

2000~2019年东北冷涡统计特征及其影响期间的降水分布

黄丽君^{1,4*}, 崔晓鹏^{1,2,3,4**}

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

2 中国气象局沈阳大气环境研究所, 沈阳 110166

3 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

4 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 东北冷涡是影响我国东北地区天气和气候的重要环流系统。本文在前人研究工作基础上, 构建了本文的东北冷涡识别与追踪方法。利用 2000~2019 年 NCEP/NCAR 再分析资料, 对东北冷涡开展客观识别与追踪, 进而分析东北冷涡的时空分布特征、持续时间、强度和尺度等, 最后利用国家地面气象站小时降水观测数据, 探讨了东北冷涡影响期间东北区域的暖季降水分布特征。东北区域内, 东北冷涡频数和影响天数无明显长期变化趋势, 但存在明显的年际变化和月际变化, 东北冷涡更易发生在暖季; 东北冷涡的持续时间主要集中在 48~72 小时, 半径尺度范围主要分布在 600~1200 km, 冷季平均尺度大于暖季, 冷季冷涡中心强度也强于暖季; 东北冷涡中心活动高频区沿 45~55°N 呈东—西走向带状分布; 东北冷涡影响期间的暖季降水量占比基本在 20%以上, 不同强度降水档 (0.1~5 mm/h, 5~10 mm/h, 10~20 mm/h 和 ≥ 20 mm/h) 中, 占比空间分布不同, 强降水局地性特征显著; 东北冷涡影响期间的暴雨日降水量占比最大可超过 70%。

关键词 东北冷涡, 客观识别与追踪, 统计特征, 降水

文章编号 **中图分类号** **文献标识码**

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21227

收稿日期 2022-06-10; **网络预出版日期**

***作者简介** 黄丽君, 女, 1997 年出生, 博士研究生, 主要从事暴雨研究。E-mail: huanglijun@mail.iap.ac.cn

****通讯作者** 崔晓鹏, E-mail: xpcui@mail.iap.ac.cn

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)

Statistical characteristics of the Northeast China Cold Vortex and its impact on precipitation distribution from 2000 to 2019

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

1 Key Laboratory of Cloud–Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Institute of Atmospheric Environment of China Meteorological Administration, Shenyang 110166

3 Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The Northeast China Cold Vortex (NCCV) is a significant circulation system affecting the weather and climate in the northeastern China (NEC). On the basis of previous studies, the identification and tracking method of NCCVs is constructed in this study. 2000–2019 NCEP/NCAR reanalysis data are used to objectively identify and track NCCVs. On this basis, the temporal and spatial distribution characteristics, duration, intensity and size of NCCVs are analyzed, and the relationship between NCCVs and precipitation in the warm season in the NEC are also discussed by using the hourly precipitation observation data offered by 216 national automatic weather stations (AWSs). NCCVs in the NEC have no obvious long-time trend, but have a considerable interannual variability and a clear seasonal variation, which are more likely to occur in the warm season. The duration of NCCVs is generally 48–72 hours and the size range mainly distributes in 600–1200 km. The mean size and intensity of NCCVs in the cold season are both larger than those in the warm season. The high occurrence of NCCVs presents an east-west zonal distribution along the latitude of 45–55°N. The contribution of NCCVs to the precipitation in the warm season in NEC is generally over 20%. For the precipitation in four classes of 0.1–5 mm/h, 5–10 mm/h, 10–20 mm/h and ≥ 20 mm/h, the spatial distributions of precipitation proportion are

different and the local characteristic of heavy precipitation is remarkable. The maximum contribution of NCCVs to the rainstorm can reach more than 70%.

Keywords Northeast China Cold Vortex, objective identification and tracking, statistical characteristics, precipitation

1 引言

东北冷涡是影响我国东北地区天气气候的主要环流系统，东北冷涡是一种切断低压。切断低压是指对流层高层由西风带深槽发展而来的闭合环流系统（Palmén and Newton, 1969; Gimeno et al., 2007），一般维持 2~3 天，但有时持续时间可长达三周（Bamber et al., 1984; Hoskins et al., 1985; Price and Vaughan, 1993）；北半球存在三个切断低压易发区，分别是南欧与东大西洋沿岸、北太平洋地区以及中国北部-西伯利亚地区（Price and Vaughan, 1993; Kentarchos and Davies, 1998; Nieto et al., 2005）；通常将发生在我国东北地区（ $35^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $115^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$ ），具有持续性和准静止性特征的切断低压称为东北冷涡（郑秀雅等，1992；孙力等，1994）。切断低压下部的对流层常不稳定，如遇地形，可激发局地对流系统，当切断低压下方的气团非常潮湿且变得潜在不稳定时，就会产生明显降水（Knippertz and Martin, 2005）。

东北冷涡对东北区域天气有重要影响，而其持续活动还会引起明显的气温和降水异常，产生一定气候效应（何金海等，2006；胡开喜等，2011；Fang et al., 2021）；同时，东北冷涡的影响也不仅局限于东北区域，在东北以外地区也常可造成冰雹、短时强降水等强对流天气，甚至引发洪涝灾害（陶诗言，1980；孙力等，2002），东北冷涡与华南前汛期和江淮梅雨期的降水量呈现明显正相关（苗春生等，2006a, 2006b；何金海等，2006；王丽娟等，2010），而东北冷涡与西南地区 6 月的降水和气温也呈现负相关（张国宏和刘长征，2010）。因此，东北冷涡天气学和气候学研究广受关注。

研究东北冷涡，首先需要对其环流进行识别。上世纪 80 年代，Parker et al.（1989）和 Bell et al.（1989）利用 500 hPa 位势高度场数据，对北半球的切断低压开展了客观识别，从时、空分布角度初步分析了切断低压特征；这种基于位势高度场的客观识别方法被广泛运用到切断低压识别研究中（Smith et al., 2002；

Novak et al., 2002; Fuenzalida et al., 2005; Favre et al., 2012); 同时, 由于北半球切断低压常与等熵面位涡 (PV) 大值区相关联 (Hoskins et al., 1985; Wernli and Sprenger, 2007), 因此, 利用 PV 来识别切断低压也是较普遍的方法 (Hernández, 1999; Wernli and Sprenger, 2007; Ndarana and Waugh, 2010)。

对于东北冷涡, 学者们常基于东北冷涡定义 (郑秀雅等, 1992; 孙力等, 1994), 开展主客观识别。主观识别主要基于逐日 500 hPa 天气图开展人工识别 (孙力等, 1994; 谢作威和布和朝鲁, 2012; 崔景琳和白爱娟, 2018; 王蕾等, 2020), 但工作量大且难以完全复现, 研究时段和范围也具有一定局限性 (Qi et al., 1999)。相比较而言, 客观识别具有一定优势, 张丰启 (2001) 基于 500 hPa 位势高度场, 设计了“八点判别法”, 客观识别低涡中心; 张国宏和刘长征 (2012) 参考识别阻塞高压的 T&M 方法 (金荣花等, 2009) 和张丰启 (2001) 的“八点判别法”, 建立了识别和监测东北冷涡的客观方法, 并分析了东北冷涡与中国 6 月气温和降水的相关关系; 上述两种客观识别方法未能体现与东北冷涡低压中心相伴随的冷中心或冷槽; 蒋大凯等 (2012) 综合利用 500 hPa 逐日高度场、温度场和风场数据, 对影响辽宁气温变化的东北冷涡开展了客观识别, 其识别区域 (35°N~55°N, 115°E~145°E) 比孙力等 (1994) 的东北冷涡定义区域略小; 王承伟等 (2012) 基于日平均再分析数据, 将 Nieto et al. (2005) 识别北半球 200 hPa 冷涡的方法应用到 500 hPa 东北冷涡中心识别中, 并采用 Bell and Bosart (1989) 的方法, 对东北冷涡中心进行追踪; Hu et al. (2010) 基于时间分辨率为 6 小时的位势高度场和温度场再分析数据, 扩大识别区域 (30°N~65°N, 100°E~150°E) 开展客观识别, 建立了 1979~2005 年东北冷涡客观识别追踪数据集, 进而分析了东北冷涡的气候特征及其对我国不同季节降水的影响。

东北冷涡一年四季均可出现 (周琳等, 1991), 并造成显著影响。在以往的东北冷涡识别和统计研究工作中, 多以暖季为主 (Zhang et al., 2008; 蒋大凯等, 2012; 刘刚等, 2015; 黄璇等, 2020), 识别方法、所用数据和识别区域等也各有不同, 利用逐 6 小时数据以及针对全年时段进行多年东北冷涡识别的研究相对较少。此外, 针对冷涡和相关降水的关系, 以往研究中尚未有利用国家站逐小时降水数据进行统计分析相关工作。鉴于近年来东北冷涡的显著影响, 本文在前人研究基础上, 依据天气学定义, 构建了东北冷涡客观识别与追踪方法;

借助近 20 年再分析数据，获得东北区域的东北冷涡客观识别与追踪数据集，进而对东北冷涡活动特征开展统计分析，包括时空分布、持续时间、强度和尺度等；最后，借助国家级自动站小时降水数据，探讨东北冷涡与东北地区暖季降水的关联。本文第二部分简要介绍研究所用数据和东北冷涡客观识别与追踪方法；第三部分重点论述东北冷涡在东北区域的时空分布、持续时间、强度和尺度等统计特征；第四部分探讨东北冷涡影响期间东北区域暖季降水的分布特征；最后一部分给出结论和讨论。

2 研究数据和东北冷涡客观识别与追踪方法

2.1 研究数据

2000~2019 年东北冷涡客观识别与追踪所用数据为，水平分辨率 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、时间分辨率 6 小时的 NCEP/NCAR 再分析数据 (Kalnay et al., 1996)。

东北冷涡影响期间东北区域暖季降水分布特征研究所用降水数据来自国家气象信息中心提供的中国国家级地面气象站逐小时降水数据集 (V1.0)。鉴于东北地区的降水主要发生在暖季 (郑秀雅等, 1992; Hu et al., 2010)，本文这部分分析研究主要关注东北地区暖季 5~9 月的降水；同时为了避免由数据缺测造成的影响，规定如果一个站点的暖季缺测率超过 5%，则剔除该站点，经过时间连续性质量控制，得到东北地区 220 个可用站点 (图 1)，考虑到呼伦贝尔地区仅有 4 个有效站点，且均分布在其东部海拔高度较低区域，不足以表征该地区的特征，因此，将呼伦贝尔境内的所有站点全部剔除。最终选取东北地区 216 个国家级地面气象站，用于东北冷涡与暖季东北地区降水关系研究。

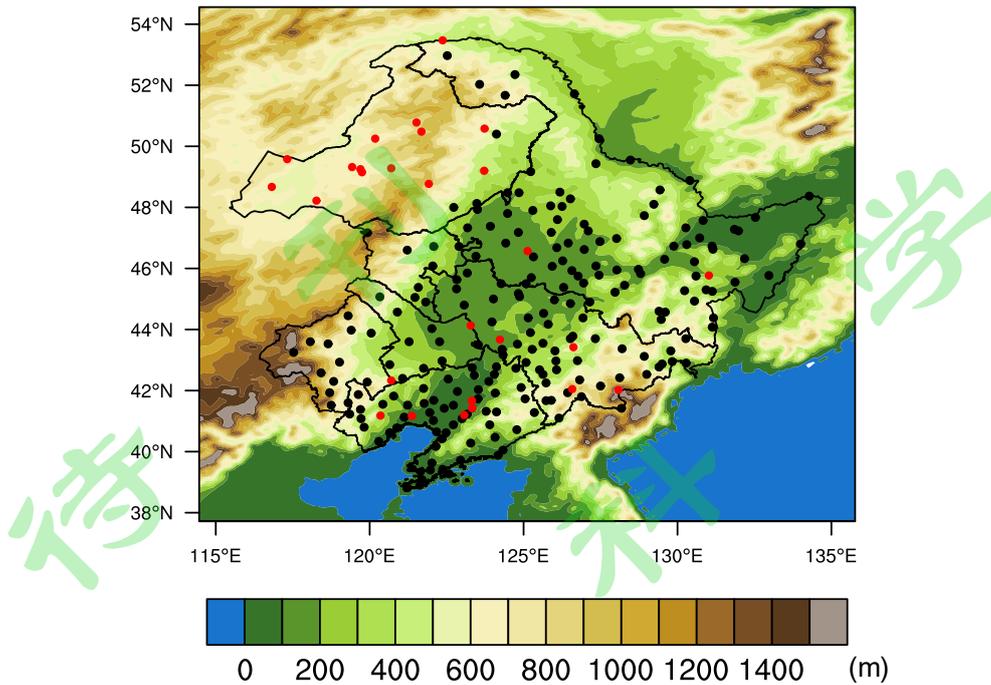


图 1 东北地区国家级地面自动站空间分布。黑色圆点/红色圆点分别代表通过/未通过质量控制的站点。填色为地形高度（单位：m）。

Fig.1. Spatial distribution of the national automatic weather stations (AWSs) in the Northeast China region (NEC), superimposed with topographic height (units: m). The black dots denote the national AWSs that pass quality control and the red dots denote the national AWSs that fail quality control.

2.2 东北冷涡客观识别与追踪方法

为识别和追踪东北冷涡，进而对其活动特征开展统计研究，参照东北冷涡传统天气学定义（郑秀雅等，1992），在前人东北冷涡客观识别和追踪研究（Hu et al., 2010；王承伟等，2012）基础上，构建了本文东北冷涡客观识别与追踪算法：（1）识别区域为 $35^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ ， $115^{\circ}\sim 145^{\circ}\text{E}$ ；（2）在该区域内 500 hPa 等压面上， 3×3 格点范围内，若中心格点的位势高度低于周围八个格点，且周围八格点中存在 $850\sim 400$ hPa 的大气厚度高于中心格点，则该中心格点为位势高度低值中心；（3）在包含低压中心在内的九个格点中，存在任意一点的纬向气温二阶导数大于 0，则判断存在与低压中心相伴随的冷中心或冷槽；（4）同一时刻识别出的冷涡中心如果相距在 5×5 格点范围内，则视为同一冷涡，并保留位势高度更低的冷涡中心；（5）任意两个连续时刻（6 小时间隔）识别出的冷涡中

心的位置相差在一定范围内（经度相差 5° 以内，纬度相差 2.5° 以内），视为同一冷涡，借此对冷涡中心移动进行追踪；（6）冷涡系统需维持两天以上。

3 近 20 年东北冷涡活动统计特征

借助 2000~2019 年 NCEP/NCAR 再分析数据 (Kalnay et al., 1996) 以及上述东北冷涡客观识别与追踪方法，在 20 年间，共识别出 558 次东北冷涡过程，在此基础上，对研究区域内东北冷涡的时空分布、持续时间、冷涡强度和尺度等特征开展统计分析。

3.1 东北冷涡活动的年际和月际变化

2000~2019 年，研究区域内东北冷涡的频数和影响天数存在明显的年际变化，但无明显长期增长或减弱趋势（图 2），每年平均出现 27.9 次东北冷涡过程，平均持续天数为 78 天（20 年所有东北冷涡过程的发生频数/持续时间相加，除以 20 年），其中，2015 年频数最多（37 次），影响天数共 96 天，2004 和 2018 年频数最少（19 次），影响天数分别为 50.5 和 54.5 天，20 年间频数和影响天数的标准差分别为 4.98 和 13.55。东北冷涡频数和影响天数的年变化具有很好的一致性（图 2），相关系数达 0.90。研究区域内东北冷涡频数和影响天数具有明显月变化，东北冷涡更易出现在暖季，尤其是 5~7 月，其中，5 月年平均频数最多（3.3 次），年平均影响天数为 8.9 天，冷季（尤其是 2~3 月和 10~11 月）东北冷涡频数和影响天数较少。除 7 月份外，东北冷涡频数和影响天数的月变化整体上一致（图 3），7 月频数相比 5 和 6 月略偏低，但影响天数与频数最高的 5 月基本持平，说明，7 月单个冷涡的平均影响时间相比 5 月略长，7 月的大尺度环流形势可能有利于东北冷涡在东北区域的维持和发展，相关机理值得进一步深入研究。年平均月际变化分布结果与 Hu et al. (2010) 研究基本一致，但数值上偏小，这是因为他的研究范围相较传统冷涡识别范围（郑秀雅等，1992）偏大，从而识别出了更多的冷涡过程。

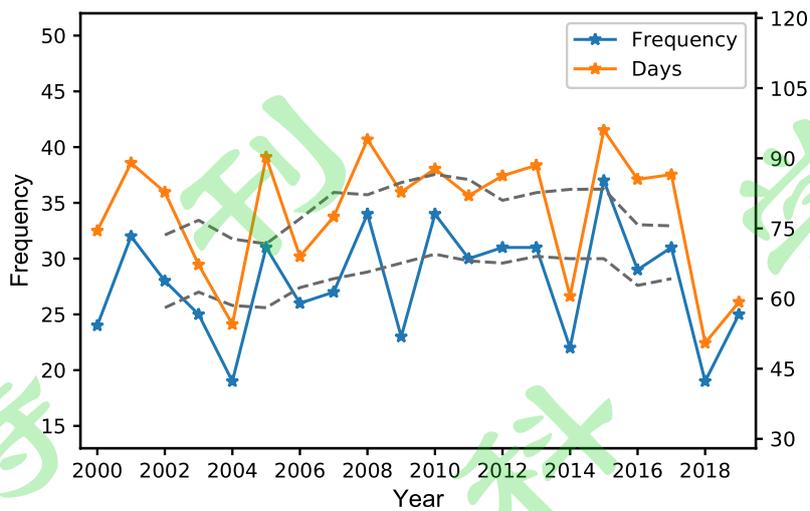


图 2 2000~2019 年东北冷涡年频数（蓝色五角星实线）和年影响天数（橙色五角星实线）的年变化。灰色虚线为相对应的五年滑动平均。

Fig.2. Variation of total frequency (blue solid line with pentagram) and total number of days (orange solid line with pentagram) of the NCCVs from 2000 to 2019 and their five-year moving average (gray dotted line).

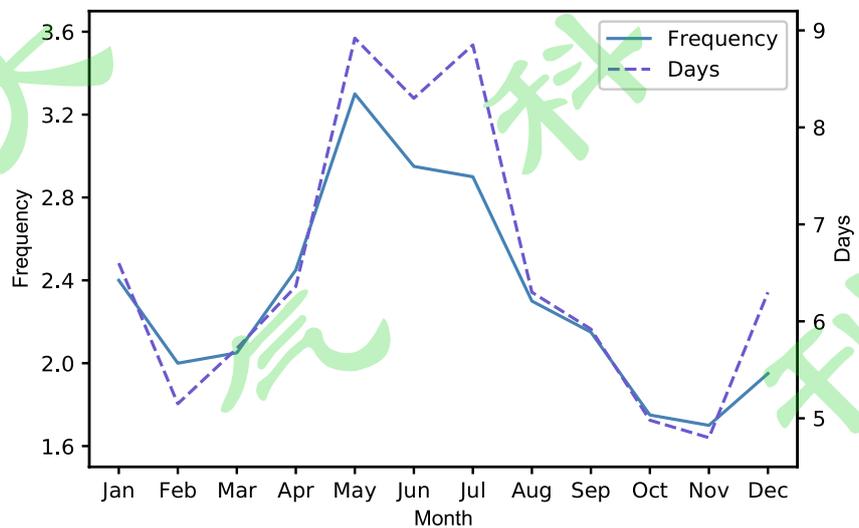


图 3 东北冷涡频数（蓝色实线）和影响天数（紫色虚线）的年平均月际变化。

Fig.3. Monthly variation of the occurrence frequency (blue solid line) and number of days (purple dotted line) of NCCVs.

3.2 东北冷涡活动频数空间分布

近 20 年间，研究区域内东北冷涡（中心）活动高频区整体上沿 $45\sim 55^{\circ}\text{N}$ 纬度带呈东—西走向带状分布，尤其是东北平原北部海拔高度较低的地区，这与前人的研究基本一致（Hu et al., 2010），这也说明地形在东北冷涡发展的过程中起到了重要作用（Fuenzalida et al., 2005）。而在其他地区，东北冷涡中心出现频数相对较少（图 4a）；区域内，东北冷涡中心初现时刻（东北冷涡中心在东北区域内最早出现时刻）主要位于区域西部（尤其是 $45\sim 55^{\circ}\text{N}$ 西边界附近，图 4b），东北冷涡强度峰值时刻（一次东北冷涡过程中，中心位势高度最低的时刻，图 4c），冷涡中心所处位置空间分布与全部活动时刻（图 4a）相似，而冷涡中心最后出现时刻（东北冷涡中心在东北区域内最后出现时刻）主要位于区域东部（尤其是 $40\sim 55^{\circ}\text{N}$ 东边界附近，图 4d）。不同季节东北冷涡活动频数基本上都分布在 40°N 以北区域，但大值区分布具有较大差异。春季冷涡多发于 $40^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 之间，尤其是在 $125^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$ 中部地区（图 5a）；夏季冷涡相比春季，大值区分布相对偏西（图 5b）；秋季冷涡活动相较其他季节偏少，但活动范围更多地向 55°N 以北扩展（图 5c）；冬季冷涡大值区主要分布在识别区域的东北象限（图 5d）。在东北冷涡研究范围内，东北冷涡中心以东移为主，包括向东北、东南移动；少数的冷涡生成于识别区域的东侧，自东向西移动。研究时段内，既有移经研究区域的东北冷涡，也有在区域内生成或消亡的东北冷涡。

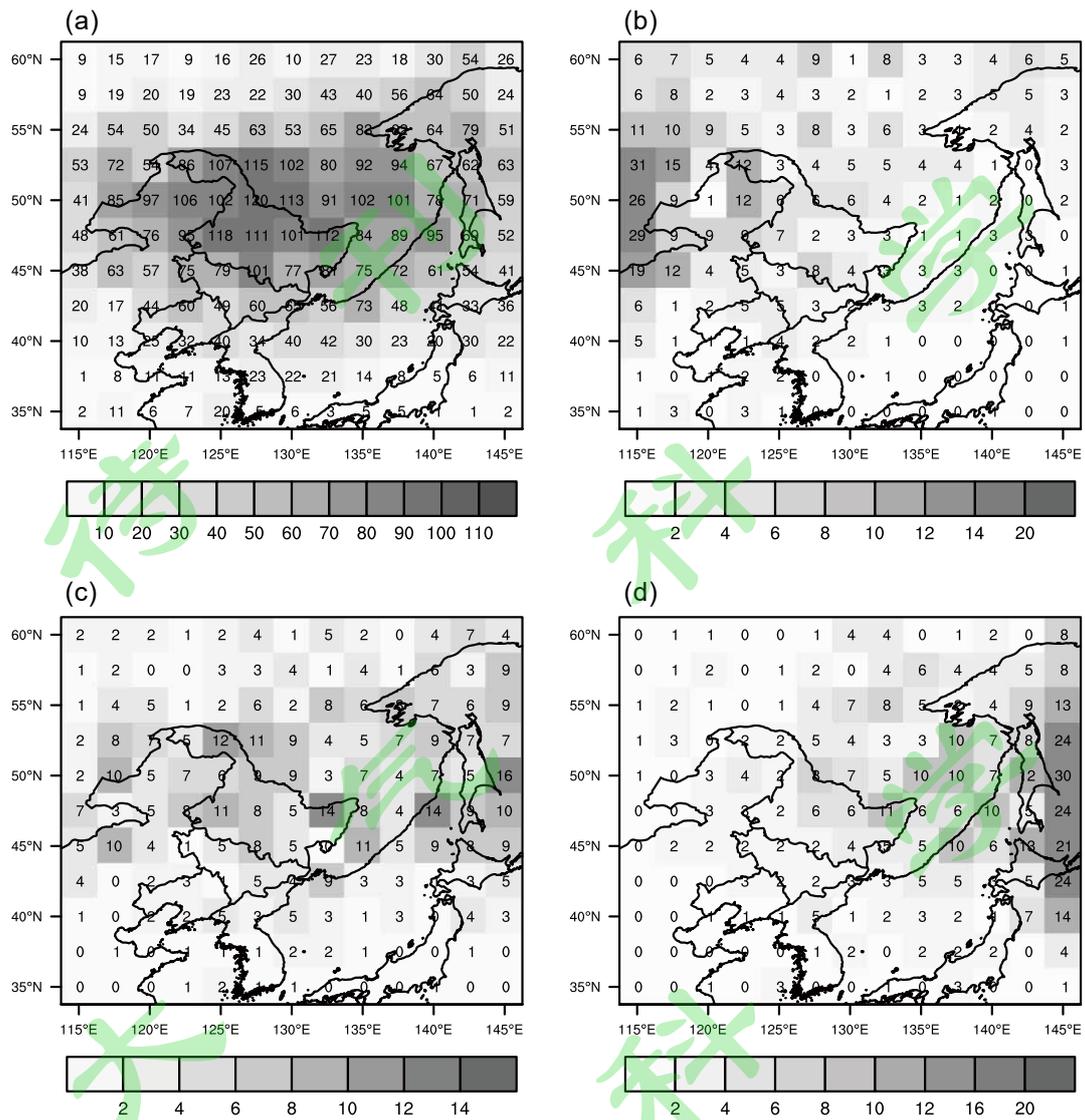


图 4 2000–2019 年东北冷涡中心全部活动时刻 (a)，区域初现时刻 (b)，峰值强度时刻 (c) 以及最后出现时刻 (d) 的频数的空间分布。

Fig.4. Spatial distribution of frequency of NCCVs during 2000–2019: (a) all time, (b) first time, (c) peak time, (d) last time.

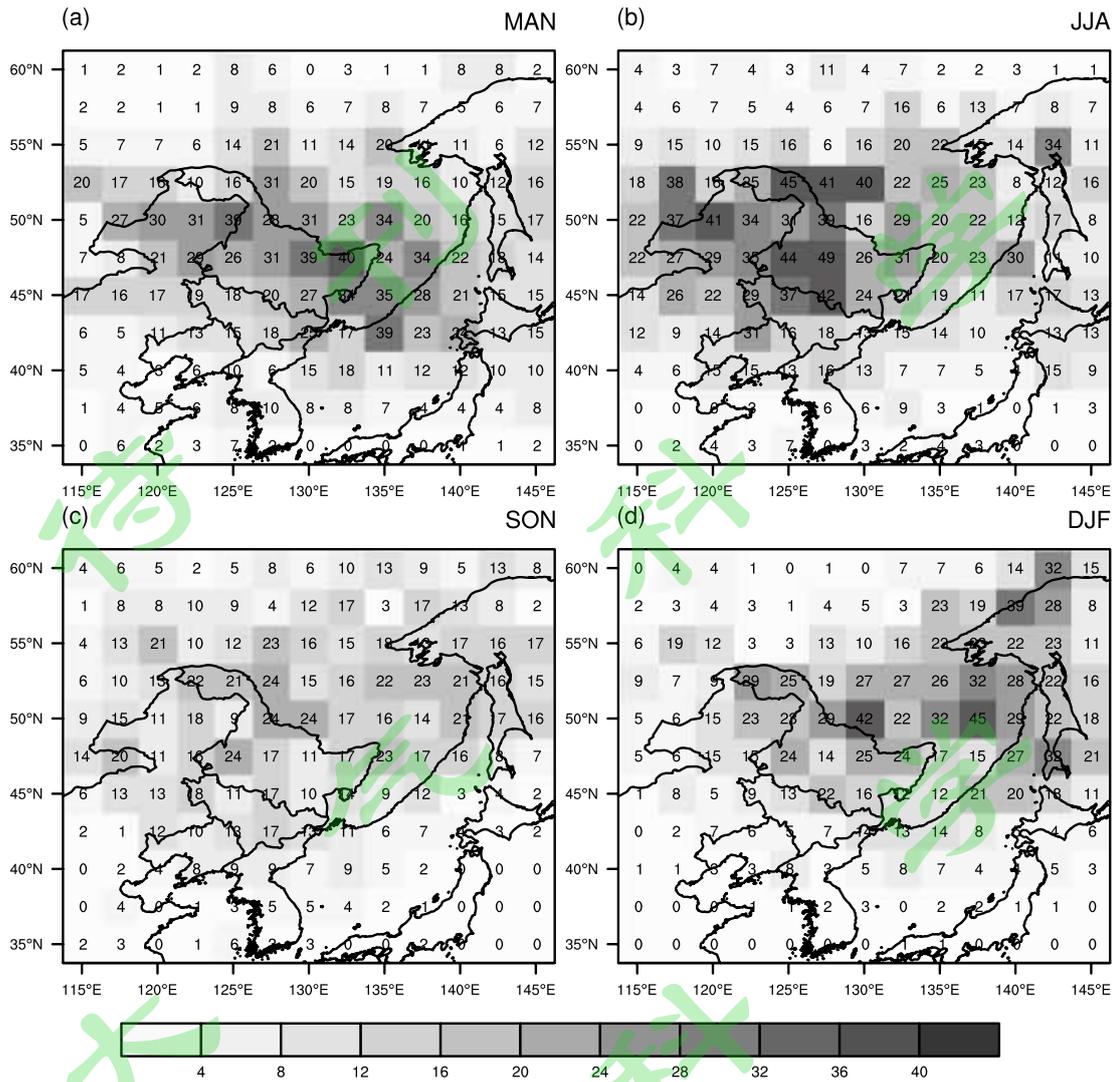


图 5 2000~2019 年不同季节东北冷涡中心频数空间分布。(a) 春季 (3~5 月); (b) 夏季 (6~8 月); (c) 秋季 (9~11 月); (d) 冬季 (12 月, 1~2 月)。

Fig.5. Spatial distribution of frequency of NCCVs in different seasons during 2000–2019: (a) spring (MAN), (b) summer (JJA), (c) autumn (SON), (d) winter (DJF).

3.3 东北冷涡的持续时间

2000~2019 年, 研究区域内东北冷涡过程发生的平均持续时间约 67 小时 (20 年中所有东北冷涡过程的持续时间相加, 除以总的冷涡频数), 随持续时间增加, 冷涡频数迅速减少, 其中, 50% 的东北冷涡过程持续时间在 48~60 小时, 只有 25% 的东北冷涡持续时间在 78 小时以上, 最长持续时间可达 186 小时 (图 6a)。全年各月份, 50% 以上的东北冷涡持续时间在 48~72 小时 (相对多出现在

春末夏初的 4~6 月以及 2 月)，其次为持续时间在 72~96 小时的东北冷涡；全年除 9 和 10 月外，均可出现持续时间 120 小时以上的东北冷涡，但 6~7 月和 12 月相对更多，5 月、8 月和 11 月次之，而 6 月、11 月和 12 月均出现了持续时间大于 168 小时的东北冷涡（图 6b）；7 月和 12 月，120 小时以上较长持续时间冷涡过程的多发，使得这两个月东北冷涡平均持续时间最长，7 月平均持续时间达到峰值与图 3 分析结论一致；冷季较多出现长持续时间冷涡可能与地表温度低，对流不易增强，冷涡更易维持有关（Porcu et al., 2007），而暖季较多出现的长持续时间冷涡则可能与大气环流形势等因素有关，相关机理需要未来开展更为深入的对比分析。

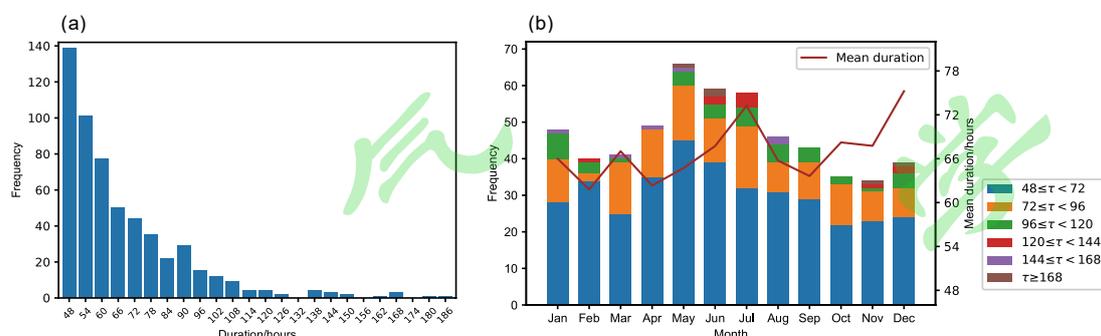


图 6 2000~2019 年不同持续时间的东北冷涡频数 (a) 和月变化 (b)。

Fig.6. Duration of NCCVs (a) and their monthly distribution (b) during 2000–2019.

3.4 东北冷涡的强度和尺度

2000~2019 年，研究区内东北冷涡最大强度为 4788 位势米，最小强度为 5841 位势米，平均为 5337 位势米，75%的东北冷涡强度大于 5564 位势米（图 7a）。从东北冷涡中心向外（共 8 个方向，间隔 45°），500 hPa 位势高度逐渐递增，当任意一个方向不满足递增时，则把该方向该点至冷涡中心的距离作为冷涡半径（Zhang et al., 2008），分析 20 年间活动于研究区域的冷涡半径尺度特征显示，东北冷涡半径尺度范围分布广泛，从几百到几千公里均有分布，平均为 953 km，75%的东北冷涡半径小于 1140 km（图 7b）。东北冷涡的强度和尺度都存在明显的月际变化，冷季冷涡中心强度明显强于暖季（图 8a），同时冷季冷涡尺度也普遍大于暖季（图 8b）。无论是年际分布，还是月际分布，绝大多数的

冷涡半径均集中在 600~1200 km 之间，2000~2019 年 20 年间，东北冷涡年平均半径年际差异不大，在 800~1100 km 之间波动，亦无明显长期变化趋势（图 9a），而年平均月际变化较为明显，暖季平均尺度较明显小于冷季，冷季半径 1500 km 以上的冷涡个数明显多于暖季，尤其是 1 月和 12 月（图 9b）。这可能与夏季对流抑制冷涡进一步发展有关（Porcu et al., 2007）。

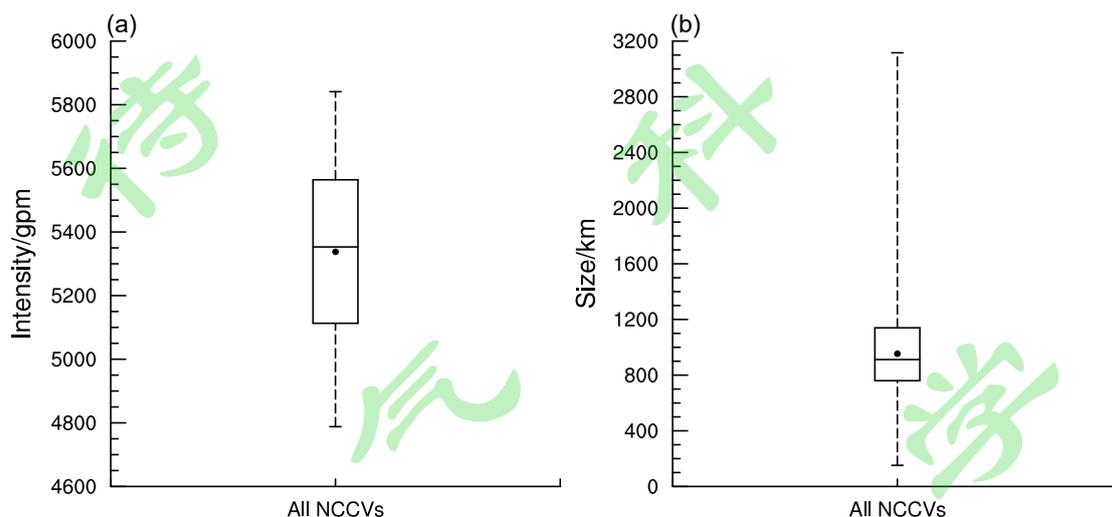


图 7 2000~2019 年东北冷涡的 (a) 强度 (单位: gpm) 和 (b) 半径尺度 (单位: km) 盒须图分布。

Fig.7. Box-and-whisker plots of intensity (units: gpm) and size (units: km) of NCCVs during the period of 2000–2019. 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.

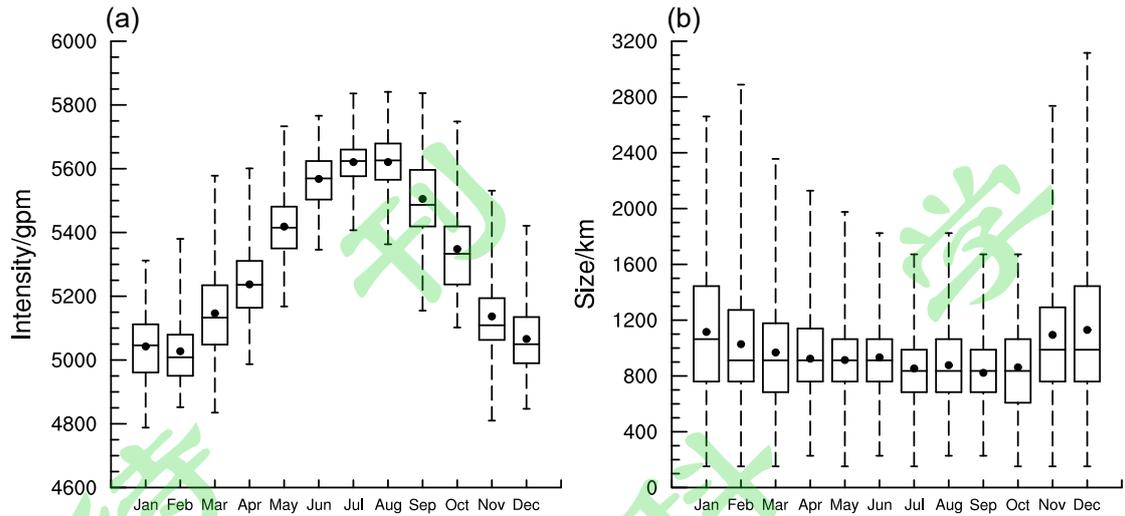


图 8 2000~2019 年不同月份东北冷涡的 (a) 强度 (单位: gpm) 和 (b) 半径尺度 (单位: km) 盒须图分布。

Fig.8. As in Fig.7, but for intensity (units: gpm) and size (units: km) of NCCVs in different months during the period of 2000–2019.

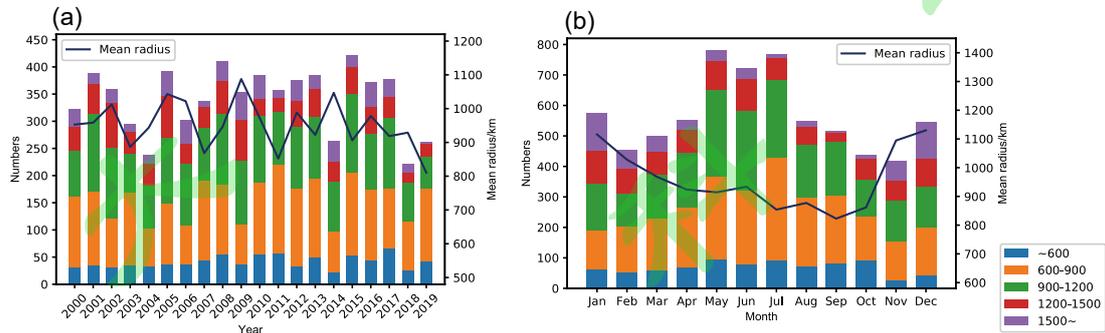


图 9 2000~2019 年不同尺度东北冷涡频数的年际 (a) 和月际 (b) 变化。不同颜色直方图代表不同半径尺度, 折线为平均半径 (单位: km)。

Fig.9. Annual variation (a) and monthly variation (b) of NCCVs with different radius ranges and mean radius (units: km) during the period of 2000–2019.

4 东北冷涡影响期间东北区域暖季降水分布特征

2000~2019 年 5~9 月东北区域年平均降水的空间分布 (图 10a) 显示, 500 mm 以上年平均降水主要位于辽宁、吉林东部和黑龙江中部, 极大值区分布在辽宁东部和吉林南部等地, 最大值超过 800 mm, 这种暖季降水分布可能主要由夏季风环流 (郑秀雅等, 1992; Sun et al., 2007)、局地地形 (王晓明和谢芳,

1994) 和海岸线分布等有关。东北冷涡影响期间的降水分布与上述年平均降水分布整体相似 (图略), 但东北冷涡影响期间的降水占东北区域年均降水的比值空间分布则较明显不同 (图 10b), 整体上, 东北冷涡影响期间的降水占比绝大多数达 20%以上, 东北区域中东部占比相对更高, 吉林东部和黑龙江东南部个别站点占比可达 34%以上。不同月份东北冷涡影响期间降水占比具有明显差异, 5月和7月占比明显较多, 黑吉辽三省的占比都可达到 30%以上, 这与 5、7月冷涡活动更为频繁具有一致性。6月份在辽宁东部占比偏多, 最多可达 40%; 8月和9月降水占比整体偏少 (图略)。

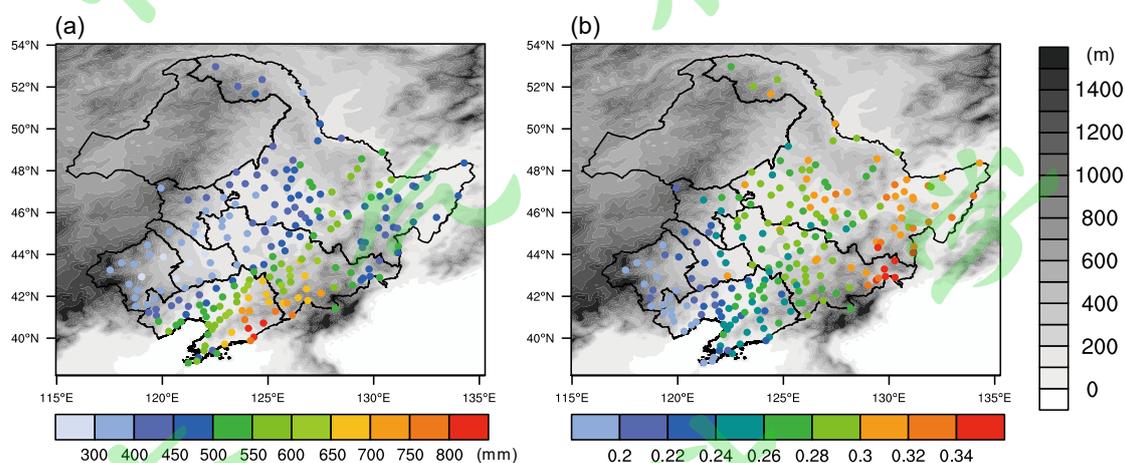


图 10 2000~2019 年暖季 (5~9 月) 东北区域年平均降水空间分布 (a) 和东北冷涡背景下的降水占比空间分布 (b)。图中阴影为地形高度 (单位: m)。

Fig.10. Spatial distribution of (a) annual mean precipitation (units: mm) and (b) the ratio of the annual mean precipitation associated with NCCVs to the total annual mean precipitation in the warm season during 2000–2019 in the NEC, superimposed with topographic height (shaded, units: m).

2000~2019 年暖季, 75%的小时降水强度在 1.7 mm 以下, 但仍有极端强度降水发生, 最大可达 143.6 mm/h (图 11); 东北冷涡影响期间的小时降水强度分布特征与全部降水相似 (图 11)。根据小时降水强度, 将所有站点小时降水分为四档: 0.1~5 mm/h, 5~10 mm/h, 10~20 mm/h 和 ≥ 20 mm/h (Miao et al., 2016),

不同强度档中，东北冷涡影响期间的小时降水样本区间分布与所有小时降水样本基本一致，75%以上的样本降水强度均分布在各档的较低区间（图 11）；伴随降水强度增强，东北冷涡影响期间的降水占比空间分布逐渐变得散乱，0.1~5 mm/h 档小时降水占比整体上呈现西低东高特征，在东北区域东部占比可达 35% 以上（图 12a），但 10~20 mm/h 的较强降水档（图 12c）以及 20 mm/h 以上的短时强降水档（图 12d）中，占比分布极为散乱（尤其后者），强降水局地性特征显著，20 mm/h 以上的小时降水档（图 12d）中，东北冷涡影响期间短时强降水占比在黑龙江东南部和西北部个别站点可达 50% 以上。

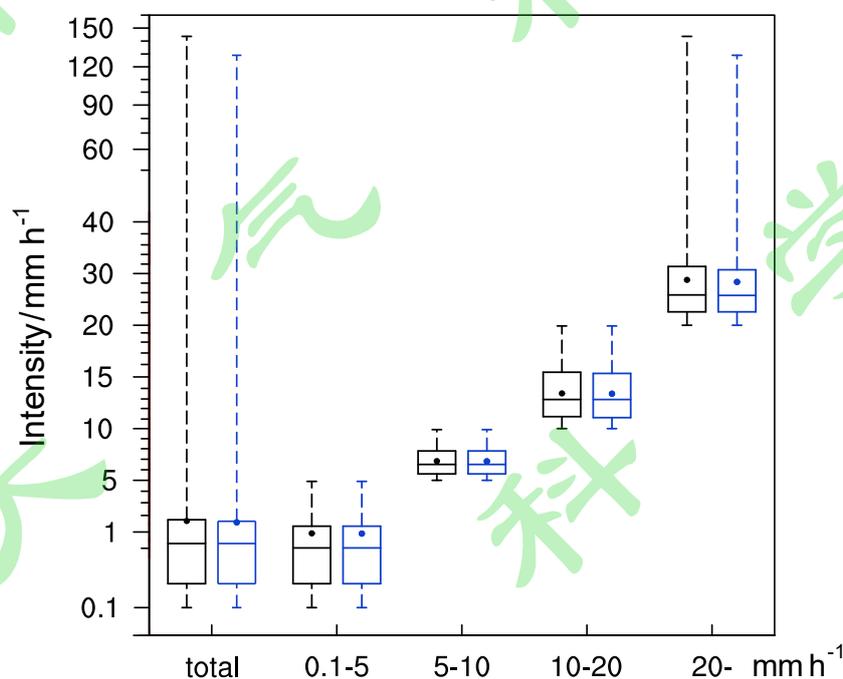


图 11 2000~2019 年暖季东北区域所有小时降水和不同强度分档小时降水样本盒须图分布。黑色为全部降水样本，蓝色为东北冷涡影响期间的降水样本。

Fig.11. As in Fig.7, but for the total intensity of precipitation and precipitation with different intensities in the warm seasons of 2000–2019 in the NEC. The black represents total precipitation and the blue represents the precipitation associated with NCCVs.

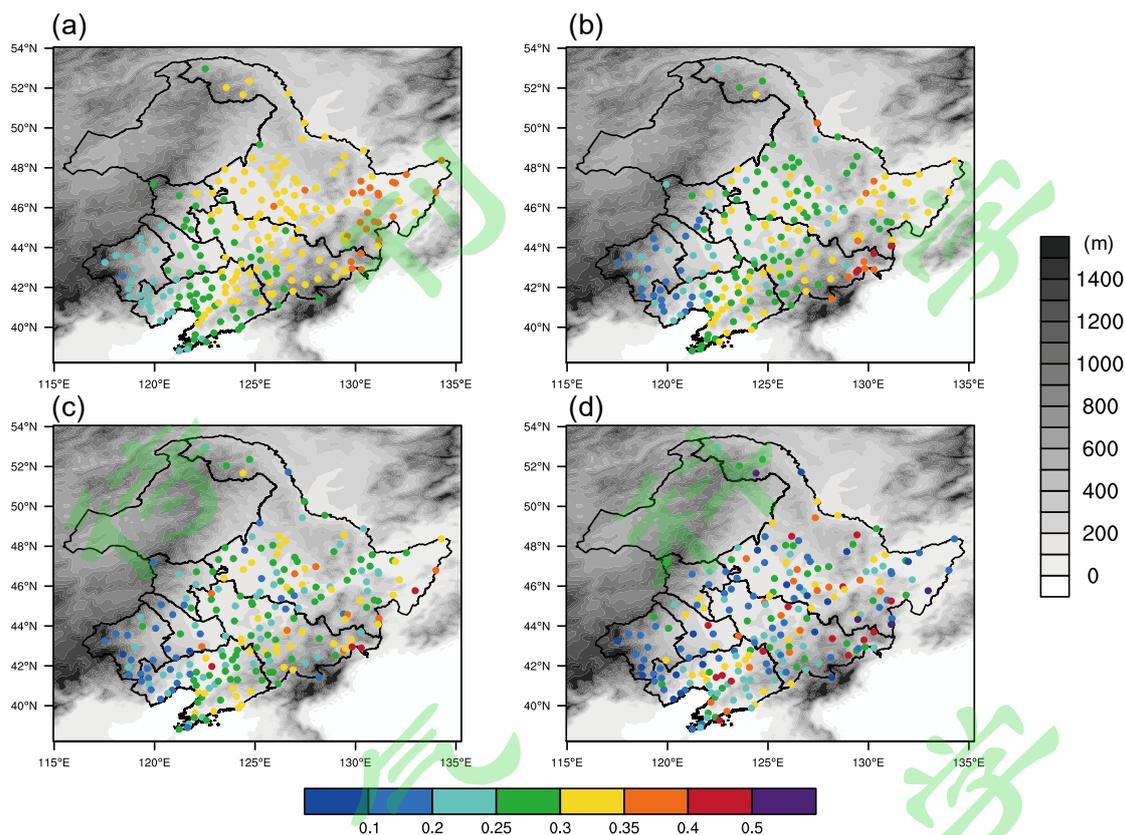


图 12 2000~2019 年暖季东北区域不同强度分档小时降水中，东北冷涡影响期间降水的占比。(a) 0.1~5 mm/h，(b) 5~10 mm/h，(c) 10~20 mm/h，(d) ≥ 20 mm/h。图中阴影为地形高度（单位：m）。

Fig.12. As in Fig.10(b), but for precipitation with different intensities. (a) 0.1–5 mm/h; (b) 5–10 mm/h; (c) 10–20 mm/h; (d) ≥ 20 mm/h.

基于国家级站点逐小时降水数据，计算得到日降水量（北京时当日 08 时到次日 08 时），若站点 24 小时累积降水量大于等于 50 mm，则记为一个暴雨日，进而分析 20 年暖季东北冷涡影响期间所有暴雨日累积降水量与 20 年全部暴雨日累积降水量的占比分布（图 13），由图 13 可见，东北冷涡影响期间的暴雨日累积降水量占比明显提升，吉林东北部和黑龙江东南部的长白山地形附近，东北冷涡暴雨日降水量占比可达 50%以上，极大值超过 70%，黑龙江北部小兴安岭地形区域亦有两个站点东北冷涡暴雨日降水量占比超过 70%。这个结果相比 Zhang et al.（2008）研究 1979~2005 年东北冷涡影响期间暖季暴雨占比偏大，这是由于 Zhang et al.（2008）在识别冷涡时添加了 40 位势米高度差阈值且只识别

中心强度数值小于 5720 位势米的冷涡，导致部分浅薄或较弱的东北冷涡未能被识别，进而影响东北冷涡影响期间暴雨占比结果。

由上述从小时降水量（图 10，12）和暴雨日降水量（图 13）两个角度的分析可见，2000~2019 年暖季，东北冷涡影响期间的降水在暖季东北区域全部降水中均占据一定份额。值得指出的是，本文东北冷涡识别追踪算法和前人相关算法中，均要求东北冷涡持续时间达 2 天以上，但在研究区域暖季还常有一些冷涡系统持续时间不足 2 天，且对局地天气有显著影响，上述基于东北冷涡传统天气学定义的识别算法会把这些达到其他标准，但持续时间小于 2 天的“非传统冷涡”及其影响排除在外；初步研究（图表略）发现，本文分析时段和研究区域内，此类“非传统冷涡”频数占比高达 85%以上，如果考虑所有冷涡（传统东北冷涡和“非传统冷涡”），冷涡影响期间降水占东北区域暖季全部降水的比例显著提升（所有站点均可达 50%以上），而在 20 mm/h 以上短时强降水和暴雨日降水中的占比则更为突出，最高接近 100%。可见，这类“非传统冷涡”对东北地区天气的影响不容忽视，亦是当地预报员关注的重点天气过程，值得深入研究。

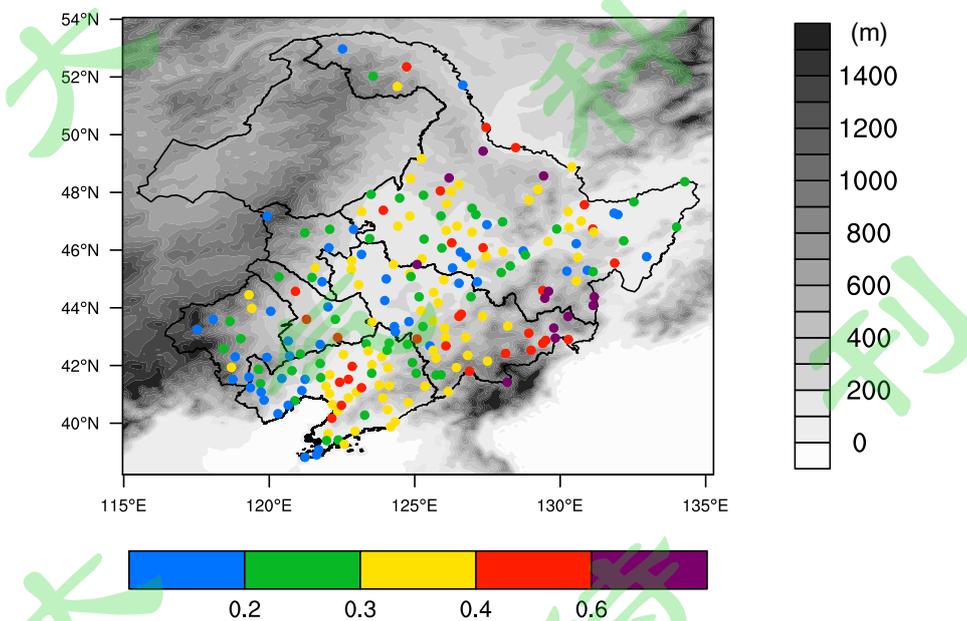


图 13 2000~2019 年暖季东北区域东北冷涡影响期间的暴雨日降水量占比空间分布。图中阴影为地形高度（单位：m）。

Fig.13. As in Fig.10(b), but for rainstorm.

5 结论与讨论

东北冷涡是影响东北地区天气和气候的重要环流系统。本文基于前人 (Hu et al., 2010) 东北冷涡识别研究, 调整了冷涡识别范围, 增加了关于冷涡深厚度的识别条件, 同时借鉴王承伟等 (2012) 冷涡研究工作, 设定了冷涡的追踪条件, 构建了新的东北冷涡客观识别与追踪算法并对识别和追踪的准确性进行了必要的验证 (限于篇幅所限, 验证图表略), 利用 2000~2019 年 NCEP/NCAR 再分析资料, 对 $35^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E}\sim 145^{\circ}\text{E}$ 区域内的东北冷涡开展客观识别与追踪, 得到近 20 年东北冷涡数据集, 并对其时空分布、持续时间、冷涡强度和尺度等特征进行分析; 进而, 结合国家级自动站小时降水数据, 分析东北冷涡影响期间东北区域的暖季降水分布特征。主要结论如下:

(1) 近 20 年, 研究区域内共出现 558 次东北冷涡过程; 东北冷涡的频数和影响天数存在明显的年际变化, 年均发生 27.9 次东北冷涡过程, 平均影响时间为 78 天, 东北冷涡频数和影响天数的年际变化具有很强的一致性; 东北冷涡频数和影响天数月际变化显著, 冷涡更易出现在暖季, 尤其是 5~7 月; 2~3 月和 10~11 月, 东北冷涡频数和影响天数较少; 除 7 月外, 东北冷涡频数和影响天数的月际变化基本一致。

(2) 东北冷涡 (中心) 活动高频区整体上沿 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 纬度带呈东-西走向带状分布; 冷涡中心初现时刻主要位于区域西部, 尤其是 $45^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 西边界附近, 而冷涡中心最后出现时刻主要位于区域东部, 尤其是 $40^{\circ}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 东边界附近。不同季节东北冷涡活动频数空间分布不同, 春季冷涡多发于中部地区; 夏季冷涡相比春季, 大值区分布相对偏西; 秋季冷涡活动更多地向 55°N 以北扩展; 冬季冷涡大值区主要分布在识别区域的东北象限。在东北冷涡研究范围内, 东北冷涡整体上以东移为主。

(3) 研究区域内, 东北冷涡的平均持续时间约 67 小时, 50% 的冷涡过程持续时间在 48~60 小时, 最长可达 186 小时; 7 月和 12 月, 东北冷涡持续时间更易达到 120 小时以上。东北冷涡平均强度为 5337 位势米, 冷季冷涡中心强度明显强于暖季; 平均半径尺度为 953 km, 冷涡半径主要集中在 600~1200 km 区间, 且暖季平均半径明显小于冷季。

(4) 东北区域暖季年平均降水量极大值区主要位于辽宁东部、吉林东南部等地，最大值超过 800 mm，东北区域暖季降水强度整体偏弱，但仍有极端强度降水发生。东北冷涡影响期间的暖季降水占比在绝大多数站点可达 20%以上；根据小时降水强度，将东北区域暖季降水分为 0.1~5 mm/h，5~10 mm/h，10~20 mm/h 和 ≥ 20 mm/h 四档，强降水局地性特征显著，20 mm/h 以上的短时强降水档中，在黑龙江东南部和西北部个别站点，东北冷涡影响期间的暖季降水占比可达 50%以上；东北冷涡影响期间的暴雨日降水量占比明显提升，在吉林东北部和黑龙江东南部的长白山地形附近，暴雨日降水量占比可达 50%以上，极大值超过 70%。

本文主要研究了近 20 年东北冷涡活动的统计特征，并初步分析了东北冷涡影响期间东北区域的暖季降水分布，对于造成这些分布特征的主导大气环流以及冷涡背景下强降水形成的宏、微观物理机制仍需深入研究揭示；此外，本文东北冷涡识别算法以及前人相关识别算法中，均要求识别出的东北冷涡系统持续时间达 2 天以上，这种基于冷涡传统定义的持续时间识别标准会把达到其他标准，但持续时间小于 2 天的“非传统冷涡”及其影响排除在外，对于业务预报而言，这类“非传统冷涡”的影响，尤其是对局地暴雨和强对流天气的影响不容忽视，这将在本文后续研究工作中加以详细分析，以便为业务预报提供更多的参考。

参考文献 (References)

- Bamber D J, Healey PG, Jones BM, et al. 1984. Vertical profiles of tropospheric gases: chemical consequences of stratospheric instructions[J]. *Atmos. Environ.* 18(9): 1759-1766.
- Bell GD, Bosart, LF. 1989. A 15-year climatology of northern hemisphere 500 mb closed cyclone and anticyclone centers[J]. *Mon. Wea. Rev.* 117(10): 2142-2163.
- 布和朝鲁, 谢作威. 2013. 东北冷涡环流及其动力学特征[J]. *气象科技进展*, 3(03): 34-39.
- Bueh Cholaw, Xie Zuowei. 2013. Northeastern China Cold Vortex Circulation and its Dynamical Features[J]. *Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 3(03): 34-39.

-
- 崔景琳, 白爱娟. 2018. 5-8月东北冷涡降水过程统计特征及其降水特征对比研究[J]. 气象科技进展, 8(01): 12-21. Cui Jinglin, Bai Aijuan. 2018. Statistical and Comparative Study on Precipitation Characteristics in NECV for May to August[J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 8(01): 12-21.
- Fang YH, Chen HS, Lin Y, et al. 2021. Classification of northeast China cold vortex activity paths in early summer based on k-means clustering and their climate impact[J]. Adv. Atmos. Sci. 38(3): 400-412.
- Favre A, Hewitson B, Tadross M, et al. 2012. Relationships between cut-off lows and the semiannual and southern oscillations. Climate. Dyn. 38(7-8): 1473-1487.
- Frierson DM, Lu J, Chen G. 2007. Width of the Hadley cell in simple and comprehensive general circulation models[J]. Geophys. Res. Lett. 34(18): 5.
- Fuenzalida HA, Sanchez R, Garreaud RD. 2005. A climatology of cutoff lows in the southern hemisphere. J. Geophys. Res. 110: D18101.
- Gimeno L, Trigo RM, Ribera P, et al. 2007. Editorial: Special issue on cut-off low systems (COL)[J]. Meteor. Atmos. Phys. 96(1-2): 1-2.
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响[J]. 科学通报, 51(23): 2803-2809. He Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2006. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu[J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51(23): 2803-2809.
- Hernández A. 1999. Un Estudio Estadístico sobre Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAs) en el Sudoeste de Europa basado en Mapas Isentropicos de Vorticidad Potencial[C]. IV Simposio Nacional de Predicción, Instituto Nacional de Meteorología, Serie Monogr., No. SM 351, Ministerio de Medio Ambiente, 235 pp.
- Hoskins BJ, McIntyre ME, Robertson AW. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc. 111(470): 877-946.
- 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(01): 179-191. Hu Kaixi, Lu Riyu, Wang Donghai. 2011. Cold Vortex over Northeast China and Its Climate Effect[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35(01): 179-191.
- Hu KX, Lu RY, Wang DH. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China[J]. Meteor. Atmos. Phys. 106(1-2): 37-48.
- 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, 78(06): 945-961. Huang Xuan, Li Dongliang. 2020. Objective identification method and variation characteristics of the Northeast China cold vortex from May to August of 1979-2018[J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 78(06): 945-961.
- 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温的影响[J]. 气象与环境学报, 28(02): 5-9. Jiang Dakai, Wang Jiangshan, Yan Qi, et al. 2012. Climatic characters of northeast cold vortex and its effect on air temperature in Liaoning province from May to September during 1961-2010[J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 28(2): 05-09.
- 金荣花, 李艳, 王式功. 2009. 四种客观定量表征阻塞高压方法的对比分析[J]. 高原气象, 28(5): 1121-1128. Jin Ronghua, Li Yan, Wang Shigong. 2009. Comparison and Analysis among Four Objective and Quantificational Blocking Index[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28(5): 1121-1128.

-
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 77(3): 437-471.
- Kentarchos AS, Davies TD. 1998. A climatology of cut-off lows at 200 hPa in the Northern Hemisphere, 1990-1994[J]. *Int. J. Climatol.* 18(4): 379-390.
- Knippertz P, Martin JE. 2005. Tropical plumes and extreme precipitation in subtropical and tropical West Africa[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 131(610): 2337-2365.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006a. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析[J]. *大气科学*, 30(06): 1249-1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006a. The Anomalous Features of the Northeast Cold Vortex During the First Flood Period in the Last 50 Years and Its Correlation with Rainfall in South China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(06): 1249-1256.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海. 2006b. 北半球环状模(NAM)、东北冷涡与前汛期华南旱涝[J]. *热带气象学报*, 22(06): 593-599. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai. 2006b. Relationship among the Northern Hemisphere Annual Mode, the Northeast China Cold Vortex and Precipitation during the First Yearly Rainy Period in South China[J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 22(06): 593-599.
- Miao CY, Sun QH, Borthwick AG, et al. 2016. Linkage between hourly precipitation events and atmospheric temperature changes over China during the warm season[J]. *Sci Rep.* 6: 13.
- Ndarana T, Waugh DW. 2010. The link between cut-off lows and Rossby wave breaking in the Southern Hemisphere[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 136: 869-885.
- Nieto R, Gimeno L, De La Torre L, et al. 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere[J]. *J. Climate.* 18(16): 3085-3103.
- Novark MJ, Bosart LF, Keyser D. 2002. Climatology of warm season 500 hPa cutoff cyclones and a case study diagnosis of 14–17 July 2000[C]. Preprints, 19th Conf. on Weather Analysis and Forecasting, Amer. Meteor. Soc., San Antonio, TX, 68-71pp.
- Palmén E, Newton C. 1969. Atmospheric circulation systems: their structure and physical interpretation[M]. New York: Academic Press, 603pp.
- Parker SS, Hawes JT, Colucci SJ, et al. 1989. Climatology of 500 mb cyclones and anticyclones 1950–85. *Mon. Wea. Rev.* 117(3): 558-570.
- 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.
- Price JD, Vaughan G. 1993. The potential for stratosphere-troposphere exchange in cut-off-low systems[J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 119(510): 343-365.
- Qi L, Leslie LM, Zhao SX. 1999. Cut-off low pressure systems over southern Australia: Climatology and case study[J]. *Int. J. Climatol.* 19(15): 1633-1649.
- 孙力, 安刚, 高枫亭, 等. 2002. 1998 年夏季嫩江和松花江流域东北冷涡暴雨的成因分析[J]. *应用气象学报*, 13(2): 156-162. Sun Li, An Gang, Gao Zongting, et al. 2002. A Composite Diagnostic Study of Heavy Rain Caused by the Northeast Cold Vortex Over Songhuajiang-Nengjiang River Basin in Summer of 1998[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 13(2): 156-162.
- 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]. *应用气象学报*, 5(3): 297-303. Sun Li, Zheng Xiuya, Wang Qi. 1994. The Climatological Characteristics of Northeast Cold Vortex in China[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese)*, 5(3): 297-303.

-
- Sun L, Shen BZ, Gao ZT, et al. 2007. The impacts of moisture transport of East Asian monsoon on summer precipitation in Northeast China. *Adv Atmos Sci* 24(4): 606–618.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rain in China[M]. Beijing: Science Press (in Chinese), 225pp.
- 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 Chengwei, XU Haiming, REN Li. 2012. The objective identification method of northeast cold vortex[J]. *Journal of Meteorology and Environment (in Chinese)*, 28(02): 1-4.
- 王蕾, 王承伟, 闫敏慧. 2020. 2000-2017 年东北冷涡活动气候特征及分析[J]. *黑龙江气象*, 37(01): 15-18. Wang Lei, Wang Chengwei, Yan Minhui. 2020. Climate characteristics and analysis of Northeast China cold vortex activity from 2000 to 2017[J]. *Heilongjiang Meteorology (in Chinese)*, 37(01): 15-18.
- 王丽娟, 何金海, 司东, 等. 2010. 东北冷涡过程对江淮梅雨期降水的影响机制[J]. *大气科学学报*, 33(01): 89-97. Wang Lijuan, He Jinhai, Si Dong, et al. 2010. Analysis of impacts of northeast cold vortex processes on Meiyu rainfall period over Yangtze-Huaihe River basin[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33(01): 89-97.
- 王晓明, 谢静芳. 1994. 东北地形对强对流天气影响的分析[J]. *地理科学*, 14(4): 347-354. Wang Xiaoming, Xie Jingfang. 1994. The analysis of the effects of topography in northeast China on strong convection weather[J]. *Scientia Geographica Sinica (in Chinese)*, 14(4): 347-354.
- Wernli H, Sprenger M. 2007. Identification and ERA-15 climatology of potential vorticity streamers and cutoffs near the extratropical tropopause[J]. *J. Atmos. Sci.* 64(5): 1569-1586.
- Zhang C, Zhang Q, Wang Y, et al. 2008. Climatology of warm season cold vortices in East Asia: 1979-2005[J]. *Meteor. Atmos. Phys.* 100(1-4): 291-301.
- 张丰启. 2001. 东北冷涡特征及其关键区的计算机识别[J]. *气象*, 27(9):46-49. Zhang Fengqi. 2001. Computer Recognition of Northeast Cold Vortex[J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 27(9):46-49.
- 张国宏, 刘长征. 2010. 东北冷涡的客观识别及监测方法[C]// 第27届中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会场论文集. 北京: 中国气象学会. Zhang Guohong, Liu Changzheng. 2010. The objective recognition of Northeast cold vortex and its monitoring method[C]// Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society on Disaster Weather Research and Forecast. Beijing: Chinese Meteorological Society (in Chinese).
- 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 Renhai. 1992. Rainstorm in Northeast China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 129pp.
- 周琳. 1991. 东北气候[M]. 北京: 气象出版社, 122 pp. Zhou Lin. 1991. Climate in Northeast China[M]. Beijing: China Meteorological Press (in Chinese), 122pp.

气 象