

斜脊斜槽与瞬变波相互作用对

我国干旱半干旱区极端低温的影响

李妍¹ 谢作威^{2*} 丁敏¹ 布和朝鲁² 王月³ 韩琛惠¹ 苏同华^{4,5}

¹ 山西省气象服务中心, 太原 030002

² 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

³ 沈阳市气象局, 沈阳 110168

⁴ 福建省灾害天气重点实验, 福州 350001

⁵ 中国气象局海峡灾害天气重点开放实验室, 福州 350001

摘要: 本文利用 ERA5 再分析资料, 重点分析了我国干旱半干旱区 (简称旱区) 冬半年三类极端低温事件的大气环流配置及其演变过程, 并研究了不同环流配置下瞬变波的活动特征以及其对异常环流的反馈强迫作用。结果表明, 欧亚大陆上一对斜脊斜槽的持续发展是造成旱区极端低温事件的关键原因, 其维持的主要原因是低频 Rossby 波能量的注入; 在其影响下, 斜脊斜槽南北两侧的瞬变波异常活跃, 其中, 斜槽南部的瞬变扰动引导小股冷空气分裂南侵, 进一步加强了极端低温事件; 同时, 瞬变涡动通量的辐合辐散又使得斜脊斜槽持续维持。斜脊斜槽的维持有利于低层西伯利亚冷高压加强并向东扩展, 从而使极端低温影响整个旱区。当这一对脊槽表现为经向伸展时, 乌拉尔山高压脊随着 Rossby 波能量向下游频散而减弱东移, 与此相应, 低层西伯利亚冷高压也表现出东移的特征, 瞬变波活动也受到抑制, 极端低温主要分布于旱区的东部地区。

收稿日期: 2023 年 11 月 8 日; **网络预出版日期:**

作者简介: 李妍, 女, 1988 年出生, 工程师, 主要从事应用气象、短期气候预测研究。E-mail: liyan_lyl@sina.cn

通讯作者: 谢作威, 男, 1986 年出生, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事中高纬大气动力学、极端事件多时空尺度机理研究。E-mail: xiezuowei@mail.iap.ac.cn

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41875078); 山西省气象局面上项目 (SXKMSQH20226313); 福建省自然科学基金项目 (2022J01441)

Funded by National Natural Science Foundation of China (41875078); The General Program of Shanxi Meteorological Administration (SXKMSQH20226313); The Natural Science Foundation of Fujian Province of China (2022J01441)

关键词 斜槽斜脊 瞬变波 极端低温 寒潮 干旱半干旱区

文章编号 2023141A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2404.23141

The interaction between tilted ridge-rough systems and transient waves and their impact on extreme low-temperatures in the arid and semi-arid regions of China

LI Yan¹ XIE Zuowei² DING Min¹ BUEH Cholaw² WANG Yue³ HAN Chenhui¹ SU Tonghua^{4,5}

¹Shanxi Meteorological Service Centre, Taiyuan 030002

²International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

³Shenyang Meteorological Service, Shenyang 110168

⁴Fujian Key Laboratory of Severe Weather, Fuzhou 350001

⁵Key Laboratory of Straits Severe Weather China Meteorological Administration, Fuzhou 350001

Abstract: This paper used the ERA5 reanalysis data to investigate the atmospheric circulation configurations and their evolution processes for three types of extreme low temperature events in the arid and semi-arid regions of China (dryland for brevity) during the winter half-year. This study examined the activity characteristics of transient eddies under different circulation configurations and their feedback forcing to the abnormal circulation. The results showed that the continuous amplification of tilted ridge and trough over the Eurasian continent was the key reason for extreme low temperature events in the dryland. This pair of ridge and trough was primarily maintained by the incoming low-frequency Rossby wave energy. Under its influence, transient eddies were abnormally active on the southern and northern sides of the titled ridge and trough, in which transient eddies in the south of trough guided part of cold air masses southward and further intensified the extreme low temperature events.

In addition, the convergence and divergence of transient vorticity fluxes favored the continuous maintenance of tilt ridge and trough, which was conducive to amplification and eastward expansion of the low-level Siberian cold high pressure, and thus led to extreme low temperatures affecting the entire dryland. When the tilted ridge and trough were elongated longitudinally, the ridge over the Ural Mountain weakened and moved eastward as Rossby wave energy emitting downward. Correspondingly, the low-level Siberian cold high pressure also exhibited an eastward displacement, and the activity of transient waves was suppressed. The extreme low temperatures are mainly confined to the eastern dryland.

Keywords tilted ridge and trough, transient eddy, extreme low-temperature, cold wave, the arid and semi-arid region.

1 引言

在全球变暖背景下，极端天气事件强发、广发、并发，已经引起了公众、学者以及政府部门的密切关注 (IPCC, 2021; 王会军等, 2020)。例如 2016 年 1 月，受北极大气异常环流的影响，中国自北向南陆续出现大风降温天气，遭遇了“世纪寒潮”事件 (武炳义和杨琨, 2016); 2020/2021 年跨年之际，超极地冷空气路径使我国遭受了两次连续的“霸王级”寒潮天气事件，1 月 7 日呼和浩特最低气温达 -30°C ，为 1972 年来最冷 (Bueh et al., 2022; Zhang et al., 2022); 2024 年 2 月 18 日，新疆遭遇极端寒潮事件，阿勒泰地区东部共 4 站最低气温下降 30°C 以上，富蕴县吐尔洪乡站日最低温降至 -52.3°C ，打破新疆有记录以来最低气温极值。极端低温事件的强发严重影响到人民的生命和财产安全，为此研究近年来的极端低温事件及其特征，对极端天气气候灾害的监测预报能力提高具有重要意义。

极涡中心偏向亚洲中高纬度时，会造成亚洲地区冷空气势力活跃、波动振幅增大，有利于寒潮天气的发生发展 (吴嘉蕙和任荣彩, 2021; Zhang et al., 2022)。最近几十年，北极极地漩涡持续的向欧亚大陆偏移 (Zhang et al., 2016)。北极平流层极涡近些年强度逐渐减弱，且平流层弱极涡模态的发生频率均呈增加趋势，其中极涡拉伸事件 (纬向对称模态) 出现的概率远高于平流层爆发性增温 (纬向非对称模态)，而极涡拉伸事件通过平流层-对流层动力耦合作用对欧亚大陆高纬度地区冷空气爆发产生显著的影响 (Zou et al., 2024)。因此，极涡活动状况可视作寒潮前的“信号枪”。西伯利亚冷高压或蒙古高原冷高压是地面上的大型反气旋环流，是亚洲地面冷空气堆的标志性天气系统，其强度可作为冷空气强度“指标”，其中心移动路径代表了冷空气的移动路径，是寒潮天气过程中最关键的地

面天气系统（李艳等，2019）。极涡偏向于欧亚大陆，有利于西伯利亚地区冷高压的发展，这可能是寒潮强发的一个重要因素。

寒潮爆发的关键机制还与西风带大型环流波动相关。当乌拉尔山阻塞形势逐渐“崩溃”，或者冷涡横槽自北向南迅速转向完成东亚大槽重建，引导地面冷高压南下，形成寒潮天气（丁一汇等，2008；Luo et al., 2017; Shi et al, 2020）。研究表明，有 80% 的中国冬季区域性极端低温事件与乌拉尔山至雅库茨克-鄂霍次克海的阻塞性环流相联系（龚志强等，2013）。但仅以局地阻塞高压活动本身，难以引发大范围持续性的极端低温事件，它的关键环流为大型斜脊斜槽，其引导的大范围冷空气在西伯利亚地区堆积，有利低层西伯利亚高压的强烈发展和向南扩展，导致极端低温事件的发生（Bueh et al., 2011a; Xie and Bueh, 2017; 布和朝鲁等，2018）。研究表明，我国极端低温事件关键环流系统乌拉尔山阻塞高压或大型斜槽斜脊都对应着波状环流的增强。Yao et al (2022; 2023) 指出，在中高纬位涡经向梯度偏弱的背景下，乌拉尔山阻塞高压易于发生、维持和合并，从而造成了 2020/2021 年初冬和 2022 年 11 月 26 日至 12 月初的极端寒潮事件。Shi et al (2023) 发现，贝加尔湖以东出现极端大振幅波是极端寒潮爆发的必要条件，东亚大槽振幅的增强，引导冷空气堆向我国东部地区爆发，从而形成极端寒潮。

大振幅环流和瞬变涡旋的相互作用是阻塞高压维持的主要原因之一（Shutts, 1983; 施宁，2013）。乌拉尔山地区阻塞高压的维持，其前部的冷平流在西伯利亚地区产生强斜压区域，可能有利于短波槽或高频瞬变波的活动（彭京备等，2023）。同时，高频瞬变波通过高频涡度通量的辐合辐散正反馈于阻塞高压的发展和维持（Bueh et al., 2011a; Xie and Bueh, 2017; Shi et al., 2022）。高频瞬变波与平均流相互作用，有利于乌拉尔山阻塞高压的发展和维持，使得北极的冷空气到

达西伯利亚地区 (Zhang et al., 2018)。研究还表明, 瞬变波的热量输送减弱了温度梯度强度, 导致平均西风气流减弱, 从而有利于阻塞高压的发展及维持 (徐辉和金荣花, 2011)。

我国北方干旱半干旱区 (简称旱区) 位于西伯利亚高压前部, 是冷空气堆积和向东南爆发的关键地区, 因此, 我国东部的低温事件也伴随着旱区强烈的降温过程, 如 2016 年 1 月 “世纪寒潮” 和 2021 年 “霸王级” 寒潮。其次, 冷空气的堆积在该地区形成了强烈的斜压性, 有利于大尺度环流和天气扰动的斜压的发展, 研究该地区的极端低温事件, 有助于理解大尺度环流在东亚地区停滞发展并导致我国东部地区极端低温事件的发生机理。最后, 全球变暖背景下, 北极地区异常增暖, 经向环流增强, 旱区及以北欧亚大陆中高纬易于异常偏冷, 斜压性可能增强 (Liu et al., 2012; Screen and Simmonds, 2014; Feng and Wu, 2015; Yao et al., 2017; Ma et al., 2018; 李牧原和罗德海, 2019)。因此, 我们选择旱区作为研究区域, 分析其极端低温事件中斜压性和瞬变扰动是否增强, 以及它们对冷空气活动的作用。另外, 瞬变波活动是否反馈于大尺度进一步促进极端低温的发生? 本文针对以上问题, 重点分析北方冬半年不同类极端低温事件的大气环流配置及其演变过程, 研究不同环流配置下瞬变波的活动特征, 并从瞬变涡动强迫作用的角度分析它对环流配置的作用, 力图为极端低温事件的季节内预报提供参考。

2 资料和方法

2.1 资料选取与处理

本文使用了欧洲中心第五代再分析数据集 (ERA5) 逐小时再分析资料 (Hersbach et al., 2020), 该资料为欧洲中心使用综合预测系统的 4 维变分同化系统和 Cy41r2 模型产生的, 它是一套同化了多源观测资料的再分析资料。本文使

用资料时段为 1979–2018 年冬季（即当年 11 至次年 3 月共 5 个月），水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ ，垂直方向为 1000–100 hPa 每隔 50 hPa 的 19 层气压层，所使用的气压层要素包括位势场、温度场、风场，近地面层要素为 2 m 温度场、10 m 水平风场和海平面气压场。

2.2 极端低温事件的定义

本文主要采用了 Zhang et al (2021) 关于极端低温事件的界定方法，界定过程分为以下三步：（1）极端低温阈值：以某个格点某一日为中心，选取前后各两日日最低气温，组成 5 日 $\times$ 40 年的时间序列，将该时间序列按照升序排列，选取该序列第 10 百分位值定义为该格点的该日极端低温阈值，最终可得研究区域内所有格点冬半年逐日极端低温阈值；（2）极端低温日：当日最低气温小于阈值的低温格点数占研究区域内总格点数的 30% 时，则认为该日研究区域内发生了一次极端低温；（3）极端低温事件：当极端低温日持续时间为 3 天及以上时，则确定为一次极端低温事件，并将极端低温格点数占比最多的一天定义为峰值日（即第 0 天）。峰值日前（后）的日期用 “- (+)” 表示，“-n (+n) 天” 即峰值日前（后）的第 n 天。通过以上界定过程，在 1979–2018 年冬季共界定出了 87 次极端低温事件。

2.3 高频瞬变涡动反馈强迫

为了定量刻画高频瞬变涡动反馈强迫（TEFF）对高度场的作用，我们采用 Lau and Nath (1991) 方法，位势倾向由高频扰动（Lancozs 的 8 天高通）的涡度通量和热量通量的辐合辐散强迫造成，计算方程如下：

$$\begin{cases} g \left\{ \frac{1}{f} \nabla^2 + f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial p} \right) \right\} \frac{\partial \phi}{\partial t} = D_{heat} + D_{vor} \\ D_{heat} = f \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\nabla \cdot \overline{V' \theta'}}{\tilde{S}} \right), \\ D_{vor} = -\nabla \cdot \overline{V' \zeta'}, \end{cases} \quad (1)$$

垂直边界层设定为 1000 hPa 和 100 hPa，它们需满足：

$$\begin{cases} -\frac{g p}{R} \left(\frac{p_0}{p} \right)^{R/C_p} \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_{heat} = -\nabla \cdot \overline{V' \theta'}, \\ \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial Z}{\partial t} \right)_{vor} = 0, \end{cases} \quad (2)$$

上述公式中“'”和“—”分别表示高频（8 天高通）和日平均。在公式（1）中， $\sigma = (-\alpha / \theta)(\partial \theta / \partial p)$ 为静力稳定度， α 为比容， $\tilde{S}$ 表示北半球平均的 $-\partial \theta / \partial p$ ， f 为科氏参数。公式（2）中的下标“heat”和“vor”分别表示高频瞬变涡动的热量通量和涡度通量的作用。具体计算步骤与施宁（2013）一致，即利用球谐函数对（1）式中的二维拉普拉斯算子展开，进行 21 波三角截断，展开可得三对角矩阵，采用追赶法计算结果。

3 极端低温事件空间分布特征

为了分析旱区极端低温事件空间分布特征，本文采用 K 均值聚类（Hartigan and Wong, 1979）对极端峰值日的低温异常进行了客观分类。通过对比 2 到 5 类空间分布（图略），我们发现类数较少不足以区分低温空间特征，而类数较多则易出现空间分布重叠的低温事件，因此，我们认为极端低温事件分为三类较为合理，其中第一至第三类事件分别为 29 个、28 个和 30 个（极端低温事件及其分类见表 1）。图 1 和图 2 分别给出了三类极端低温峰值日的 2 m 温度场以及 10 m 风场异常合成场和海平面气压场的异常合成。根据低温异常分布范围，这三类极

端低温异常特征分别为：旱区型、旱区东部型和旱区西部型。

表 1 旱区极端低温事件及其分类

Tabel 1 Extreme Low-Temperatures in the arid and semi-arid regions and their classification

序号	事件起始日	事件终止日	事件峰值日	类别
1	19791108	19791124	19791121	1
2	19800128	19800213	19800205	1
3	19800311	19800314	19800313	3
4	19800329	19800331	19800331	1
5	19810123	19810128	19810125	1
6	19810222	19810226	19810223	1
7	19811104	19811109	19811107	2
8	19811129	19811202	19811201	2
9	19811217	19811219	19811217	2
10	19830106	19830109	19830107	2
11	19840125	19840206	19840131	3
12	19840221	19840303	19840228	1
13	19841215	19841230	19841221	1
14	19850107	19850113	19850112	3
15	19850216	19850223	19850216	3
16	19850307	19850314	19850310	1
17	19850318	19850320	19850319	3
18	19851206	19851214	19851210	2
19	19860225	19860302	19860228	2
20	19861123	19861128	19861124	3
21	19870323	19870326	19870324	2
22	19871101	19871104	19871103	3
23	19871125	19871206	19871127	1
24	19880212	19880218	19880216	1
25	19880226	19880307	19880301	1
26	19890112	19890114	19890113	2
27	19890218	19890220	19890219	3
28	19890303	19890308	19890304	3
29	19891105	19891107	19891106	3
30	19900221	19900224	19900223	2
31	19901129	19901203	19901129	1
32	19910218	19910221	19910219	3
33	19910328	19910331	19910329	2
34	19911225	19920102	19911227	1
35	19921106	19921109	19921107	1

36	19930113	19930119	19930114	2
37	19931116	19931123	19931120	1
38	19940116	19940120	19940117	3
39	19940307	19940314	19940312	1
40	19950314	19950318	19950316	1
41	19960112	19960115	19960115	3
42	19960219	19960223	19960221	2
43	19960322	19960324	19960323	3
44	19961204	19961210	19961205	1
45	19971114	19971119	19971115	1
46	19971124	19971211	19971201	2
47	19980116	19980120	19980118	1
48	19980317	19980321	19980318	1
49	19990325	19990327	19990326	3
50	19991218	19991221	19991220	2
51	20000126	20000202	20000130	2
52	20000223	20000227	20000224	3
53	20000321	20000323	20000322	3
54	20001106	20001112	20001110	2
55	20010306	20010308	20010307	2
56	20011211	20011220	20011213	1
57	20021101	20021103	20021101	2
58	20021223	20030105	20030102	2
59	20030305	20030307	20030306	3
60	20040202	20040205	20040204	3
61	20041229	20041231	20041230	2
62	20050206	20050209	20050206	3
63	20050216	20050220	20050218	1
64	20051203	20051206	20051203	2
65	20051212	20051215	20051214	2
66	20060105	20060107	20060106	3
67	20060311	20060314	20060312	2
68	20080120	20080214	20080212	1
69	20091111	20091121	20091116	1
70	20100210	20100217	20100215	3
71	20100307	20100309	20100308	2
72	20100328	20100331	20100331	3
73	20101230	20110117	20110109	3
74	20110318	20110325	20110321	1
75	20120120	20120126	20120122	3
76	20121102	20121104	20121103	2
77	20121221	20121224	20121222	1
78	20121228	20130108	20130103	2
79	20140209	20140211	20140209	3

80	20141211	20141216	20141215	3
81	20160122	20160125	20160123	2
82	20160212	20160214	20160213	1
83	20161121	20161124	20161122	2
84	20180106	20180108	20180107	3
85	20180127	20180205	20180129	3
86	20181114	20181117	20181116	3
87	20181205	20181212	20181207	1

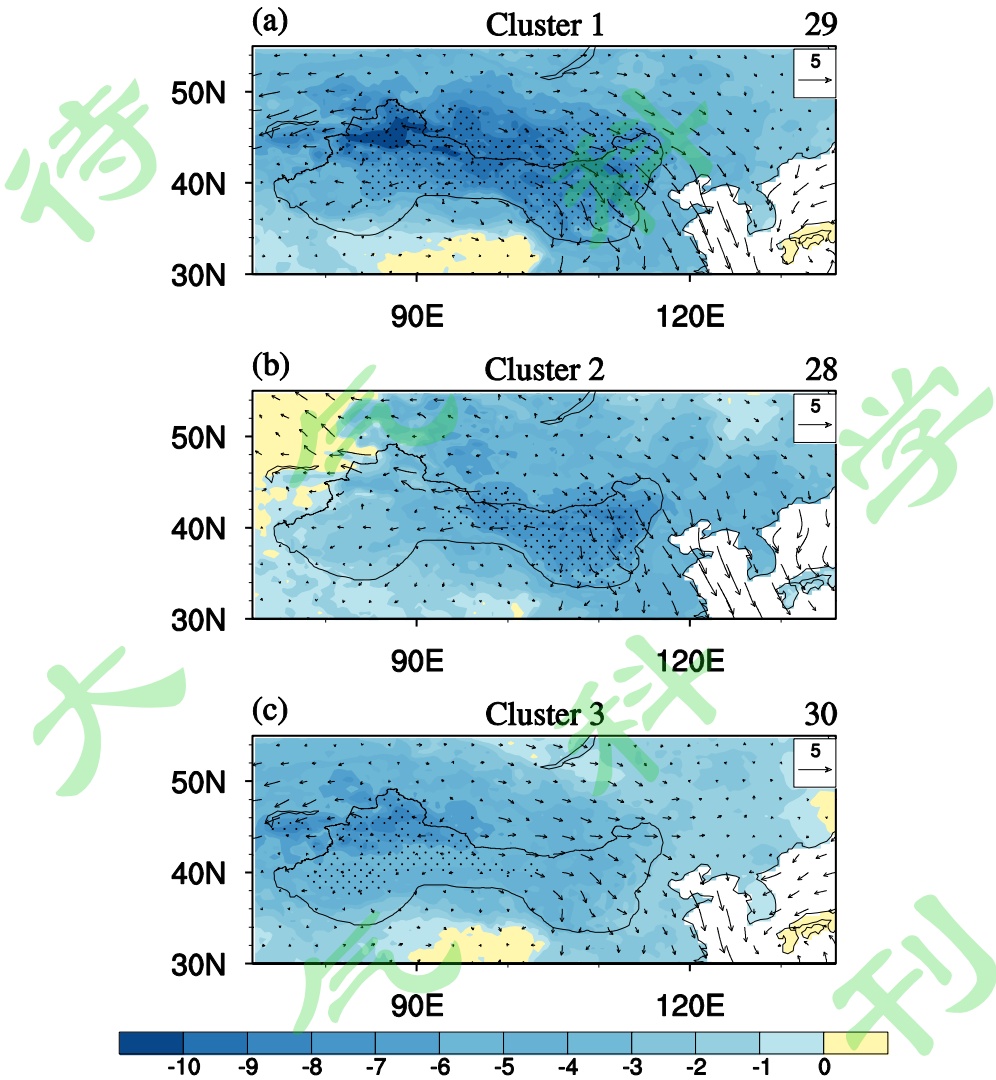


图 1 三类极端低温事件的 2 m 温度异常（填色，单位：℃）和 10 m 风场异常合成场（箭头，单位：m s⁻¹），打点代表温度异常合成通过 95%显著性检验，图中黑实线为旱区。（a）－（c）分别为第一类至第三类。

Fig. 1 Composite 2-m air temperature anomalies (shaded, units: °C) and 10-m wind anomalies (arrows, units: m s⁻¹) for the three clusters of extreme cold events. The stippling marks the regions with statistical significance above the 95% confidence

level. The polygon designates the arid region of China. (a) – (c) are for clusters 1 to 3, respectively.

第一类事件代表旱区冬半年气温明显一致偏低的极端低温事件，最大异常区位于新疆地区的准噶尔盆地，最低气温较气候态偏低 11°C 。整个旱区受较强的偏北风异常影响，东部为西北风异常控制，新疆地区为东北风异常控制（图 1a），这两股气流把蒙古高原的冷空气向我国旱区输送。从海平面气压异常合成场中可见（图 2a），第一类事件中，乌拉尔山地区海平面气压场为正异常，并向东南方向延伸至我国东部地区。该正异常区存在两个异常中心，一个位于乌拉尔山，其东南部的东北风影响我国新疆一带；另一个位于黄土高原，其东北部的西北风将冷空气输送至黄土高原，两个异常中心使得蒙古地区的冷空气在旱区不断堆积并南下。因此，该类事件中低温的影响范围较广，且强度较大。

第二类极端低温事件中，旱区东部的气温异常较西部明显偏低，其中内蒙古自治区的乌兰察布最低气温较气候态偏低 9.5°C 。旱区东部仍受西北风影响，强度较第一类明显减弱，而旱区中西部受偏东气流影响（图 1b）。海平面气压正异常范围明显偏小（图 2b），主要分布于蒙古国和中国地区，这表明西伯利亚冷空气无明显堆积，不利于冷空气向整个旱区爆发。西伯利亚高压异常中心主要位于黄土高原地区，其东侧的偏北风不断将冷空气输送至旱区东部。

第三类极端低温事件中，旱区西部的新疆地区气温异常较旱区东部明显偏低，准噶尔盆地最低气温较气候态偏低 8.8°C 。旱区东部仍受西北风影响，西北地区则受弱的偏东气流影响（图 1c）。尽管该类事件与第一类事件有相似宽广的正海平面气压（图 2c），但正异常区主要位于乌拉尔山地区和拉普捷夫海，其向东南延伸至我国东部地区的异常强度较第一类明显偏弱，正异常中心位于蒙古国西部，受其南侧的偏东气流影响，冷空气主要输送至旱区西北部。

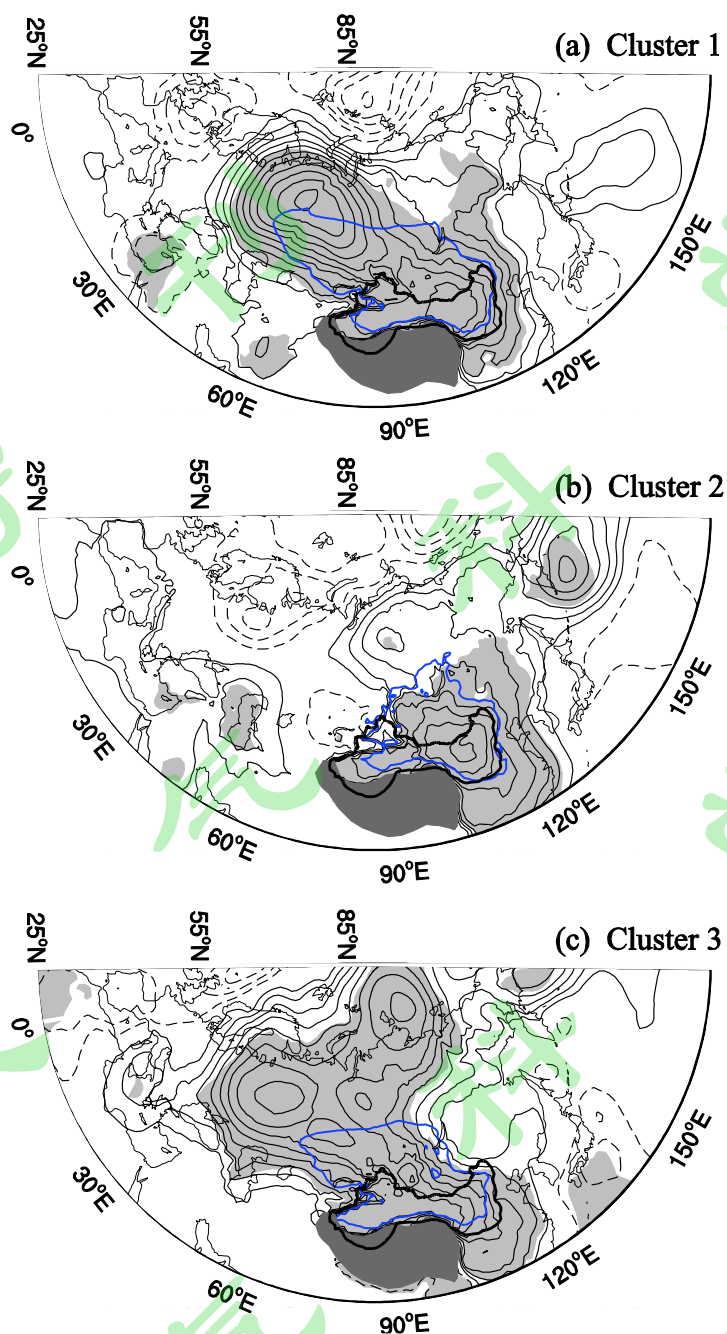


图2 三类极端低温事件的海平面气压异常合成场(单位: hPa), 等值线间隔为 1 hPa, 浅灰阴影表示合成异常通过 95%显著性检验, 图中蓝实线表示 1030 hPa 线, 粗黑实线为旱区, 深灰阴影表示青藏高原。(a) – (c) 分别为第一类至第三类。

Fig. 2 Composite SLP anomalies (units: hPa) for the three groups of extreme cold events. Contours are drawn for every 1 hPa. Light gray shading indicates composite anomalies statistically significant at 95% confidence. The blue solid line indicates 1030 hPa and black thick solid line designates the arid region of China. The heavy gray shading is the Tibetan Plateau. (a) – (c) are for clusters 1 to 3, respectively.

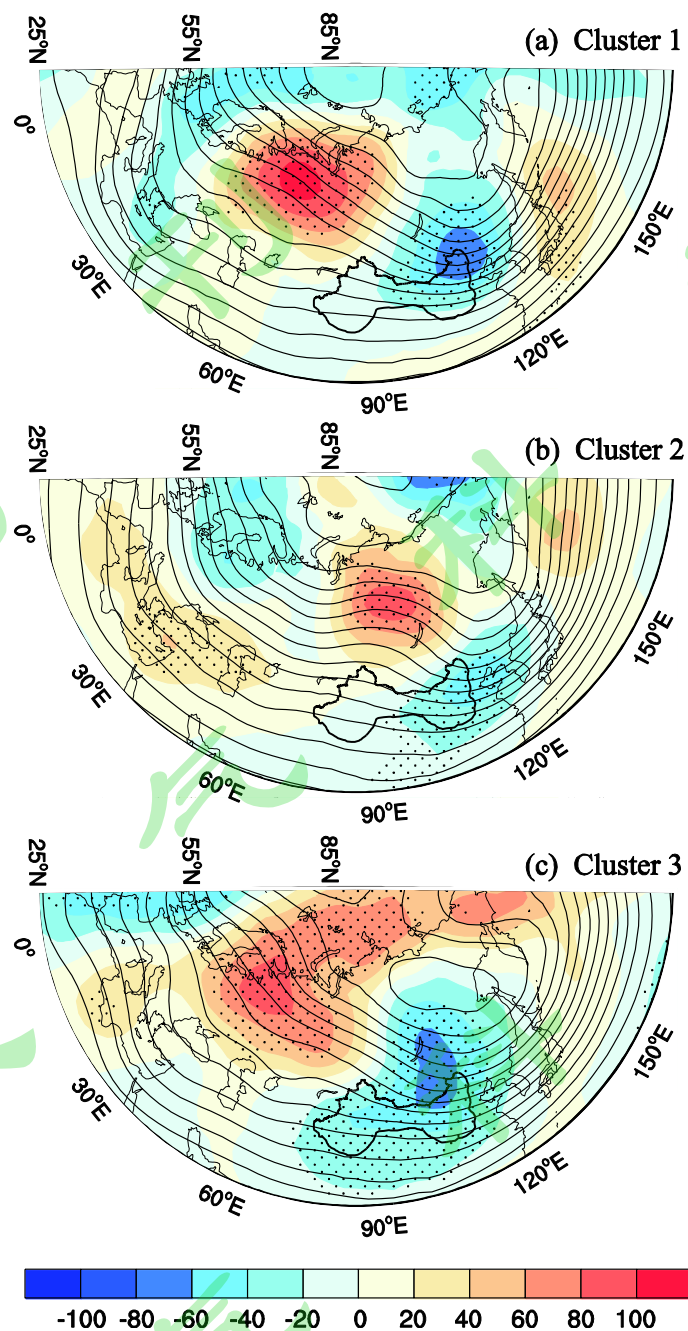


图3 三类极端低温事件的 500 hPa 位势高度（等值线，单位：gpm）及其异常（填色）合成场，等值线间隔为 50 gpm，打点表示合成异常通过 95%显著性检验，图中粗黑实线为旱区。（a）－（c）分别为第一类至第三类。

Fig. 3 Composite 500 hPa geopotential height (contour, units: gpm) and corresponding anomalies (shading) for the three groups of extreme cold events. Contours are drawn for every 50 gpm. Stippling indicates that composite anomalies are statistically significant at 95% confidence. The black thick solid line designates the arid region of China. (a) – (c) are for clusters 1 to 3, respectively.

为了说明对流层环流配置，图 3 给出了 500 hPa 位势高度及其异常合成场。可见旱区三类极端低温在欧亚大陆上空主要为一对槽脊，其中脊位置偏北，槽由次极区向西南深入中国西北地区，表现出典型的斜脊斜槽的特征（Bueh et al., 2011b）。在第一类极端低温事件中，斜脊位于乌拉尔山地区，斜槽位于贝加尔湖东南部（图 3a）。与第一类极端低温事件相比，第二类极端低温事件的斜脊斜槽尺度较小，斜脊位于西伯利亚地区，斜槽也偏浅薄（图 3b）。第三类极端低温事件的斜脊斜槽不仅更为宽广，也更强，其斜脊向北伸入极区，并与北太平洋脊打通，这使得极涡偏向于欧亚大陆，斜槽更为深厚（图 3c）。这三类极端低温事件的不同槽脊配置与 Zhuo et al（2022）提出的乌拉尔山阻塞高压和东北亚冷涡三种协同作用相吻合。第一类与他们的乌拉尔阻塞初始型相对应，东亚的降温幅度最大；第三类与太平洋阻塞-乌拉尔阻塞接力型相对应，他们研究指出，这两个地区阻塞高压的协同作用使得东亚降温幅度更大和持续事件更长。本文关注偏上游的中亚地区，这说明槽脊或乌拉山阻塞高压和东北亚冷涡是亚洲极端寒潮的关键环流配置。

4 极端低温事件的环流演变

以上分析表明了旱区极端低温的空间分布主要取决于西伯利亚冷高压的强度和主体位置。研究表明，西伯利亚高压的发展受到对流层高层高压脊环流的驱动（Takaya and Nakamura, 2005；布和朝鲁等，2018）。考虑到第一类旱区型和第二类旱区东部型极端低温事件西伯利亚高压表现出明显的差异，本小节主要对比分析前两类极端低温事件对流层环流的演变过程。

4.1 旱区型极端低温事件

图4给出了第一类极端低温事件-4天到+2天300 hPa位势高度异常合成及其对应的波作用通量。可以看出，在-4天（图4a），乌拉尔山—阿尔泰山脉北侧—大兴安岭—西北太平洋存在“+ - + -”的Rossby波列，其中，乌拉尔山和西伯利亚地区为一斜脊斜槽；随着持续不断的Rossby波能量频散，波列不断加强并东移。至-2天（图4b），乌拉尔山正异常中心略向东移动，阿尔泰山脉—大兴安岭—西北太平洋的“- + -”波列逐步东移至蒙古—日本海—北太平洋，巴尔喀什湖至贝加尔湖的负异常中心也明显加深，斜脊斜槽范围加大。峰值日（图4c），在上游地区，有Rossby波能量从挪威海的负异常中心向乌拉尔山地区频散，使东移的乌拉尔山正异常中心略向西退并稳定维持在乌拉尔山地区；而乌拉山正异常中心向下游能量频散明显减弱，蒙古地区负异常中心则东移至蒙古东部和我国东北地区，欧亚大陆形成大型斜脊斜槽。峰值日后2天（图4d），乌拉尔山地区正异常中心仍稳定维持，有Rossby波能量由其向巴尔喀什湖地区频散，使得巴尔喀什湖至日本形成宽广的负高度异常环流。由此可见，在第一类极端低温事件中，乌拉尔山地区的正异常表现出准定常的特征，有利于欧亚大陆斜脊斜槽的不断发展和西伯利亚高压持续维持，随着低压环流的东移，西伯利亚高压向南扩展，从而导致整个旱区极端低温事件的发生。

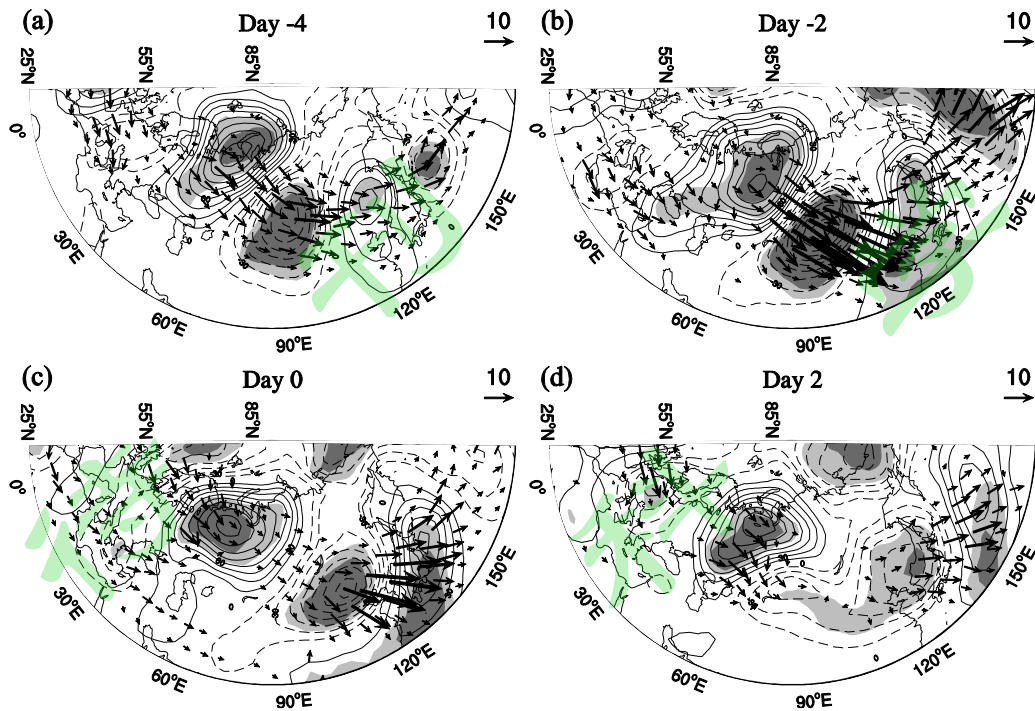


图 4 第一类极端事件的 300 hPa 位势高度异常（等值线，单位：gpm）合成场的演变过程和对应的波作用通量（箭头，单位： $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ）。等值线间隔为 15，浅（深）阴影代表合成异常通过 90%（95%）显著性检验。（a）–（c）分别为第-4 天至 +2 天。

Fig. 4 Composite evolution of 300 hPa geopotential height anomalies (contours; units: gpm) and wave activity fluxes (arrows, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) for the first type of extreme cold events. Contours are drawn for every 15. Light (heavy) shading indicates statistical significance above the 90% (95%) confidence level. (a) – (c) are for days -4 to +2, respectively.

受上述欧亚地区大型斜槽斜脊影响，蒙古地区斜压性明显增强。为了考察大气斜压不稳定性，本文根据 Simmonds and Lim (2009)的斜压性定义，计算了 750 hPa 最大 Eady 增长率，差分所用的上下层分别为 650 hPa 和 850 hPa。图 5 给出了第一类极端低温事件峰值日的大气斜压性空间分布，正异常表示强斜压性。可见，欧亚大陆中纬度地区为宽广的负异常，显著的负异常中心主要位于蒙古地区，这表明蒙古地区斜压性明显增强。该强斜压性中心主要位于上述斜脊斜槽之间，一方面它有利于斜压能量的释放，促进斜脊斜槽的维持（布和朝鲁等，2018；

Zhang et al., 2021), 另一方面有利于瞬变波的活动。

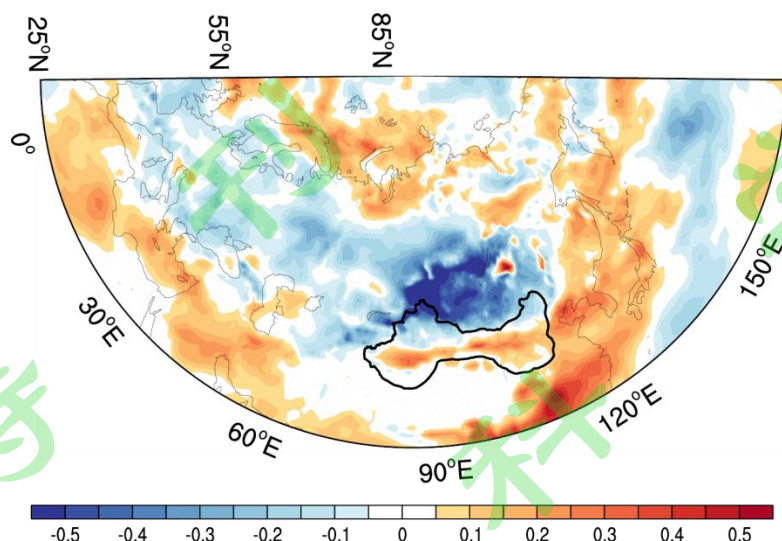


图 5 第一类极端低温事件峰值日 750 hPa 大气斜压性异常合成场 (单位: d^{-1}), 黑色实线为旱区。

Fig. 5 Composite 750 hPa atmospheric baroclinicity anomalies (units: d^{-1}) for the first type of extreme cold events. The solid black line represents the arid regions of China.

斜脊斜槽这种大型环流的维持和发展, 改变了欧亚大陆盛行的西风环流, 影响了瞬变波的活动, 尤其是乌拉尔山脊前的冷平流增强了斜压性, 有利于瞬变波的活动。为了说明瞬变波活动特征, 图 6 给出了第一类极端事件-4 天到+2 天 300 hPa 高频扰动动能异常合成。气候态上, 瞬变波主要活跃于两大洋区的风暴路径及其延伸区, 其中北大西洋延伸至西西伯利亚平原地区。在-4 天 (图 6a), 受乌拉尔山正异常的稳定维持的影响, 其北侧至东侧的萨彦岭地区瞬变波活动明显加强, 而乌拉尔山正异常区域内所对应的瞬变波活跃区域受到抑制。从-2 天至峰值日 (图 6b 和 6c), 萨彦岭地区瞬变波异常活跃区向东南扩展至蒙古国和河西走廊, 其异常活跃区由纬向分布转为经向分布, 这表明, 旱区瞬变波变得活跃和集中, 反映了小股冷空气分裂南侵 (陈海山等, 2012)。而在峰值日后 2 天 (图 6d), 旱区及其附近无明显瞬变波活动, 这可能是由于冷空气爆发结束, 低压异

常环流东移后，西风变得平直，不利于瞬变波活动。

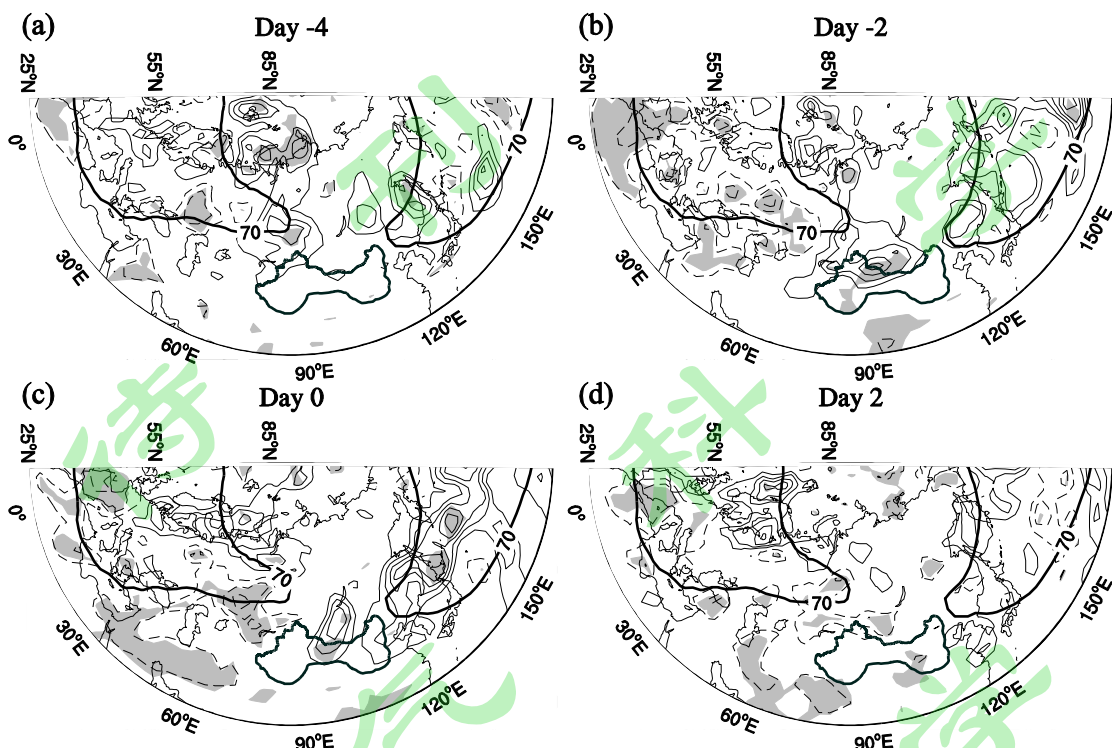


图 6 第一类极端事件的 300 hPa 高频扰动动能异常（单位： $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ）合成场的演变过程。等值线间隔为 15，阴影代表合成异常通过 90%显著性检验，黑实线为气候平均瞬变涡动动能，褐色实线为旱区。（a）–（d）分别为第-4 天至+2 天。

Fig. 6 Composite evolution of 300 hPa high-frequency disturbance kinetic energy anomalies (units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) for the first type of extreme event. Contours are drawn for every 15. Shading indicates statistical significance above the 90% confidence level. The solid black line represents the climatological mean transient eddy kinetic energy, and the solid brown line represents the arid regions of China. (a) – (d) are for days -4 to +2, respectively.

瞬变波的活动，不仅会带来热量的输送，它造成的高频涡动热量和涡度通量的辐合辐散也会对大尺度环流产生反馈作用。为了分析瞬变涡动反馈强迫对 300 hPa 异常环流的贡献，图 7 给出了第一类极端低温事件-4 天至+2 天 300 hPa 瞬变涡动反馈强迫异常合成。在气候态上，瞬变波反馈强迫在其活跃区南侧产生明显的正位势高度倾向，这与 Lau and Nath（1991）的结果相一致的。在-4 天（图

7a), 新地岛瞬变波异常活跃区在其东西两侧造成了一对正负高度异常倾向, 其中正异常位于东欧地区, 有利于乌拉尔山正高度异常的维持。而萨彦岭瞬变波异常活跃区不仅增强了西伯利亚地区的负高度倾向, 同时, 也在其东南侧蒙古地区产生了正高度倾向, 这种强迫的高度异常分布减缓了斜脊斜槽的东移。从-2 天至峰值日 (图 7b 和 7c), 随着次极区瞬变波持续活跃, 瞬变波的正反馈强迫作用不断加强, 有利于乌拉尔山高压脊的持续维持。而蒙古地区瞬变波的活跃在其南北两侧分别产生了正负高度倾向, 阻碍了斜脊斜槽的东移。在+2 天 (图 7d), 瞬变波活动减弱, 特别是蒙古地区, 也无明显反馈强迫作用。

在对流层高层, 低频 Rossby 波能量频散是欧亚大陆斜脊斜槽维持和发展的主要机理, 在其影响下, 西风气流分支, 在脊北侧和槽南侧的瞬变波异常活跃。一方面槽底的瞬变波引导小股冷空气侵入旱区, 加强了极端低温事件; 另一方面, 活跃的瞬变波在其南北两侧分别产生了正负高度倾向, 脊南侧的正高度倾向有利于乌拉尔山高压脊的稳定维持, 槽底的这一对偶极子减缓了斜脊斜槽的东移, 有利于斜脊斜槽的持续维持, 使得低层西伯利亚冷高压的持续维持并向东扩展, 从而冷空气影响整个旱区地区。

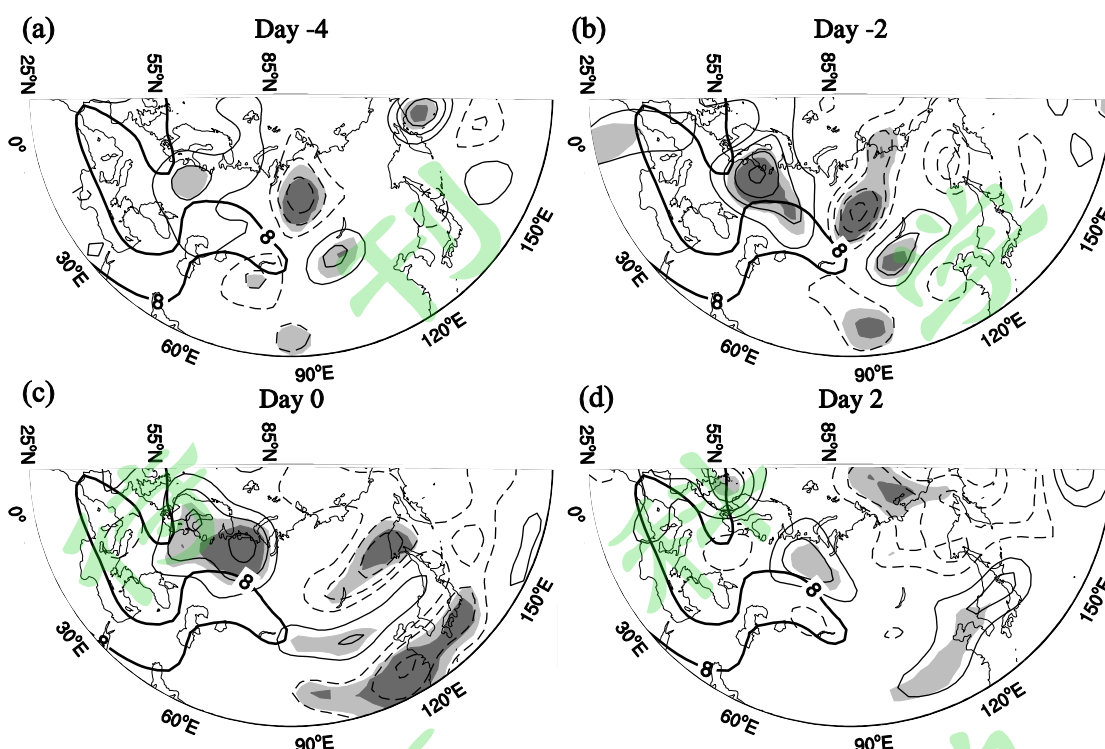


图 7 第一类极端事件的 300 hPa TEFF 异常（单位： gpm d^{-1} ）合成场的演变过程。等值线间隔为 6，浅（深）阴影代表合成异常通过 90%（95%）显著性检验，图中黑实线为气候平均反馈。（a）–（d）分别为第-4 天至+2 天。

Fig. 7 Composite evolution of 300 hPa TEFF anomalies (units: gpm d^{-1}) for the first type of extreme event. Contours are drawn for every 6. Light (heavy) shading indicates statistical significance above the 90% (95%) confidence level. The solid black line in the figure represents the climatological mean TEFF. (a) – (d) are for days -4 to +2, respectively.

4.2 旱区东部型极端低温事件

图 8 给出了旱区东部型极端低温事件-4 天到+2 天 300 hPa 位势高度异常合成及其对应的波作用通量。在-4 天（图 8a），欧亚大陆上空也有明显的 Rossby 波列和能量频散，其位相较旱区型的波列偏东，经向伸展特征较为明显，乌拉尔山正高度异常未向北伸入次极区。从-2 天至峰值日（图 8b 和 8c），随着 Rossby 波能量向下游频散，Rossby 波列明显减弱。与旱区型低温不同的是，无明显 Rossby 波能量来自上游地区，乌拉尔山正异常减弱并快速向东移动，而负异常

环流在 Rossby 波能量注入情况下持续维持，移动较为缓慢，因此，在贝加尔湖南北两侧形成经向型偶极型环流配置。在+2 天（图 8d），异常中心强度均明显减弱，正异常中心北移至泰梅尔半岛，贝加尔湖以南的负异常强度明显减弱并东至江淮地区。

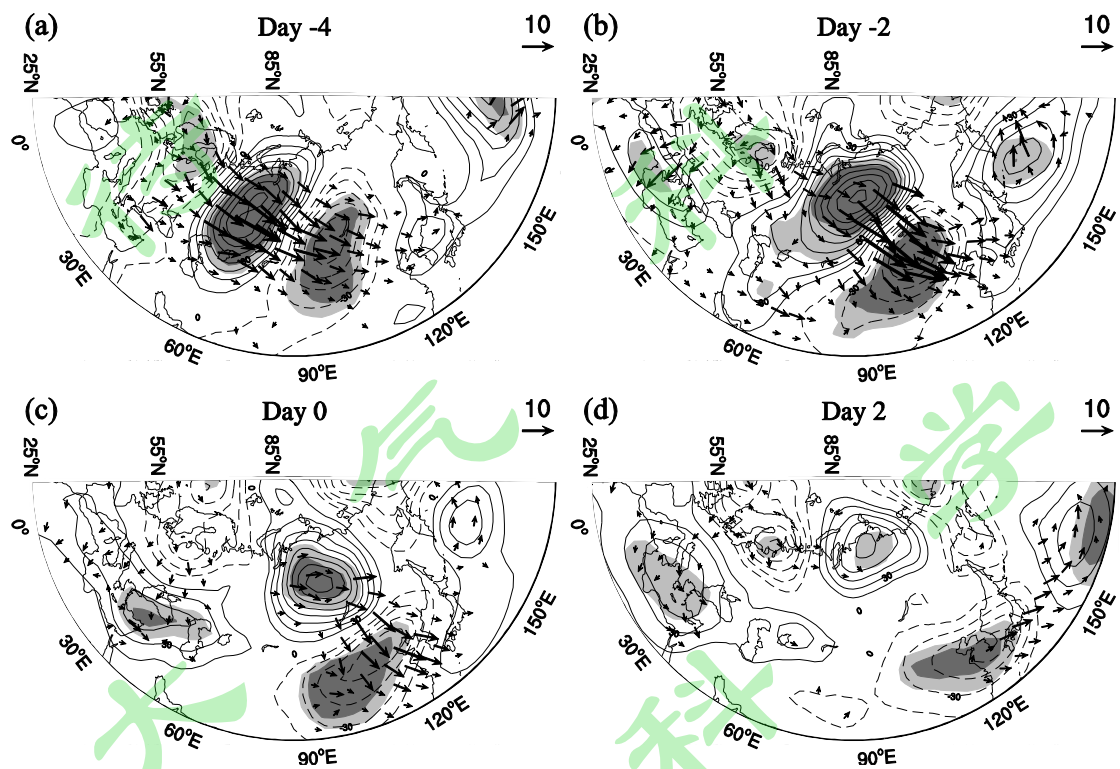


图 8 同图 4，但为旱区东部型极端低温事件

Fig. 8 As in Fig. 4, but for the extreme cold events in the eastern dryland region

图 9 给出了旱区东部型极端低温事件峰值日大气斜压性分布，与旱区型相比，由于波列位置偏东，特别是乌拉尔山高度正异常移至西伯利亚地区，所以与此对应，强斜压区也较旱区型偏东，主要分布于蒙古地区经中国至萨哈林岛，这可能不利于瞬变波在旱区活动。

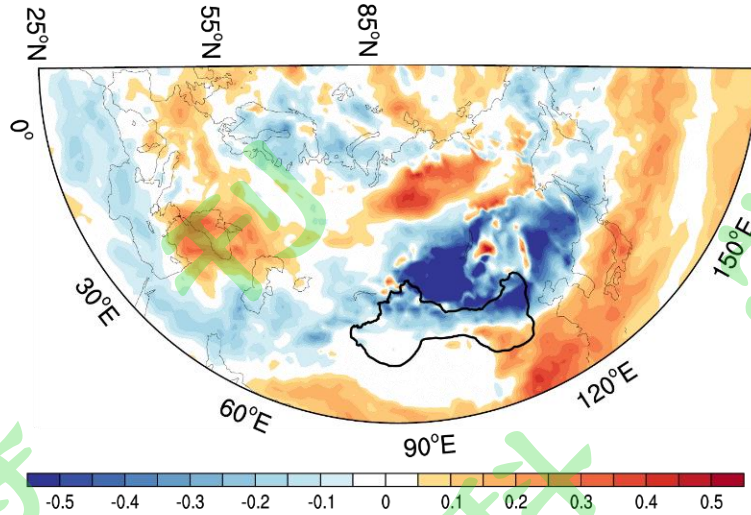


图 9 同图 5，但为旱区东部型极端低温事件

Fig. 9 As in Fig. 5, but for the extreme cold events in the eastern dryland region

图 10 和图 11 分别给出了旱区东部型极端事件-4 天到+2 天 300 hPa 对应的瞬变涡动能异常合成和瞬变涡动反馈强迫。在-4 天（图 10a 和 11a），欧洲地区的瞬变波活跃区明显加强，这造成了东欧地区负高度倾向，有利于局地负高度异常环流的维持并成为 Rossby 波源。同时，乌拉尔山脊北侧的泰梅尔半岛瞬变波也异常活跃，在新地岛的附近形成了正高度倾向的强迫，这对乌拉尔山正异常的维持有一定的贡献。从-2 天至峰值日（图 10b、10c、11b 和 11c），随着乌拉尔山正高度异常环流的东移，瞬变波异常活跃区主要位于西伯利亚地区，从而在贝加尔湖造成正高度倾向，使得乌拉尔山正高度异常环流进一步东移；另外，与旱区型极端低温不同的是旱区无明显瞬变波活动，对冷空气爆发没有明显的促进作用。峰值日之后（图 10d 和 11d）欧亚大陆瞬变波动活动明显减弱。

综上，旱区东部型极端低温事件的 Rossby 波列有明显的经向伸展，这不仅使异常环流随着 Rossby 波能量向下游频散而快速减弱，还不利于瞬变波的活动。另外，此类事件无明显上游 Rossby 波能量的持续注入，乌拉尔山高压脊随着

Rossby 能量频散减弱和东移，与此相应，低层西伯利亚冷高压也表现出东移的特征，因而冷空气主要影响旱区东部。

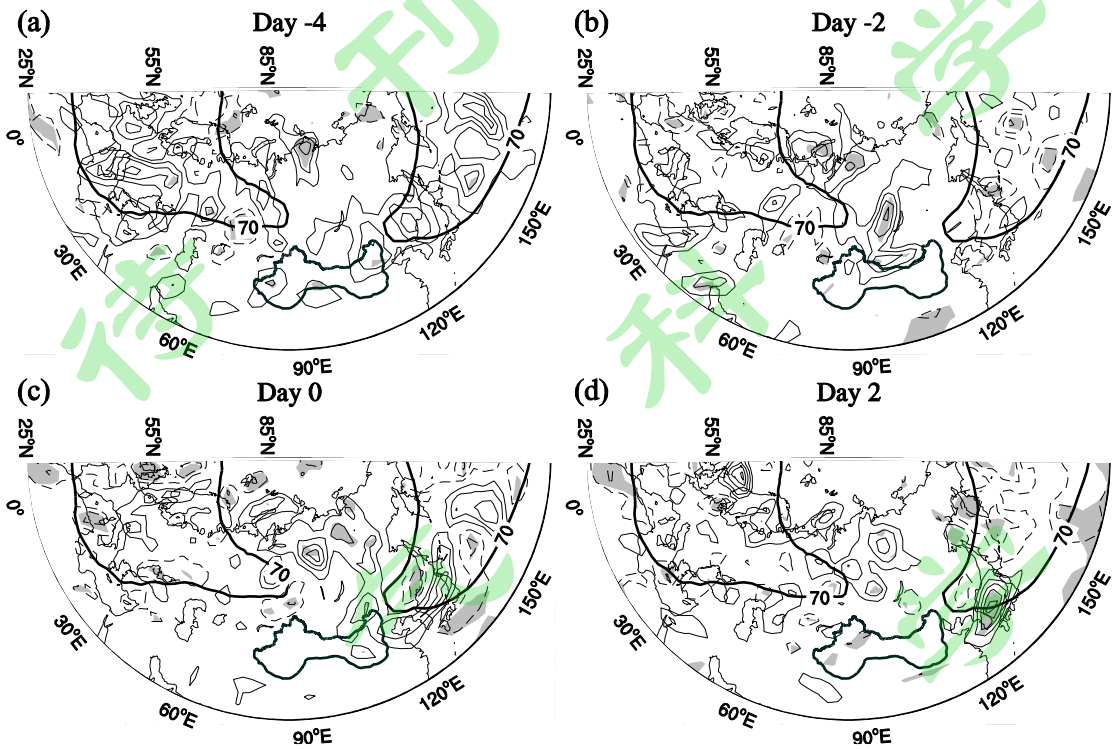


图 10 同图 6，但为旱区东部极端低温事件

Fig. 10 As in Fig. 6, but for the extreme cold events in the eastern arid region

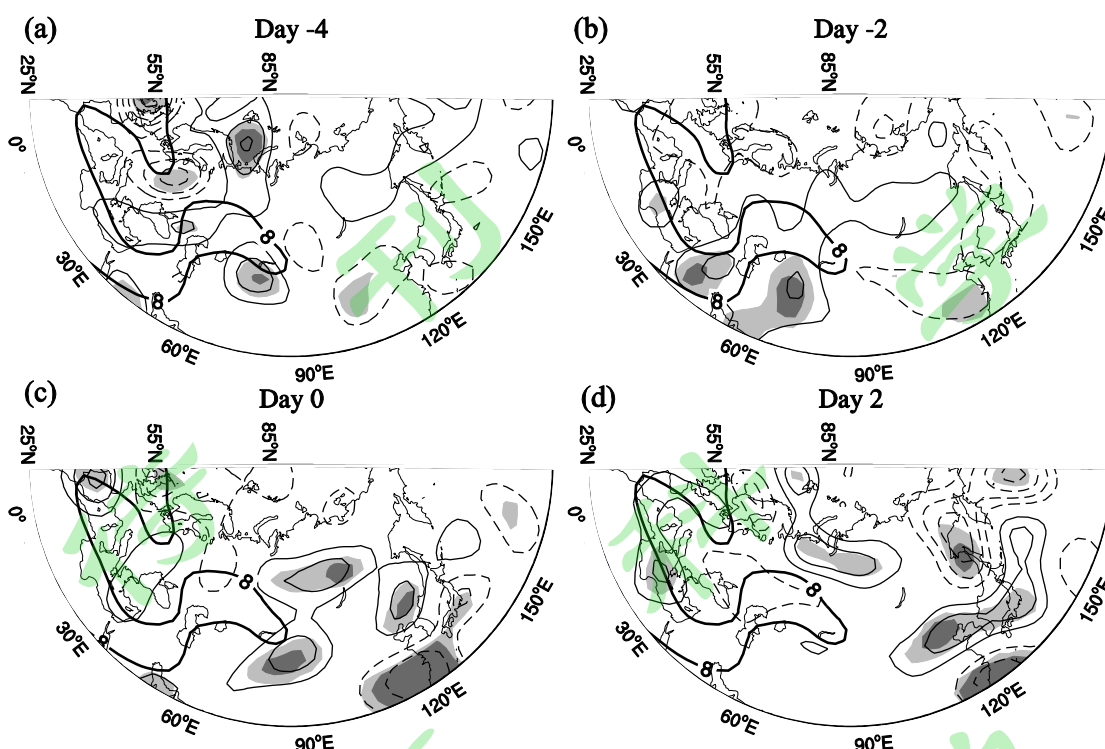


图 11 同图 7，但为旱区东部极端低温事件

Fig. 11 As in Fig. 7, but for the extreme cold events in the eastern dryland region

4.3 旱区西部型极端低温事件

本文着重分析了第一类旱区型和第二类旱区东部型极端低温事件环流的演变过程。实际上，第三类旱区西部型极端低温事件的环流配置也具有非常鲜明的特点。

图 12 给出了第三类极端低温事件-4 天到+2 天 300 hPa 位势高度异常合成及其对应的波作用通量。可以看出，在-4 天（图 12a），西欧—乌拉尔山—阿尔泰山脉南侧存在“- + -”的 Rossby 波列，与前两类不同，表现出更明显的向低纬度传播的特征，乌拉尔山的正异常中心北向延伸至西北太平洋；随着持续不断的 Rossby 波能量频散，波列不断加强并东移。至-2 天（图 12b），乌拉尔山正异常中心略向东移动，阿尔泰山负异常中心明显加深，斜脊斜槽范围加大，其下游东亚地区的正异常中心加强北扩并与西北太平洋正异常中心相连。与第一类事件类

似，峰值日（图 12c），在上游地区，有 Rossby 波能量从西欧地区负异常中心向乌拉尔山地区频散，使东移的乌拉尔山正异常中心西退并稳定维持在乌拉尔山地区；而乌拉山正异常中心向下游能量频散明显减弱，蒙古地区负异常中心向东扩展至我国东北地区，欧亚大陆形成大型斜脊斜槽，太平洋鄂霍茨克海仍为正异常中心。峰值日后 2 天（图 12d），太平洋鄂霍茨克海高压脊发展西移，与原来的乌拉尔地区正异常合并形成一个强大的乌拉尔正异常中心，使得乌拉尔山负异常持续时间进一步延长，从而引起了更大幅度和更长时间的东亚降温。这与 Zhuo et al（2022）提出的太平洋阻塞—乌拉尔阻塞接力型事件环流形势相似。第三类极端低温事件与第一类低温事件相类似，但欧亚大陆斜槽斜脊明显更宽阔，且乌拉尔山正异常中心位置更西更北，其维持原因除上游低频 Rossby 波能量的注入，还与下游太平洋正异常中心发展西移过程与上游系统合并有关。该类型极端低温事件降温幅度要较第一类弱。

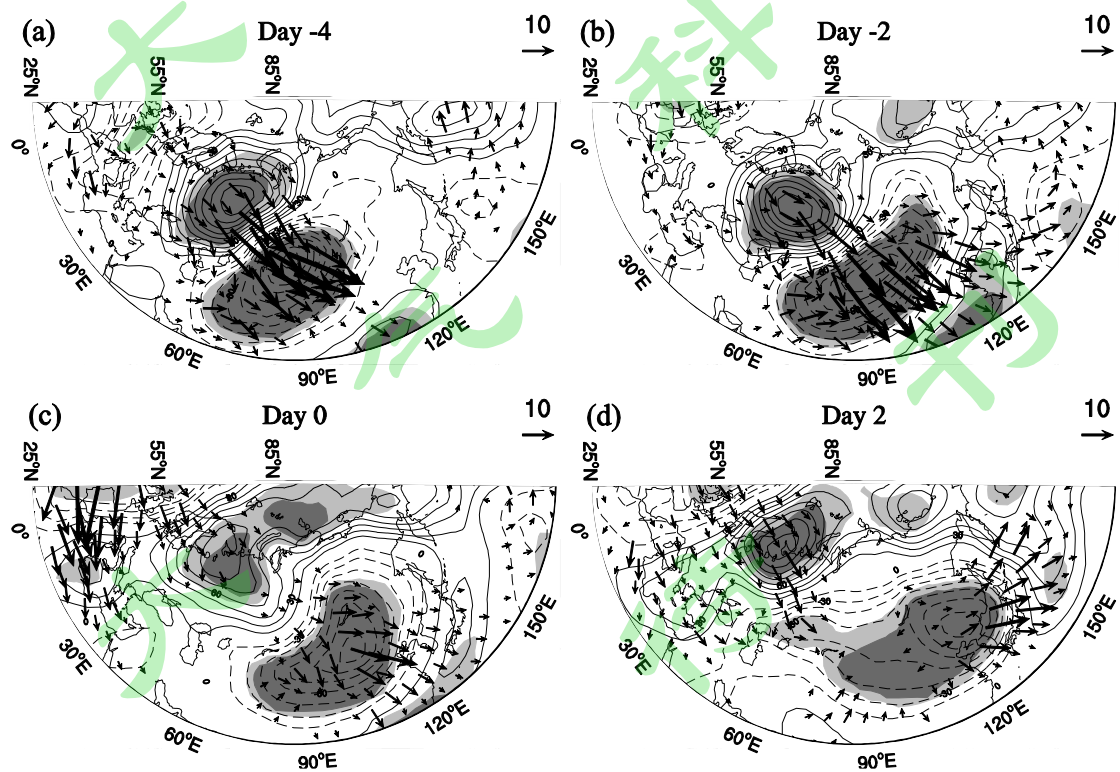


图 12 同图 4，但为旱区西部型极端低温事件

Fig. 12 As in Fig. 4, but for the extreme cold events in the western dryland region

5 讨论与结论

5.1 讨论

全球变暖背景下，旱区极端低温事件发生频数在整体上呈减少趋势，由于三类极端低温事件与不同环流配置相联系，它们年代变化有什么不同呢？图 13 给出了旱区三类极端低温事件的年代际分布，可见，三类极端低温事件发生频次在不同年代有所不同，表现出由第一类逐渐向第三类转变的特征。第一类极端低温事件发生在 80 和 90 年代，后面两个年代减少一半以上。第二类极端低温事件则呈现出波动振荡的变化特征，90 年代减少，00 年代增加为主要的类型，10 年代急剧减少。而第三类极端低温事件则呈先下降后上升的变化特征，主要发生于 80 年代和 10 年代，在 10 年代为旱区主要的极端低温事件类型。

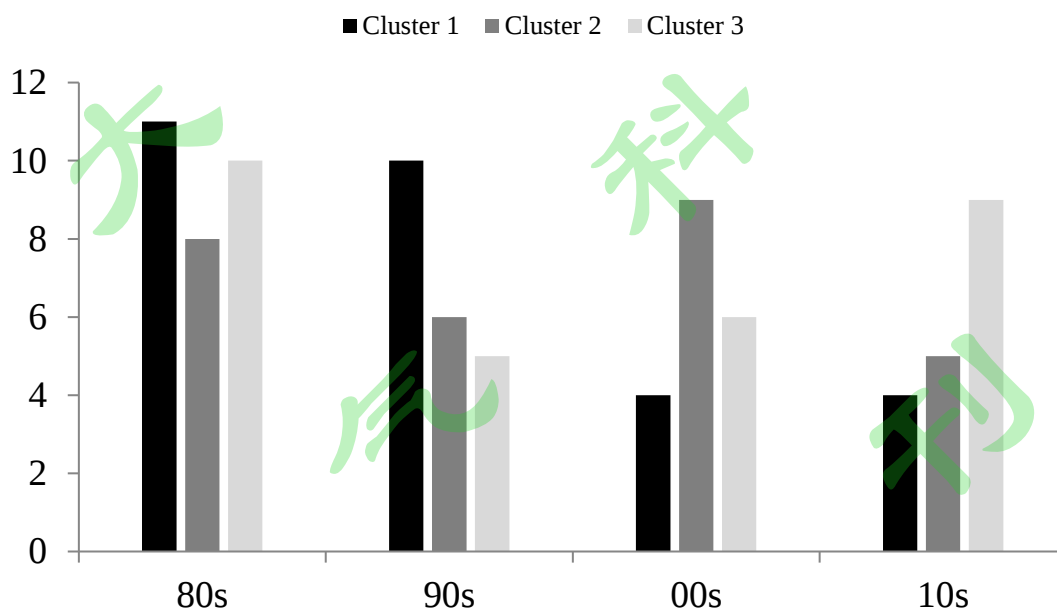


图 13 三类极端事件年代际分布

Fig. 13 The decadal distribution of the three clusters of extreme cold events

已有研究给出了乌拉尔山阻塞高压持续维持和东移对我国寒潮的影响,以及天气尺度波破碎的特征(Xie and Bueh, 2017)。Yao et al (2021; 2023) 研究发现,乌拉尔山阻塞高压的活动,会导致北极地区海冰覆盖减少,在它们共同影响下,北极涡旋变弱和更加不稳定,以及受拉尼娜的协同影响,极端冷事件易于频繁发生。本文从大尺度异常环流和瞬变波相互作用的角度,揭示了大尺度异常环流的持续维持有利于瞬变波的活动,瞬变波一方面增强了极端低温事件,另一方面瞬变涡动涡度通量和热量强迫有利于大尺度异常环流的持续维持,从而造成了大范围极端低温事件。近年来,很多研究强调北极放大对极端低温的影响,通过本文两种低温异常环流的对比分析,我们初步认为北极放大一方面有利于高压脊向极区伸入,其强烈的暖平流造成了极区斜压性增强,有利于瞬变波活动,进而使得高压脊在极区持续维持,加强了高低频环流间的相互作用,使得极端低温事件强发、广发、并发。

5.2 结论

本文利用 ERA5 再分析资料,界定了旱区冬季极端低温事件,根据低温空间分布特征,可分为旱区型、旱区东部型和旱区西部型,其中旱区型和旱区西部型与稳定少动的西伯利亚冷高压相联系,而东部型与东移的西伯利亚高压相联系。根据西伯利亚冷高压活动特征,重点分析了旱区型和旱区东部型极端低温事件的高空异常环流演变特征、瞬变波活动异常及其对异常环流的反馈强迫作用。

旱区型极端低温的对流层高层环流主要为欧亚大陆一对斜脊斜槽的持续发展,其主要能量来源为 Rossby 波能量。在斜脊斜槽影响下,西风气流分支,在脊北侧和槽底部地区瞬变波异常活跃,它一方面引导小股冷空气侵入旱区,加强了极端低温事件,另一方面,所造成的位势倾向不仅有利于乌拉尔山高压脊的稳

定维持，还减缓了斜脊斜槽的东移。脊前源源不断的冷空气堆积使得低层西伯利亚冷高压持续维持并向东扩展，从而使冷空气影响整个旱区地区。

旱区东部型极端低温事件为一对经向伸展的脊和槽，随着 Rossby 波能量向下游频散而减弱，乌拉尔山高压脊明显减弱并东移，在此影响下，低层西伯利亚冷高压也表现出东移的特征，因此极端低温主要影响旱区东部。

参考文献 (References)

- 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斜槽系统研究进展 [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 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42(3): 656–676.
- Bueh C, Fu X Y, Xie Z W. 2011a. Large-scale circulation features typical of wintertime extensive and persistent low temperature events in China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4(4): 235–241.
- Bueh C, Shi N, Xie Z. 2011b. Large-scale circulation anomalies associated with persistent low temperature over southern China in January 2008 [J]. Atmospheric Science Letters, 12(3): 273–280.
- Bueh C, Peng J, Lin D, et al. 2022. On the two successive super cold waves straddling the end of 2020 and the beginning of 2021 [J]. Adv. Atmos. Sci., 39(4): 591–608.
- 陈海山, 刘蕾, 朱月佳. 2012. 中国冬季极端低温事件与天气尺度瞬变波的可能联系 [J]. 中国科学: 地球科学, 42 (12): 1951–1965. Chen Haishan, Liu Lei, Zhu Yuejia. 2012. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity [J]. Science China: Earth Sciences, 56(7): 1266–1280.
- 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 Yafang, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 66(5): 808–825.
- Feng C, Wu B. 2015. Enhancement of winter Arctic warming by the Siberian high over the past decade [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 8(5): 257–263.
- 龚志强, 王晓娟, 任福民, 等. 2013. 亚欧中纬度关键区正位势高度距平场配置与中国冬季区域性极端低温事件的联系 [J]. *大气科学*, 37(6): 1274–1286.
- Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Ren Fumin, et al. 2013. The Euro-Asia height positive anomalies character and its probable influence on regional extreme low-temperature events in winter in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37(6): 1274–1286.
- Hartigan J A, Wong M A. 1979. Algorithm AS 136: A K-means clustering algorithm [J]. *Journal of the Royal Statistical Society. Series C (Applied Statistics)*, 28(1): 100–108.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 146: 1999–2049.
- IPCC. 2021. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis* [M]. Cambridge University Press.
- Lau N C, Nath M J. 1991. Variability of the baroclinic and barotropic transient eddy forcing associated with monthly changes in the midlatitude storm tracks [J]. *J Atmos Sci*, 48: 2589–2613.

- 李牧原, 罗德海. 2019. 冬季北极增暖与中纬度环流和极寒天气之间的联系: 经向位涡梯度的关键作用 [J]. 中国科学: 地球科学, 49(09): 1335–1345. Li M, Luo D. 2019. Winter Arctic warming and its linkage with midlatitude atmospheric circulation and associated cold extremes: The key role of the meridional potential vorticity gradient [J]. SCIENCE CHINA Earth Sciences (in Chinese), 49(09): 1335–1345.
- 李艳, 王嘉禾, 王式功. 2019. 极涡、阻塞高压和西伯利亚高压在极端低温事件中的组合性异常特征 [J]. 兰州大学学报(自然科学版), 55(1): 51–63. Li Yan, Wang Jiahe, Wang Shigong. 2019. The integrated circulation anomalies of polar vortex, blocking and the Siberian high over the extreme low-temperature events [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences, in Chinese), 55(1):51–63.
- Liu J, Curry J A, Wang H, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109(11): 4074–4079.
- Luo D, Yao Y, Dai A, et al. 2017. Increased quasi-stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic warming. Part II: A Theoretical Explanation [J]. J. Climate, 30(10):3549–3568.
- Ma S, Zhu C, Liu B, et al. 2018. Polarized response of East Asian winter temperature extremes in the era of Arctic Warming [J]. J. Climate, 31(14): 5543–5557.
- 彭京备, 孙淑清, 陈伯民. 2023. 乌拉尔阻塞高压的维持发展及其与 2020/2021 年冬季强寒潮活动的关系[J]. 大气科学, 47(5): 1421–1433. Peng Jingbei, Sun Shuqing, Chen Bomin. 2023. Maintenance and development of Ural blocking

- high and its relationship with severe cold wave activities in 2020/2021 winter [J].
- Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 47(5): 1421–1433.
- Screen J A, Simmonds I. 2014. Amplified mid-latitude planetary waves favor particular regional weather extremes [J]. *Nature Climate Change*, 4(8): 704–709.
- 施宁. 2013. 高频瞬变涡动反馈强迫对东亚/太平洋事件演变过程的作用[J]. *大气科学*, 37(6): 1187–1198. Shi Ning. 2013. Role of high-frequency transient eddy feedback forcing in the evolution of East Asia-Pacific events[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37(6): 1187–1198.
- Shi N, Suolang T, Tian P, et al. 2020. Contrasting relationship between wintertime blocking highs over Europe–Siberia and temperature anomalies in the Yangtze River basin [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 148(7): 2953–2970.
- Shi N, Wang Y, Suolang T. 2022. Energetics of boreal wintertime blocking highs around the Ural Mountains [J]. *J. Meteor. Res.*, 36(1): 154–174.
- Shi N, Ekwacu S, Fu S, et al. 2023. Features of local finite amplitude wave activity during extreme cold waves over Eastern China [J]. *J. Climate*, 36: 7583–7597.
- Shutts G J. 1983. The propagation of eddies in diffluent jet streams: Eddy vorticity forcing of 'blocking' flow fields [J]. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, 109(462): 737–761.
- Simmonds I, Lim E-P. 2009. Biases in the calculation of Southern Hemisphere mean baroclinic eddy growth rate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36, L01707.
- Takaya K, Nakamura H. 2005. Mechanisms of intraseasonal amplification of the cold Siberian High [J]. *J. Atmos. Sci.*, 62:4423–4440.
- 王会军, 唐国利, 陈海山, 等. 2020. “一带一路”区域气候变化事实、影响及可

- 能风险 [J]. 大气科学学报, 43, 1–9. Wang Huijun, Tang Guoli, Chen Hanshan, et al. 2020. The Belt and Road region climate change: facts, impacts and possible risks[J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 43(1):1–9.
- 武炳义, 杨琨. 2016. 从 2011/2012 和 2015/2016 年冬季大气环流异常看北极海冰以及前期夏季北极大气环流异常的作用 [J]. 气象学报, 74(5): 683–696.
- Wu Bingyi, Yang Kun. 2016. Roles of Arctic sea ice and the preceding summer Arctic atmospheric circulation anomalies in the atmospheric circulations anomalies of 2011/2012 and 2015/2016 winters [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 74(5): 683–696.
- 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 [J]. 大气科学, 45(3): 558–572. Wu Jiahui, Ren Rongcai, 2021. Stratosphere–troposphere interactions during nationwide extensive and persistent extreme cold events in boreal winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 45(3): 558–572.
- Xie Z, Bueh C. 2017. Blocking features for two types of cold events in East Asia [J]. J. Meteor. Res., 31 (2): 309–320.
- 徐辉, 金荣花. 2011. 2008 年初瞬变涡在中高纬阻高异常中的作用分析 [J]. 高原气象, 30(3): 600–606. Xu Hui, Jin Ronghua. 2011. Analysis on the effect of the transient eddy on Ural blocking high in 2008 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30(3): 600–606.
- Yao Y, Luo D, Dai A, et al. 2017. Increased quasi stationarity and persistence of winter Ural blocking and Eurasian extreme cold events in response to Arctic

warming. part i: insights from observational analyses [J]. J. Climate, 30(10): 3549–3568.

Yao Y, Zhang W Q, Luo D H, et al. 2022. Seasonal cumulative effect of Ural blocking episodes on the frequent cold events in China during the early winter of 2020/21 [J]. Adv. Atmos. Sci., 39, 609-624.

Yao Y, Zhuo W, Gong Z, et al. 2023. Extreme Cold Events in North America and Eurasia in November/December 2022: A Potential Vorticity Gradient Perspective [J]. Adv. Atmos. Sci., 40, 953-962.

叶丹, 张耀存. 2014. 冬季东亚副热带急流和温带急流协同变化与我国冷空气活动的关系 [J]. 大气科学, 38(1): 146–158. Ye Dan, Zhang Yaocun. 2014. Association of concurrent variation between the East Asian polar front and subtropical jets with winter cold air activity in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (1): 146–158.

Zhang J, Tian W, Chipperfield M P, et al. 2016. Persistent shift of the Arctic polar vortex towards the Eurasian continent in recent decades [J]. Nature Climate Change, 6(12): 1094–1099.

Zhang R, Sun C, Zhang R, et al. 2018. The impact of Arctic sea ice on interannual variations of summer Ural blocking [J]. International Journal of Climatology, 38(12): 4632–4650.

Zhang Y, Liu Y, Ding Y. 2021. Identification of winter long-lasting regional extreme low-temperature events in Eurasia and their variation during 1948–2017 [J]. Adv. Clim. Change Res., 32(3): 353–362.

- Zhang R N, Zhang R H, Dai G. 2022. Intraseasonal contributions of Arctic sea ice loss and Pacific decadal oscillation to a century cold event during early 2020/21 winter [J]. *Climate Dynamics*, 58: 741–758.
- Zhang X D, Fu Y F, Han Z, et al. 2022. Extreme cold events from East Asia to North America in winter 2020/21: Comparisons, causes, and future implications [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 39(4), 553–565.
- Zhuo W Q, Yao Y, Luo D H , et al. 2022. Combined impact of the cold vortex and atmospheric blocking on cold outbreaks over East Asia and the potential for short-range prediction of such occurrences [J]. *Environmental Research Letters*, 17. 084037.
- Zou C, Zhang R, Zhang P, et al. 2024. Contrasting physical mechanisms linking stratospheric polar vortex stretching events to cold Eurasia between autumn and late winter [J]. *Climate Dynamics*, 62, 2399–2417.