东北亚地区冷涡活动特征及其影响期间我国东北暖季降水分布

1

2 黄丽君^{1,4*},崔晓鹏^{1,2,3,4**},陈力强³ 3 4 1 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴重点实验室, 北京 100029 5 2 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京 210044 3 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166 6 7 4 中国科学院大学,北京 100049 摘要本文客观识别和追踪了2000~2019年东北亚地区持续时间为[6,24)和[24, 8 48)小时("短持续"冷涡)以及≥48小时(传统东北冷涡)的3730次冷涡过程, 9 分析了不同持续时间冷涡时空分布、强度和尺度特征的差异及其影响期间我国东 10 北暖季降水分布。结果表明:(1)持续时间为[6.24)小时的冷涡发生频次最多(占 11 比约 60%),传统东北冷涡频次最少(占比约 15%)。(2)冷涡存在明显的年际 12 和月际变化,更易出现在暖季 5-8 月,但不同持续时间冷涡频数峰值月份不同。 13 (3) 持续时间为[6, 24)、[24, 48)和≥48 小时的冷涡中心活动主要高频区分别出 14 现在识别区域东北角、东北象限和中部;冷涡中心初现时刻位置主要位于 15 45°-55°N之间的识别区域西边界附近,另外,持续时间为[6,24)([24,48))小时 16 的冷涡中心初现时刻位置在识别区域东北象限(中北部)亦存在高频区:冷涡中 17 心在分析区域内的最后出现时刻较多位于 40°N 以北的分析区域东边界附近。(4) 18 冷涡持续时间越长,强度越强、半径越大;冷季冷涡强度和半径大于暖季。(5) 19 东北暖季,冷涡背景下总降水量和短时强降水量占比均值均超过 60% (后者更 20 大),冷涡持续时间越长,上述占比相对越大;不同持续时间冷涡影响期间,总 21 降水量/短时强降水量占比空间分布存在明显差异。"短持续"冷涡相关研究同样 22 需要重视。 23 关键词 冷涡 不同持续时间 我国东北暖季降水 东北亚地区 24 25 文章编号 中图分类号 文献标识码 26 doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2304.23030 27

收稿日期 2023-06-08: 网络预出版日期 资助项目 中国气象局沈阳大气环境研究所基本科研业务费重点项目 2020SYIAEZD4 Funded by The Institute of Atmospheric Environment of China Meteorological Administration (2020SYIAEZD4) *作者简介 黄丽君,女, 1997 年出生,博士研究生,主要从事暴雨相关研究,E-mail: huanglijun@mail.iap.ac.cn **通讯作者 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

28 Characteristics of Cold Vortexes in Northeast Asia and their Impacts

on Precipitation Distribution of Warm Seasons over Northeast China

30

HUANG Lijun^{1,4*}, CUI Xiaopeng^{1,2,3,4**}, CHEN Liqiang³

3 Institute of Atmospheric Environment of China Meteorological Administration, Shenyang

- Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of
 Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029
- 2 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters
 (CIC-FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044
- 35

110166

36

37

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract In this study, 3730 cold vortexes (CVs) in Northeast Asia from 2000 to 2019 38 are objectively identified and tracked, including "short duration" CVs that last [6, 24) 39 and [24, 48) hours and traditional northeast CVs that last at least 48 hours. 40 Differences in the spatial and temporal distribution, intensity, and scale characteristics 41 of CVs of different durations, and their impact on precipitation over Northeast China 42 during warm seasons, are further investigated. The results show that: (1) CVs with a 43 44 duration of [6, 24) hours are the most common, accounting for about 60%, while traditional CVs are the least, about 15%. (2) CVs have considerable inter-annual and 45 inter-monthly variations, which are more likely to occur from May to August, but CVs 46 with different durations peak in different months. (3) The high occurrences of CV 47 centers with durations of [6, 24), [24, 48), and \geq 48 hours appear in the northeast 48 corner, northeast quadrant, and central part of the identification region, respectively. 49 The first moments of CV centers mainly occur near the western boundary between 50 45°–55°N, and CV centers with a duration of [6, 24) and [24, 48) hours are also more 51 frequent in the northeast quadrant and north-central part, respectively. The last 52 53 moments of CV centers are located near the eastern boundary of the identification region north of 40°N. (4) The longer the CVs last, the stronger the CV centers and the 54 larger the CV sizes. The CVs are stronger and larger in cold seasons than in warm 55 seasons. (5) The average ratios of total precipitation and short-time heavy 56 precipitation under CVs are both more than 60%, and the latter is much larger. The 57 longer the duration of CVs, the larger the ratios. The spatial distributions of total 58

precipitation and short-time heavy precipitation under different durations of CVs
present remarkable differences. The research on "short duration" CVs also needs more
attention.

Keywords cold vortex, different duration, precipitation of warm seasons over
Northeast China, Northeast Asia

64 1 引言

65 东北冷涡是影响我国东北地区乃至东亚地区天气和气候的主要系统,东北冷
66 涡是一种深厚的高空冷性大尺度涡旋,其所控制的地区常呈现"上冷下暖"不稳
67 定层结结构,十分有利于对流性系统的发生、发展,进而带来暴雨、冰雹、低温
68 冷害、连阴雨等灾害性天气(刘成歧等,1976;丁士晟,1983;孙力,1997)。
69 东北冷涡背景下,强降水和强对流等灾害性天气的预报一直是业务部门面临的瓶
70 颈难题之一,强降水数值预报结果常与实况存在较大偏差(齐铎等,2023),相
71 关机理研究和预报技术研发备受关注。

针对东北冷涡活动特征及其影响,学者们从东北冷涡识别与追踪(孙力等, 72 1994; 王承伟等, 2012; 黄丽君和崔晓鹏, 2022)、东北冷涡活动气候学统计特 73 征(Zhang et al., 2008; Hu et al., 2010)、东北冷涡影响下的暴雨(孙力等, 1995; 74 钟水新等, 2013; 任丽等, 2014) 和强对流(陈力强等, 2005; 郑媛媛等, 2011; 75 王培等, 2012)特征以及发生发展机制 (Fu and Sun, 2010; 吴迪等, 2010; Yang 76 et al., 2022; Huang et al., 2023)等诸多方面开展了大量的研究工作,取得了众多 77 创新成果。需要指出的是,以往东北冷涡相关研究工作基本都从传统天气学定义 78 (郑秀雅等, 1992)出发,聚焦持续时间达两天以上的、活跃于东北亚地区 79 (35°-60°N, 115°-145°E)的东北冷涡系统来开展(Hu et al., 2010; 王承伟等, 80 2012;黄璇和李栋梁,2020;黄丽君和崔晓鹏,2022)。而对于上述区域内,满 81 足东北冷涡绝大多数识别标准,但持续时间不足两天的冷涡系统及其影响期间的 82 降水特征鲜有研究,那么,在东北亚地区,这些"短持续"冷涡发生频次具有怎 83 样的统计特征?和传统东北冷涡特征有何差异?同时,在"短持续"冷涡影响期 84 间,东北地区暖季降水,尤其是小时降水量≥20mm的短时强降水具有怎样的分 85 布特征?与传统东北冷涡影响期间的短时强降水有何差异? 86

87 针对上述科学问题,本文将在前期研究(黄丽君和崔晓鹏,2022)基础上,
88 针对东北亚地区(35°-60°N,115°-145°E)持续时间2天及以上的传统东北冷涡
89 和持续时间不足2天的"短持续"冷涡,统计对比分析它们在时空分布、强度和
90 尺度等特征上的差异,及其影响期间我国东北地区暖季降水特征的差异。本文第
91 2节简要介绍研究所用数据和方法;第3节对比分析不同持续时间冷涡系统活动
92 的统计特征;第4节分析不同持续时间冷涡影响期间我国东北地区暖季降水特征
93 的差异;最后一节给出文章主要结论与讨论。

94 2 数据和方法



95 2.1 研究所用数据

96 (1) 2000~2019 年 NCEP/NCAR 再分析数据(Kalnay et al., 1996)。水平分
97 辨率为 2.5°×2.5°,时间分辨率为 6 小时,物理量包括:位势高度场、温度场。

(2) 国家气象信息中心提供的 2000~2019 年我国东北地区暖季(5-9月) 98 中国国家级地面气象站逐小时降水数据集。该数据集已由国家气象信息中心进行 99 100 气候极值检验、内部一致性检验和时间一致性检验等质量控制(任芝花等,2015)。 为保证本文统计研究工作准确性,对站点降水观测数据开展进一步质量控制,如 101 果某个站点的暖季监测数据缺测率超过 5%,则剔除该站点,据此,得到本文研 102 究区域内有效站点共计 220 个(图1中黑色圆点所示);进一步,考虑到呼伦贝 103 尔地区仅有 4 个有效站点,且均分布在呼伦贝尔东部边界附近海拔高度较低区 104 域,不足以表征该地区的降水特征,因此,将呼伦贝尔境内的所有站点全部剔除。 105

106 最终得到满足本文研究需求的有效国家级站点共 216 个。









123 占比达 59.49%),持续时间为[24,48)小时的冷涡过程共 953 个(占比 25.55%),
124 而持续时间达 48 小时及以上的传统东北冷涡过程仅占 14.96% (558 个)。

表12000~2019年不同持续时间冷涡过程发生频次(个)和占比(%)。

		to 2019.		
	持续时间(小时)	发生频次	占比(%)	Sal
	[6, 24)	2219	59.49	32
	[24, 48)	953	25.55	
	\geq 48	558	14.96	
- HA	全部	3730	100	

127 Table 1 Frequency and proportion (%) of cold vortexes (CVs) with different durations from 2000

129 3.1 不同持续时间冷涡活动的年际和月际变化

130 东北亚区域不同持续时间冷涡年发生频次具有明显的年际变化(图 2),不
131 同持续时间冷涡年发生频数和影响天数具有很好的一致性(相关系数均超过
132 0.90,且均通过了 95%的显著性检验,图略);但不同持续时间冷涡年频次的长
133 期变化趋势不同(图 2),持续时间为[6,24)小时的冷涡年发生频次呈减少趋势,
134 而持续时间超过 24 小时的冷涡年发生频数呈不同程度增加趋势。

东北亚区域的冷涡活动存在明显月际变化,整体上看(图 3a),发生频数和 135 影响天数的月际变化具有较好一致性,冷涡更容易在暖季的 5-8 月发生,其次为 136 冷季的 12-1 月。不同持续时间冷涡发生频数和影响天数的月际变化存在差异(图 137 3b-d),持续时间为[6,24)小时的冷涡(图 3b)在 6-7 月发生最多(尤其是 7 月), 138 其次为1月,9月相对最少;持续时间为[24,48)小时的冷涡(图 3c)最易出现在 139 4-8月(6月最多),10月相对最少,12和1月亦偏少(与所有冷涡以及其他持 140 续时间冷涡月际变化不同);而持续时间≥48小时的传统东北冷涡(图 3d)则最 141 易发生在 5 月, 11 月相对最少。需要注意的是, 传统东北冷涡(图 3d) 7 月发 142 生频数虽小于5月,但两者影响天数相当(均接近9天),类似的,持续时间为 143 [24, 48)小时的冷涡(图 3c)的6月和8月之间亦具有类似特征,说明,7和8 144 月可能相对更容易出现持续时间较长的冷涡过程。 145

126



149 Fig.2 Variation of frequency of CVs with different durations (solid line with pentagram) and linear

150 trend (dashed line) from 2000 to 2019 in Northeast Asia. The data has been standardized.

146

147



153 全部冷涡;(b)持续时间为[6,24)小时的冷涡;(c)持续时间为[24,48)小时的冷涡;(d)持
 154 续时间≥48小时的东北冷涡。

- 155 Fig.3 Monthly variation of frequency (solid line) and days (dashed line) of CVs with different
- 156
- durations in Northeast Asia. (a) all CVs, (b) CVs with a duration of [6, 24) hours, (c) CVs with a 157 duration of [24, 48) hours, (d) CVs with a duration of \geq 48 hours.
- 3.2 不同持续时间冷涡中心的空间分布 158

2000~2019年,东北亚区域(35°-60°N, 115°-145°E)内均有冷涡中心活动 159 (图 4a), 100 次以上的高频区基本分布在 40°N 以北,极值中心位于 50°-55°N 160 纬度带上。不同持续时间的冷涡中心空间分布差异显著(图 4b-d),持续时间为 161 [6,24)小时的冷涡中心最大高频区位于分析区域东北角,其次为 50°-52.5°N 纬度 162 带附近(图 4b);持续时间为[24,48)小时的冷涡中心多分布于 45°N 以北,极值 163 中心位于分析区域的东北象限(图 4c);而持续时间≥48 小时的传统东北冷涡中 164 心集中分布在分析区域中部,尤其是我国内蒙古北部、黑龙江以及紧邻黑龙江的 165 俄罗斯部分区域(图 4d)。 166

分析区域内,冷涡中心最先出现时刻的位置上主要位于分析区域西边界附 167 近、分析区域东北角以及 50°-55°N 纬度带的分析区域中北部部分地区(图 5a)。 168 持续时间为[6.24)小时的冷涡中心初现时刻较广泛分布于 45°N 以北,高频区主 169 要位于分析区域东北象限、分析区域西边界以及 50°-55°N 纬度带附近 (图 5b); 170 持续时间为[24,48)小时的冷涡中心初现时刻主要位于40°N以北的分析区域西边 171 界和紧邻黑龙江的俄罗斯部分地区(图 5c);而持续时间≥48小时的传统东北冷 172 涡中心初现时刻集中分布在 45°-55°N 之间的分析区域西边界附近 (图 5d)。与 173 初现时刻(图5)有所不同,冷涡中心在分析区域内的最后出现时刻较多位于40°N 174 以北的分析区域东边界附近(图 6a),尽管不同持续时间冷涡中心最后出现时刻 175 空间分布(图 6b-d)略有不同,但最高频出现区域均基本位于分析区域东边界 176 附近,尤其是传统东北冷涡中心(图 6d),其次为分析区域中部部分地区。可见, 177 持续时间相对较长的冷涡过程随着中纬度西风带环流自西向东移动,在区域内消 178 亡或移出分析区域;而持续时间较短的冷涡过程,一部分来自主要活动于分析区 179 域外而在区域内滞留时间较短的冷涡系统,亦有部分于分析区域内生成但生命史 180 181 较短暂,这可能在一定程度上影响本文冷涡活动区域和持续时间的统计,未来需 要通过扩大识别区域,进一步探讨和分析东北亚地区冷涡的活动特征。 182







. . .

1/2







195 3.3 不同持续时间冷涡的强度和尺度特征

参照黄丽君和崔晓鹏(2022),以 500 hPa 冷涡中心位势高度定义冷涡强度。
分析区域内的冷涡最大强度为 4788 位势米,最小强度为 5887 位势米,平均强度
为 5353 位势米;尽管不同月份略有差异,但整体上,冷涡持续时间越长,强度
相对越大,传统东北冷涡的强度基本上强于"短持续"冷涡。冷涡强度呈现出显
著的月际变化,冷季的冷涡强度明显强于暖季,7、8 月份的冷涡强度相对最弱,
而 11–2 月的冷涡相对最强(图 7)。

202 参照 Zhang et al. (2008)和黄丽君和崔晓鹏(2022),定义冷涡水平尺度,
203 从冷涡中心向外(共8个方向,角度间隔45°),500 hPa 位势高度逐渐递增,当
204 任意一个方向不满足递增条件时,则把该点至冷涡中心的距离定义为冷涡半径。

整体上看,分析区域内的冷涡半径在几百到数千公里之间广泛分布,主体分布于 205 400-1200 km 之间,平均尺度为 822 km,持续时间越长,冷涡半径相对越大,约 206 50%持续时间为[6, 24)小时的冷涡半径在 400-800 km 之间,持续时间为[24, 48) 207 小时的冷涡半径主要分布在 600-1000 km 之间,而持续时间超过 48 小时的传统 208 东北冷涡半径相对最大,主要分布在700-1100 km 之间。冷涡半径也存在较明显 209 的月际变化,暖季的冷涡水平尺度相对较小,而冷季冷涡的水平尺度相对更大, 210 半径超过 2400 km 的冷涡只在冬季出现,这可能是由于夏季对流抑制冷涡进一步 211 发展导致的 (Porcu et al., 2007)。 212

213

214



图 7 2000~2019 年不同持续时间冷涡强度(单位:gpm)逐月分布(右侧部分为 20 年冷涡强度)
度的整体分布)。蓝色盒须图为全部冷涡,红色盒须图为持续时间[6,24)小时的冷涡,绿色
盒须图为持续时间[24,48)小时的冷涡,紫色盒须图为持续时间≥48 小时的传统东北冷涡。
Fig.7 Monthly box-and-whiskers plots of CV intensity (units: gpm) with different durations from 2000 to 2019 (the right part shows total CVs in 20 years). Black for all CVs with a duration ≥ 6 hours, red for CVs with a duration of [6, 24) hours, green for CVs with a duration of [24, 48)
hours, purple for CVs with a duration of ≥ 48 hours. The highest line denotes the maximum and

the lowest line denotes the minimum. The uppermost border of boxes denotes the 75% percentile

and the lowermost border denotes the 25% percentile; medians and mean value denoted by the



black solid line and the solid dot in boxes, respectively.



228 4 暖季不同持续时间冷涡影响期间我国东北地区降水分布特征

2000~2019年暖季,分析区域内共出现 1782 次不同持续时间的冷涡过程(表 229 2), 其中, 持续时间为[6, 24)、[24, 48)和≥48小时的冷涡频次分别为1043、461 230 231 和 278 次; 98.3% (41.2%)的冷涡过程影响期间,我国东北地区出现了降水(短 时强降水)。32%(共334次)的持续时间为[6,24)小时的冷涡影响期间,我国东 232 北地区出现短时强降水, 而半数以上的持续时间为[24, 48)小时和≥ 48 小时的冷 233 涡过程影响期间,我国东北地区发生了短时强降水。可见,对于东北地区强降水 234 业务预报而言,除了需要关注传统东北冷涡过程,"短持续"冷涡过程(持续时 235 间为[6,24)和[24,48)小时)同样值得重视;此类冷涡过程虽然持续时间较短,但 236

- 237 由于冷涡影响期间"上冷下暖"的不稳定层结结构,也有利于对流系统发展和强
- 238 降水等灾害性天气的发生。
- 239 表 2 2000~2019 年暖季(5-9月)东北亚区域不同持续时间冷涡频次及其影响期间我国东北
 240 地区降水特征。
- 240

241 Table 2 Frequency of CVs with different durations in Northeast Asia and their impacts on

242 precipitation characteristics over NEC in warm seasons (May–September) from 2000 to 2019.

持续时间 (小时)	发生频次	伴随降水的冷涡	伴随短时强降水的冷涡	
行续时间(小时)		频次(占比)	频次(占比)	
[6, 24)	1043	1017(97.5%)	334 (32.0%)	
[24, 48)	461	456 (98.9%)	241 (52.3%)	
\geq 48	278	278 (100%)	159 (57.2%)	
全部	1782	1751 (98.3%)	734 (41.2%)	

2000~2019年暖季,我国东北地区各国家级站点观测到的总降水量中,平均 243 约有 62%的降水量发生在东北亚区域冷涡系统影响期间,极小值接近 50%,极 244 大值超过 70% (图 9): 对于短时强降水的降水总量而言, 相应的平均值略高于 245 所有降水量,但极大值达到100%,且75%的站点记录的短时强降水量占比超过 246 50%。伴随持续时间增加,冷涡背景下发生的总降水量/短时强降水量占比整体上 247 逐步增大(图 9),持续时间[6,24)小时的冷涡影响期间,相应的总降水量/短时 248 强降水量占比平均值约为 15%; 持续时间[24, 48)小时的冷涡影响期间, 总降水 249 量/短时强降水量占比的平均值约为 20%;而持续时间≥ 48 小时的传统东北冷涡 250 影响期间的上述占比平均值接近30%;同时,不同持续时间冷涡影响期间短时强 251 降水量占比的极大值均超过 50%, 尤其是在持续时间[24, 48)小时的冷涡影响期 252 间。 253







256 站点记录的降水量占 20 年暖季该站点记录的所有降水总量的比值。黑色为全部降水, 蓝色257 为短时强降水。

254

255

Fig.9 Box-and-whiskers plots of the ratios of total precipitation and short-time heavy precipitation
under CVs to accumulated precipitation of 20 years over NEC in warm seasons from 2000 to 2019.
Black for total precipitation, blue for short-time heavy precipitation.

冷涡过程影响期间,东北地区绝大部分站点降水量在暖季总降水量中的占比 261 达 55%以上(图 10a),尤其是黑龙江和吉林两省的站点,个别站点的降水量占 262 比超过70%。不同持续时间冷涡影响期间降水量占比空间分布存在明显差异(图 263 10b-d)。其中,持续时间[6,24)小时的冷涡过程影响期间,降水量占比大值区主 264 要位于黑龙江中西部和东部边境附近、辽宁和吉林两省与内蒙古交界附近地区, 265 以及辽宁东南部,大值区与东北地区的地形分布存在较密切的联系(图 10b); 266 持续时间[24,48]小时的冷涡过程影响期间,降水量占比大值区主要位于吉林中 267 南部、辽宁北部以及内蒙古通辽市附近地区(图 10c);而持续时间≥ 48 小时的 268 传统东北冷涡过程影响期间,降水量占比大值区则主要位于黑龙江和吉林东部附 269 近地区(图10d)。 270



272 图 10 2000~2019 年暖季,不同持续时间冷涡影响期间,我国东北地区国家级站点观测降水
273 量占 20 年暖季所有降水总量的比值空间分布。(a)全部冷涡;(b)持续时间[6,24)小时的
274 冷涡;(c)持续时间[24,48)小时的冷涡;(d)持续时间≥48 小时的传统东北冷涡。阴影为
275 地形高度(单位: m)。

271

Fig.10 Spatial distribution of the ratios of the accumulated precipitation under CVs to total
accumulated precipitation of 20 years over NEC in warm seasons from 2000 to 2019,
superimposed with topographic height (shaded, units: m). (a) all CVs, (b) CVs with a duration of
[6, 24) hours, (c) CVs with a duration of [24, 48) hours, (d) CVs with a duration of ≥ 48 hours.

冷涡过程影响期间,东北地区多数国家级站点短时强降水量在暖季所有短时 280 强降水总量中的占比超过 50%,尤其是辽宁省的站点(图 11a),整个东北地区, 281 约 20 个国家级站点的短时强降水量占比超过 80%,分布于大、小兴安岭和长白 282 山等复杂地形附近地区(图 11a)。不同持续时间冷涡过程影响期间,短时强降 283 水量占比的空间分布亦存在较明显差异(图 11b-d),但与全部降水量占比(图 284 10b-d)相比,短时强降水量占比大值区的空间分布相对更为散乱,持续时间 [6, 285 24)小时的冷涡过程影响期间,短时强降水量占比超过 20%的站点多数位于黑龙 286 江省境内(图 11b),而持续时间[24,48)小时(图 11c)和≥48小时(图 11d)的 287

288 冷涡过程影响期间,短时强降水量占比超过 30%的站点在东北地区各个省份均有

289 不同程度的分布。



292

290

291

293

Fig.11 As in Fig. 10, but for short-time heavy precipitation.

由上述分析可见,20 年暖季,东北地区约一半以上的降水量出现在冷涡系 294 统环流背景下,而冷涡环流型更是东北地区暖季发生短时强降水时最主要的环流 295 背景;与全部降水量占比分布相比,冷涡影响期间短时强降水量占比的空间分布 296 相对更为散乱;冷涡环流、暖湿输送、地形和下垫面等耦合作用下,短时强降水 297 形成机理更为复杂;冷涡背景下强降水预报是东北地区暖季降水预报面临的突出 298 瓶颈难题(齐铎等, 2023)。因此, 深入揭示不同持续时间冷涡系统活动规律及 299 其影响期间强降水的形成机理,进而研发相应的预报方法,对于东北地区暖季强 300 降水灾害防御具有极为重要的意义和实用价值。 301

302 5 结论与讨论

本文利用 2000~2019 年 NCEP/NCAR 再分析数据和客观识别与追踪方法(黄
丽君和崔晓鹏,2022),对东北亚区域(35°-60°N,115°-145°E)不同持续时间
(持续时间[6,24)和[24,48)小时的"短持续"冷涡,以及≥48小时的传统东北冷
涡)的冷涡活动开展客观识别和追踪,进而对比分析不同持续时间冷涡时空分布、
强度和尺度特征的差异,及其影响期间我国东北地区暖季降水特征差异。主要结
论如下:

309 (1) 2000~2019 年, 识别区域内共发生 3730 次冷涡过程, 其中, 持续时间
310 为[6, 24)小时的冷涡发生频次最多, 占比高达 59.49%, 而持续时间≥48 小时的传
311 统东北冷涡发生频次最少(占比 14.96%)。

312 (2)冷涡活动具有明显的年际变化和月际变化,冷涡活动最易出现在暖季
313 的 5-8 月,其次为冬季的 12-1 月,其中,持续时间为[6,24)、[24,48)和≥ 48 小
314 时的冷涡过程分别在 7 月、6 月和 5 月活动最频繁。

(3) 冷涡中心位置高频活动区域位于识别区域内的 50°-55°N 纬度带上, 其 315 中,持续时间为[6,24)小时的冷涡中心最大高频活动区位于识别区域的东北角, 316 持续时间为[24, 48)小时的冷涡中心位置多分布于识别区域的东北象限,而持续 317 时间>48小时的传统东北冷涡中心位置集中分布在识别区域中部,不同持续时间 318 的冷涡中心初现时刻位置均在识别区域西边界附近的 45°-55°N 纬度带存在高频 319 区,但持续时间为[6,24)([24,48))小时的冷涡中心初现时刻位置在识别区域东 320 北象限(中北部)亦存在高频区:冷涡中心在识别区域内的最后出现时刻位置多 321 位于 40°N 以北的识别区域东边界附近。 322

323 (4)从整体上看,冷涡持续时间越长,冷涡中心强度越大,冷涡半径也越
324 大,冷涡中心强度和半径尺度存在明显的月际变化,冷季,冷涡强度和半径尺度
325 均要大于暖季。

326 (5)东北地区暖季,冷涡背景下各站点观测的总降水量和短时强降水量在
327 暖季全部降水量与全部短时强降水量中占比的平均值均超过 60%(短时强降水量
328 占比更大,极端值甚至可达 100%);持续时间越长,东北地区暖季冷涡背景下的
329 总降水量(短时强降水量)占比也相对越大。不同持续时间冷涡影响期间,各站
330 点总降水量占比空间分布存在明显差异,持续时间为[6,24)小时的冷涡影响期
331 间,辽宁、吉林和内蒙古交界附近占比相对更大,持续时间[24,48)小时的冷涡

332 影响期间,总降水量占比大值区主要位于吉林中南部和内蒙古通辽市附近,而持
333 续时间≥48小时的传统东北冷涡影响期间,总降水量占比大值区主要位于黑龙江
334 和吉林东部地区。不同持续时间冷涡影响下,短时强降水量占比相对更大,但空
335 间分布更为散乱,体现出短时强降水更强的局地性特征。

本文借助客观识别与追踪方法(黄丽君和崔晓鹏, 2022),统计分析了东北 336 亚地区冷涡活动特征以及不同持续时间冷涡活动特征的差异,并探讨了暖季冷涡 337 影响期间我国东北地区的总降水和短时强降水特征以及不同持续时间冷涡影响 338 期间的差异。由本文研究可见,冷涡背景下,东北地区暖季总降水量占比显著, 339 短时强降水量占比更高。虽然"短持续"(持续时间为[6,24)和[24,48)小时)冷 340 涡过程持续时间短、强度相对弱、尺度相对小,但其发生频数可达传统东北冷涡 341 过程频数的5倍以上(表3-1和表3-2),同时,在上述"短持续"冷涡影响期间, 342 短时强降水频次是传统东北冷涡影响期间短时强降水频次的3.6倍以上(表3-2), 343 因此,对于"短持续"冷涡过程及其影响期间的短时强降水等灾害性天气相关机 344 理研究和预报技术研发同样需要高度重视。在冷涡系统环流背景下,暖湿输送、 345 局地地形和下垫面等的耦合作用, 使得短时强降水事件发生概率高, 发生发展机 346 理复杂,预报难度大,观测数据分析尚不足以深入揭示相关物理过程和机制,未 347 来有必要利用高分辨率数值模拟等手段,进一步研究揭示不同持续时间冷涡影响 348 期间,局地强降水的宏微观形成机理。 349

350

参考文献(References)

- 第力强,陈受钧,周小珊,等. 2005. 东北冷涡诱发的一次 MCS 结构特征数值模拟[J]. 气象学报, (02):
 173–183. Chen Liqiang, Chen Shoujun, Zhou Xiaoshan, et al. 2005. A Numerical Study of the MCS in a Cold
- 353 Vortex over Northeast China[J]. Acta Meteorologica Sinica, (02): 173–183.
- 354 丁士晟. 1983. 东北低温冷害的气候分析[C]// 东北夏季低温长期预报文集. 北京: 气象出版社, 9-16. Ding
- Shicheng. 1983. The climate analysis on microtherm and freeze injury in northeast China[C] // Long Term
 Forecast Corpus On Summer Microtherm In Northeast China (in Chinese). Beijing: China Meteorologica Press,
- 357 9–16.
- Fu S M, Sun J H. 2012. Circulation and Eddy Kinetic Energy Budget Analyses on the Evolution of a Northeast
 China Cold Vortex (NCCV) in May 2010[J]. Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II, 90(4):
 553–573.

- 361 Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over
- 362 Northeast China[J]. Meteor. Atmos. Phys. 106(1–2): 37–48.
- 363 黄丽君, 崔晓鹏. 2022. 2000~2019 年东北冷涡统计特征及其影响期间的降水分布[J]. 大气科学, 待刊. Huang
- 364 Lijun, Cui Xiaopeng. 2022. Statistical characteristics of the Northeast China Cold Vortex and its impact on
- 365 precipitation distribution from 2000 to 2019[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), doi:
- 366 10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21227.
- 367 Huang L J, Cui X P, Chen L Q, et al. 2023. Objective Circulation Classification of Rainstorm Days Associated with
- 368 Northeast China Cold Vortexes in the Warm Seasons of 2000–19, Front. Earth Sci. 10:1066070.
- 369 黄璇, 李栋梁. 2020. 1979—2018 年 5-8 月中国东北冷涡建立的客观识别方法及变化特征[J]. 气象学报,
- 370 78(6): 945–961. Huang Xuan, Li Dongliang. 2020. Objective identification method and variation characteristics
 371 of the Northeast China cold vortex from May to August of 1979–2018. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese),
- **372 78(6)**: **945–961**.
- 373 Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. Bull. Amer.
- 374 Meteor. Soc. 77(3): 437–471.
- 375 刘成歧, 李贵臣, 陈连友. 1976. 东北冷涡移动路径的统计预报[J]. 大气科学, (01): 68-71. Liu Chenqi, Li
- Guichen, Chen Lianyou. 1976. Statistical prediction of the moving path of the northeast cold vortex[J]. Chinese
 Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), (01): 68–71.
- Porcu F, Carrassi A, Medaglia CM, et al. 2007. A study on cut-off low vertical structure and precipitation in the
 Mediterranean region[J]. Meteor. Atmos. Phys. 96(1–2): 121–140.
- 380 齐铎,崔晓鹏,陈力强,等. 2023. 基于主客观环流分型的强降水数值预报 MODE 检验——方法及其在 2019
- 381 年暖季东北地区的应用[J]. 大气科学, 待刊. Qi Duo, Cui Xiaopeng, Chen Liqiang, et al. 2023. Evaluation of
- 382 heavy rainfall numerical prediction based on subjective and objective circulation classification as well as
- method for object-based diagnostic evaluation method and its application over Northeast China during the
 warm season of 2019[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2210.22107.
- 385 任丽,杨艳敏,金磊,等. 2014. 一次东北冷涡暴雨数值模拟及动力诊断分析[J]. 气象与环境学报, 30(4):
- 386 19–25. Ren Li, Yang Yanmin, Jin Lei, et al. 2014. Numerical simulation on a rainstorm process caused by
- 387 Northeast China cold vortex and its diagnostic analysis [J]. Journal of Meteorology and Environment (in
 388 Chinese), 30(4): 19–25.
- 389 任芝花, 张志富, 孙超, 等. 2015. 全国自动气象站实时观测资料三级质量控制系统研制[J]. 气象, 41(10):
- 390 1268–1277. Ren Zhihua, Zhang Zhifu, Sun Chao, et al. 2015. Development of Three-Step Quality Control
- 391 System of Real-Time Observation Data from AWS in China[J]. Meteorological Monthly, 41(10): 1268–1277.
- 392 孙力. 1997. 东北冷涡低温连阴雨的气候学特征[C]// 东北冷涡研究文集. 沈阳: 辽宁出版社, 6–7. Sun Li.
 393 1997. The climate characteristic of microtherm and rain days in cold vortex over northeastern China [C] / /
- 394 Corpus of Research on cold vortex over Northeastern China (in Chinese). Shenyang: Liaoning Publishing House,
- 395 6–7.

- 396 孙力, 王琪, 唐晓玲. 1995. 暴雨类冷涡与非暴雨类冷涡的合成对比分析[J]. 气象, (03): 7-10. Sun Li, Wang
- 397 Qi, Tang Xiaoling. 1995. A Composite Diagnostic Analysis of Cold Vortex of Storm-rainfall and Non-Storm
- 398 Rainfall Types[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), (03): 7–10.
- 399 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关系[J]. 应用气象学
- 400 报, 5(3): 297–303. Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The Climatological Characteristics of Northeast Cold
 401 Vortex in China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5(3): 297–303.
- 402 王承伟, 徐海明, 任丽, 等. 2012. 东北冷涡客观识别方法的研究[J]. 气象与环境学报, 28(02): 1-4. Wang
- 403 Chengwei, Xu Haiming, Ren Li, et al. 2012. The objective identification method of northeast cold vortex[J].
- 404 Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 28(02): 1–4.
- 405 王培, 沈新勇, 高守亭. 2012. 一次东北冷涡过程的数值模拟与降水分析[J]. 大气科学, 36(01): 130-144.
- 406 Wang Pei, Shen Xinyong, Gao Shouting. 2012. A Numerical Study and Rainfall Analysis of a Cold Vortex
- 407 Process over Northeast China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36(01): 130–144.
- 408 吴迪, 姚秀萍, 寿绍文. 2010. 干入侵对一次东北冷涡过程的作用分析[J]. 高原气象, 29(5): 1208-1217. Wu
- 409 Di, Yao Xiuping, Shou Shaowen. 2010. Analysis of Impact of Dry Intrusion on a Cold Vortex Process in
- 410 Northeast China[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29(5): 1208–1217.
- 411 Yang Y T, Cui X P, Zou Q L. 2022, Moisture sources tracking of a cold vortex rainstorm over Northeast China
- 412 using FLEXPART[J], Atmospheric Science Letters, 23(12), e1123.
- 413 Zhang C, Zhang Q, Wang Y, et al. 2008. Climatology of warm season cold vortices in East Asia: 1979–2005[J].
- 414 Meteor. Atmos. Phys. 100(1–4): 291–301.
- 415 郑媛媛, 姚晨, 郝莹, 等. 2011. 不同类型大尺度环流背景下强对流天气的短时临近预报预警研究[J].气象,
- 416 37(07): 795-801. Zheng Yuanyuan, Yao Chen, Hao Ying, et al. 2011. The Short-Time Forecasting and
- 417 Early-Warning Research on Severe Convective Weather Under Different Types of Large-Scale Circulation
- 418 Background[J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37(07): 795–801.
- 419 钟水新, 王东海, 张人禾, 等. 2013. 一次冷涡发展阶段大暴雨过程的中尺度对流系统研究[J]. 高原气象,
- 420 32(02): 2435–2445. Zhong Shuixin, Wang Donghai, Zhang Renhe, et al. 2013. Study of Mesoscale Convective
- 421 System in Heavy Rainstorm Process at a Cold Vortex Development Stage[J]. 2013. Plateau Meteorology (in
- 422 Chinese), 32(02): 2435–2445.
- 423 郑秀雅, 张廷治, 白人海. 1992. 东北暴雨[M]. 北京: 气象出版社. 129pp. Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi, Bai
- 424 Renhai. 1992. Rainstorm in Northeast China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 129pp.



