

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19

东北冷涡低温影响的关键环流型及其机理研究

陈晨^{1,2,3}, 谢作威^{2*}, 肖天贵¹, 成泽伦², 布和朝鲁², 李尚锋⁴, 杨旭⁴, 涂钢⁴

1. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

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. 抚顺市气象局, 抚顺 113000

4. 吉林省气象科学研究所所长白山气象与气候变化吉林省重点实验室/中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062

摘要 东北冷涡常导致东北地区夏季低温冷害, 给“东北粮仓”带来“哑巴灾”。

本文利用欧洲中心第五代再分析资料, 分析了 1979–2021 年初夏 (5–6 月) 东北冷涡低温影响的关键环流配置及其形成和维持机理。结果表明: 贝加尔湖地区和鄂霍茨克海地区的脊以及东北冷涡共同组成了典型的倒“Ω”环流, 这有利于高纬度地区冷空气和高位涡侵入东北地区; 同时, 鄂霍茨克海地区高压南侧的偏东风将冷空气输入东北地区, 这两股冷空气共同造成东北地区异常偏冷。自东欧平原至贝加尔湖的“- + -” Rossby 波列是东北冷涡的前兆信号, 非绝热加热和摩擦作用促进了这一 Rossby 波列的发展。随后, Rossby 波的作用起着主要贡献, 它使高位涡不断向南入侵和堆积, 并在东亚急流的正压变形作用下, 形成深厚的

收稿日期 2022-02-02; 网络预出版日期
* 通讯作者 谢作威, 男, 1986 年出生, 副研究员, 主要从事中高纬大气动力学研究。E-mail: xiezuowei@mail.iap.ac.cn.
资助项目 国家自然科学基金项目 (41630424); 中国气象局创新发展专项 (CXFZ2022J007 和 CXFZ2023P004); 吉林省科技发展计划项目(20180101016JC)
Funded by National Natural Science Foundation of China (41630424);
Science and Technology Innovation Development Project of China Meteorological Administration (Grant No. CXFZ2022J007& CXFZ2023P004); Jilin province science and technology development plan item (20180101016JC)

20 东北冷涡。随着 Rossby 波能量向下游频散以及非绝热加热和摩擦的耗散作用，
21 东北冷涡急剧减弱。而当贝加尔湖北侧地区为准定常脊时，它切断了东北地区与
22 高纬度的冷空气和高位涡的联系，Rossby 波能难以使东北冷涡发展，因而对东北
23 地区无明显低温影响。

24 **关键词** 东北冷涡；低温；Rossby 波；位涡收支；阻塞高压

25 文章编号 2023015A

26 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2304.23105

27 **Study on the key circulation patterns and mechanism of**
28 **Northeast China cold vortex on the low temperature impact**

29 CHEN Chen^{1,2,3}, XIE Zuowei², XIAO Tianguai¹, CHENG Zelun², BUEH Cholaw^{1,2}, LI
30 Shangfeng⁴, YANG Xu⁴, Tu Gang⁴

31
32 1 *School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225*

33 2 *International Center for Climate and Environment Sciences (ICCES), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of*
34 *Sciences, Beijing 100029*

35 3 *Fushun Meteorological Bureau, Fushun 113000*

36 4 *Jilin Provincial Key Laboratory of Changbai Mountain Meteorology & Climate Change/Laboratory of Research for Middle-*
37 *High Latitude Circulation Systems and East Asian Monsoon, Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun*
38 *130062*

39 **Abstract** Northeast China cold vortex (NCCV) often induces low temperature and cold damage
40 in Northeast China during summer, resulting in "Dumb Disaster" to the "Northeast Granary". Using
41 the fifth-generation reanalysis data of ECMWF, this paper analyzes the key circulation configuration,
42 as well as formation and maintenance mechanism of NCCV with low temperature impact during
43 early summer (May–June) over 1979–2021. The results show that two ridges over Lake Baikal and
44 the Okhotsk Sea as well as NCCV form a typical inverted "Ω" circulation, which favors invasions
45 of cold air and high potential vorticity from the high latitude region into Northeast China. At the
46 same time, easterlies on the south flank of high over the Okhotsk Sea bring cold air into Northeast
47 China. These two cold air intrusions together cause the abnormally cold in Northeast China. The "-
48 + -" Rossby wave train from the eastern European Plain to Lake Baikal is the precursor of NCCV,
49 which is amplified by the diabatic heating and friction. Subsequently, the Rossby wave plays a major
50 role, which causes the high potential vorticity intruding southward and accumulating. The East
51 Asian jet barotropically deforms such high potential vorticity to form a deep NCCV. As the
52 downward dispersion of Rossby wave energy and the dissipation of diabatic heating and friction,
53 NCCV weakens drastically. When the quasi-stationary ridge maintains over the north of Lake Baikal,
54 it cuts off the connection between Northeast China and the cold air and high potential vorticity over
55 the high latitude region. The Rossby wave hardly leads NCCV to develop and thus NCCV has no
56 obvious low temperature impact over Northeast China.

57 **Key Words** Northeast China cold vortex; Low temperature; Rossby wave; Potential vorticity
58 budget; Blocking high.

59 1 引言

60 东北冷涡 (Northeast China cold vortex, 简称 NCCV), 是指活跃在我国东
61 北地区或其附近深厚的高空大型气旋性涡旋, 经常与欧亚大陆不同地区阻塞高压
62 相伴出现 (郑秀雅等, 1992; 孙力等, 1994; 胡开喜等, 2011)。东北冷涡常造
63 成东北地区低温连阴雨、冰雹、暴雨、龙卷等灾害性天气, 给人类生命安全、财
64 产经济和生态环境带来严重的危害 (Zhao and Sun, 2007; 蔡雪薇等, 2019)。例
65 如, 2022 年 6 月东北地区一共发生了 3 次东北冷涡过程, 分别出现于 4-6 日、
66 10-14 日和 22-25 日, 导致东北地区气温偏低、暴雨次数偏多、月降水量突破同
67 期历史极值, 还造成了华北和华中多地雷暴大风等强对流天气。

68 东北冷涡以夏季最为活跃, 可占夏季的 42%, 其低温影响约占夏季低温时段
69 的 70%, 是造成东北地区低温冷害和谷物减产的主要原因 (丁士晟, 1980, 孙力
70 等, 2000)。东北冷涡的低温影响与其自身的强度和位置有关, 深厚和偏南的冷
71 涡对东北地区的低温影响较为强烈和持久 (蒋大凯等, 2012)。研究表明, 东北
72 冷涡的低温影响还与欧亚大陆阻塞高压或高压脊的配置密切相关 (李尚锋等,
73 2012; Xie and Bueh, 2015; Fang et al., 2021)。当东北的上游地区为高压脊时,
74 东北冷涡向东北的南部地区移动, 所带来的低温影响更强更广, 分布于东北至中
75 东部地区。而与雅库茨克-鄂霍茨克海地区阻塞高压相联系的东北冷涡稳定少动,
76 低温影响主要局限于东北地区。刘刚等 (2012, 2019) 指出, 鄂霍茨克海地区阻
77 塞高压是影响东北冷涡和东北低温重要的环流系统, 鄂霍茨克海阻塞高压偏多年,
78 东北亚地区环流以经向型为主, 其南侧的偏东气流把海上的冷空气带入我国东北
79 地区。这些研究启示我们, 究竟什么样的东北冷涡环流配置对东北地区低温明显

80 最为明显？

81 东北冷涡的干冷入侵还体现在高空，这种干冷入侵通常是高空的高位涡下传，
82 当侵入到对流层中低层暖湿气流之上时，由于层结稳定度的减弱，高位涡中的涡
83 度部分将增强，造成东北冷涡加强（吴迪等，2010；刘英等，2012；王宁等，2014）。
84 在这种下暖上冷配置下，斜压能量的转换成为东北冷涡发展的主要能量来源（Fu
85 and Sun, 2012）。研究表明，引导高位涡侵入东北地区的西北气流主要是上游地
86 区的高压脊发展，如贝加尔湖和乌拉尔山等地区（廉毅等，2010；Xie and Bueh,
87 2015）。上游高压脊的发展通常伴着 Rossby 波能量向东北地区频散，使东北冷
88 涡发生发展（Xie and Bueh, 2015；Nie et al., 2022）。另外，源自东北亚阻塞型环
89 流和副热带异常环流的 Rossby 波能量，经向传播至东北地区，也有利于东北冷
90 涡环流的维持（Wang et al., 2003；施宁等，2008，2009）。

91 东北冷涡的“冷”通常指的是对流层中高层的冷，而有关东北冷涡如何对东
92 北地区地表产生低温影响仍不清楚，本文将针对这一问题开展研究，探讨什么样
93 的东北冷涡环流配置会对地面产生低温影响？这样具有深厚冷影响的东北冷涡
94 与 Rossby 波传播有什么样的关系？通过对这些问题的深入研究，我们希望能加
95 深对东北冷涡低温影响的理解。

96 2 资料和方法

97 2.1 资料

98 本文使用的再分析资料为欧洲中期天气预报中心提供的第五代大气再分析
99 全球气候数据（ERA5；Hersbach et al., 2020），ERA5 是由集合预报系统的四维
100 变分资料同化和 CY41R2 模型预报产生的。所使用的要素场包括气压层的位势

101 场、温度场和水平风场 (u 和 v)、320 K 位涡 (q) 和水平风场、地表 2 m 气温
102 和 10 m 风场, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。气压层资料范围为 1000–200 hPa, 垂直分
103 辨率为 50 hPa。时间分辨率为 1 小时, 日平均资料为 24 时次平均。研究时间段
104 为 1979–2021 年, 每年取东北冷涡频发的 5–6 月。

105 2.2 方法

106 2.2.1 东北冷涡的界定

107 本文对东北冷涡的界定主要是根据传统的定义(孙力等, 1994), 使用程序
108 进行自动识别(Xie and Buch, 2015), 具体步骤如下:

109 首先, 在 (115°E – 145°E , 35°N – 55°N) 范围内, 500 hPa 高度场上至少有一
110 条闭合的等值线; 具体判定是利用 Matlab 或 Matplotlib 的 contour 函数依次提取
111 出等值线, 该函数将指定的值线性插值到相邻位势高度值的两个格点之间, 若等
112 值线首尾两点重合, 则为闭合等值线。其次, 配有冷中心或冷槽, 即有纬向气温
113 极小值。最后, 当持续时间为 3 天及以上时, 将其识别为一次冷涡过程。

114 另外, 我们还增加了冷涡具有一定深度的条件, 即冷涡中心(高度最低值)
115 与其最外围闭合等值线的高度差, 这主要为了去除尺度较小的闭合等值线。我们
116 对该条件进行了 5–50 gpm 的敏感性实验, 当值大于等于 25 gpm 之后东北冷涡
117 数量变化不明显(图略), 因此, 该值取为 25 gpm。根据这些条件, 我们统计出
118 1979–2021 年初夏(5–6 月)共 196 例东北冷涡事件, 将东北地区区域(图 1 的
119 黑曲线)平均的 2 m 温度异常最强日定义为东北冷涡峰值日。

120 为了研究东北冷涡对东北地区的低温影响, 将 196 个事件根据东北冷涡峰值
121 日的强度从强到弱排序, 并分成四等份: 高值类冷涡、中高值类冷涡、中低值类
122 冷涡和低值类冷涡, 均为 49 例。

123 本文分别对四类东北冷涡进行了环流场合成分析, 并使用学生 t 检验进行显
124 著性检验(黄嘉佑, 2004)。

125 2.2.2 Rossby 波作用通量

126 为了分析欧亚大陆 Rossby 波传播对东北冷涡的影响, 本文采用 Takaya and

127 Nakamura (2001) 定义的 Rossby 波作用通量。在球坐标系下, 水平方向波作用
128 通量的公式为:

$$129 \quad \vec{W}_h = \frac{p \cos \varphi}{2|\vec{U}_c|} \left(\begin{aligned} & \frac{U_c}{a^2 \cos^2 \varphi} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda^2} \right] + \frac{V_c}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] \\ & \frac{U_c}{a^2 \cos \varphi} \left[\frac{\partial \psi'}{\partial \lambda} \frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \lambda \partial \varphi} \right] + \frac{V_c}{a^2} \left[\left(\frac{\partial \psi'}{\partial \varphi} \right)^2 - \psi' \frac{\partial^2 \psi'}{\partial \varphi^2} \right] \end{aligned} \right) \quad (1)$$

130 其中 $\vec{U}_c = (U_c, V_c)$ 为 1979–2021 年气候平均风场, ψ' 为针对于气候平均的扰动流
131 函数, φ 和 λ 分别表示纬度和经度, a 代表地球半径, p 为气压除以 1000 hPa 的值。
132 由于基本流为气候平均, 该波作用通量能够很好地描述纬向非均匀气流中的
133 Rossby 波扰动 能量的传播。

134 2.2.3 位涡收支

135 为了刻画东北冷涡演变机理, 本文使用等熵位涡收支对与东北冷涡相联系的
136 高位涡进行了诊断分析。由于基本流的平移作用, 位涡的变化受到位置移动的影响
137 比较大, 而它对位涡的发展或减弱不起直接作用。因此, 我们对欧拉形式的位
138 涡收支方程进行了简单的变换, 推导出准拉格朗日形式的位涡收支。

139 位涡倾向方程表示为:

$$140 \quad \frac{\partial q}{\partial t} = -\vec{U} \cdot \nabla q + Res \quad (2)$$

141 其中 q 为位涡, 单位为 PVU ($1 \text{ PVU} = 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$), Res 为非绝热加热和摩
142 擦作用。为了研究位涡异常的收支, 我们将所有变量分解为气候平均和异常, 然
143 后代入公式 (2), 并减去公式 (2) 中的气候平均, 可得:

$$144 \quad \frac{\partial q'}{\partial t} = -\vec{U}' \cdot \nabla \bar{q} - \vec{U}_c \cdot \nabla q' - (\vec{U}' \cdot \nabla q' - \overline{\vec{U}' \cdot \nabla q'}) + Res' \quad (3)$$

145 为了去除基本流的平移作用, 我们对 \vec{U}_c 进行进一步分解, 即 ($30^\circ \text{N} - 70^\circ \text{N}$;
146 $60^\circ \text{E} - 170^\circ \text{E}$) 的区域平均风 ($\vec{U}_{c\text{均}}$) 和非均匀风 ($\vec{U}_{c\text{非}}$), 并代入公式 (3), 并
147 把平移项移到左边可得:

$$148 \quad \frac{\partial q'}{\partial t} + \vec{U}_{c\text{均}} \cdot \nabla q' = -\vec{U}' \cdot \nabla \bar{q} - \vec{U}_{c\text{非}} \cdot \nabla q' - (\vec{U}' \cdot \nabla q' - \overline{\vec{U}' \cdot \nabla q'}) + Res' \quad (4)$$

149 公式右边第一项 $-\vec{U}' \cdot \nabla \bar{q}$ 为扰动风场对基本流的作用, 反映了 Rossby 波的

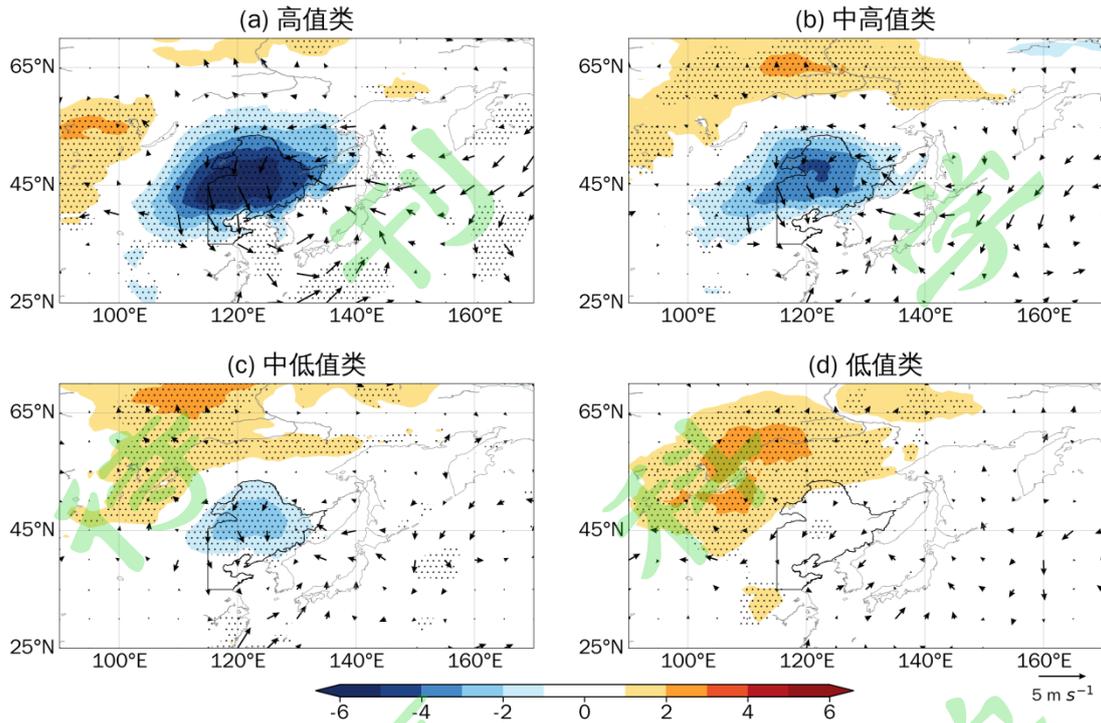
150 传播; 第二项 $-\vec{U}_{c\neq} \cdot \nabla q'$ 为正压变形项; 第三项 $-(\vec{U}' \cdot \nabla q' - \overline{\vec{U}' \cdot \nabla q'})$ 为非线性项;
151 第四项 Res' 是非绝热加热异常和摩擦作用。关于各项的物理意义解释详见 Xie et
152 al. (2019)。

153 3 结论

154 3.1 四类东北冷涡的环流特征

155 基于上一节东北冷涡的分类结果, 图 1 给出了四类东北冷涡峰值日的 2 m 温
156 度异常和 10 m 水平风异常合成场。由图可见, 高值类冷涡造成东北地区低温影
157 响最大, 低温异常不仅覆盖整个东北地区和华北地区, 还影响至蒙古东部和外东
158 北。在地面风场上, 东北地区不仅有偏北风异常, 还有来自于白令海峡经鄂霍茨
159 克海至东北地区的偏东风异常。可见, 这两股冷空气共同造成了东北地区近地面
160 偏冷。

161 中高值类和中低值类冷涡的低温影响的强度和范围逐渐减小, 这是由于东北
162 地区的偏北风和下游的偏东风明显减小, 特别是来自于海上的偏东风。在低值类
163 冷涡中, 这两股气流减弱得更为不明显, 东北地区也无低温分布, 而在西侧贝加
164 尔湖地区有较大范围的暖异常分布。



165

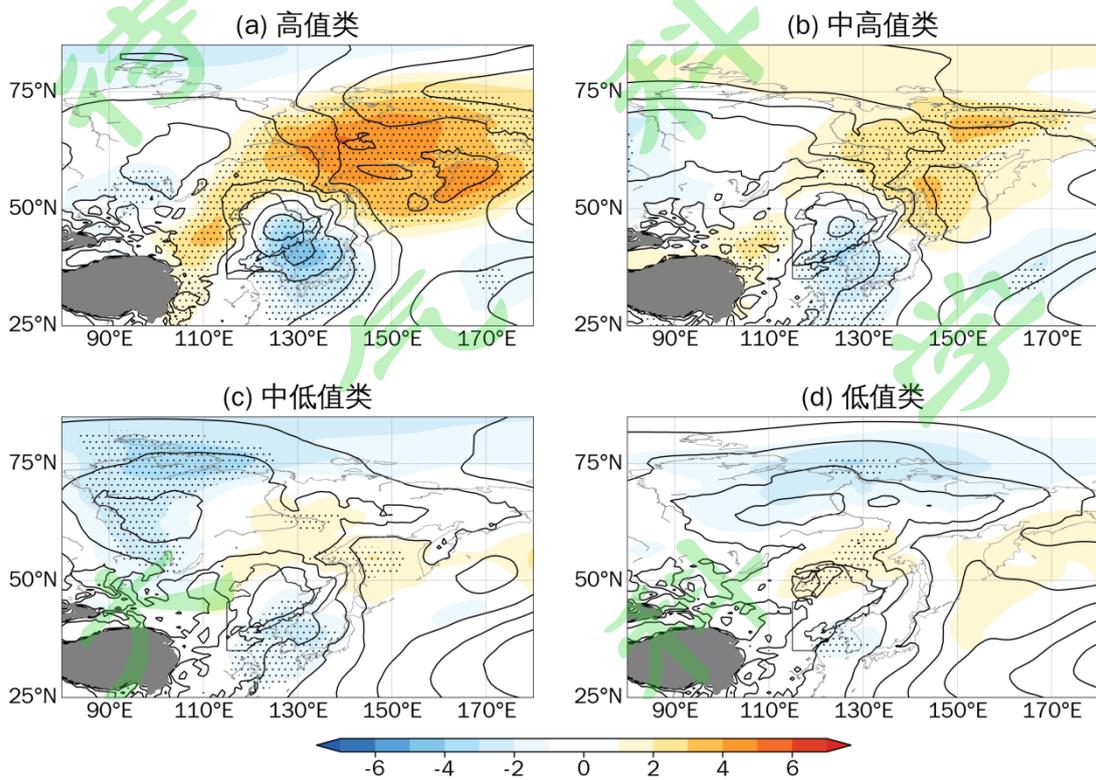
166 图 1 四类东北冷涡的地表 2 m 温度异常（填色，单位：°C）和 10 m 风场异常合成场
 167 （箭头，单位：m s⁻¹），打点代表合成异常通过 95% 显著性检验，图中黑实线为东北地
 168 区。（a）是高值类东北冷涡类；（b）是中高值类东北冷涡类；（c）是中低值类东北冷
 169 涡类；（d）是低值类东北冷涡类。

170 **Figure 1** The composite 2 m temperature anomalies (shading, unit: °C) and 10 m wind
 171 anomalies (arrows, units: m s⁻¹) for the four types of NCCV. Stippling indicates the composite
 172 anomalies that are significant at the 95% confidence level. The solid black curve designates
 173 Northeast China. (a) is a high value group of NCCV; (b) is a mid-high value group of NCCV;
 174 (c) is a mid-low value group of NCCV; (d) is a low value group of NCCV.

175

176 为了分析造成近地面风场差异的环流，图 2 先给出了四类东北冷涡的海平面
 177 气压及其异常合成场。高值类冷涡在东北地区有一明显的低压系统，中心位于东
 178 北平原，而其负异常环流略偏东南，这有利于东北地区盛行偏北风异常（图 2a）。
 179 在其东北侧，有一高压脊由波弗特高压伸向东北亚地区，东北亚地区表现出显著
 180 的正异常环流，有利于白令海峡至我国东北地区偏东风异常的维持。中高值类与

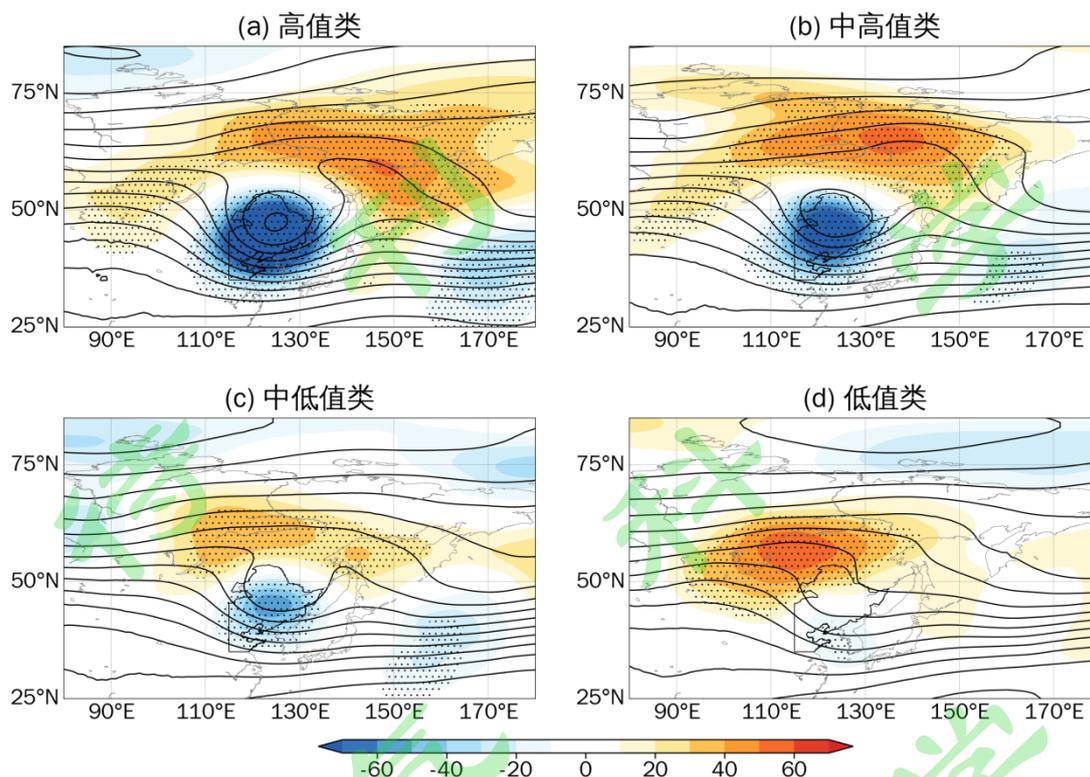
181 高值类的环流较为相似（图 2b），但地面低压和高压脊的强度有所减弱。中低值
 182 类和低值类冷涡东北地区的低压环流明显偏弱（图 2c 和 2d），特别是低值类，
 183 东北地区无明显低压环流，不利于偏北风的形成。同时，东北亚地区也无明显高
 184 压环流，也不利于西北太平洋地区偏东风的形成。可见，造成东北地区异常偏冷
 185 的海平面气压配置主要是东北地区低压环流和东北亚地区的高压脊。



186
 187 图 2 如图 1，但为海平面气压（等值线，单位：hPa）及其异常（填色）合成场，等
 188 值线间隔为 2 hPa，灰色表示青藏高原。
 189 **Figure 2** As Figure 1, but for the composite sea level pressure (contours, unit: hPa) and
 190 corresponding anomalies (shading) fields. Contour interval is 2 hPa. The grey shaded area
 191 designates the Tibetan Plateau.

192
 193 图 3 给出了四类东北冷涡 500 hPa 位势高度及其异常合成场。高值类东北冷
 194 涡环流场在东北亚地区表现出明显的倒“Ω”特征（图 3a），其中，贝加尔湖地

195 区为一中等强度的脊，鄂霍茨克海地区有一明显的脊伸向中西伯利亚高原，在两
196 个脊中间有一深厚的东北冷涡，东北地区清晰可见两条闭合等值线，其中心位置
197 较地面低压中心略偏西北（图 2a）。另外，极涡偏向于泰梅尔半岛，有一低压槽
198 向南伸向西伯利亚地区，与倒“ Ω ”的开口相联系，有利于高纬度冷空气侵入东
199 北地区。中高值类异常环流强度略弱（图 3b），但有明显的偶极子特征，高压脊
200 位于切尔斯基山脉，阻断了东北冷涡与高纬度冷空气的联系，冷涡中心较高值类
201 东北冷涡略偏北，表现出更明显的向西倾斜的特征。中低值类东北冷涡环流配置
202 较前两类明显减弱（图 3c），其中，高压脊主要位于贝加尔湖地区，鄂霍茨克海
203 地区高压脊明显减弱，而东北地区仅表现出一宽广的低压槽。而低值类环流主要
204 为一明显的贝加尔湖脊和东北地区的弱槽（图 3d）。可见，对东北地区低温影响
205 显著的东北冷涡环流配置为明显的倒“ Ω ”特征，有利于与高纬度冷空气相联系，
206 而其余三类的高压脊主要位于东北冷涡的北侧，完全阻断了东北冷涡与其北侧冷
207 空气的联系。



208

209 图3 如图1，但为500 hPa位势高度（等值线，单位：gpm）及其异常（填色）合成
210 场，等值线间隔为40 gpm。

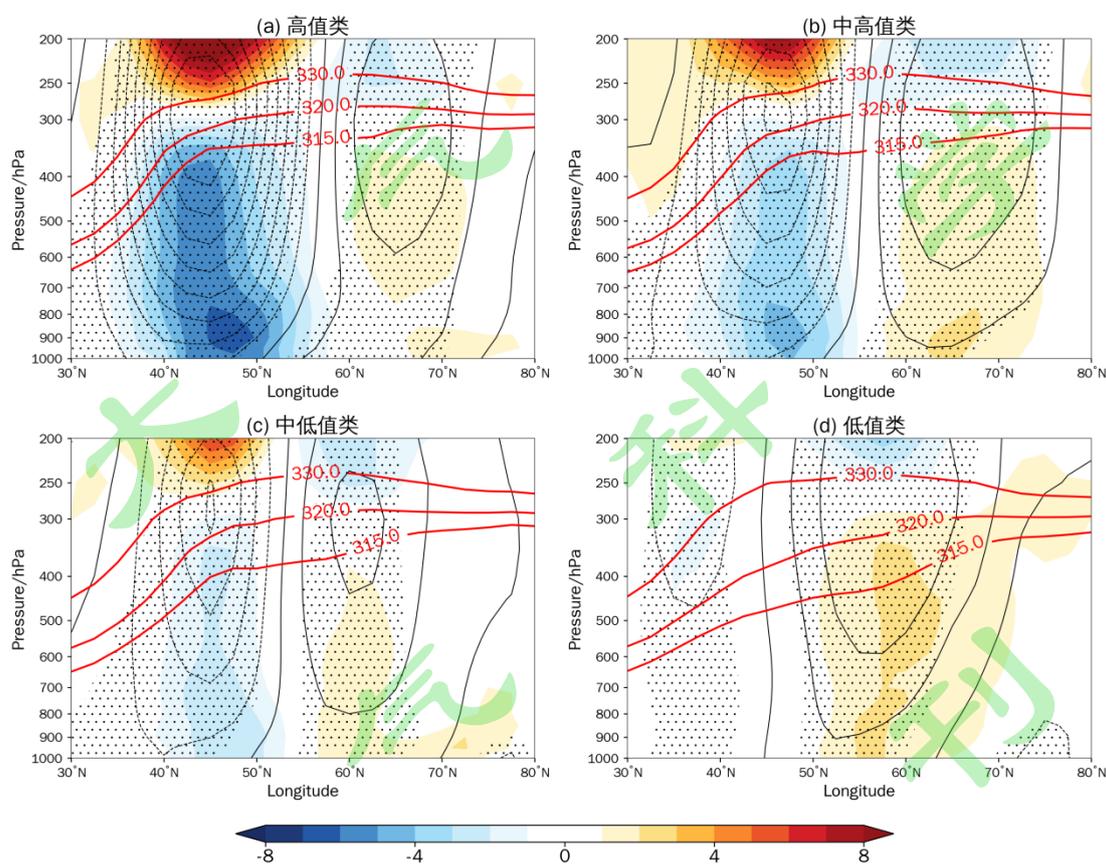
211 **Figure 3** As Figure 1, but for the composite 500 hPa geopotential height (contour, unit:
212 gpm) and corresponding anomalies (shading) fields. Contour interval is 40 gpm.

213

214 由对流层中层环流和海平面气压对比可见，东北冷涡随着高度略向西北倾斜，
215 为了进一步分析东北冷涡垂直结构，图4给出了沿着东北冷涡中心125°E的位势
216 高度异常和温度异常合成剖面图。在低温影响最强日，高值类东北冷涡为非常深
217 厚的相当正压环流系统（图4a），其中心位于300 hPa，在中心上下分别为暖和
218 冷异常，低温异常中心位于900 hPa附近，位置较冷涡中心偏北，由近地层偏北
219 风把冷空气向东北输送。在东北冷涡中心以北，等熵面基本上与等压面平行，而
220 在中心南侧，等熵面表现出急剧下滑，位温垂直梯度减小，即层结稳定度变小，
221 这有利于位涡中静力稳定度向涡度转化，使气旋性环流加强，这可能是造成近地

222 面气旋性环流较对流层中层略偏东南的原因之一，从而使得东北地区盛行偏北风
223 异常。

224 中高值类和中低值类东北冷涡环流强度逐渐减弱，其垂直伸展也变弱，位置
225 较高值类东北冷涡有所南移，并且负高度异常在对流层中低层表现出略向南扩展，
226 尽管冷异常仍然较为深厚，但强度也明显减弱（图 4b 和 4c）。同时，北侧的高
227 压环流向南移动。低值类东北冷涡的环流明显减弱（图 4d），仅在对流层中上层
228 有较弱的异常环流；而北侧的正高度异常环流进一步南移，并且有所加强。



229

230 图 4 四类东北冷涡沿 125°E 高度异常（黑色等值线，单位：gpm）、温度异常（填
231 色，单位：°C）和位温（红色粗实线，单位：K）合成经向剖面图。等值线间隔为 20
232 gpm，打点代表高度异场合成通过 95%显著性检验。（a）是高值类东北冷涡类；

233 （b）是中高值类东北冷涡类；（c）是中低值类东北冷涡类；（d）是低值类东北冷涡
234 类。

235 **Figure 4** Meridional cross sections of the composite geopotential height anomalies (black
236 contour, unit: gpm), temperature anomalies (shading, unit: °C) and potential temperature
237 (thick red line, unit: K) along 125°E for the four types of NCCV. Contour interval is 20 gpm.
238 Stippling indicates the composite height anomalies that are significant at the 95% confidence
239 level. (a) is a high value group of NCCV; (b) is a mid-high value group of NCCV; (c) is a
240 mid-low value group of NCCV; (d) is a low value group of NCCV.

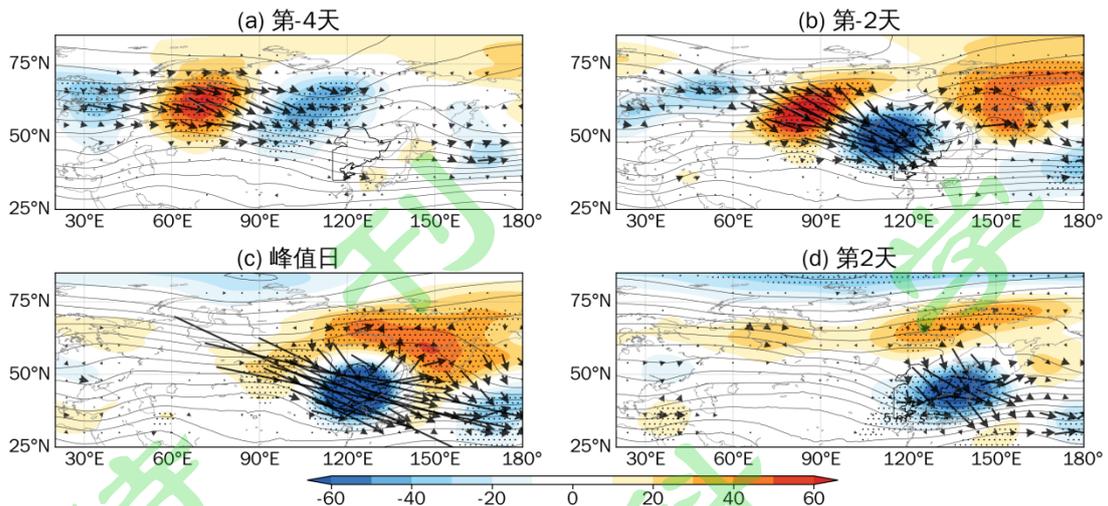
241

242 3.2 东北冷涡形成机理分析

243 上述分析表明，与高值类和低值类相联系的贝加尔湖脊较强，这意味着有
244 Rossby 波能量向东北地区频散，因此，本文主要关注这两类环流的演变机理。简
245 单起见，以第一-N（N）天代表冷涡峰值日之前（之后）的第 N 天。

246 3.2.1 500 hPa 环流演变特征

247 如图 5 给出了高值类东北冷涡 500 hPa 环流合成场以及相应 Rossby 波作用
248 通量。在第-4 天（图 5a），欧亚大陆为两槽一脊环流形势，即“- + -”波列，
249 有 Rossby 波能量自东欧平原向贝加尔湖地区频散。在第-2 天（图 5b），随着
250 Rossby 波能量向东北地区频散，乌拉尔山脊和贝加尔湖槽在东移过程中不断加
251 强，特别是槽明显加深于大兴安岭西侧。在其北侧，有较弱的 Rossby 波能量由
252 贝加尔湖向鄂霍茨克海地区频散，鄂霍茨克海地区的脊明显加强并向北伸，北亚
253 地区的环流表现出倒“Ω”特征。在峰值日（图 5c），贝加尔湖西侧的脊进一步
254 向东北地区频散 Rossby 波能量，使槽强烈向南加深并被切断形成冷涡。东北亚
255 脊进一步加强并西退，北亚地区倒“Ω”环流特征更为明显。在第 2 天（图 5d），
256 随着东北冷涡向下游频散 Rossby 能量，东北冷涡明显减弱为槽，并东移至日本
257 海，东北高压脊也减弱，倒“Ω”特征环流消散。



258
 259 图 5 高值类东北冷涡的 500 hPa 位势高度（等值线，单位：gpm）及其异常（填色）合
 260 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 40 gpm，
 261 打点代表合成异常通过 95%显著性检验，图中黑实线为东北地区。（a）为第-4 天；（b）
 262 为第-2 天；（c）为峰值日；（d）为第 2 天。

263 **Figure 5** The life cycle of composite 500 hPa geopotential height (contour, unit: gpm) and
 264 corresponding anomalies (shading) and Rossby wave activity fluxes (arrows, units: $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$) for
 265 the high value group of NCCV. The contour interval is 40 gpm. Stippling indicates the
 266 composite anomalies that are significant at the 95% confidence level. The solid black curve
 267 designates Northeast China. (a) is at day -4; (b) is at day -2; (c) at the peak day; (d) is at day
 268 2.

269

270 3.2.2 320 K 等熵位涡分析

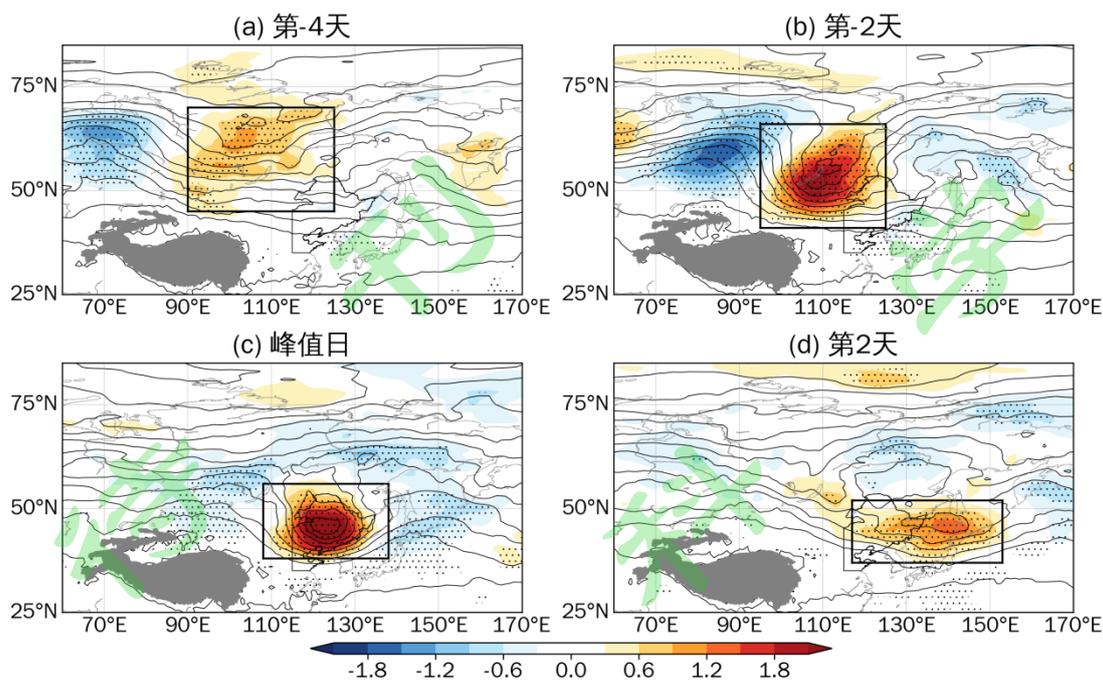
271 由上述 Rossby 波列可见，有槽自次极区向贝加尔湖深入，这意味着高位涡
 272 向东北侵入。由 3.1 小节的垂直剖面分析可知，320 K 等熵面穿越东北冷涡中心，
 273 并在东北地区明显向下倾斜。在绝热无摩擦条件下，位涡沿着等熵面运动。因此，
 274 本文选取 320 K 等熵面位涡来刻画东北冷涡发展机理。

275 图 6 给出了高值类冷涡 320 K 等熵面位涡演变过程，320 K 的高位涡基本上
 276 分布在中高纬地区，其环流较图 5 的高度场更为明显，这可能是由于中高纬具有

277 较强的稳定层结，突出了槽脊环流的特征。从第-4 天至-2 天（图 6a 和 6b），欧
278 亚大陆有明显的 Rossby 波列发展，其中，乌拉尔山地区的脊区有低位涡的加强
279 并向东北方向伸展，这有利于次极区和高纬度地区的高位涡向南侵入贝加尔湖地
280 区，因此贝加尔湖深厚的槽区有显著的正位涡异常加强。同时，鄂霍茨克海和楚
281 科奇半岛的脊区有低位涡向北伸展和发展。在峰值日（图 6c），欧亚大陆 Rossby
282 波列明显减弱，北亚地区表现出明显的经向环流特征，从萨彦岭至东北亚地区为
283 宽广的负位涡异常，高位涡主体移到中国东北地区，形成典型的倒“Ω”特征环
284 流。在第 2 天（图 6d），这种偶极子位涡环流明显减弱并东移，高位涡中心移动
285 至库页岛和千岛群岛。

286 对于东北冷涡发展而言，中高纬度环流经历了一次纬向波列向经向型环流的
287 调整，上游乌拉尔山脊的发展和向东北伸展，有利于高位涡由次极区不断向贝加
288 尔湖侵入和堆积，并向我国东北地区移动形成东北冷涡。

289
290



291

292 图6 同图5，但为320 K等熵面位涡（等值线，单位：PVU）及其异常（填色）合成
 293 场。等值线间隔为0.5 PVU，灰色表示青藏高原，黑色方框表示正位涡异常区。

294 **Figure 6** As Figure 5, but for the composite 320 K isentropic surface potential vorticity
 295 (contour, unit: PVU) and corresponding anomalies (shading). Contour interval is 0.5 PVU.
 296 The grey shaded area designates the Tibetan Plateau. The black rectangle designates the
 297 positive potential vorticity anomalies.

298 3.3 位涡收支分析

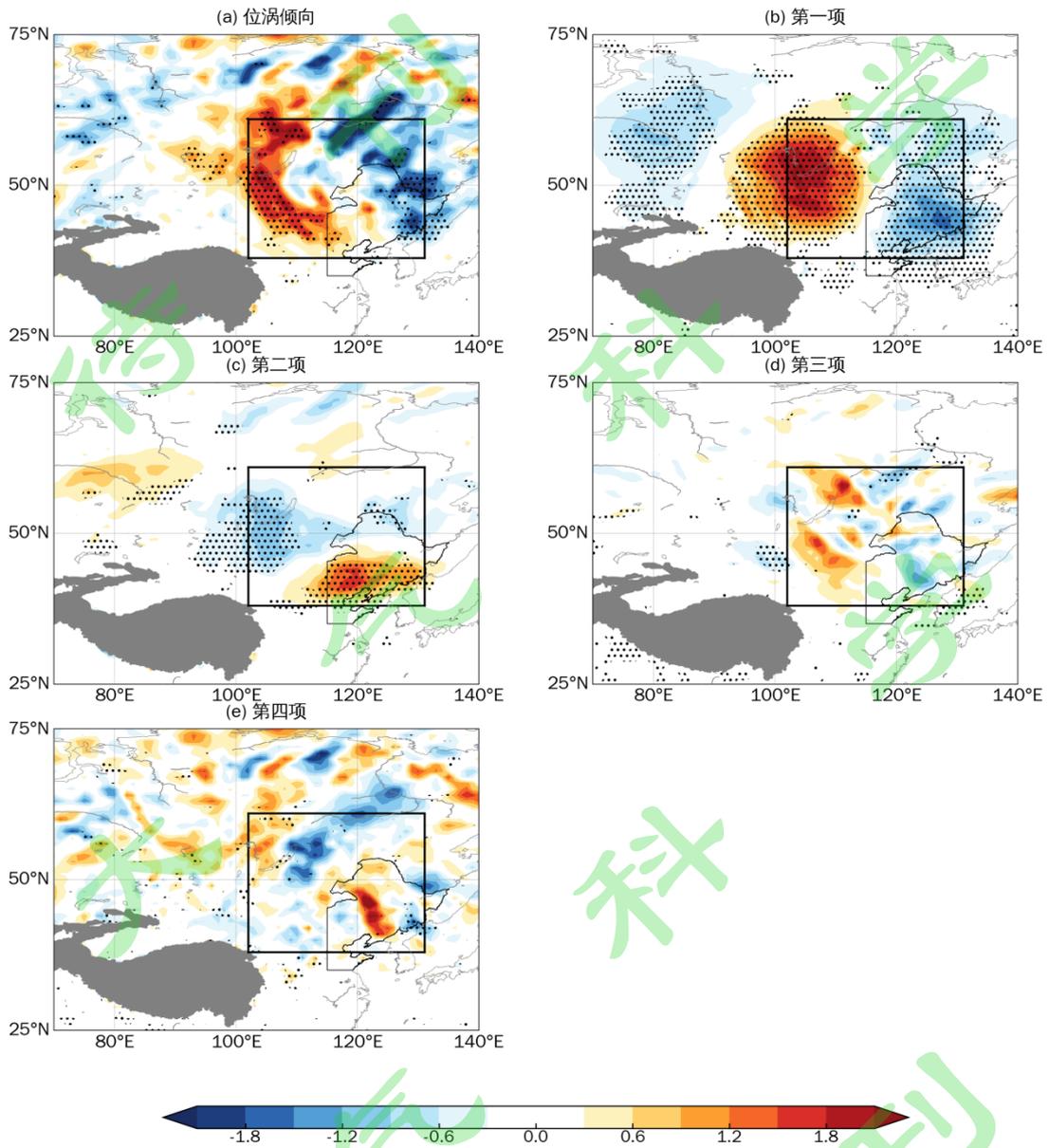
299 从位涡场演变过程可见，从第-2天至峰值日，与东北冷涡相联系的高位涡
 300 形态发生了剧烈的变化，从东北-西南的带状分布变成了准圆形，为了理解影响
 301 这种位涡变化的物理过程，我们利用方法中推导的准拉格朗日位涡收支方程计算
 302 了高值类东北冷涡第-1天的各项结果，如图7所示。去除均匀的气候平均风之
 303 后，在东北冷涡范围内位涡倾向表现为“+ -”分布（图7a），即东北冷涡的西
 304 半部分加深，而东北冷涡东部减弱。这种变化导致原来东北-西南的高位涡带状
 305 分布转变为各向同性的圆形分布，有利于东北冷涡环流加强。这种位势倾向分布

306 主要来自于第一项的贡献（图 7b），即风场异常对平均位涡的平流作用，东北冷
307 涡西侧脊前偏北风异常把高纬度高位涡向南平流，而东北冷涡东侧槽前偏南风异
308 常把低纬度的低位涡向北平流。可见，第一项作用使环流系统西退，它反映了
309 Rossby 波传播的作用（Xie et al., 2019），与上述强波作用通量相对应。值得注
310 意的是，第一项造成的位涡倾向也表现出南北的带状分布，和位涡本身的分布密
311 切相关，因此，尽管它的贡献很大，但对冷涡的形态变化可能并不起主要作用。

312 第二项造成的位涡倾向与第一项有所相反，贝加尔湖地区为负位涡倾向，正
313 位涡倾向主要分布于东北地区的南部（图 7c），即东亚急流轴的北侧。第二项是
314 非均匀风场对位涡异常的平流和变形作用，首先，去掉均匀的平均风之后，仍有
315 较弱的非均匀西风对正位涡异常起着平移作用，造成东北冷涡西部负位涡倾向；
316 其次，在急流轴北侧有很强的非均匀风的气旋式切变，使得靠近急流轴的正位涡
317 异常更快地向东平流，从而造成东北冷涡东南部的正位涡倾向。因此，它的作用
318 是使东北冷涡发生变形，从东北-西南的带状分布变为各项同性的准圆形分布，
319 使冷涡向南加深。

320 第三项是非线性项的作用，它造成的位涡倾向大体上与第一项相类似，但更
321 为局地性特征（图 7d）。它和正位涡异常的形态有关，从第-2 天至峰值日，由
322 正位涡异常从贝加尔湖向南入侵过程中（图 6b 和 6c），偏北风异常把贝加尔湖
323 正位涡异常向南平流，而其东侧为偏南风异常把负位涡异常向北平流，从而造成
324 与 Rossby 波相类似的倾向。第四项是非绝热加热和摩擦作用，它造成的位涡倾
325 向与第二项有所相似（图 7e），即东北冷涡西侧为负的位涡倾向，东南一侧有狭
326 长的正位涡倾向，这可能与东北冷涡东南一侧有暖湿气流的输送和深对流的发展

327 有关，凝结潜热释放会在对流层中下层产生正位涡。



328

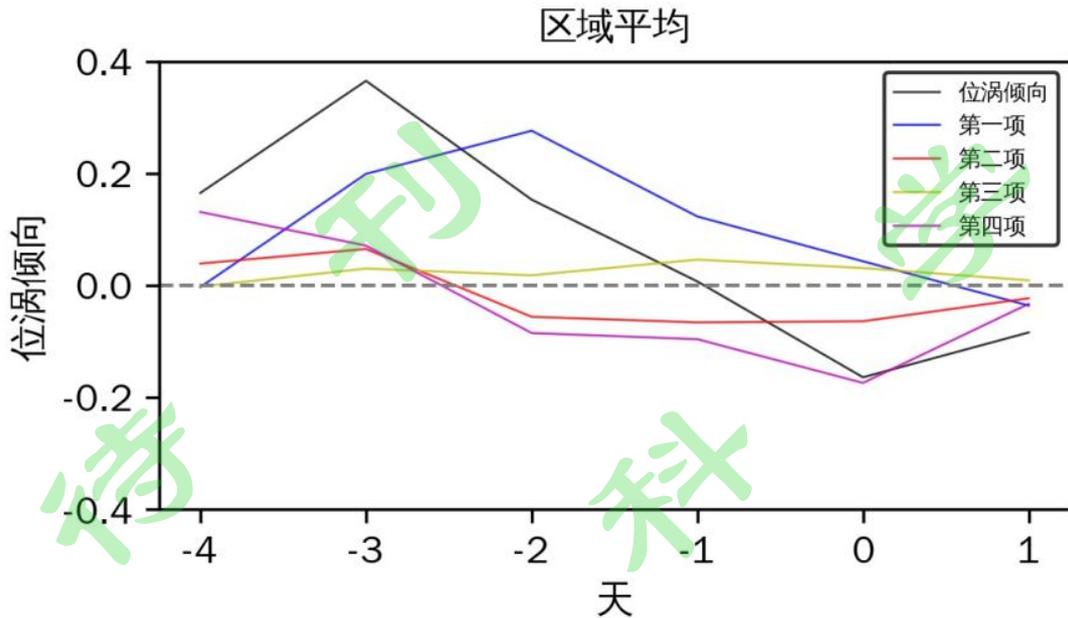
329 图7 高值类东北冷涡第-1天的位涡收支方程各项倾向的合成场（填色，单位： PVU d^{-1} ）。
 330 打点代表合成异常通过95%显著性检验，图中黑细线为东北地区，黑色粗方框为
 331 东北冷涡的范围，灰色表示青藏高原。（a）为位涡倾向；（b）为第一项；（c）为第
 332 二项；（d）为第三项；（e）为第四项。

333 **Figure 7** Snapshot of the composite each term of potential vorticity budget equation for the
 334 high value group of NCCV (shading, units: PVU d^{-1}). Stippling indicates the composite
 335 anomalies that are significant at the 95% confidence level. The black thin curve designates

336 Northeast China. The black thick box shows the range of NCCV. The grey shaded area
337 designates the Tibetan Plateau. (a) is potential vorticity tendency; (b) is the first term; (c) is
338 the second term; (d) is the third term; (e) is the fourth term.

339 为了进一步考察各物理过程对东北冷涡发展的贡献,我们追踪了逐日高位涡
340 区域,如图 6 的方框所示,并计算了位涡收支方程各项的区域平均数值,如图 8
341 所示。从第-4 天至第-1 天,位涡均为正的倾向(图 8 黑色折线),在峰值日转
342 为负的倾向,表明东北冷涡开始减弱和消亡。第一项从第-3 天开始为正的贡献
343 (图 8 蓝色折线),在第-2 天达到最强,它是高位涡发展的主要贡献,然后逐渐
344 减小,在第 1 天转为负的位涡倾向,此时东北冷涡减弱。与其相似贡献的为非线
345 性项(图 8 中黄色折线),但在整个生命史中,对东北冷涡相联系高位涡的贡献
346 很小。尽管这两项在与东北冷涡相联系的高位涡发展中起着重要作用,但在第-
347 4 天,第三和第四项起着更大的贡献,特别是非绝热加热项和摩擦项的贡献,这
348 说明在 Rossby 波列发展前期,非绝热加热或摩擦作用可能促进了高位涡扰动的
349 形成和发展,而在 Rossby 波列发展起来之后,它们起着耗散的作用,即第-2 天
350 开始为负位涡倾向。

351 综上所述,东北冷涡形成之前,次极区和高纬度高位涡向贝加尔湖地区南侵
352 的过程中,非绝热加热和摩擦作用起着重要作用,它促进了北亚 Rossby 波列初
353 期的发展。随着 Rossby 波列的发展,Rossby 波的作用起着主要贡献,它使高位
354 涡不断加强,发展成为东北-西南向的带状分布。在东亚急流的气旋式切变气流
355 中,高位涡南侧更快地向东平流,从而把带状分布的高位涡变成各向同性的准圆
356 形分布,东北冷涡环流加强。随着 Rossby 波能量向下游频散以及非绝热加热和
357 摩擦的耗散作用,东北冷涡急剧减弱。



358

359 **图 8** 高值类东北冷涡从第-4 天至第 1 天的位涡收支方程中各项的区域平均值 (单位:
360 PVU d⁻¹)。

361 **Figure 8** The area-average value of each term of the potential vorticity budget equation (units:
362 PVU d⁻¹) for the high value group of NCCV from days -4 to day 1.

363

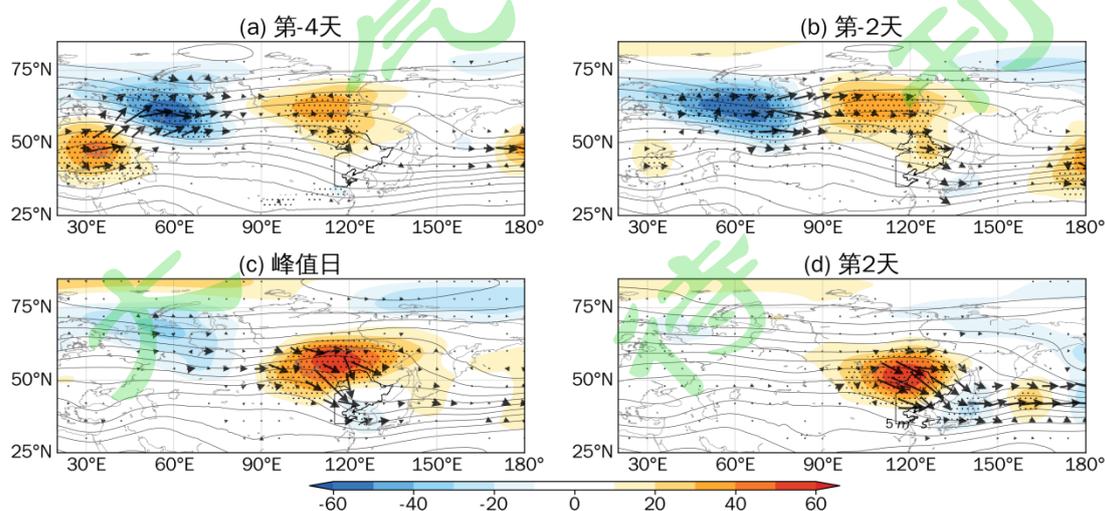
364 3.4 低值类东北冷涡

365 通过 3.1 小节四类东北冷涡环流配置的对比分析可知, 低值类东北冷涡在贝
366 加尔湖地区有明显的强高压脊, 阻断了东北冷涡与北侧冷空气的联系, 使得低值
367 类冷涡对东北地区的低温影响最小。那么, 与高值类东北冷涡相对比, 有什么不
368 同的过程导致贝加尔湖脊强烈发展? 由于低值类东北冷涡无明显的位涡异常, 我
369 们这里简要地从 500 hPa 高度场和 320 K 等熵面位涡给出低值类东北冷涡演变特
370 征。

371 图 9 给出了低值类东北冷涡 500 hPa 环流演变过程和 Rossby 波作用通量,
372 尽管与高值类冷涡相似的是峰值日贝加尔湖地区为脊, 但 Rossby 波源、相位、

373 波长、强度和传播路径不尽相同。低值类冷涡相联系的 Rossby 波列起源于黑海
374 地区脊区，异常环流呈现“+ - +”波列，与高值类东北冷涡的 Rossby 波列有所
375 反位相。并且三个异常环流表现出西北-东南倾向，波长较为宽广，如第-2天和
376 峰值日，欧亚大陆环流主要为一对“-+”异常，并表现出准定常的特征。Rossby
377 波能量由黑海地区向北经乌拉尔山至贝加尔湖北侧的中西伯利亚高原，贝加尔湖
378 北侧地区的脊不断加强并向北伸展，导致一个宽广的高压脊稳定地盘踞在北亚地
379 区，阻断了冷空气或高位涡向南入侵，尽管有 Rossby 波能量由贝加尔湖地区向
380 东北地区频散，但强度较弱，位势高度场合成场上东北地区表现为一低压槽。

381 为了说明贝加尔湖北侧宽广的高压脊阻断了高纬度的高位涡向南侵入的这
382 一现象，图 10 给出了低值类东北冷涡 320 K 等熵面位涡演变图。由图可见，高
383 位涡主要向斯堪的纳维亚半岛至乌拉尔山地区侵入，而乌拉尔山以东的北亚地区
384 为宽广的低位涡和负位涡异常，无明显的高位涡由高纬度向南侵入，因此，在东
385 北地区也无明显高位涡分布。通过高值类和低值类东北冷涡对比可见，东北冷涡
386 强烈发展主要由上游而来的强 Rossby 波和北侧冷空气或高位涡的侵入共同导致
387 的。

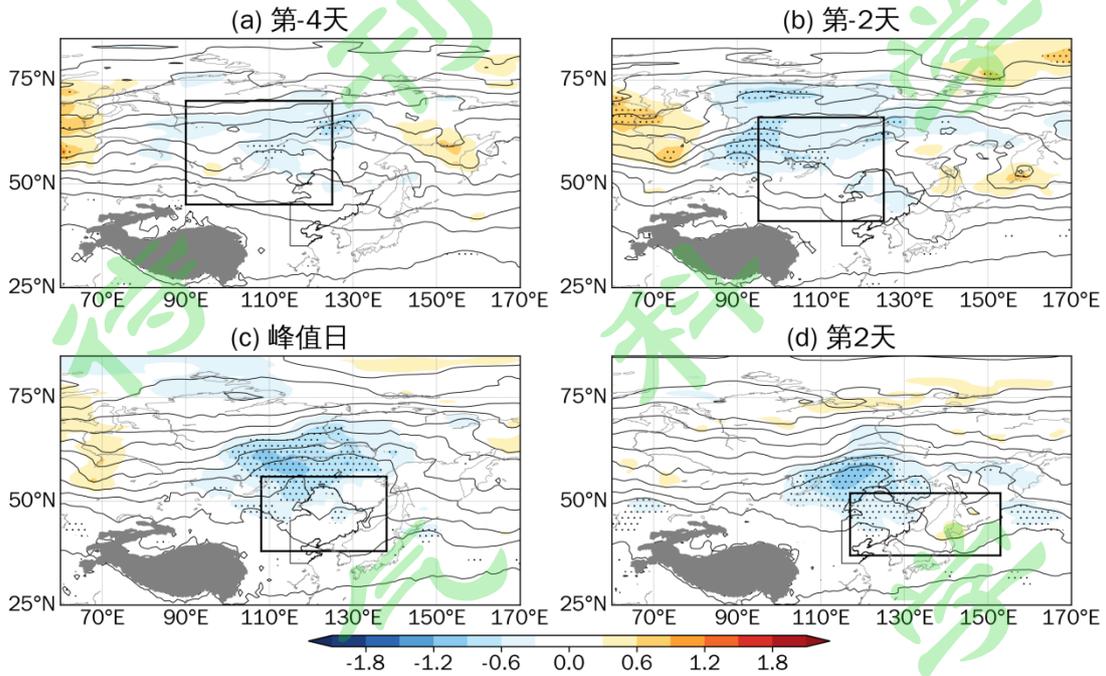


388

389 图9 同图5，但为低值类东北冷涡。

390 **Figure 9** As Figure 5, but for the low value group of NCCV.

391



392

393 **图10** 同图5，但为低值类东北冷涡 320 K 等熵面位涡（等值线，单位：PVU）及其
394 异常（填色）合成场。等值线间隔 0.5 PVU，灰色表示青藏高原。

395 **Figure 10** As Figure 5, but for the composite 320 K isentropic surface potential vorticity
396 (contour, unit: PVU) and corresponding anomalies (shading) for the low value group of
397 NCCV. Contour interval is 0.5 PVU. The grey shaded area designates the Tibetan Plateau.

398

399 4 结论与讨论

400 本文使用欧洲中心 ERA5 再分析资料，研究了 1979–2021 年初夏（5–6 月）

401 东北冷涡对东北地区低温的影响和机理。首先，根据东北地区低温影响，把东北

402 冷涡事件分成了四等分：高值类冷涡、中高值类冷涡、中低值类冷涡和低值类冷

403 涡，并分析了影响东北地区低温的东北冷涡的关键环流配置；然后，利用 Rossby

404 波作用通量和准拉格朗日位涡收支，重点分析了具有强烈低温影响的东北冷涡形

405 成和维持机理。

406 对东北地区具有显著低温影响的东北冷涡环流配置为明显的倒“ Ω ”特征，
407 即贝加尔湖地区和鄂霍茨克海地区分别有高压脊维持，东北地区为深厚的东北冷
408 涡。这种配置有利于东北冷涡与高纬度冷空气或高位涡相联系，使东北冷涡非常
409 深厚，中心大致位于对流层 300 hPa，中心以下为低温异常，低温中心位于 900
410 hPa 附近。等熵面穿越东北冷涡中心之后急剧下滑，有利于气旋性环流加强，使
411 得地面低压中心较东北冷涡偏东南，其西侧的偏北风将冷空气输送至东北地区。
412 另外，波弗特高压伸向东北亚地区的高压脊，其南侧偏东风异常有利于将冷空气
413 输入东北地区，两股冷空气共同造成东北地区异常偏冷。而其余三类的高压脊主
414 要位于东北冷涡的北侧，阻断了东北冷涡与其北侧的冷空气的联系，东北冷涡强
415 度偏弱，其垂直伸展也偏小，特别是低值类东北冷涡，也无来自于鄂霍茨克海一
416 带的冷空气输入。

417 来自上游的 Rossby 波能量和次极区的高位涡侵入共同导致了东北冷涡强烈
418 发展。高值类东北冷涡与自东欧平原至贝加尔湖“- + -” Rossby 波列相联系，
419 上游乌拉尔山脊的发展和向东北伸展，有利于高位涡由次极区不断向贝加尔湖侵
420 入和堆积，非绝热加热和摩擦作用也促进了北亚 Rossby 波列的发展。随着 Rossby
421 波列的发展，Rossby 波的作用起着主要贡献，它使高位涡不断加强，发展成为东
422 北-西南向的带状分布。在东亚急流的正压变形作用下，高位涡变成准圆形分布，
423 即东北冷涡环流加强。随着 Rossby 波能量向下游频散以及非绝热加热和摩擦的
424 耗散作用，东北冷涡急剧减弱。

425 与高值类东北冷涡明显不同，低值类东北冷涡相联系的 Rossby 波较弱，并

426 且位相与高值类东北冷涡有所相反，即贝加尔湖北侧为宽广的准定常脊，这使得
427 高纬度的高位涡和冷空气难以侵入中国东北地区。因此，低值类东北冷涡对东北
428 地区无明显低温影响。

429 已有大量研究表明，乌拉尔山-鄂霍次海双阻塞高压不仅影响东北冷涡的发
430 展还会造成东北地区低温异常（如廉毅等，2010；李尚锋等，2012；刘刚等，2012，
431 2019；苏丽欣等，2015；刘子奇等，2022 等），已有工作侧重于欧亚大陆 Rossby
432 波传播有利于高位涡向东北地区侵入，本文强调两者的协同作用，即欧亚大陆为
433 “- + -” 的 Rossby 波列，在非绝热加热和摩擦作用下，高位涡异常发展起来，
434 促进了 Rossby 波列的发展，随着 Rossby 波列的发展，使得高位涡强烈发展并在
435 东北地区形成切断。关于双阻型对东北地区的低温影响，已有主要侧重于对流层
436 中高层阻塞环流，本文强调近地面高压的维持，它将“北太平洋冰窖”之称的鄂
437 霍茨克海面上冷气团输送至东北地区；同时，从位涡反演视角来看，东北冷涡强
438 烈发展，其东南侧的西南风能扩展至近地面，促进地面气旋发展，即斜压发展，
439 使得东北地区盛行偏北风，有利于西北偏冷的气流侵入东北地区。受篇幅限制，
440 有关鄂霍茨克海高压对东北冷涡的具体影响，将在后续中利用位涡反演来阐明鄂
441 霍茨克海地区地面高压和对流层中高层阻塞高压对东北冷涡的影响。

442 参考文献（References）

- 443 [1] 丁士晟. 1980. 东北地区夏季低温的气候分析及其对农业生产的影响 [J]. 气象学报，
444 38(3): 234–242.
445 Ding Shisheng. 1980. The Climatic analysis of low temperature in summer over the Northeast
446 China and influence for agricultural product [J]. Acta Meteorological Sinica, 38(3): 234–242.
447 [2] Fu S M, Sun J H. 2012. Circulation and eddy kinetic energy budget analyses on the evolution
448 of a Northeast China cold vortex (NCCV) in May 2010 [J]. Journal of the Meteorological

- 449 Society of Japan, 90(4): 553–573.
- 450 [3] Fang Y H, Chen H S, Yi L, et al. 2021. Classification of Northeast China cold vortex activity
451 paths in early summer based on k-means clustering and their climate impact [J]. Advance
452 Atmospheric Science, 38(3), 400–412.
- 453 [4] Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis [J]. Quart. J. Roy.
454 Meteor. Soc., 146(730): 1999–2049. doi: 10.1002/qj.3803.
- 455
- 456 [5] 胡开喜, 陆日宇, 王东海. 2011. 东北冷涡及其气候影响 [J]. 大气科学, 35(1): 179–191.
457 Hu Kaixi, Lu Riyu, Wang Donghai. 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate
458 effect [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(1): 179–191.
- 459 [6] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法(第三版)[M]. 北京:气象出版社, 2004, 298pp
- 460 [7] 蒋大凯, 王江山, 阎琦, 等. 2012. 1961–2010 年 5–9 月东北冷涡气候特征及其对辽宁气
461 温的影响 [J]. 气象与环境学, 28(2): 05–09.
- 462 Jiang Dakai, Wang Jiangshan, Yan Qi, et al. 2012. Climatic characters of northeast cold vortex
463 and its effect on air temperature in Liaoning province from May to September during 1961–
464 2010 [J]. Journal of Meteorology and Environment, 28(2): 05–09.
- 465 [8] 廉毅, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化 [J].
466 大气科学, 34(2): 429–439.
- 467 Lian Yi, Bueh Cholaw, Xie Zuwei, et al. 2010. The anomalous cold vortex activity in
468 Northeast China during the early summer and the low-frequency variability of the northern
469 hemispheric atmosphere circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese),
470 34 (2): 429–439.
- 471 [9] 刘刚, 沈伯竹, 廉毅, 等. 2012. 亚洲阻塞高压分类及其与东北冷涡活动和东北夏季低温
472 的联系 [J]. 地理科学, 32(10): 1269–1274.
- 473 Liu Gang, Shen Baizhu, Lian Yi, et al. 2012. The Sorts of 500 hPa Blocking High in Asia and
474 It's Relations to Cold Vortex and Aestival Low Temperature in Northeast of China [J]. Scientia
475 Geographica Sinica, 32(10): 1269–1274.
- 476 [10] 刘英, 王东海, 张中锋, 等. 2012. 东北冷涡的结构及其演变特征的个例综合分析 [J]. 气
477 象学报, 70(3): 354–370.
- 478 Liu Ying, Wang Donghai, Zhang Zhongfeng, et al. 2012. A comprehensive analysis of the
479 structure of a northeast China-cold-vortex and its characteristics of evolution [J]. Acta
480 Meteorologica Sinica, 70(3): 354–370.
- 481 [11] 李尚锋, 廉毅, 陈圣波, 等. 2012. 东北初夏极端低温事件的空间分布特征及其成因机理
482 分析 [J]. 地理科学, 32(6): 752–758.
- 483 [12] 刘刚, 徐士琦, 廉毅. 2019. 夏季亚洲阻塞高压识别及其对中国东北气候异常的可能影
484 响:不同再分析资料对比 [J]. 气象学报, 77(2):303–314.
- 485 [13] 刘子奇, 路瑶, 李艳. 2022. 中国大范围持续性极端低温事件年代际变化及其大气环流

- 486 成因 [J]. 高原气象, 41(3):558-571.
- 487 [14] Nie Y, Zhang Y, Zuo J, et al. 2022. Dynamical processes controlling the evolution of early-
488 summer cut-off lows in Northeast Asia [J]. *Climate Dynamics*. doi:10.1007/s00382-022-
489 06371-5. 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2008. 中高纬度 Rossby 波活动对华南前汛期 EAP
490 事件中期演变过程的影响 [J]. 气象学报, 66(6): 1020–1031.
- 491 Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2008. The impact of mid-and high-latitude Rossby
492 wave activities on the medium-range evolution of EAP event in the pre-rainy period of South
493 China [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 66(6): 1020–1031.
- 494 [15] 施宁, 布和朝鲁, 纪立人, 等. 2009. 中高纬 Rossby 波活动对盛夏东亚/太平洋事件中
495 期演变过程的影响 [J]. 大气科学, 33(5): 1087–1100.
- 496 Shi Ning, Bueh Cholaw, Ji Liren, et al. 2009. Impacts of mid-and high-latitude Rossby wave
497 activities on the medium-range evolution of East Asia/Pacific events during the mid-and late
498 summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(5): 1087–1100.
- 499 [16] 苏丽欣, 廉毅, 李尚锋, 等. 2015. 东北区夏季低温事件概率空间分布与亚洲阻塞流型域
500 及其冷空气活动路径 [J]. 地理科学, 35(2):251-258.
- 501 [17] Wang Y F, Fujiyaoshi Y, Kato K. 2003. A teleconnection pattern related with the development
502 of the Okhotsk high and the Northward progress of the subtropical high in east Asian summer
503 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20(2): 237–244.
- 504 <https://doi.org/10.1007/s00376-003-0009-4>
- 505 [18] 吴迪, 姚秀萍, 寿绍文. 2010. 干侵入对一次东北冷涡过程的作用分析 [J]. 高原气象,
506 29(5): 1208–1217.
- 507 Wu Di, Yao Xiuping, Shou Shaowen. 2010. Analysis of impact of dry intrusion on a cold vortex
508 process in Northeast China [J]. *Plateau Meteorology*, 29(5): 1208–1217.
- 509 [19] 王宁, 王婷婷, 张硕, 等. 2014. 东北冷涡背景下一次龙卷过程的观测分析 [J]. 应用气象
510 学报, 25(4): 463–469.
- 511 Wang Ning, Wang Tingting, Zhang Shuo, et al. 2014. Observation of a tornado in the
512 circulation background of northeast cold vortex [J], *Journal of applied meteorology science*,
513 25(4): 463–469.
- 514 [20] Xie Z, Bueh C. 2015. Different types of cold vortex circulations over Northeast China and their
515 weather impacts [J]. *Monthly Weather Review*, 40: 845–863.
- 516 [21] Xie Z, Bueh C. 2017. Cold vortex events over Northeast China associated with the Yakutsk-
517 Okhotsk blocking [J]. *International Journal of Climatology*, 37:381–398.
- 518 [22] Xie Z, Black R X, Deng Y. 2019. Planetary and synoptic-scale dynamic control of extreme cold
519 wave patterns over the United States [J]. *Climate Dynamics*, 53:1477–1495.
- 520 [23] 郑秀雅, 张延治, 白人海. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 132pp.
- 521 Zheng Xiuya, Zhang Yanzhi, Bai Renhai. 1992. *Rainstorm in Northeast China (in Chinese)*
522 [M]. Beijing: China Meteorological Press, 132pp.

- 523 [24] 孙力, 郑秀雅, 王琪. 1994. 东北冷涡的时空分布特征及其与东亚大型环流系统之间的
524 关系 [J]. 应用气象学报, 5(3): 297–303.
525 Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The climatological characteristics of northeast cold
526 vortex in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5(3): 297–303.
527 [25] 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 2000. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析
528 [J]. 气象学报, 58(6): 704–714.
529 Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2000. A study of the persistent activity of northeast cold vortex
530 in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. Acta Meteorologica Sinica,
531 58(6): 704–714.