

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*

黄璇^{1,2} 李栋梁¹
HUANG Xuan^{1,2} LI Dongliang¹

1. 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/气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室, 南京, 210044

2. 中国人民解放军94608部队, 南京, 211500

1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters/Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

2. 94608 Troops of PLA, Nanjing 211500, China

2019-12-12 收稿, 2020-10-25 改回.

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. 气象学报, 78(6): 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. *Acta Meteorologica Sinica*, 78(6):945-961

Abstract Northeast China cold vortex (NECV) is an important weather system in Northeast China. Based on the ERA-Interim four times daily reanalysis data provided by ECMWF, the existing objective identification method is improved and the idea of weather map analysis is applied to the objective identification of cold vortex. 516 Northeast China cold vortex processes in the summers (May to August) from 1979 to 2018 are extracted in this study. In order to study the difference in the NECV initial position, the active region of the NECV is divided into four quadrants with 45°N as the X-axis and 125°E as the Y-axis. Results show that in summer, the frequency of NECV formation is the highest in the second quadrant (northwest) and the lowest in the fourth quadrant (southeast). The NECVs are mainly moving to the east. The average persistence time of the NECV in summer is 3.2 d, and the persistence times are quite different for NECVs generated in different quadrants. The longest persistence time is found for NECVs generated in the second quadrant (3.5 d on average) while the shortest is found for those generated in the fourth quadrant (2.9 d on average). 72.1% of the NECVs have a lifespan less than 4 d. The frequency of the NECV generation in the second quadrant in each month of the summer is much more than that in the other three quadrants, and decreases month by month, demonstrating an obvious characteristic of intraseasonal variation. The initial position and the frequency of the NECV both have obvious interdecadal variation characteristics. In May, the NECV initial position is located further north from 1998 to 2007 and further south from 2008 to 2018. In June, it moves southward from 1980 to 1998 and northward from 2008 to 2018. It is also located further east from 1993 to 2003 and further west from 2004 to 2018. In July, it moves northward from 1998 to 2010, westward from 1985 to 2000 and eastward from 2005—2012. In August, it is located further north from 2002 to 2010 and further east from 2009 to 2018. In terms of frequency, especially in the second quadrant, the interdecadal variation of the NECV is obviously inconsistent within the season. There are more NECVs from 1979 to 1985 and fewer from 1986 to 1992 in May; more from 1979 to 1992 and fewer from 1993 to 2018 in June; more from 1980 to 1991 and fewer from 1992 to 2000 in July.

* 资助课题: 国家重点研发项目(2018YFC1507101、2018YFC1505602)。

作者简介: 黄璇, 主要从事气候变化和预测的研究。E-mail: xuanhnuist@126.com

通信作者: 李栋梁, 主要从事气候动力学与气候变化研究。E-mail: lidl@nuist.edu.cn

Key words Northeast China cold vortex (NECV), Objective identification, Initial position

摘要 东北冷涡是中国东北地区重要的天气系统,采用欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA-Interim一日4次再分析资料,并改进现有的客观识别方法,将分析天气图的思路运用于对冷涡的客观识别中,检索出1979—2018年夏季(5—8月)516个东北冷涡过程。为了研究冷涡生成位置的差异,以45°N线为X轴,125°E线为Y轴将研究区划分为4个象限。结果表明:夏季东北冷涡生成位置以第2象限(西北部)最多,第4象限(东南部)最少,冷涡以向东移动为主。夏季东北冷涡的平均生命期为3.2 d,各象限生成的冷涡平均生命期有较大差异,第2象限最长,平均约为3.5 d;第4象限最短,平均约为2.9 d。72.1%的冷涡过程生命期少于4 d。夏季各月第2象限生成的冷涡频数均远多于其他3个象限,且具有很明显的逐月递减的季节内变化特征。东北冷涡的生成位置和频数具有明显的年代际变化,5月,1998—2007年偏北,2008—2018年偏南;6月,1980—1998年南移,2008—2018年北移,1993—2003年以偏东为主,2004—2018年以偏西为主;7月,1998—2010年北移,1985—2000年偏西,2005—2012年偏东;8月,2002—2010年偏北,2009—2018年偏东。就频数而言,特别是第2象限生成的冷涡,其年代际变化在季节内存在明显不一致,5月,1979—1985年冷涡偏多,1986—1992年冷涡偏少;6月,1979—1992年偏多,1993—2018年偏少;7月,1980—1991年偏多,1992—2000年偏少。

关键词 东北冷涡, 客观识别, 生成位置

中图法分类号 P467

1 引言

切断低压(Cut Off Lows, COLs)是对流层中高层的闭合系统,由西风槽加深后向低纬度完全分离而形成,是一种深厚的高空冷性低涡。东亚与北美、欧洲同为全球切断低压的3大频发区(Nieto, et al, 2005)。东北冷涡(Northeast China cold vortex, NECV)则是发生在中国东北及其邻近地区具有持续性及准静止性的切断低压。陶诗言(1980)指出,东北低压或冷涡是中国暴雨主要的大气环流形势之一,常造成中国东北与华北北部的暴雨和雷阵雨天气。1998年松嫩流域特大洪涝灾害(孙力等, 2002; 蒋大凯等, 2012)和2008年5月辽宁地区连阴雨天气(吴艳青等, 2009)的主要影响系统就是反复出现且维持的东北冷涡。尽管东北冷涡的时间尺度为天气尺度,但是频繁的冷涡活动不仅影响到中、短期天气,也对短期气候有较大的影响,能引起明显的月、季气温和降水异常,具有显著的“气候效应”(何金海等, 2006; 胡开喜等, 2011)。东北冷涡的天气、气候效应不仅具有局地性、也具有非局地性特征,对中国东部的降水、气温都有重要的影响。蒙远文(1983)指出,当东北冷涡周围的流场具备一定的环流特征时,在东北冷涡后部的偏北气流引导下,冷空气会以“东灌”的形式影响广西;朱平盛(1986)认为东北冷涡是初夏造成山东强对流天气的主要系统之一;张国宏等(2010)发现东北冷涡与6月中国西南地区的降水和气温均为负相关关

系;胡开喜等(2011)指出,在东北冷涡活跃的夏季,长江流域往往降水显著偏多,而冬季东北冷涡频繁活动时,中国大部分地区往往低温少雨;刘慧斌等(2012)认为东北冷涡的活动对中国东部雨带位置有重要的调制作用。

对于冷涡的识别,主要分为主观识别和客观识别两大类。主观识别方法主要运用逐日(24 h一次)的高空天气图进行人工识别。Price等(1992)、Kentarchos等(1998)在识别200 hPa的切断低压时就运用了主观识别的方法;孙力等(1994)、吴艳青等(2009)在识别东北冷涡时也运用主观识别方法。但主观识别方法难以完全重复,且耗时费力,所以往往研究时段及研究范围较为局限(Qi, et al, 1999)。客观识别则是基于等压面上位势高度、温度、风等数据,运用计算机技术对冷涡进行自动识别。随着观测资料及再分析资料的日益完善,以及计算机技术的发展,已有学者将客观识别方法运用于东北冷涡的研究中。张丰启(2001)基于位势高度,采用“8点法”对东北冷涡低值中心进行了判识;张国宏等(2010)同样基于位势高度,运用“三圈法”进行冷涡的判定。然而,上述两种仅基于位势高度的客观识别方法忽略了东北冷涡的冷性和环流特征。蒋大凯等(2012)综合了位势高度与风场、温度场等要素,对1961—2010年的冷涡进行了识别与追踪,但选取的冷涡活动范围相对较小,对冷涡过程追踪时仅规定中心所在经度连续,对其纬度的变化不作要求,王承伟等(2012)将Nieto等(2005)

识别北半球 200 hPa 冷涡的方法应用于 500 hPa 中国东北冷涡中心的识别, 利用代表温度梯度变化的暖锋参数等约束条件对东北冷涡进行识别, 并应用 Bell 等(1989)的方法对其进行轨迹追踪, 该方法考虑了东北冷涡的冷性特征及闭合低压环流特征, 并较好地实现了对同一个冷涡过程的追踪, 但其判定闭合环流时仅规定备选点的北部有 2 个相邻格点的纬向风为偏东风或静风, 条件不够充分。现有的客观识别方法似乎抓住了冷涡的基本特征, 相比主观识别效率有了很大的提高, 但其天气学意义及准确度还有待提高。文中将主观识别中分析天气图的思路运用于对冷涡的客观识别中, 结合两种识别方法的优势, 使用时间精度更高(6 h 一次)的资料, 以期在自动识别的同时提高其准确度。

许多学者(孙力等, 2000; 胡开喜等, 2011; 蒋大凯等, 2012)研究表明, 中国东北冷涡发生的频数和活动的天数等具有明显的年际和年代际变化特征。孙力等(1994)统计了 1956—1990 年 4—10 月的冷涡过程, 发现冷涡过程平均持续 3.9 d, 每次持续时间以夏季(6—8 月)最长, 达 4.1 d, 认为东北冷涡具有一定的准静止性。冷涡的持续性和准静止性是其对天气造成影响的关键(孙力等, 1994; 朱占云等, 2010; 杨涵洧等, 2012)。虽然东北冷涡属于高空系统, 但它的发展变化与东北地区的大地形也有十分密切的关系(孙力等, 1994)。谢作威等(2012)指出东北冷涡出现天数的极大值在地理上有 2 个中心, 一个位于大兴安岭的古利牙山, 另一个在小兴安岭以北的黑河。刘慧斌等(2012)指出, 冷涡中心在(40°—50°N, 120°—130°E)有分布极值。孙力等(1994)曾注意到冷涡活动位置的重要性, 按照东北冷涡活动位置的不同纬度将其分成北涡、中涡和南涡, 发现 3 类冷涡在发生频数、变化特征及月际特征上均有很大差异, 造成的天气变化也有很大差别, 蒋大凯等(2012)也曾分析东北冷涡对辽宁气温造成的影响。张宇等(2018)分析认为, 2017 年中国内蒙古中东部、东北、华北、黄淮区域的干旱与东北冷涡位置异常偏东有关。上述对冷涡位置的分类主要考虑了冷涡位置的南北差异, 实际上, 东西差异也是很重要的。文中将东北冷涡活动的区域按照数学方法结合地形划分成 4 个象限, 并按照每次冷涡生成位置的经度和纬度进行分类, 分别探讨不同象限生成的冷涡特征。由于夏季是

东北冷涡最活跃的季节, 因此着重对发生于夏季(5—8 月)的东北冷涡进行讨论。

2 资料与方法

(1) 针对东北冷涡的客观识别, 采用 ECMWF 提供的 ERA-Interim 1979—2018 年夏季(5—8 月, 下同)每日 4 次(02、08、14、20 时, 北京时, 下同)的 500 hPa 高度场、温度场以及 u, v 风场再分析资料, 水平分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 。这里采用时间精度为 6 h 的资料, 对于识别和追踪冷涡更为客观和有效, 不易遗漏冷涡系统(Blender, et al, 2000)。

(2) 运用线性回归, 显著性检验, Mann-Kendall 突变检验, 功率谱分析等统计分析方法。

3 东北冷涡的客观识别

3.1 识别标准

关于东北冷涡的定义, 如今应用比较广泛的是孙力等(1994)所使用的东北冷涡天气学定义。但由于研究目的不同等各方面原因, 学者们在研究中所定义的东北冷涡标准仍有所不同, 主要分歧在于冷涡的活动区域和生命期。例如胡开喜等(2011)认为东北冷涡的活动区域为(30°—65°N, 100°—150°E), 生命期至少 2 d; 吴艳青等(2009)选取的冷涡活动区域为(35°—60°N, 115°—135°E), 生命期至少 3 d。

文中对东北冷涡的定义依然沿用孙力等(1994)的思路, 但将其规定的冷涡活动区域取为(35°—60°N, 110°—145°E), 6 h 检测一次, 尽可能避免遗漏对中国东部夏季降水产生影响的东北冷涡。另外, 由于文中选取资料的时间分辨率更高, 连续性更好, 故要求一次冷涡过程至少维持 2 d(8 个时次)即可, 要求: 500 hPa 天气图上至少能分析出一条闭合等高线(以 40 gpm 为间隔, 下同), 并有冷中心或明显冷槽配合的低压环流系统; 冷涡中心出现在(35°—60°N, 110°—145°E)内; 冷涡在上述区域内的生命期 ≥ 8 个时次(每两个时次间隔 6 h, 下同)。

具体识别方法如下:

(1) 参照张丰启(2001)的“8 点法”, 寻找出位势高度低值点。如图 1, 若点 P 的位势高度(H_0) (单位: dagpm, 下同)比周围相邻的 8 个格点都低, 则将 P 点确定为一个位势高度低值中心。

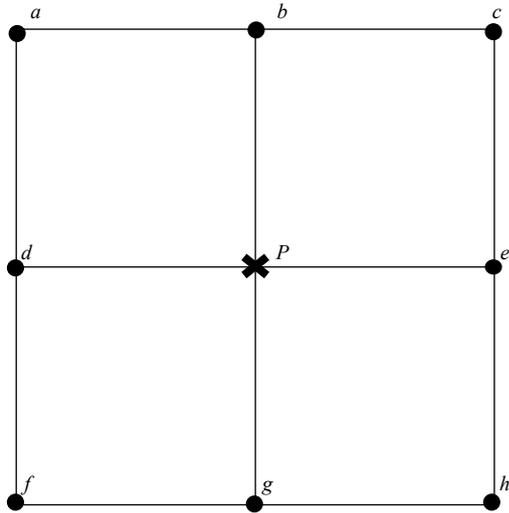


图 1 冷涡位势高度低值中心识别示意

Fig. 1 Diagram of lowest geopotential height at the surrounding grids of the cold vortex

(2) 结合台站业务中天气学分析的方法, 判断在低值中心 P 处是否能至少分析出一条闭合等高线。如图 2a 和 b 分别列出了闭合等高线的 2 种不同情况, 其中, 图 2a 为闭合等高线完全处于冷涡识别范围内, 图 2b 为闭合等高线处于冷涡识别范围边界, 这 2 种情况均视为在低值中心 P 处分析出了至少一条闭合等高线。判断方法如下: 若点 P 处存在闭合等高线, 则按照台站业务中分析天气图的规则, 计算其最内圈的等高线 (L) 所对应的位势高度值 (H_L)

$$H_L = 500 + 4 \times [(H_0 - 500) / 4] \quad (1)$$

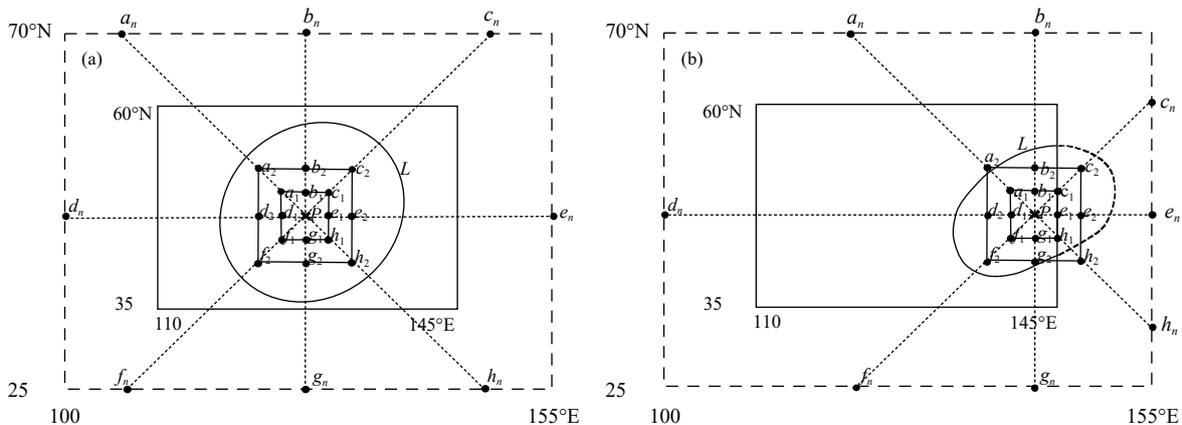


图 2 冷涡闭合等高线的识别示意

(a. 闭合等高线完全处于冷涡识别范围内, b. 闭合等高线处于冷涡识别范围边界)

Fig. 2 Diagram of recognizing the closed contour of the cold vortex (a. the closed contour is completely within the identification range of the cold vortex, b. the closed contour is at the boundary of the identification range of the cold vortex)

式中, $\lceil x \rceil$ 表示向上取整, 即取大于等于 x 的最小整数。由点 P 向其周围 8 个方向 (东、南、西、北、东北、东南、西北、西南) 延伸, 若在 $(25^\circ\text{--}70^\circ\text{N}, 100^\circ\text{--}155^\circ\text{E})$ 内 (较搜索区域分别向东、南、西、北 4 个方向拓宽 10° , 以便找出边界处的冷涡中心) 这 8 个方向上均能寻找到一个格点, 使得该点的位势高度 $H \geq H_L$, 则认为在天气图分析过程中, 点 P 周围 8 个方向上均有一个格点与点 P 之间能通过该等值线 L , 等值线 L 可闭合。此时, 则认为点 P 为一个潜在的冷涡中心。需要注意的是, 闭合等高线内, 若出现位势高度值低于 H_0 的格点, 则说明该闭合等高线内, 点 P 不是位势高度最低处, 应舍去。

(3) 判断潜在的冷涡中心 P 处是否存在气旋式环流: 如图 3, 在低值中心 P 周围的 8 个格点中, 若北面至少有一个格点风速 $u \leq 0$, 南面至少有一个格点风速 $u \geq 0$, 东面至少有一个格点风速 $v \geq 0$, 西面至少有一个格点风速 $v \leq 0$, 则认为点 P 处有气旋性环流。

(4) 冷中心或温度槽判定: 方法同 (1)、(2), 但使用温度场资料, 等温线间隔为 4°C 。

(5) 若同时满足 (1)、(2)、(3)、(4) 中的条件, 则将点 P 视为一个冷涡中心。

(6) 冷涡追踪, 判定冷涡过程: ① 相邻两个时次的冷涡中心, 经向移动距离不超过 5 个纬度; 纬向距离, 向西不超过 5 个经度, 向东不超过 10 个经度, 则视为同一个冷涡过程。② 如图 4 所示, 虚线环流处为前一时次的冷涡 P_1 , 实线环流处分别为当

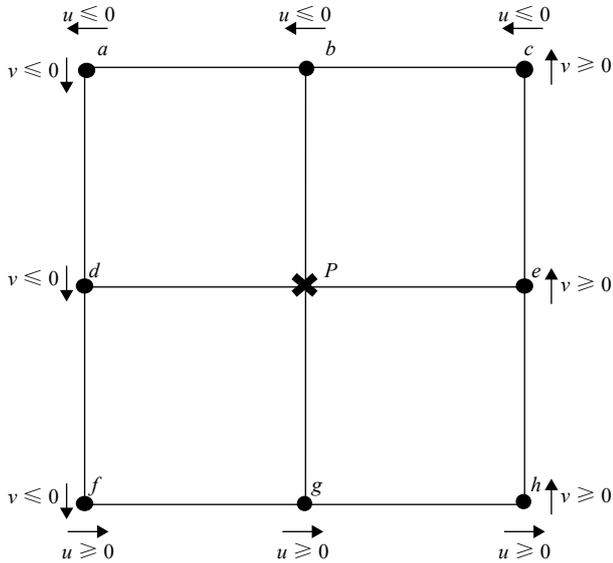


图 3 判断冷涡气旋性环流示意

Fig. 3 Diagram of identifying the cyclonic circulation of the cold vortex

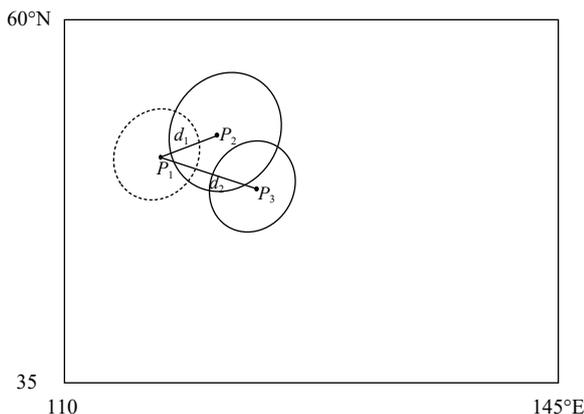


图 4 冷涡追踪示意

Fig. 4 Diagram of tracing the cold vortex

前时次的两个冷涡 P_2 和 P_3 , 且 P_1 移动至两个冷涡 P_2 和 P_3 的距离均符合前述追踪冷涡的条件, 则比较该移动距离 d_1 和 d_2 , 若 $d_1 \leq d_2$, 则认为只有冷涡 P_2 是由前一个时次的冷涡 P_1 移动所至, 冷涡 P_1 和 P_2 属于同一个冷涡过程。

通过与已有对东北冷涡的客观识别方法的比较, 文中在张丰启“8点法”(张丰启, 2001)对冷涡低值中心判断的基础上, 参照了业务天气图冷涡分析及蒋大凯等(2012)、王承伟等(2012)的工作, 综合考虑了东北冷涡位势高度场、温度场、风场等要素特征, 对冷涡过程进行追踪, 在具体的识别标准和步骤上进一步优化, 主要体现在以下几方面:

(1)资料选取的时间分辨率更高。冷涡识别的准确度很大程度取决于资料的时、空分辨率, 文中所使用资料的时间精度为 6 h, 相比于前人普遍使用的 24 h 一次观测资料或日平均资料而言, 能更精确地抓住冷涡系统的生消变化, 不易遗漏系统。

(2)判断在 500 hPa 天气图上能否分析出闭合等高线时, 严格遵循业务天气图分析的规则, 按照 40 gpm 的间隔寻找低值中心周围最内圈的一条等值线, 符合业务预报中分析冷涡系统的要求, 并在其周围 8 个方向上都保证有大于该等值线数值的点, 以最大程度确保该等值线能够闭合。改进了前人识别方法中只是寻找出位势高度的低值点, 仅对其周围风向做出要求, 并不能确切寻找出闭合等值线的技术。

(3)对于风场条件, 王承伟等(2012)只规定了低值中心北部 2 个点的纬向风方向, 蒋大凯等(2012)也只规定了其北侧和南侧共 6 个点上的纬向风方向, 而文中对低值中心东、南、西、北 4 个方向的风向均做出要求, 更好地保证了其满足气旋性环流的特征。

(4)在追踪冷涡(即判断连续 2 d 的冷涡是否为同一个冷涡过程)时, 蒋大凯等(2012)只考虑了相邻 2 d 冷涡系统的经度是否连续, 却未考虑其纬度是否连续, 且未明确给出判断“连续”与否的标准。王承伟等(2012)给出了移动距离的范围。然而同一天出现的多个冷涡系统中, 可能有不止一个冷涡系统符合该条件(如图 4 给出的可能情况), 但究竟哪一个冷涡是由前一个时次的冷涡移动而来的, 并未给出明确的判别标准, 文中针对这种可能出现的情况(图 4), 在识别方法中进行了改进, 详见前面识别方法第(6)条第②点。

3.2 识别结果及其验证

依据以上冷涡识别的方法, 统计识别出的 1979—2018 年夏季 516 个东北冷涡过程列成东北冷涡年表(表 1 为部分结果), 生成(结束)时间表示为 YYYYMMDDHH BT, 其中 YYYY 表示年份, MM 表示月份, DD 表示日期, HH 表示小时, BT 表示北京时; 生成(结束)位置用经纬度表示。

吴艳青等(2009)采用主观识别方法对 2008 年 5 月的冷涡进行了识别, 结果如表 2 所示(表中 DD—DD, 表示开始日期—结束日期)。表 3 列出了

表1 1979—2018年5—8月东北冷涡年表
Table 1 Chronological table of NECV in the summers (May to August) from 1979 to 2018

| 序号 | 生成时间 | 生成位置 | 结束时间 | 结束位置 |
|-----|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 | 1979050408 BT | (52°N, 110°E) | 1979050620 BT | (54°N, 126°E) |
| 2 | 1979050708 BT | (55°N, 139°E) | 1979050902 BT | (59°N, 140°E) |
| 3 | 1979050814 BT | (55°N, 119°E) | 1979051020 BT | (60°N, 133°E) |
| 4 | 1979051020 BT | (48°N, 133°E) | 1979051520 BT | (44°N, 132°E) |
| 5 | 1979051508 BT | (42°N, 115°E) | 1979051808 BT | (44°N, 138°E) |
| ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ | ⋮ |
| 512 | 2018061114 BT | (60°N, 127°E) | 2018061614 BT | (55°N, 120°E) |
| 513 | 2018071214 BT | (52°N, 113°E) | 2018071408 BT | (54°N, 121°E) |
| 514 | 2018080520 BT | (60°N, 131°E) | 2018080802 BT | (58°N, 145°E) |
| 515 | 2018081714 BT | (59°N, 111°E) | 2018082108 BT | (57°N, 126°E) |
| 516 | 2018082402 BT | (42°N, 121°E) | 2018082602 BT | (46°N, 129°E) |

表2 2008年5月东北3种类型冷涡出现日期(吴艳青等, 2009)
Table 2 Occurrence dates of three types of NECV in May of 2008(Wu, et al, 2009)

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 北涡 | 04—06 | — | — | — | 15—17 | — | — | — | — | 31 |
| 中涡 | — | 06—08 | 09—11 | — | — | 18—20 | 21—23 | 24—27 | 27—30 | — |
| 南涡 | — | — | — | 12—14 | — | — | — | — | — | — |

表3 2008年5月东北冷涡出现时间(本文)
Table 3 Times of NECV occurrence in May of 2008

| 序号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|------|------|------|------|------|------|------|
| 开始 | 0402 | 0608 | 0914 | 1520 | 2314 | 2702 | 2820 |
| 结束 | 0608 | 0908 | 1514 | 2102 | 2702 | 2902 | 3120 |

本文对该时期7个冷涡的识别结果。由于文中识别的结果精确到6 h, 故将其表达为DDHH的形式, DD为日期, HH为小时。

将文中的识别结果(表3)与吴艳青等(2009)的结果(表2)比较发现, 两者有所不同。主要原因包括:(1)表2识别冷涡时将其分为北涡、中涡、南涡3类, 部分冷涡被分解为两个过程, 故而冷涡过程数较多。如表3中的冷涡过程3(9日14时—15日14时), 在表2中被分解为过程3(9—11日)与过程4(12—14日); 表3中的冷涡过程4(15日20时—21日02时), 在表2中被分解成过程5(15—17日)与过程6(18—20日)。(2)冷涡搜索范围不同。表2选取的冷涡范围为(35°—60°N, 115°—135°E), 相比表3, 范围略小。表3中过程3(9日14时—15日14时)的冷涡中心于15日02时移至139°E, 过程4的冷涡中心于21日02时移至143°E, 均超出了表2选取的范围, 故未被其统计。(3)所用资料的时间分辨率不同, 表2识别冷涡使用的是日资

料, 表3所用资料的时间精度为6 h。表2中的过程8(24—27日)对应于表3中的过程5(23日14时—27日02时), 但由于表2使用的是日资料, 可能遗漏了23日14及20时的冷涡中心, 将24日作为该过程开始的时间。

综合考虑以上因素, 将两者识别结果进行比较分析, 发现仍然存在差异。表2识别的冷涡过程7(21—23日), 表3未识别出。图5a为22日02—20时500 hPa温、压场, 可以发现该4个时次中, 只有02时在长白山以西有一个冷涡, 之后便已消亡, 该过程生命史过短, 不符合冷涡过程的定义。表2中27—30日为同一个冷涡过程, 而表3的结果中, 27日02时—29日02时为一个冷涡过程, 28日20时以后的冷涡则为另一个过程。图5b为28日14时—29日08时500 hPa温、压场, 28日14时只在(47°N, 126°E)处有一个冷涡, 20时该冷涡已经很弱, 但在(46°N, 113°E)处又生成了一个新的冷涡, 此时两个冷涡同时存在, 而29日02时以后便只

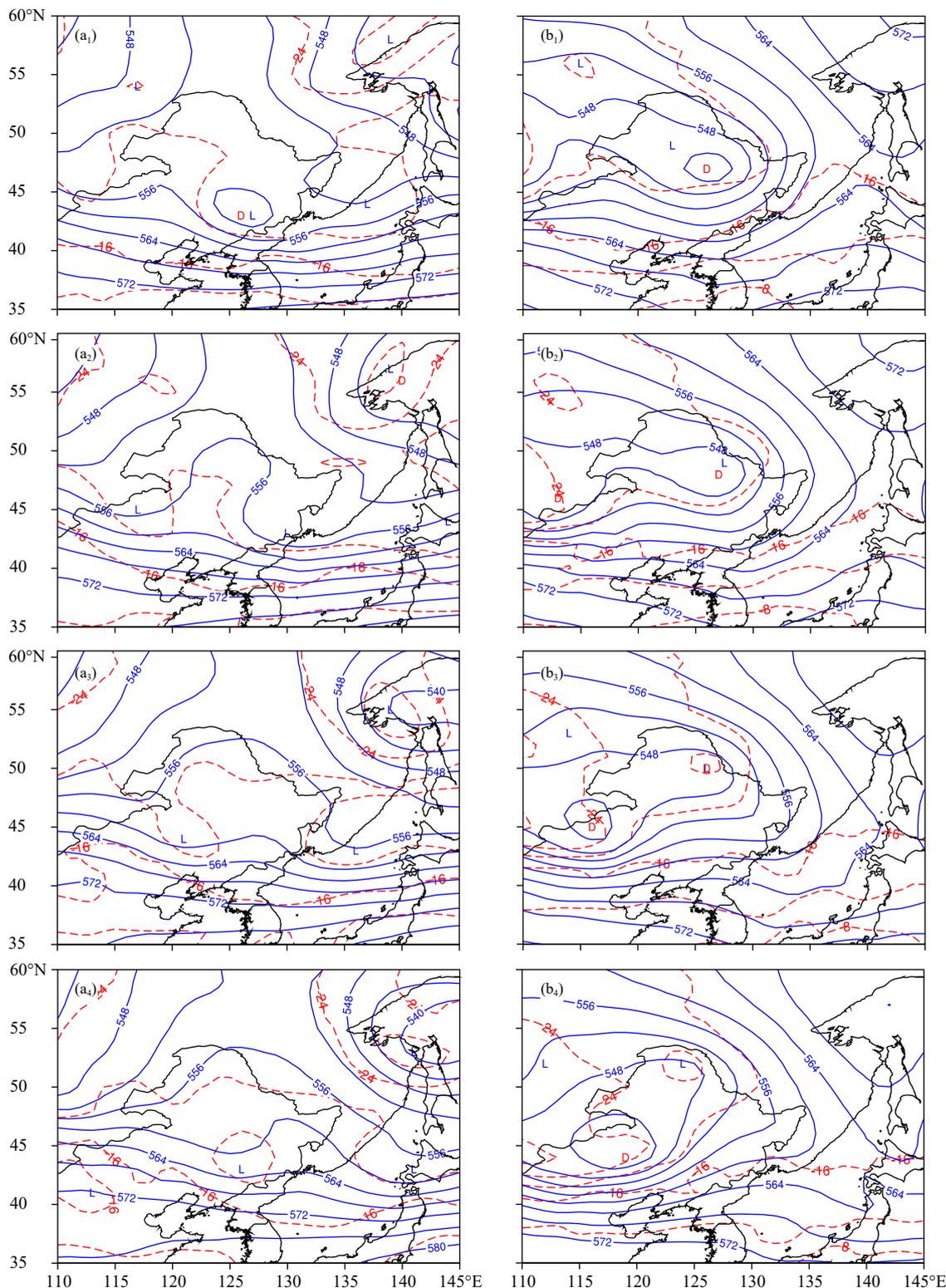


图 5 2008 年 5 月两个典型东北冷涡过程 500 hPa 温、压场
(实线为等高线, 单位: dagpm, 虚线为等温线, 单位: °C; a₁—a₄, 22 日 02—20 时, b₁—b₄, 28 日 14 时—29 日 08 时)

Fig. 5 Temperature and pressure fields at 500 hPa for two typical NECV processes in May 2008
(solid lines are isohypes, unit: dagpm, dashed lines are isotherms, unit: °C; a₁—a₄, from 02:00 to 20:00 BT 22, b₁—b₄, from 14:00 BT 28 to 08:00 BT 29 May 2008)

有西侧新生成的冷涡继续维持,因此表3将其视为两个不同的冷涡过程。

4 东北冷涡的特征

根据冷涡生成位置的平均纬度(50.7°N)和经度(121.5°E),结合中国气象观测站点的分布情况,并考虑东北平原、大兴安岭山脉、长白山山脉等地形因素的影响,对该区域按如下方法进行划分:以45°N线为X轴,125°E线为Y轴,将东北冷涡的识别区域划分为4个象限。从位于右上角的第1象限开始,按逆时针,依次分别为第1(东北部),第2(西北部),第3(西南部)和第4(东南部)象限。如此,大兴安岭山脉被较为完整地划入第2象限内。分象限对冷涡进行讨论可以更好地反映东北冷涡生成位置的特点。

4.1 冷涡生命期

经统计,1979—2018年夏季东北冷涡平均生命期3.2 d(12.8个时次)。夏季各月冷涡平均生命期大致相同,但各象限生成的冷涡却有较大差异。以第2象限生成的冷涡维持时间最长,平均约3.5 d(14.1个时次)。第4象限生成的冷涡维持时间最短,仅约2.9 d(11.4个时次)。就第2象限生成的冷涡而言,又是以6月的平均生命期最长,约4.0 d(16.1个时次);第4象限6月生成的冷涡维持时间最短,仅约2.3 d(9.3个时次)。可见,6月生成于不同象限的冷涡生命期有很大的差异。

文中将生命期长度按维持的时次数划分成6个区间,分别为:[8, 12), [12, 16), [16, 20), [20, 24), [24, 28), [28, +∞),并分析其分布规律(图6)。

统计分析可知,维持时间少于4 d(16个时次)

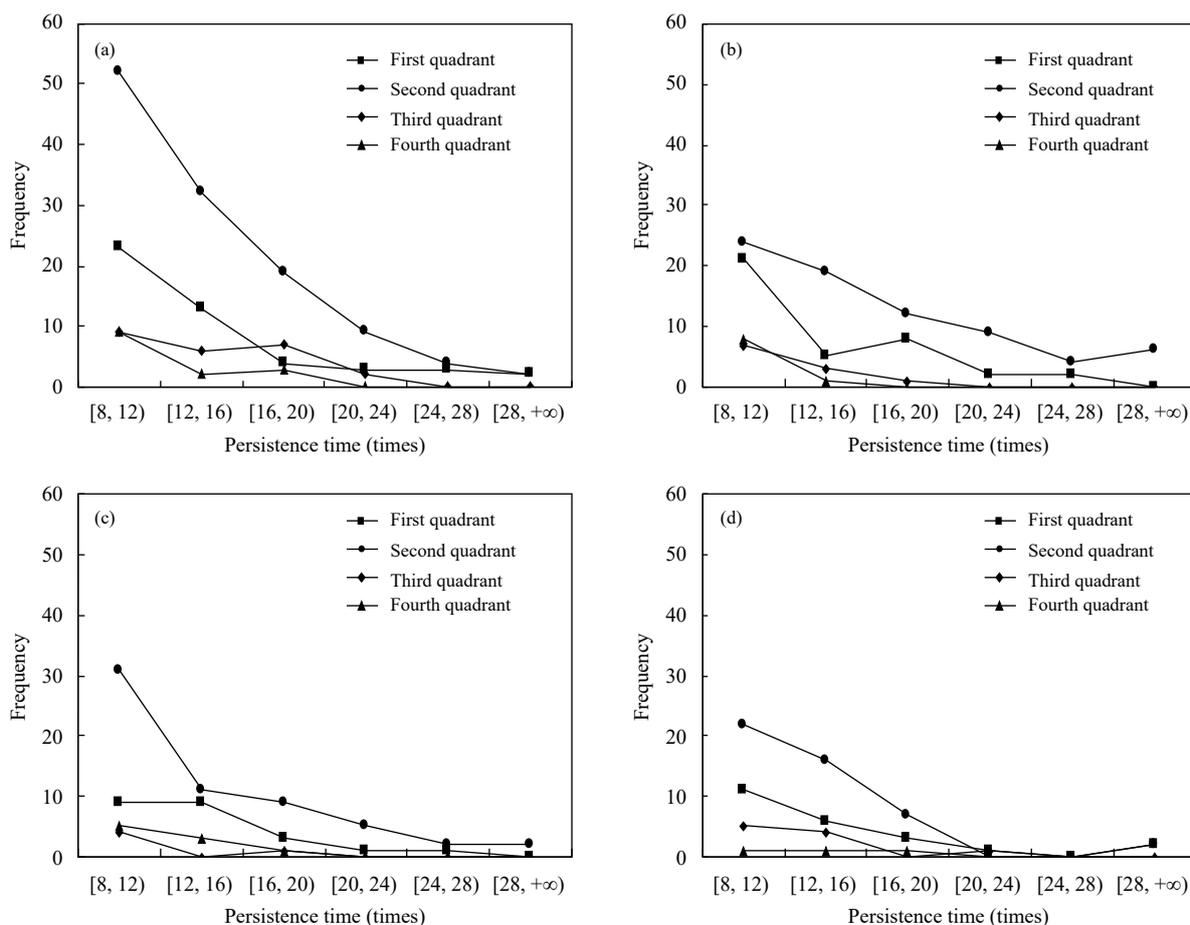


图6 1979—2018年夏季东北冷涡生命期的频数分布

(a. 5月, b. 6月, c. 7月, d. 8月)

Fig. 6 Distribution of the persistence time of the NECV in summer from 1979 to 2018

(a. May, b. June, c. July, d. August)

的冷涡占总数的 72.1%, 特别是第 4 象限 6 月生成的冷涡, 维持时间基本不超过 4 d(16 个时次); 维持时间少于 6 d 的冷涡占总数的 93.8%, 这充分体现东北冷涡属于天气尺度环流系统, 并具有一定的准静止性特征, 与刘刚等(2015)得出的结论一致。从刘刚等(2015)的研究中可以发现, 随着冷涡维持时间的增加, 其发生频次愈发减少。然而文中分象限后发现, 这样的变化规律并不完全适用于每个象限, 例如 5 月第 3 象限以及 6 月第 1 象限生成的冷涡中, 维持时间在[16, 20)的相比于[12, 16)均有所增加。

4.2 冷涡生成位置

4.2.1 冷涡生成位置的空间分布

统计 1979—2018 年夏季识别出的 516 个东北冷涡过程, 将其生成位置标记在图 7 中。可以看出, 夏季各月冷涡生成位置的空间分布都具有西北(第 2 象限)多, 东南(第 4 象限)少的特征。其中, 以第 2 象限生成的冷涡最多, 共 299 个, 占该 40 a 冷涡总数的 57.9%; 第 1 象限次之, 共 132 个, 占 25.6%; 第 3 和第 4 两个象限较少, 分别仅占 9.7% 和 6.8%。

4.2.2 冷涡生成位置的时间变化

图 8 给出了 1979—2018 年每年夏季各月平均东北冷涡生成位置纬度和经度的时间变化特征。就平均状态而言, 夏季各月东北冷涡生成位置存在一定差异, 8 月略偏北(平均位于 51.8°N), 5 月略偏南(平均位于 50.2°N); 6 月略偏东(平均位于 122.9°E), 5 月略偏西(平均位于 120.4°E), 即 5 月生成的东北冷涡位置总体偏西南。从冷涡生成位置的长期线性变化趋势看, 40 a 各象限的冷涡生成位置没有明显的变化趋势。但 1985 年起, 5 月冷涡生成位置有显著南移的趋势, 南移速率为 1.04°/(10 a)(约 115 km/(10 a)), 通过了 90% 的显著性检验。经 Mann-Kendall 突变检验(图略), 近 40 a 夏季各月的冷涡位置变化不存在明显突变。

对近 40 a 冷涡的生成位置做功率谱分析(图略), 5 月, 冷涡的生成位置表现为 5—6 a 的南北振荡以及 2—3 a 的东西振荡; 6 月, 在东西方向和南北方向上均存在 2—3 a 的周期振荡。周期原因将另文讨论。

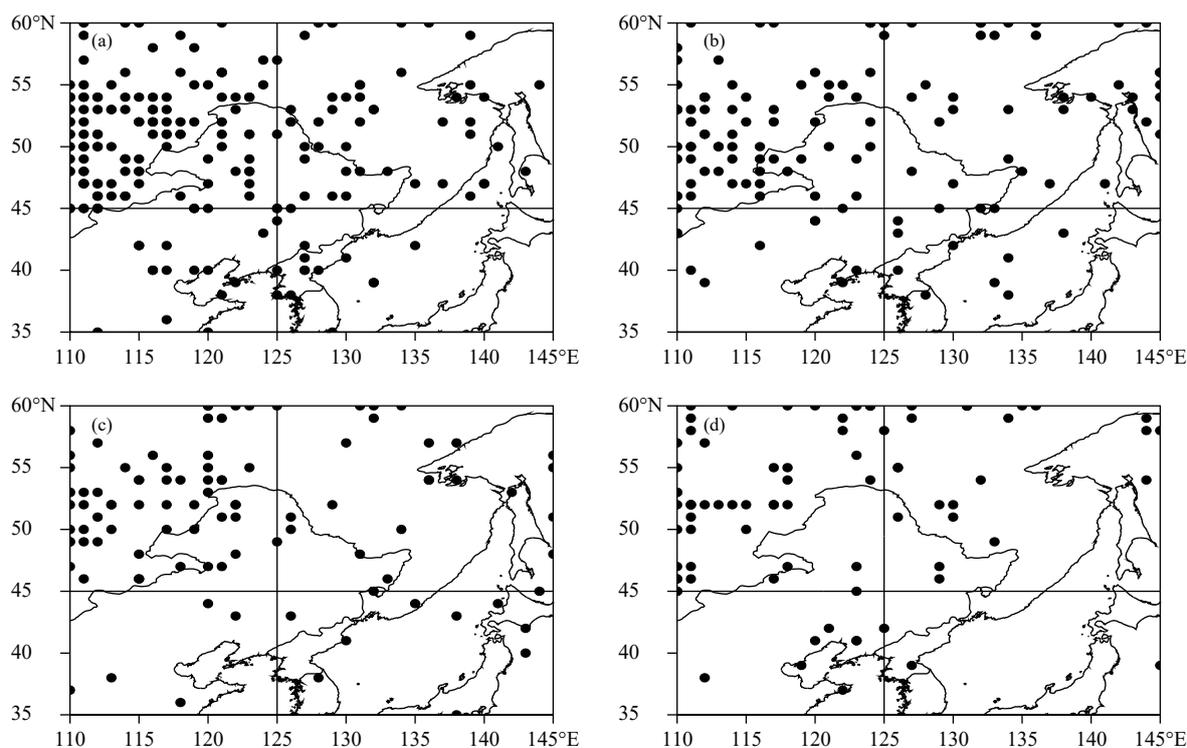


图 7 1979—2018 年夏季各月东北冷涡的生成位置(实线对区域进行划分, 下同)

(a. 5 月, b. 6 月, c. 7 月, d. 8 月)

Fig. 7 Initial positions of NECVs in the summers from 1979 to 2018

(solid line divides the region into quadrants, the same hereafter)(a. May, b. June, c. July, d. August)

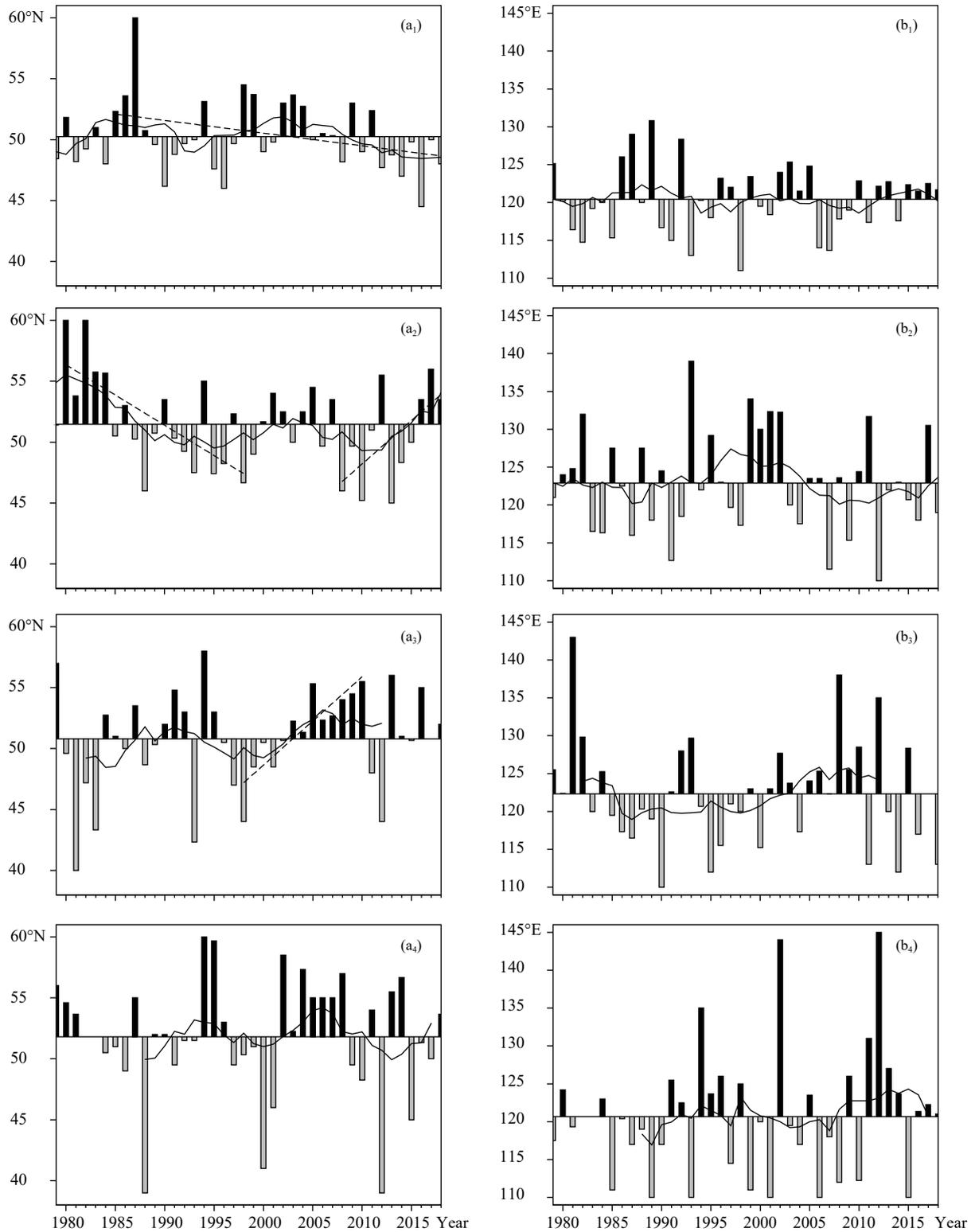


图8 1979—2018年夏季各月平均东北冷涡生成位置(柱状)及其9点滑动平均(折线)
 (虚线表示通过90%显著性检验的线性趋势; a₁—a₄分别为5—8月的纬度变化, b₁—b₄分别为5—8月的经度变化)

Fig. 8 Averaged initial positions of NECVs in the summers from 1979 to 2018 (bar chart) and their nine-point running means (line chart) (dashed line represents the long-term linear trend passing the 90% significance test; a₁—a₄ are latitude changes from May to August, b₁—b₄ are longitude changes from May to August)

东北冷涡生成位置具有明显的年际变化特征。8 月, 其南北最大相差 21 个纬度(约 2300 km): 1988 年仅 1 个冷涡生成, 位于第 3 象限, 因此其生成位置异常偏南, 位于 39°N; 而 1994 年也只有一个冷涡生成, 位于第 1 象限, 故其生成位置异常偏北, 位于 60°N。在 6 月, 冷涡生成位置的的东西差异最大达 29 个经度(约 2100 km): 2012 年仅 2 个冷涡生成, 均位于第 2 象限, 其生成位置异常偏西, 位于 110°E, 而 1993 年也只生成 2 个冷涡, 分别位于第 1、4 象限, 其平均生成位置异常偏东, 平均经度达 139°E。可以发现, 冷涡平均生成位置在其个数偏少时易出现异常, 冷涡位置的异常与各象限生成的冷涡个数有关。

从图 8 中东北冷涡生成位置的 9 点平滑曲线来看, 东北冷涡的生成位置还具有明显的年代际变化特征: 从生成位置的南北变化来看, 5 月在 1998—2007 年偏北, 2008—2018 年偏南; 6 月在 1980—1998

年南移, 2008—2018 年北移; 7 月在 1998—2010 年北移; 8 月在 2002—2010 年偏北。从东西变化来看, 5 月年代际变化不明显; 6 月在 1993—2003 年以偏东为主, 2004—2018 年以偏西为主; 7 月在 1985—2000 年偏西, 2005—2012 年偏东; 8 月在 2009—2018 年偏东。

4.2.3 冷涡的移动方向

东北冷涡的移动方向对天气的影响区域及影响时间都有重要作用。文中用一次冷涡过程始末位置的连线表示该过程冷涡的移动方向, 将其移动方向大致分为 4 类: 向西, 向东, 向东北(含正北), 向东南(含正南)。图 9 为 1979—2018 年夏季各象限生成的东北冷涡移动方向的示意, 并分别统计生成于各象限的冷涡移动方向的百分比。可以发现, 冷涡以向东移动为主, 第 2、3、4 象限向东移动的冷涡均超过了 70%, 而第 1 象限只有 31.8% 的冷涡向东移动, 其向东南方向移动的冷涡却超过了 35%。

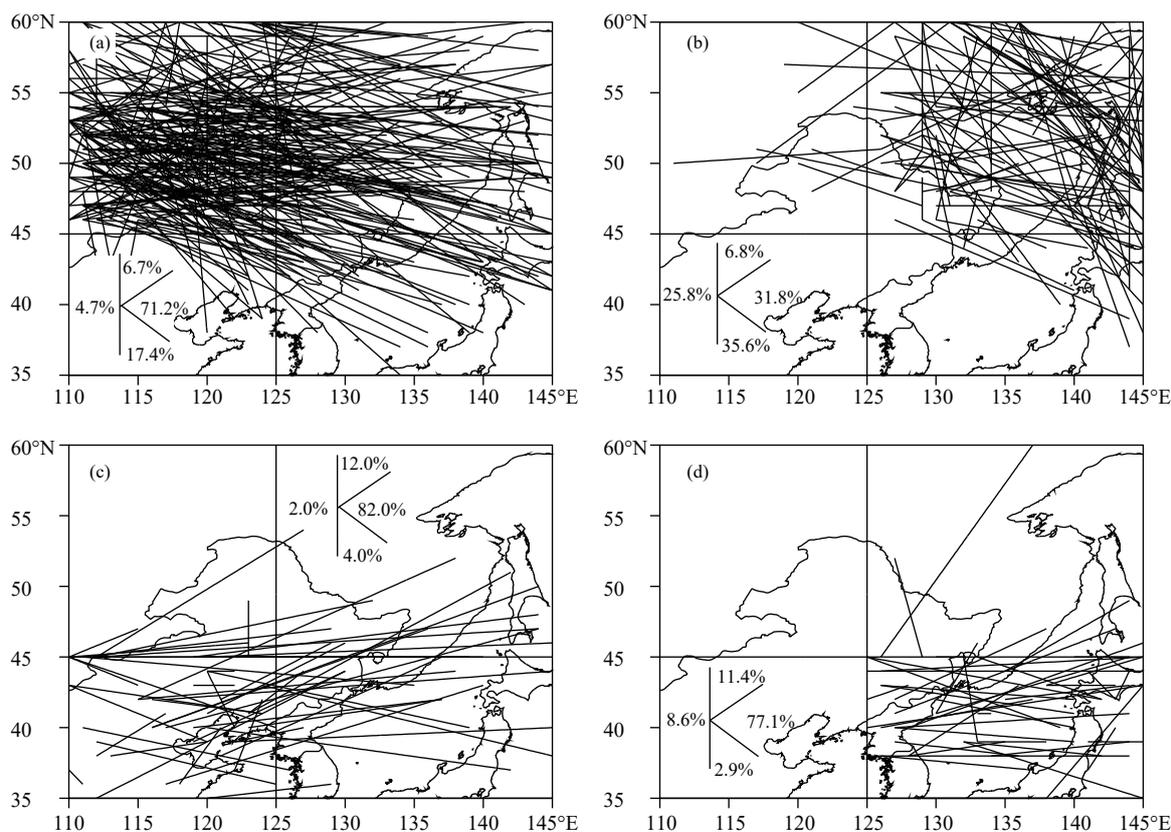


图 9 1979—2018 年夏季各象限生成的东北冷涡移动方向及所占百分比

(a. 第 2 象限, b. 第 1 象限, c. 第 3 象限, d. 第 4 象限)

Fig. 9 Moving directions of NECVs in each quadrant and their percentages in the summers from 1979 to 2018

(a. second quadrant, b. first quadrant, c. third quadrant, d. fourth quadrant)

由表4可知,夏季各月生成的东北冷涡向各方向移动所占比例有很大差异。各月都是以向东移动为主,而向东移动的冷涡以5月最多,其余方向均以7月最多。

表4 1979—2018年夏季各月生成的东北冷涡移动方向所占比例(%)

Table 4 Moving directions of NECVs in the summer months and their percentages in 40 years from 1979 to 2018 (%)

| 移动方向 | 西 | 东 | 东北 | 东南 |
|------|------|------|------|------|
| 5月 | 5.9 | 70.6 | 6.8 | 16.7 |
| 6月 | 13.6 | 59.9 | 3.8 | 22.7 |
| 7月 | 14.4 | 48.5 | 12.4 | 24.7 |
| 8月 | 9.6 | 63.9 | 9.6 | 16.9 |

4.3 不同象限生成的冷涡频数的变化

4.3.1 冷涡频数的季节内变化

从1979—2018年夏季各象限生成的东北冷涡频数逐月变化(图略)可知,5和6月生成的冷涡较多,分别占39.5%和25.6%;7和8月生成的冷涡相对较少,分别占18.8%和16.1%。夏季各月均以第2象限最多,第1象限次之,而第3、第4象限较少。只有7月第4象限生成的冷涡多于第3象限。

第2象限生成的冷涡在各月都远远多于其他3个象限,且具有很明显的逐月递减的变化特征。其中5月生成的冷涡多达118次,占该象限夏季生成冷涡总数的39.5%。

图10反映了1979—2018年5—8月各象限生成的东北冷涡频数,可以看出,相同年份不同月份,同一个象限生成的冷涡频数也存在较大差异。以1982年第2象限生成的冷涡为例,5月有6个,异常偏多,而6、7、8月生成的冷涡却较常年偏少。

4.3.2 冷涡频数的年(代)际变化

从图10中东北冷涡频数随时间的变化情况可以看出,各象限生成的冷涡频数有较大差异。总体

而言,第2象限生成的冷涡最多,尤其是5月,该象限平均有3.0个冷涡生成(表5);第4象限生成的冷涡最少,其中8月平均只有0.1个冷涡生成。由线性变化趋势可以看出,近40 a,各象限生成的冷涡频数均没有显著的线性变化趋势。经Mann-Kendall突变检验(图略),近40 a发生的冷涡频数不存在明显的突变。

通过对冷涡频数的功率谱分析(图略)可知,第1象限5月存在2—3 a和8 a左右的周期振荡,6月具有5 a左右的显著周期,7月表现为8—12 a的周期振荡;第2象限5月存在准6 a的周期振荡;第3象限7月具有6 a左右的显著周期,8月表现为4—5 a的周期振荡;第4象限5月存在6 a左右的周期振荡,6月具有2—3 a的显著周期。

各象限生成的东北冷涡频数有明显的年际变化特征。以第2象限5月为例,1982和2011年均具有6个冷涡,1987年却没有冷涡发生。从表5中近40 a夏季各月冷涡频数的平均值和均方差看出,各月平均值和均方差均以第1、2象限较大,第3、4象限较小。然而,第3、4象限的均方差大于平均值,表明这两个象限冷涡的稳定性更差,比第1、2象限的冷涡更不稳定。如5月第2象限的均方差虽最大,但其与平均值之比仅为0.47;8月第4象限的均方差虽最小,但其与平均值之比为3.0。可见,第1、2象限生成的冷涡频数多,相对稳定。

通过图10中冷涡频数的9点平滑曲线可以看出,各象限生成的冷涡频数还具有较明显的年代际变化特征。由于第2象限生成的冷涡较多,故以此为例进行分析。5月,1979—1985年冷涡偏多,1986—1992年冷涡偏少;6月,1979—1992年偏多,1993—2018年偏少;7月,1980—1991年偏多,1992—2000年偏少。另外值得注意的是,2005—2018年,第3象限7月持续14 a没有冷涡生成。

以 ± 1 个标准差为标准,挑选出第2象限东北冷

表5 1979—2018年夏季各月生成的东北冷涡频数的平均值及均方差

Table 5 Average values and standard deviations of NECV frequency in summer from 1979 to 2018

| | 第1象限 | | 第2象限 | | 第3象限 | | 第4象限 | |
|----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| | 平均值 | 均方差 | 平均值 | 均方差 | 平均值 | 均方差 | 平均值 | 均方差 |
| 5月 | 1.2 | 1.0 | 3.0 | 1.4 | 0.6 | 0.8 | 0.3 | 0.6 |
| 6月 | 0.9 | 0.8 | 1.9 | 1.1 | 0.3 | 0.5 | 0.2 | 0.5 |
| 7月 | 0.6 | 0.8 | 1.5 | 1.0 | 0.1 | 0.3 | 0.2 | 0.4 |
| 8月 | 0.6 | 0.8 | 1.2 | 0.9 | 0.2 | 0.4 | 0.1 | 0.3 |

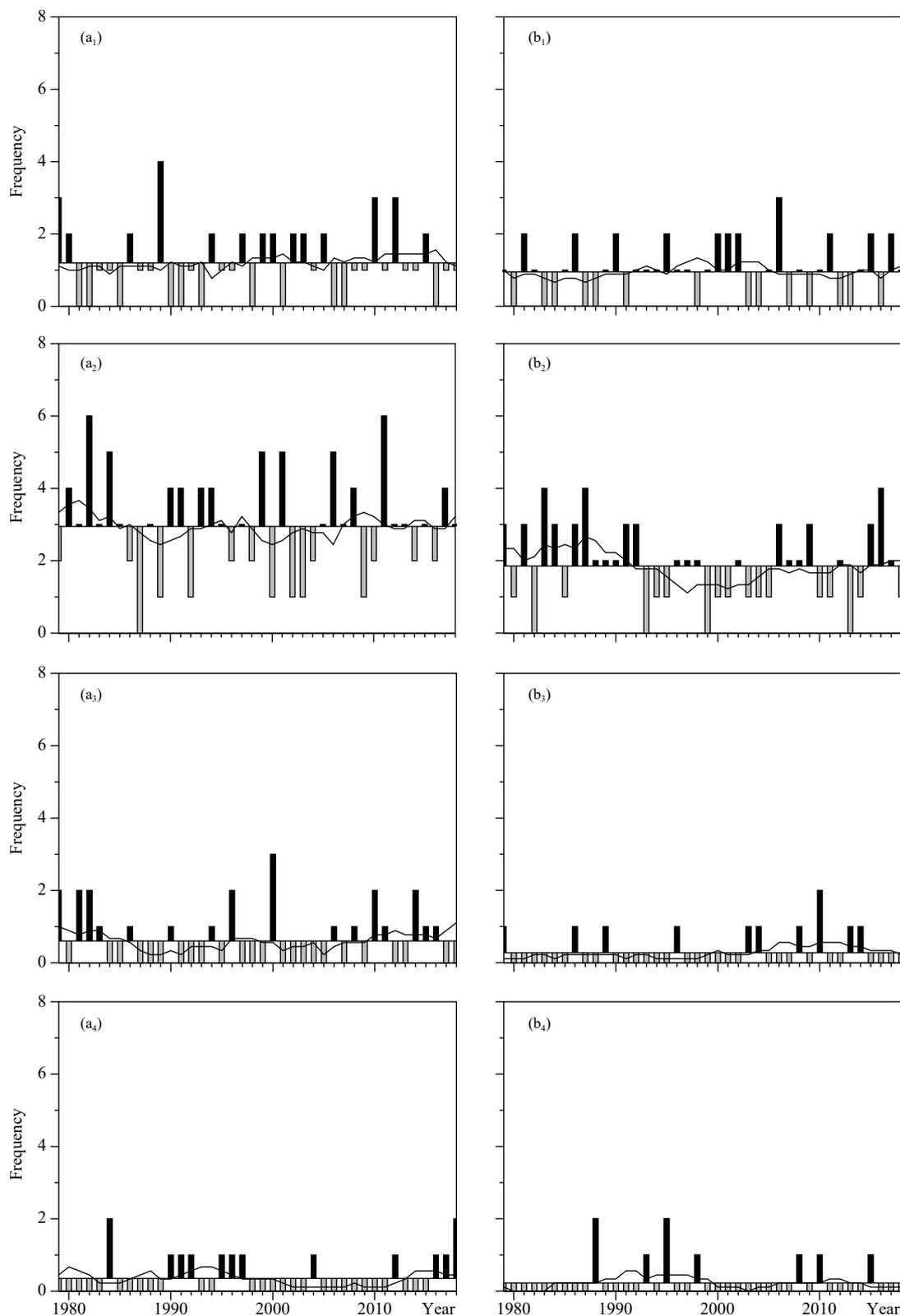
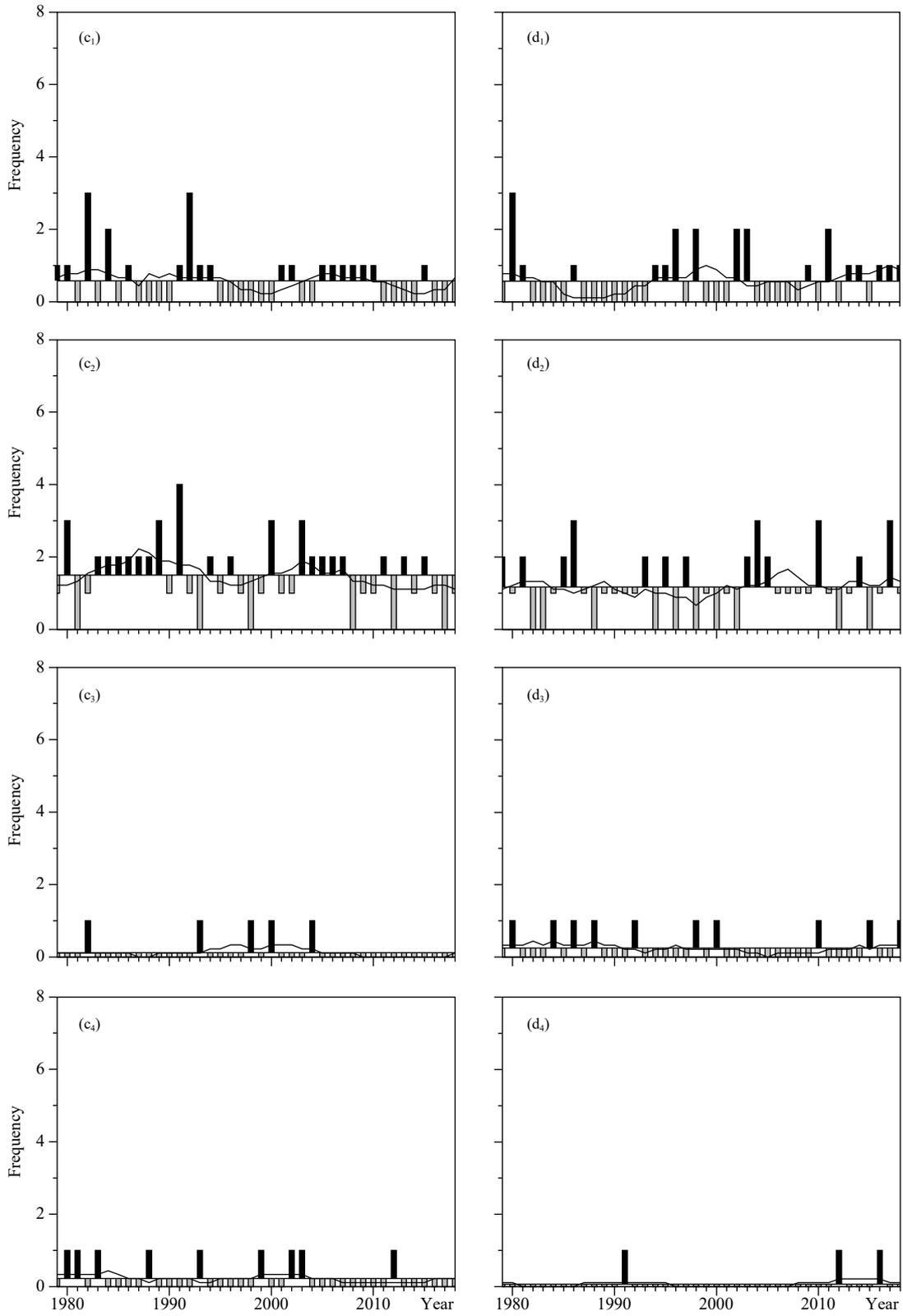


图 10 1979—2018 年夏季各象限生成的东北冷涡频数 (柱状) 及其 9 年滑动平均 (折线)

(下角标数字 1—4 表示第 1—4 象限; a₁—a₄, 5 月, b₁—b₄, 6 月, c₁—c₄, 7 月, d₁—d₄, 8 月)

Fig. 10 NECV frequency in each quadrant in the summers from 1979 to 2018 (bar chart) and its nine-point running mean (line chart) (the columns 1 to 4 represent the first to fourth quadrants respectively; a₁—a₄, May, b₁—b₄, June, c₁—c₄, July, d₁—d₄, August)



续图 10

Fig. 10 Continued

涡异常偏多和偏少的年份,如表 6 所示,分别分析其 500 和 850 hPa 的环流距平场(图 11)。可以发现,无论是高空还是低空,在第 2 象限生成的东北冷涡偏多年,冷涡活动区域的西北部较常年均有气旋性环流及负的温度异常,且西太平洋副热带高压较常年偏强;而在第 2 象限冷涡偏少年,在冷涡活动区域的西北部则为反气旋环流距平场,该区域温度较常年偏高,副热带高压较常年偏弱。

5 结论与讨论

根据东北冷涡的定义,将台站业务中分析天气图的思路运用到客观识别方法中,检索出 1979—

表 6 夏季第 2 象限冷涡异常年的东北冷涡频数
Table 6 NECV frequencies in the second quadrant for abnormal years in summer

| | 年份 | 冷涡频数 | 冷涡频数标准化值 |
|----|------|------|----------|
| 偏多 | 1986 | 10 | 1.43 |
| | 2011 | 10 | 1.43 |
| | 1984 | 11 | 1.99 |
| | 2006 | 11 | 1.99 |
| | 1991 | 12 | 2.56 |
| 偏少 | 1998 | 4 | -1.96 |
| | 2002 | 4 | -1.96 |
| | 2000 | 5 | -1.40 |
| | 2012 | 5 | -1.40 |

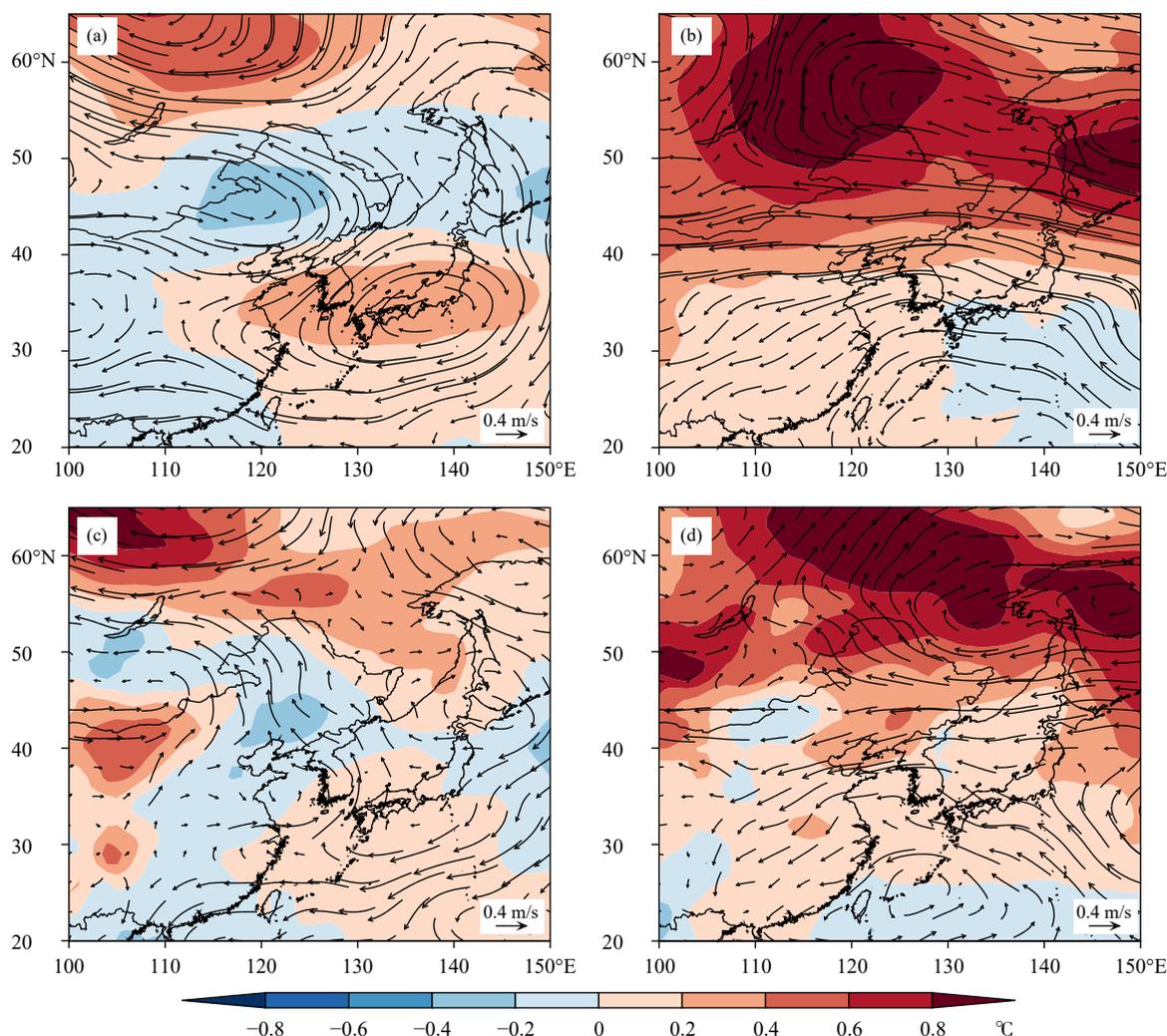


图 11 第 2 象限东北冷涡异常年份温度(色阶,单位:℃)及水平风(箭矢,单位:m/s)距平场
(a, b. 500 hPa, c, d. 850 hPa; a, c. 偏多年, b, d. 偏少年)

Fig. 11 Anomalies of temperature (shaded, unit: °C) and horizontal wind (curly vector, unit: m/s) for years with abnormal NECV activities in the second quadrant
(a, b. 500 hPa, c, d. 850 hPa; a, c. years more than normal, b, d. years less than normal)

2018年夏季(5—8月)的东北冷涡活动过程。以 45°N 线为 X 轴, 125°E 线为 Y 轴,将东北冷涡的活动范围划分为4个象限。按照划分的象限讨论冷涡的位置特征,主要结论如下:

(1)夏季东北冷涡生成位置的空间分布具有西北多,东南少的特点。各象限生成的冷涡以向东移动为主。自1985年起,5月冷涡生成位置有显著南移的趋势。从生成位置的南北变化来看,5月,1998—2007年偏北,2008—2018年偏南;6月,1980—1998年南移,2008—2018年北移;7月,1998—2010年北移;8月,2002—2010年偏北。从东西变化来看,5月,年代际变化不明显;6月,1993—2003年以偏东为主,2004—2018年以偏西为主;7月,1985—2000年偏西,2005—2012年偏东;8月,2009—2018年偏东。

(2)近40 a夏季东北冷涡平均生命期为3.2 d,各象限生成的冷涡平均生命期有较大差异。以第2象限(西北部)最长(3.5 d),第4象限(东南部)最短(2.9 d)。

(3)夏季各月第2象限生成的冷涡频数均远多于其他3个象限,且具有很明显的逐月递减的季节内变化特征。各象限生成的冷涡频数还具有较明显的年代际变化特征,特别是第2象限生成的冷涡,其年代际变化在季节内存在明显不一致,5月,1979—1985年冷涡偏多,1986—1992年冷涡偏少;6月,1979—1992年偏多,1993—2018年偏少;7月,1980—1991年偏多,1992—2000年偏少。另外值得注意的是,2005—2018年,第3象限7月持续14 a没有冷涡生成。

不同位置生成的东北冷涡,其发生的频数以及生命期等都具有不同的特征,那么东北冷涡生成位置的变化是否会对该地区降水的分布产生一定的影响?在更大范围上,其对中国东部其他地区的降水分布又将产生怎样的影响?产生这些影响的大气环流条件又是怎样的?这些问题关系到如何运用东北冷涡生成位置的变化对该地区甚至是是中国东部广泛地区的降水情况作出预测,值得进一步探究。

参考文献

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.科学通报,51(23):2803-2809. He J H, Wu Z W, Jiang Z H, et al.

2006. "Climate effect" of the Northeast cold vortex and its influences on Meiyu. Chinese Sci Bull, 52(5): 671-679
- 胡开喜,陆日宇,王东海.2011.东北冷涡及其气候影响.大气科学,35(1): 179-191. Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate effect. Chinese J Atmos Sci, 35(1): 179-191 (in Chinese)
- 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.气象与环境学报,28(2): 5-9. Jiang D K, Wang J S, Yan Q, 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 Meteor Environ, 28(2): 5-9 (in Chinese)
- 刘刚,廉毅,颜鹏程等.2015.5—8月东北冷涡客观识别分类及北半球大气环流特征分析.地理科学,35(8): 1042-1050. Liu G, Lian Y, Yan P C, et al. 2015. The objective recognition and classification of Northeast cold vortex and the northern hemisphere atmospheric circulation characters in May to August. Scientia Geogr Sinica, 35(8): 1042-1050 (in Chinese)
- 刘慧斌,温敏,何金海等.2012.东北冷涡活动的季节内振荡特征及其影响.大气科学,36(5): 959-973. Liu H B, Wen M, He J H, et al. 2012. Characteristics of the Northeast cold vortex at intraseasonal time scale and its impact. Chinese J Atmos Sci, 36(5): 959-973 (in Chinese)
- 蒙远文.1983.东北冷涡引导冷空气南下影响广西的环流特征.广西气象,(6): 1-4. Meng Y W. 1983. The circulation characters of Guangxi influenced by Northeast vortex leading the cold air southward. J Guangxi Meteor, (6): 1-4 (in Chinese)
- 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.应用气象学报,5(3): 297-303. Sun L, Zheng X Y, Wang Q. 1994. The climatological characteristics of Northeast cold vortex in China. Quart J Appl Meteor, 5(3): 297-303 (in Chinese)
- 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.气象学报,58(6): 704-714. Sun L, An G, Lian Y, et al. 2000. A study of the persistent activity of Northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics. Acta Meteor Sinica, 58(6): 704-714 (in Chinese)
- 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.应用气象学报,13(2): 156-162. Sun L, An G, Gao Z T, et al. 2002. A composite diagnostic study of heavy rain caused by the Northeast cold vortex over Songhuajiang-Nenjiang River basin in summer of 1998. J Appl Meteor Sci, 13(2): 156-162 (in Chinese)
- 陶诗言.1980.中国之暴雨.北京:科学出版社,225pp. Tao S Y. 1980. Rainstorm in China. Beijing: Science Press, 225pp (in Chinese)
- 王承伟,徐海明,任丽等.2012.东北冷涡客观识别方法的研究.气象与环境学报,28(2): 1-4. Wang C W, Xu H M, Ren L, et al. 2012. The objective identification method of Northeast cold vortex. J Meteor Environ, 28(2): 1-4 (in Chinese)
- 吴艳青,阎琦,康晓玉等.2009.2008年5月东北冷涡异常活动特征.气象与环境学报,25(5): 13-17. Wu Y Q, Yan Q, Kang X Y, et al. 2009.

- Anomaly characteristics of persistent activity Northeast cold vortex in May of 2008. *J Meteor Environ*, 25(5): 13-17 (in Chinese)
- 谢作威, 布和朝鲁. 2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流. *气象学报*, 70(4): 704-716. Xie Z W, Bueh C. 2012. Low frequency characteristics of Northeast China cold vortex and its background circulation pattern. *Acta Meteor Sinica*, 70(4): 704-716 (in Chinese)
- 杨涵涌, 封国林, 沈柏竹等. 2012. 中国夏季东北冷涡强度的定量化分析. *大气科学*, 36(3): 487-494. Yang H W, Feng G L, Shen B Z, et al. 2012. The quantitative research on cold vortex in summer over Northeast China. *Chinese J Atmos Sci*, 36(3): 487-494 (in Chinese)
- 张丰启. 2001. 东北冷涡特征及其关键区的计算机识别. *气象*, 27(9): 46-49. Zhang F Q. 2001. Computer recognition of Northeast cold vortex. *Meteor Mon*, 27(9): 46-49 (in Chinese)
- 张国宏, 刘长征. 2010. 东北冷涡的客观识别及监测方法//第27届中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会论文集. 北京: 中国气象学会.
- Zhang G H, Liu C Z. 2010. The objective recognition of Northeast cold vortex and its monitoring method//Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society on Disaster Weather Research and Forecast. Beijing: Chinese Meteorological Society (in Chinese)
- 张宇, 王素萍, 冯建英. 2018. 2017年全国干旱状况及其影响与成因. *干旱气象*, 36(2): 331-338. Zhang Y, Wang S P, Feng J Y. 2018. Drought events and its causes in 2017 in China. *J Arid Meteor*, 36(2): 331-338 (in Chinese)
- 朱平盛. 1986. 东北冷涡下的山东强对流天气. *山东气象*, (3): 36-39. Zhu P S. 1986. Severe convective weather in Shandong under Northeast cold vortex. *J Shandong Meteor*, (3): 36-39 (in Chinese)
- 朱占云, 何金海. 2010. 东北冷涡的特征、影响及其可能机制的研究. *气象与减灾研究*, 33(4): 1-8. Zhu Z Y, He J H. 2010. Study on the characteristics, effect and possible mechanism of Northeast cold vortex. *Meteor Disaster Reduction Res*, 33(4): 1-8 (in Chinese)
- Bell G D, Bosart L F. 1989. A 15-year climatology of northern hemisphere 500 mb closed cyclone and anticyclone centers. *Mon Wea Rev*, 117(10): 2142-2164
- Blender R, Schubert M. 2000. Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions. *Mon Wea Rev*, 128(2): 377-384
- Kentarchos A S, Davies T D. 1998. A climatology of cut-off lows at 200 hPa in the Northern Hemisphere, 1990-1994. *Int J Climatol*, 18(4): 379-390
- Nieto R, Gimeno L, de la Torre L, et al. 2005. Climatological features of cutoff low systems in the Northern Hemisphere. *J Climate*, 18(16): 3085-3103
- Price J D, Vaughan G. 1992. Statistical studies of cutoff-low systems. *Ann Geophys*, 10(1): 96-102
- Qi L, Leslie L M, Zhao S X. 1999. Cut-off low pressure systems over southern Australia: Climatology and case study. *Int J Climatol*, 19(15): 1633-1649