(5): 109-116.  
590 [49] 庄晓翠,安冬亮,张林梅,等. 2010. 阿勒泰地区寒潮天气特征分析及预报[J].沙漠与绿洲气  
591 象, 4(1): 32~35. Zhuang Xiaocui, An Dongliang, Zhang Lingmei, et al. 2010. Analysis and  
592 Forecast of Cold Wave Weather in Altay Region[J]. Desert and Oasis Meteorology (in  
593 Chinese) , 4(1):32~35.  
594 [50]张俊兰,牟欢,谢葭颖. 2015. 北疆寒潮天气分析及预报[J].沙漠与绿洲气象, 2015, 9(6):  
595 11~18. Zhang Junlan, Mu Huan, Xie Jiaying. 2015. Analysis and Forecast of Cold Wave  
596 Weather in Northern Xinjiang[J]. Desert and Oasis Meteorology (in Chinese), 9(6):11~18.  
597 [51] 庄晓翠, 李博渊, 陈春艳. 2016. 新疆北部一次暖区与冷锋暴雪并存的天气过程分析[J].  
598 气候与环境研究, 21(1): 17-28. Zhuang Xiaocui, Li Boyuan, Chen Chunyan. 2016. Analysis  
599 of a Snowstorm Weather Process in a Coexisting Warm Area and Cold Front in Northern  
600 Xinjiang[J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21(1): 17-28.  
601