

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. 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 (1): 179–191.

东北冷涡及其气候影响

胡开喜^{1,2,3} 陆日宇^{1,2} 王东海⁴

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100080

2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

3 国家气象信息中心, 北京 100081

4 中国气象科学研究院灾害性天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 基于自动识别、追踪方法得到的近 50 年东北冷涡数据集, 本文研究了东北冷涡的年际变率及演变趋势, 并分析了其持续性活动对我国气候的影响及相关联的大尺度环流异常特征。结果表明, 东北冷涡具有很明显的年际变率, 且存在 2.5 年左右的主振荡周期, 但没有显著的长期变化趋势。东北局地在持续性冷涡控制下, 四季气温均明显偏低, 并在春季和夏季能造成局部降水偏多。在东北冷涡活跃的夏季, 长江流域往往降水显著偏多; 而在冬季东北冷涡频繁活动时, 我国大部分地区往往低温少雨, 这与强盛的东亚冬季风密切相关。研究结果表明, 冬季东北冷涡活动和东亚冬季风强度之间的相关系数达到 99% 的信度水平。在东北冷涡活跃的夏季, 东亚地区对流层维持着深厚的偶极型位势高度异常, 高空急流向南偏移并略加强, 低层西北太平洋反气旋异常和中纬度地区的东风异常有助于局地的水汽通量的辐合, 进而有利于降水的偏多。

关键词 东北冷涡 年际变率 气候影响

文章编号 1006-9895 (2011) 01-0179-13

中图分类号 P445

文献标识码 A

Cold Vortex over Northeast China and Its Climate Effect

HU Kaixi^{1,2,3}, LU Riyu^{1,2}, and WANG Donghai⁴

1 Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 National Meteorological Information Center, Beijing 100081

4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract Based on the long-term dataset of cold vortex over Northeast China derived from automatic method of detection and track, interannual variability of cold vortex over Northeast China, the effect of its persistent activities on regional climate, and the associated large-scale circulation anomalies are investigated. The results show that the cold vortex has a considerable interannual variability, but no significant long-term trends. Persistent activities of cold vortex have a major oscillation with a period of about 2.5 a. Frequent occurrences of cold vortex can cause a significant negative air temperature anomaly over Northeast China for all seasons and lead to more local rainfall in spring and summer seasons. There are likely more rainfalls over the Yangtze River basin when the summer cold vortex is more frequent. In winter when the cold vortex occurs more frequently, most of China experiences lower air tempera-

收稿日期 2010-03-25, 2010-08-09 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40633016、40725016

作者简介 胡开喜, 男, 博士, 主要从事气候变化方面的研究。E-mail: hukaixi@cma.gov.cn

通讯作者 陆日宇, E-mail: lr@mail.iap.ac.cn

ture and less rainfall, which is highly related to strong East Asian winter monsoon. In the summer of more cold vortices, deep dipole-like geopotential height anomaly maintains over East Asia, the upper-level jet stream shifts southward and is strengthened slightly, and the lower-tropospheric anticyclonic anomaly over the western North Pacific and the easterly anomaly over high latitudes facilitate the water vapor flux to be convergent over the Yangtze River basin and Northeast China, respectively.

Key words cold vortex, interannual variability, climate effect

1 引言

在中高纬行星波的发展过程中,高空冷槽不断向南加深,与极地冷源的联系会被低纬暖气团所切断。在纬向平均西风带的南侧,将会形成一个闭合的冷性涡旋中心,这就是切断低压(Palmen and Newton, 1969)。在天气图上,切断低压表现为在对流层中高层上具有冷心或冷槽结构的闭合低压中心。切断低压一般可维持 3~7 天,直至因绝热加热或摩擦过程而消亡(Hoskins et al., 1985)。不少研究都指出,中国北部—西伯利亚是北半球切断低压的最有利发生地区之一(Price and Vaughan, 1992; Kentarchos and Davies, 1998; Nieto et al., 2005)。在我国,最常见的切断低压就是东北冷涡(朱乾根等, 2000)。

当对流层低层有加热时,高层冷涡控制下的大气往往发生很强的对流不稳定,产生暴雨、冰雹等灾害性天气(陶诗言, 1980; 郑秀雅和张廷治, 1992)。由于移动缓慢,冷涡往往可在局地维持数日,这给局地的定量降水预报带来了很大的困难(王东海等, 2007)。例如,不少研究都认为,1998 年夏季松花江—嫩江流域百年一遇的持续性特大强降水与东北冷涡的频繁活动密切相关(张庆云等, 2001; Zhao and Sun, 2007)。在回顾了东北冷涡的发生、发展及其强对流特征的研究进展后,张立祥和李泽椿(2009)指出,需要通过现代化的雷达、卫星等观测设备和数值模拟,研究东北冷涡及其强天气的机制,进而提高东北冷涡天气的预报水平。

东北冷涡是东亚中高纬度地区重要的天气系统,但是它的活动具有群发性、持续性的特征(孙力, 1997)。频繁的东北冷涡活动,能引起明显的气温和降水异常,具有显著的“气候效应”(何金海等, 2006a)。冷涡的持续性活动是造成我国东北地区低温冷害以及谷物减产的主要原因(丁士晟, 1980)。同时,当夏季东北冷涡处于活跃期,东北

地区降水偏多(何金海等, 2006b),甚至能造成大范围区域持续性的强降水(孙力等, 2000)。

对我国东部降水的研究中,对于热带低纬地区的影响因子考虑较多,而对源自于中高纬地区的环流系统研究较少。事实上,包括东北冷涡在内的中高纬度大气环流对东亚季风气候有着同样重要的影响(张庆云和陶诗言, 1998; Li and Wang, 2003; Ju et al., 2005)。最近,一些学者采用东北区域月平均气温定义了一个东北冷涡强度指数(NECVD),研究结果表明,频繁的东北冷涡活动,不仅能显著地影响东北的区域气候异常,而且能引起非局地的气候异常,如江淮梅雨降水(何金海等, 2006a)和前汛期华南降水(苗春生等, 2006)的异常偏多。但是,作为对流层中高层深厚的天气尺度系统,东北冷涡用低层的月平均气温来表征,其准确性、合理性和直观性不够充足。此外,除了夏季之外,东北冷涡在其他季节的频发性是否也有一定的“气候效应”,以前的研究对此并无太多的关注。

采用逐日天气图,一些学者(郑秀雅和张廷治, 1992; 孙力等, 1994)统计分析了多年的东北冷涡气候学特征,结果表明东北冷涡不仅受到中高纬度环流系统如极涡、高空西风急流和阻塞高压的影响,而且还与低纬度的西太平洋副热带高压、赤道辐合带、厄尔尼诺—南方涛动(ENSO)等热带大气环流的异常密切相关(孙力等, 1994, 2000; 蒋尚城等, 2002; 刘宗秀等, 2002)。然而,这种基于天气图的冷涡判定方法耗时费力,而且具有很大的主观性(Gimeno et al., 2007)。

因而, Hu et al. (2010) 采用一种客观、自动的方法来识别并追踪冷涡系统。本文利用这种方法得到的多年东北冷涡数据集来研究其年际变率特征,并分析东北冷涡年际变率所对应的大尺度环流特征及其对区域气候的可能影响。

2 资料与方法

本文所用到的资料如下:

(1) 采用水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 、时间分辨率为 6 小时的 NCEP/NCAR 再分析资料 (Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001)。根据东北冷涡的传统天气学定义 (郑秀雅和张廷治, 1992), 我们设计了自动地识别东北冷涡的算法, 进而建立了一套多年 (1958~2006) 的东北冷涡数据集 (Hu et al., 2010)。关于客观识别东北冷涡的具体方法, 请参考附录。

(2) 在进行合成分析时, 采用 1958~2006 年 NCAR/NCEP 和 ERA-40 再分析资料 (Uppala, 2002) 的月平均水平风场、位势高度、比湿等, 其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

(3) 1951~2006 年中国 160 个气象观测站的月平均气温和月降水量资料 (下载自国家气候中心 <http://ncc.cma.gov.cn> [2010-06-04])。

本文中所用到的分析方法概括如下:
(1) 对冷涡发生频次的时间序列, 采用线性回归和功率谱分析方法, 探究其演变的长期趋势和主振荡周期;

(2) 利用线性相关分析, 研究冷涡活动的年际变率对我国气候的影响;

(3) 选取夏季冷涡典型多发、少发年, 对北半球大气环流场进行合成分析, 揭示在夏季不同冷涡背景下的环流背景特征及其对区域气候影响的可能原因。

3 结果

3.1 东北冷涡活动的年际变化特征

图 1 给出东北冷涡发生天数和发生个数的逐年变化及其长期线性趋势。可以看出, 东北冷涡具有很明显的年际变率特征。例如, 1980 年有 59 个东北冷涡发生, 而在 1964 年仅有 38 个冷涡活跃于东北地区。多年平均上, 大约 49 个冷涡 (225 天) 活跃于东北地区, 因而是影响东亚中高纬地区的重要天气系统之一。同时, 对于冷涡发生个数和发生天数, 二者的演变具有很好的一致性, 相关系数达 0.83, 这说明了冷涡的平均维持期比较稳定。此外, 在 1958~2006 年期间, 逐年冷涡天数和个数均没有显著的增长或减弱趋势, 其长期变化趋势都没有达到 95% 的统计信度水平。

就各个季节来看, 无论是发生天数 (图 2), 还是发生个数 (图 3), 东北冷涡也有相当大的年际变率特征。表 1 列出了东北冷涡发生天数和个数的平均值 (Mean) 及相对标准偏差 (RSD) (即标准偏差与平均值之商)。可以看出, 无论是冷涡的发生天数还是发生个数, 季节相对标准偏差值大约比全年标准偏差值高出一倍。因此, 相对于其气候平均值, 各个季节冷涡的年际变率比全年冷涡的年际变率更加明显。例如, 在春季, 冷涡天数的气候平均值约为 55 天 (图 2a), 但它的变化幅度却非常大,

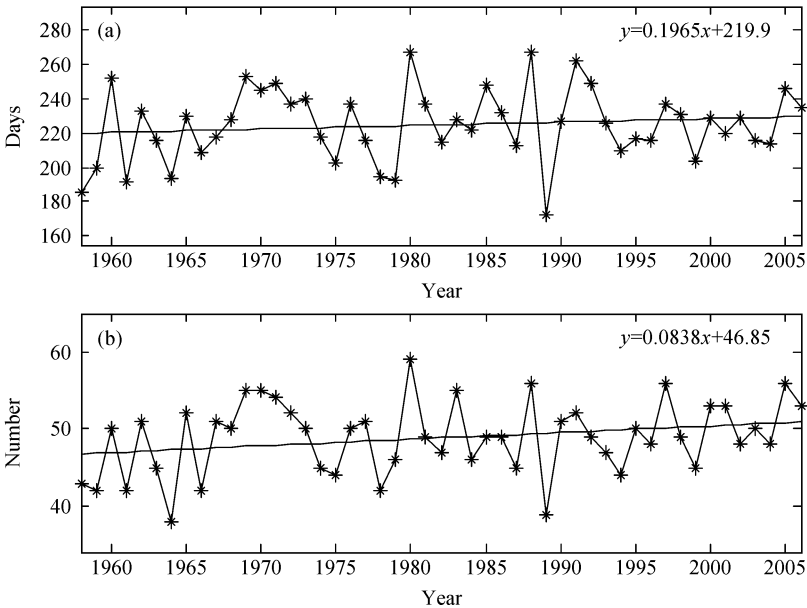


图 1 东北冷涡的逐年发生天数(a)和发生个数(b)及其长期线性趋势(虚线)
Fig. 1 Occurrence days (a) and numbers (b) of cold vortex over Northeast China and their long-term linear trends (dashed lines)

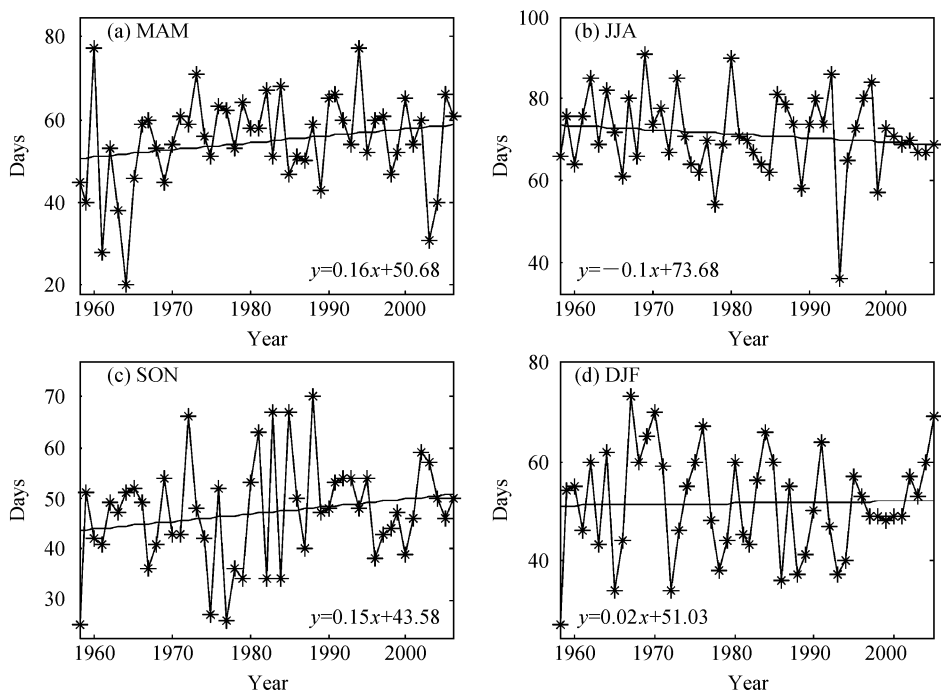


图2 东北冷涡的发生天数及其长期线性趋势(虚线): (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季
Fig. 2 Occurrences days of cold vortex over Northeast China and their long-term linear trends (dashed line) in (a) MAM (Mar - Apr - May), (b) JJA (Jun - Jul - Aug), (c) SON (Sep - Oct - Nov), (d) DJF (Dec - Jan - Feb)

从仅有 20 天(1964 年)可以到接近 80 天(1960 年和 1994 年)。特别地,夏季冷涡天数在大多数年份在 60~90 天内之间,但在 1994 年却低至不足 40 天(图 2b),该年夏季的冷涡个数也是最少的,不足 10 个(图 3b)。

春季冷涡个数有显著的增多趋势,线性趋势为 0.7 个/10 a,达到 95%的信度水平。该季节冷涡天数也有增多的趋势,但未能达到 95%的信度。其余季节冷涡发生天数和个数的长期趋势均没有达到

95%的统计信度。
对全年和各个季节的冷涡发生时间序列进行的功率谱分析表明,东北冷涡的发生存在着显著的振荡周期(表 2)。年冷涡时间序列有一个 2.5 年左右的主周期,也进一步说明了年际变率是东北冷涡发生演变的主时间尺度分量。就季节而言,秋季的 2.5 年主周期通过了 99%的信度,而冬季的冷涡演变以 7.5 年为主。东北冷涡发生频次的两年左右的振荡,是否受到北半球大尺度准两年气候变率模态的影响,值得进一步研究。

表 1 东北冷涡发生个数、发生天数的多年平均值 (Mean) 和相对标准方差 (RSD)

Table 1 Annual mean (Mean) and relative standard deviation (RSD) for occurrence numbers and days of cold vortex over Northeast China on annual and seasonal timescales

	东北冷涡发生个数		东北冷涡发生天数	
	Mean	RSD	Mean	RSD
全年	48.9	10%	224.8	9%
春季	12.4	23%	54.7	21%
夏季	16.1	17%	71.3	14%
秋季	9.9	26%	27.1	22%
冬季	10.6	25%	51.6	23%

表 2 东北冷涡发生个数和发生天数的显著周期
Table 2 Significant periods for occurrence numbers and days of cold vortex over Northeast China

	显著周期/a	
	东北冷涡发生个数	东北冷涡发生天数
全年	2.5 *	2.5 *
春季		2.7 *
夏季	2.5 *	5.5 *
秋季	2.5 **	2.5 **
冬季	7.5 *	7.5 *

注: *、** 表示达到 95%、99%信度水平。

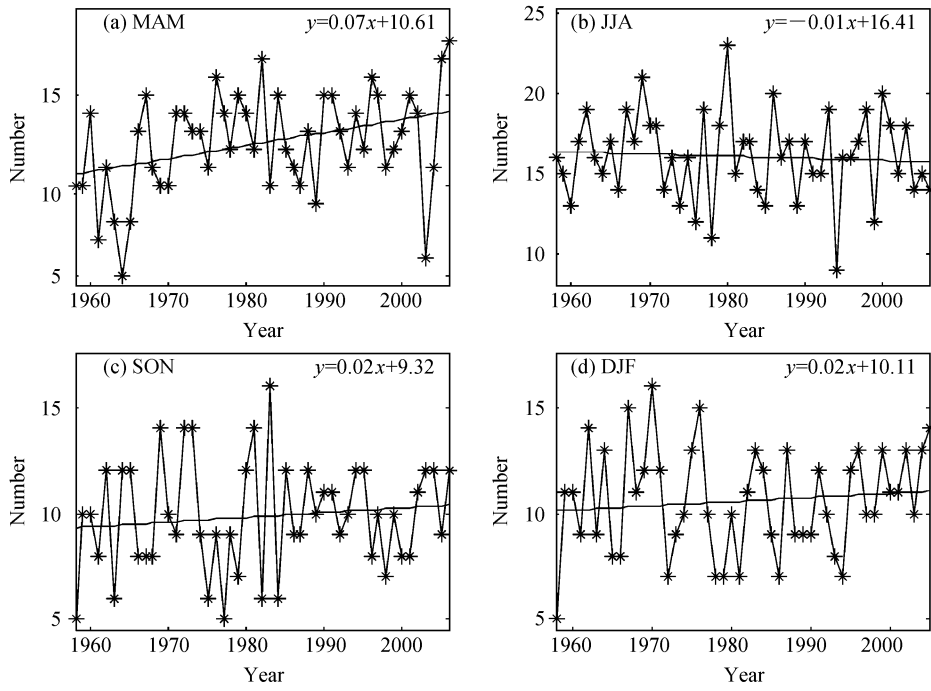


图3 同图2，但为东北冷涡发生个数
Fig. 3 Same as Fig. 2, but for occurrence numbers of cold vortex over Northeast China

3.2 东北冷涡活动的年际变化对我国气候的影响

东北冷涡从时间尺度上来说是天气尺度的波动，但具有较强的准静止性，其持续性特征十分显著（孙力，1997）。此外，从空间上看，东北冷涡不仅对东北地区的天气气候有重要影响，而且可引导高纬的冷空气南下影响中低纬度地区（苗春生等，2006）。因此，频繁的东北冷涡活动，不仅可导致对流性天气异常，而且可对短期气候异常有一定影响。

首先，我们分析了不同季节东北冷涡的持续性活动对我国不同区域降水和气温的影响。图4为东北冷涡的发生天数与同期我国160站点降水的相关分布。春季，东北冷涡的发生天数与东北大部分地区的降水存在明显正相关，而与华北大部分地区降水的相关系数为负值。秋季的冷涡活动与我国东北地区的降水并没有特别的关联，这可能因为此时是冷涡活动最弱的季节。当冬季多冷涡活动的年份，我国东部的大部分地区降水偏少，在东北中部、华北和江淮流域均达到了95%的信度水平。

在冷涡最频繁发生的夏季，东北地区的北部和西部的降水与该时期的冷涡频数有正相关，这种分布与苗春生等（2006）的结果是相似的。值得关注

的是，此时长江流域的降水与夏季冷涡的频发活动有显著的正相关，说明了中高纬度环流系统异常对低纬度地区降水的影响。何金海等（2006a）指出，梅雨期东北冷涡越强盛，梅雨量很可能偏多。关于夏季频繁的冷涡活动与局地和非局地的降水的关联，将在3.3节进一步讨论。

就东北局地而言，在冷季（春季和冬季）东北冷涡的活动对该地区的气候影响要大于冷涡活动最频繁的夏季。Hu et al.（2010）的研究也指出，相对暖季而言，东北地区的降水在冷季更单一地受东北冷涡的影响，本文的工作更进一步说明了这一点。

持续性的东北冷涡活动也可在一定程度上显著地影响我国的气温（图5）。无论在哪个季节，冷涡发生天数与东北地区的气温有显著的负相关。特别在夏季和冬季，在东北地区的中部和南部，这种负相关关系更为显著。

在冷涡频发的夏季，东北地区的中部和南部以及华北大部分地区更易出现气温异常偏低，即所谓的“冷夏”天气。孙力等（2000）研究与东北地区气温对应的大尺度环流时，也得到了与此类似的结果。

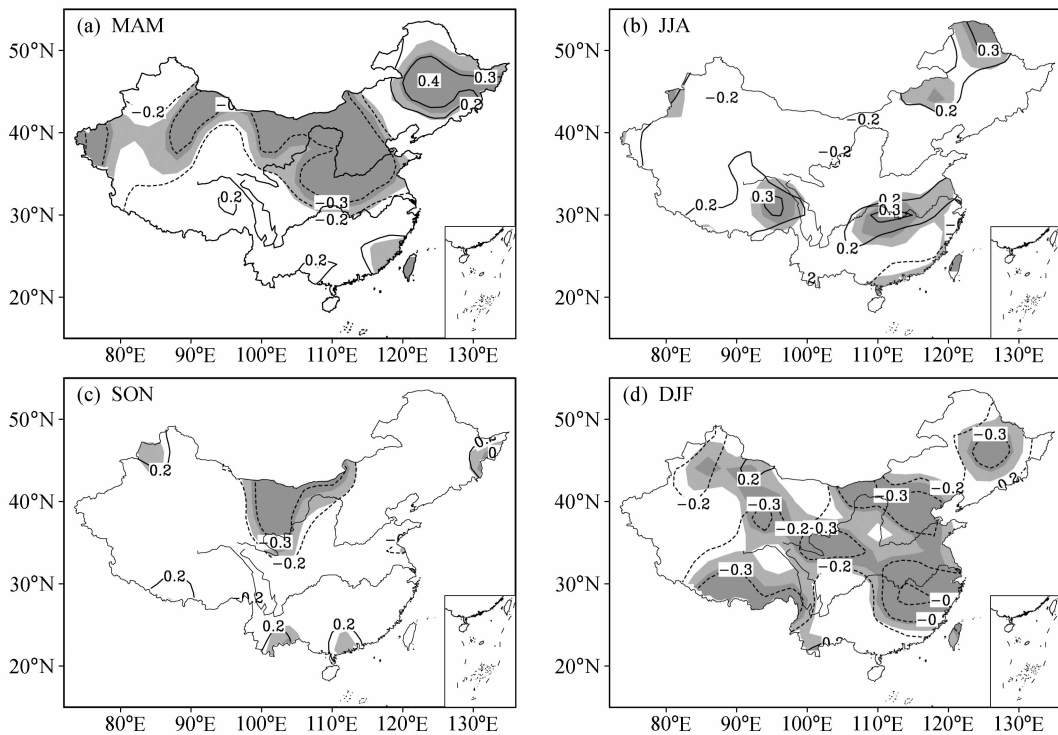


图 4 东北冷涡的发生天数与同期中国降水量的相关分布: (a) 春季; (b) 夏季; (c) 秋季; (d) 冬季。浅、深阴影: 达到 90%、95% 的信度水平

Fig. 4 Correlation maps between seasonal occurrence days of cold vortex over Northeast China and China precipitation for (a) MAM, (b) JJA, (c) SON, and (d) DJF. Light and heavy shadings illustrate the confidence levels of 90% and 95%, respectively

在冬季,我国东部大部分地区的气温与冷涡天数显著地相关,这可能反应了冷涡的异常偏多与东亚冬季风的强盛有关联,进一步使得我国大部分地区气温异常偏低。为此,我们选了几种不同物理量定义的东亚冬季风指数 (I_1 、 I_2 、 I_3 和 I_4),分别计算了它们与同期冷涡活动天数的相关系数(表 3)。其中, I_1 定义为 10 m 经向风的南北差异 (Chen et al., 2000), I_2 定义为 300 hPa 纬向风的南北差异 (Jhun and Lee, 2004), I_3 定义为海平面气压的纬向梯度 (Wu and Wang, 2002), I_4 定义为 500 hPa 位势高度 (Φ) 经验正交分解的第一主分量 (Wang et al., 2009)。这些东亚冬季风指数定义各具特色,有利用低层环流异常 (I_1 和 I_3),也有利用中高层环流异常 (I_2 和 I_4)。从表 3 中看出,当东亚冬季风强盛时,东北冷涡往往活动频繁,其相关系数达到 99% 的信度水平。此外,不少研究表明,在强东亚冬季风影响下,我国东部降水异常偏少,这与冬季冷涡发生天数与我国大部分地区降水显著的负相关关系是一致的 (图 4d)。

表 3 冬季东北冷涡发生天数 (Winter Cold Vortex Index, 简称 WCVI) 与东亚冬季风指数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between occurrence days of cold vortex over Northeast China and some East Asian winter monsoon indices

东亚冬季风指数	定义变量 (垂直层次)	与 WCVI 的相关系数
I_1	v (10 m)	0.45 *
I_2	u (300 hPa)	0.50 **
I_3	SLP	0.51 **
I_4	Φ (500 hPa)	0.58 **

注: *、** 表示达到 95%、99% 信度水平。

3.3 与夏季东北冷涡活动年际变化相联系的环流异常特征

如上分析,东北冷涡的频繁活动,可在一定程度上影响东北局地甚至非局地区域。夏季是东亚冷涡最活跃的季节,也是对流性天气最有利的发生季节。因此,我们将重点分析夏季东北冷涡活动所关联的大尺度环流特征,进而更好地理解其影响的局地和非局地气候异常。

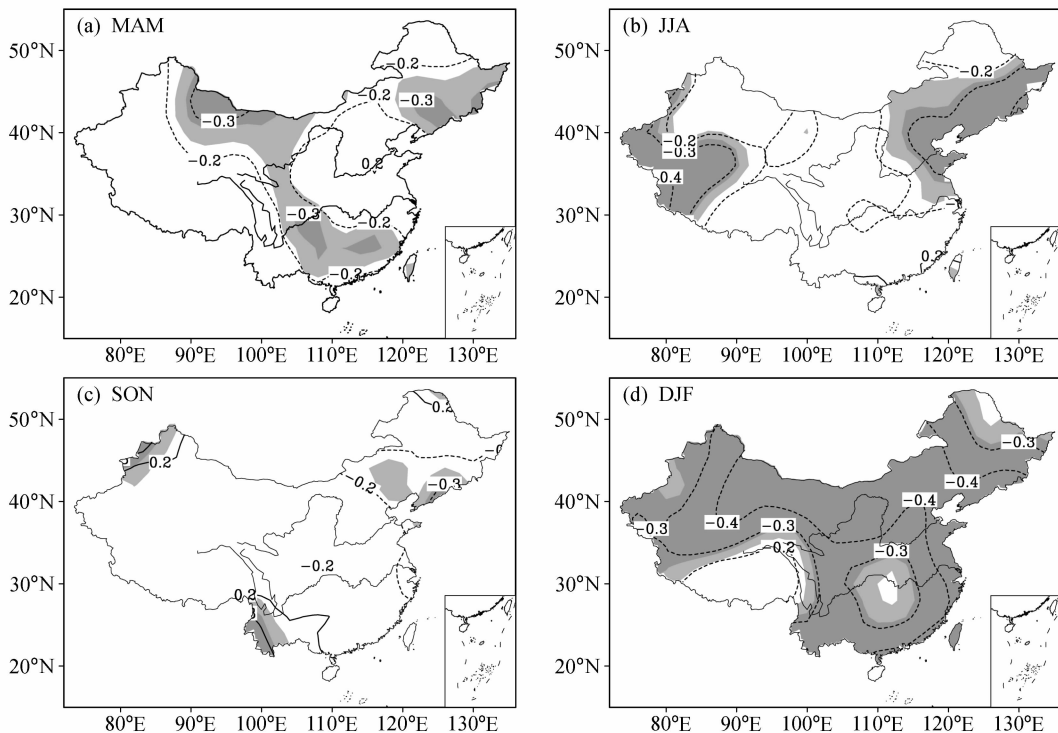


图5 同图4, 但为东北冷涡的发生天数与同期中国气温的相关分布

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for correlation between seasonal occurrence days of cold vortex over Northeast China and China air temperature

对夏季东北冷涡发生天数序列(图2b)进行标准化处理, 然后选取大(小)于一个标准方差的年份。其中, 大于一个标准方差的7年为: 1962、1964、1969、1973、1980、1993、1998年。小于一个标准方差的5年为: 1966、1978、1989、1994、1999年。值得一提的是, 21世纪以来东北夏季冷涡发生天数一直比较接近常年(图2b), 也即2000年之后夏季冷涡发生频次年际变率的减弱。因而本文选取的夏季东北冷涡活动年际变化异常年份之中, 没有一年是在2000年之后的。这在一定程度也反映了东北冷涡的发生频率存在着年代际变化特征(孙力等, 2000)。对于21世纪初夏季东北冷涡发生频次年际变率的减弱, 是否具有稳定性, 以及是否受到北半球中高纬地区气候变暖的响应, 还需利用更长的观测资料和数值模拟进行深入的分析。

在东北冷涡频发性活动的夏季, 在对流层的高低不同层次(200 hPa、500 hPa和850 hPa), 东亚中高纬度地区的均表现为一个北正南负的偶极位势高度异常(图6)。其中, 对流中高层的正位势异常区域中心位于贝加尔湖北侧, 而在对流层低层呈纬向的带状分布, 可延伸至西北太平洋沿岸。位势负

异常区呈带状, 位于40°N左右, 其中两个中心分别位于110°E和150°E。位势高度异常在对流层高低层相似的偶极分布, 这与东北冷涡深厚的相当正压结构是一致的。

图7为夏季200 hPa纬向风场在东北冷涡活跃年与非活跃年的合成场, 这反映了东亚高空西风急流在冷涡多发、少发年的差异。在气候态上, 夏季东亚对流层高层急流轴大约位于40°N附近。由夏季东北冷涡多发、少发的合成场, 在气候态高空急流轴位置的南侧、北侧分别存在着带状的西风异常区和东风异常区, 风速异常值可达4 m/s左右。因而, 在气候态急流轴的南侧东亚高空急流强度加强, 而其北侧急流强度减弱。

大体类似于Lu(2004)和Lin and Lu(2005)定义的东亚高空急流经向偏移, 我们定义夏季东亚高空急流的经向偏移指数为: 200 hPa纬向风在区域(40°N~50°N, 90°E~160°E)和(30°N~40°N, 90°E~160°E)平均值之差。夏季东北冷涡发生天数与急流经向偏移指数二者的相关系数为0.41, 达到99%的信度水平。这意味着相对于夏季东北冷涡少发年份, 在冷涡频发年东亚高空西风急流主体

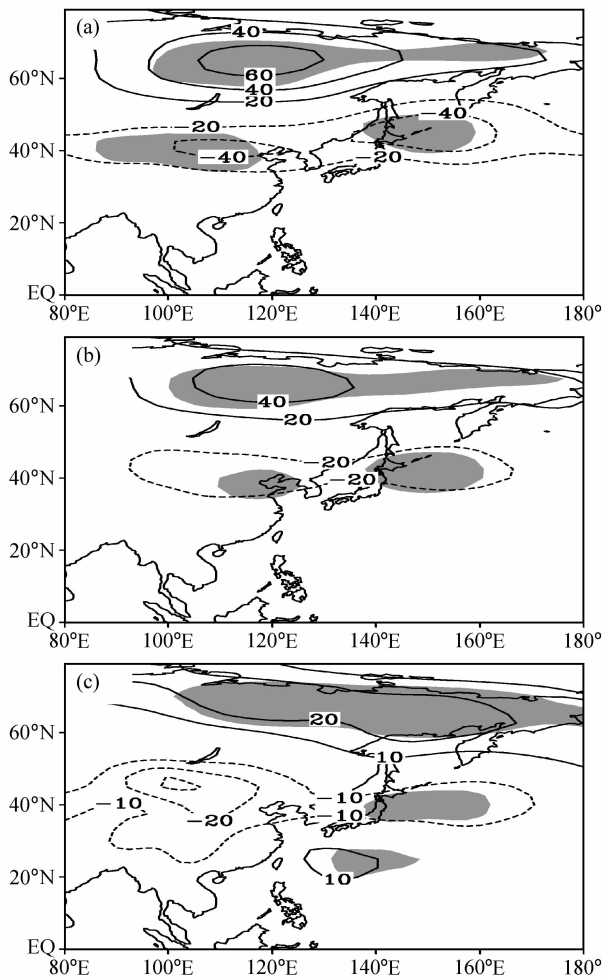


图6 200 hPa (a)、500 hPa (b) 和 850 hPa (c) 位势高度场在夏季东北冷涡活动多、少年的合成差异 (单位: gpm)。阴影区表示达到 95% 信度水平

Fig. 6 Composite differences in geopotential height at (a) 200 hPa, (b) 500 hPa, and (c) 850 hPa pressure levels between more and less cold vortex years chosen by JJA over Northeast China. Contour interval is 20 gpm for (a) and (b), and is 10 gpm for (c). Shadings illustrate the differences at the 95% confidence level

位置向南偏移。

同时,考虑到东亚高空急流的强度,我们定义(30°N~50°N, 90°E~160°E)范围内区域平均的200 hPa 纬向风异常为东亚高空急流的强度指数。东亚高空急流的强度指数与夏季东北冷涡发生天数相关系数为 0.30, 达到了 95% 的信度检验水平。这表明东北冷涡多发年较冷涡少发年,东亚高空西风急流强度易于更强。

图8显示了90°E~160°E 纬向平均的200 hPa 纬向西风在夏季东北冷涡多发年和少发年的合成。

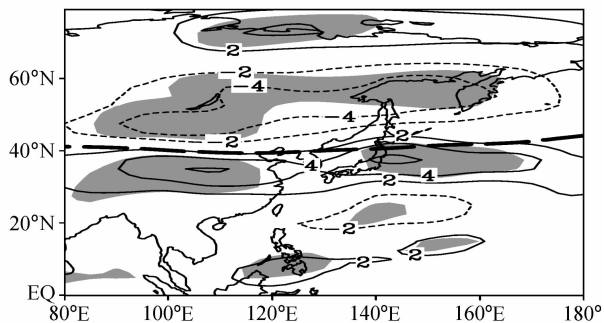


图7 200 hPa 纬向风场在夏季东北冷涡活动多、少年的合成差异 (单位: m/s)。阴影: 达到 95% 信度水平; 粗长虚线: 气候态 200 hPa 高空急流轴的位置

Fig. 7 Composite difference in 200 hPa zonal wind between more and less cold vortex years chosen by JJA over Northeast China. Contour intervals is 2 m/s and zero contour is not shown. Shadings illustrate the difference at the 95% confidence level. The thick long-dashed line denotes the climatological location for the axis of East Asian upper-tropospheric jet stream

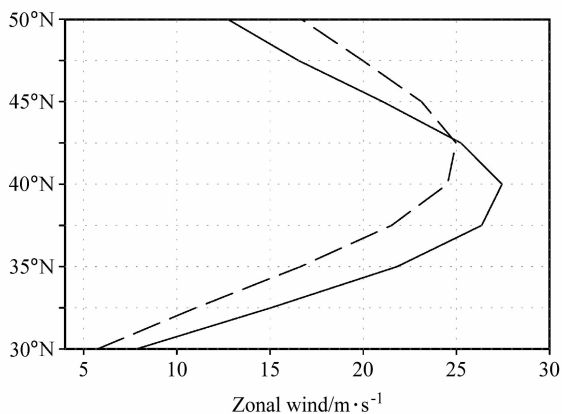


图8 90°E~160°E 纬向平均的200 hPa 纬向风在夏季东北冷涡活动多年(实线)、少年(虚线)的合成 (单位: m/s)

Fig. 8 Composite 200 hPa zonal wind averaged over 90°E~160°E for more (solid line) and less (dashed line) cold vortex years chosen by JJA over Northeast China

在夏季东北冷涡的多发年,东亚高空急流轴最大风速(27.4 m/s)较东北冷涡少发年增强 2.7 m/s。而在东北冷涡少发年,东亚高空西风急流轴处于大约 42.5°N 附近,较冷涡多发年向高纬偏移 2.5°左右。

对于对流层低层而言,西太平洋副热带高压位置和强度的变化对东亚地区的气候异常有着极为重要的影响(Tao and Chen, 1987; Ding, 1994)。考虑到不同再分析资料在对流层低层东亚夏季环流描述的不确定性(黄刚, 2006; 陈际龙和黄荣辉,

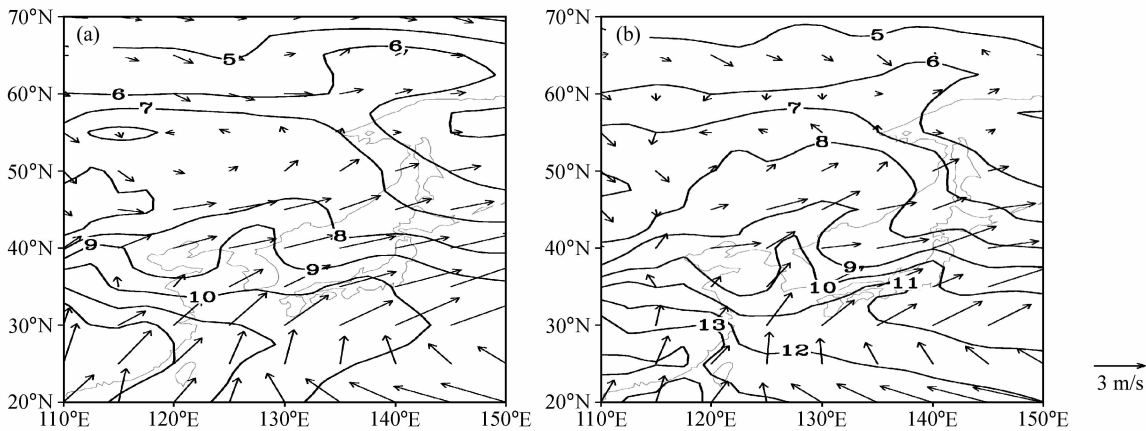


图9 气候平均(1979~2002年)的夏季850 hPa水平风场(矢量)和比湿场(等值线,间隔为1 g/kg): (a) NCEP/NCAR再分析资料; (b) ERA-40再分析资料

Fig. 9 Climatology of 850 hPa winds (vector) and specific humidity (contour) from 1979 to 2002 for (a) NCEP/NCAR reanalysis and (b) ERA-40 reanalysis. Contour interval is 1 g/kg

2007), 我们对比分析了 NCEP/NCAR 和 ERA-40 两套最常用的长期再分析资料中 850 hPa 低层风场和比湿的特征。

尽管在两套再分析资料中, 多年气候平均的 850 hPa 比湿在副热带西北太平洋上差异较大, 表现为比湿在 ERA-40 资料中明显比在 NCEP/NCAR 资料中数值偏大, 但是, 在我国大陆东部地区两套再分析资料差异明显小, 而且均表现出由南向北的减少梯度, 并在东北地区形成一个相对的“湿舌”(图9)。特别地, 该东北地区“湿舌”和位于日本海、鄂霍次克海的干区形成由西向东的减少梯度。在华北及其以南地区, 盛行南风, 而在东北地区基本为西风。相比于比湿场, 风场在两套再分析资料中有很好的 consistency。比湿场在我国东部地区呈现的经向梯度分布以及东北—东部海域的纬向梯度分布在两套再分析资料中也有很好的一致性。

在东北冷涡异常活跃年份, 低层副热带西北太平洋上存在着显著的反气旋式风场异常(图10)。这一风场异常加强了气候态西太平洋副热带反气旋西部的南风分量, 从而更加有利于低纬地区的充足水汽向长江流域甚至更北地区的输送。此外, 在中纬度 50°N 左右, 从西北太平洋沿岸至贝加尔湖北侧, 存在一条强盛的东风异常带。以上两个显著风场异常区在两套再分析资料中的描述大致相同, 说明所得结果可信, 只是相对于 ERA-40 资料, 在

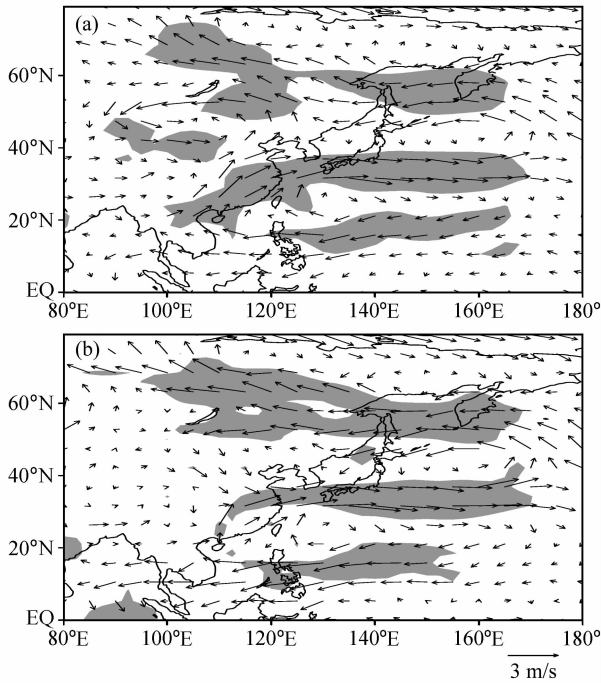


图10 850 hPa水平风场在夏季东北冷涡多、少年的合成差异: (a) NCEP/NCAR再分析资料; (b) ERA-40再分析资料。阴影: 纬向或经向风速差值达到95%信度水平

Fig. 10 Composite differences in 850 hPa winds between more and less cold vortex years chosen by JJA over Northeast China for (a) NCEP/NCAR reanalysis and (b) ERA-40 reanalysis. Shadings illustrate the differences for zonal or meridional wind velocity at the 95% confidence level

NCEP/NCAR 资料中夏季东北冷涡多发年西北太平洋反气旋西侧的南风异常稍强些。

黄荣辉等(1998)的研究指出,水汽的扰动平流输送项($-\mathbf{V}' \cdot \nabla \bar{q}$)是水汽通量散度($\nabla \cdot \mathbf{qV}$)异常的主要贡献项。在东北冷涡频繁活跃的夏季,长江流域低层西北太平洋反气旋异常西侧的南风分量(图10)和向北的水汽梯度(图9)所带来的正水汽扰动平流输送造成的水汽通量散度辐合,进而有利于长江流域降水的偏多。

为了说明水汽的扰动平流输送项对东北地区降水的影响,图11给出850 hPa扰动风场和气候态比湿场的相互配置关系。在中纬度地区,由NCEP/NCAR和ERA-40资料分析得到的结果都表明,东北亚地区西北太平洋沿岸的东风异常和向西的水汽梯度也给东北地区带来了正的水汽扰动平流输送。考虑到东北地区气候态的风场为西风(图9),因而东风异常实际上是起到了阻挡湿度更大的气团向下游输送,使得水汽通量有利于在东北地区的辐合,进而导致降水的偏多。

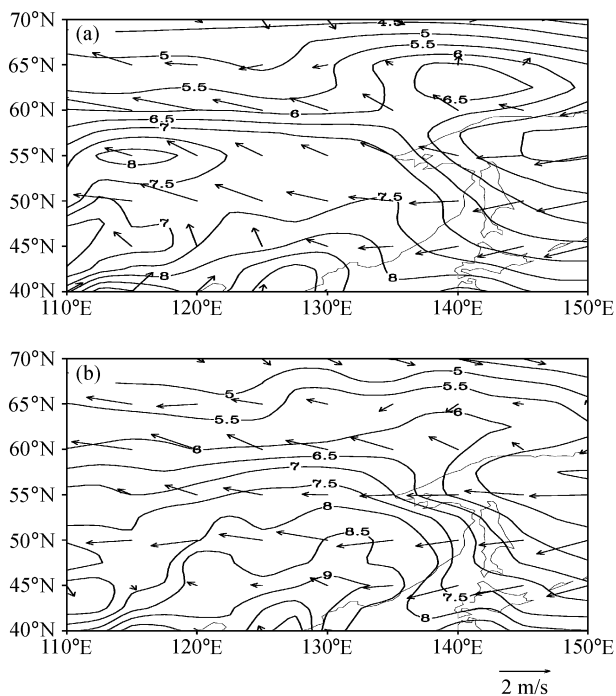


图11 气候平均(1979~2002年)的夏季850 hPa比湿场(等值线)和夏季东北冷涡多、少年的850 hPa水平风场(矢量)的合成差异:(a) NCEP/NCAR再分析资料;(b) ERA-40再分析资料

Fig. 11 Climatology of 850 hPa specific humidity (contour) from 1979 to 2002 and composite differences in 850 hPa winds (vector) between more and less cold vortex years chosen by JJA over Northeast China for (a) NCEP/NCAR reanalysis and (b) ERA-40 reanalysis

4 结论与讨论

东北冷涡是东亚中高纬度地区重要的天气系统,其持续性频繁活动在一定程度上能影响局地和非局地的气候异常。本文利用自动识别方法所得到的近50年东北冷涡数据,分析了东北冷涡的年际变率及演变趋势,并分析了其持续性活动对我国气候的影响及相关联的大尺度环流异常特征,得到了如下的一些结论:

(1) 东北冷涡具有很明显的年际变率特征。就全年平均而言,大约49个冷涡(225天)活跃于东北地区。全年冷涡发生个数(发生天数)的相对标准偏差为10%(9%),为各季节值的一半左右,表明各季节年际变率比全年更为明显。就长期演变来看,除了春季冷涡发生个数有0.7个/10 a的增多趋势外,其余季节和全年都没有显著的长期演变趋势。此外,东北冷涡的发生个数和发生天数的演变具有很好的一致性,二者在除冬季之外的其他季节均存在一个2.5年左右的主振荡周期。

(2) 持续性的东北冷涡活动能够影响局地和非局地的气候异常,造成一定的“气候效应”。春季,频繁的东北冷涡活动可以造成东北大部的低温多雨和华北大部的少雨。在最不活跃的秋季,除了东北南部的低温异常外,冷涡活动对我国区域气候的影响较小。当冬季有频繁的东北冷涡活动时,我国大部分地区明显地气温偏低,降水偏少。

(3) 冬季东北冷涡的持续性活动与东亚冬季风的强盛密切相关,二者之间的相关达到了99%的信度水平。冬季东北冷涡的持续性活动强的年份,东亚冬季风也偏强;反之,冷涡活动偏弱的年份,东亚冬季风也偏弱。

(4) 在东北冷涡最为活跃的夏季,我国东北和华北大部分地区往往气温异常偏低,而在东北中西部和长江流域降水显著地偏多。分析表明,当夏季东北冷涡活动频繁时,东亚地区对流层存在深厚的偶极型位势高度异常,高空急流向南偏移并略加强,低层西北太平洋反气旋异常和中高纬度地区的东风异常分别有助于长江流域和东北地区的水汽通量的辐合,进而有利于降水的偏多。

致谢 非常感谢两位审稿人对本文提出了宝贵的修改和讨论意见。吉林气象科学研究所的廉毅研究员对本文初稿给予了很多有益的修

改意见，在此深表感谢。感谢中国科学院大气物理研究所的林中达博士、王林博士分别提供的东亚高空西风急流指数和东亚冬季风指数。

附录

类似于郑秀雅和张廷治(1992)的东北冷涡天气学定义，将满足以下条件的天气系统定义为一次冷涡事件：(1) 在($30^{\circ}\text{N}\sim 65^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$)区域内，500 hPa 等压面上存在闭合低压中心；(2) 低压系统有冷心或明显的冷槽相伴随；(3) 系统至少维持 2 天以上。

为了在格点资料中具体地量化以上冷涡定义，我们设计了一个三步算法如下(图 12)：

(1) 识别算法 对于 500 hPa 东北区域内，当包括位势高度低中心(其位势高度低于所有周围八个格点的值)在内的九个最相邻格点中，任一点的纬向气温二阶导数大于零，则该位势高度低中心(图 12a 中的 A) 视为潜在的冷涡中心。

(2) 归并算法 在任何时刻， 5×5 格点方框内的所有潜在冷涡中心(图 12b 中的 B 和 C) 将视为同一冷涡系统。其中，位势高度最低的格点视为该系统的主中心(图 12b 中的 B)。

(3) 追踪算法 在任意连续的 2 个时刻(6 h)，如果满足上述条件的 2 个中心点距离小于 10 个经度(即移速小于 10 个经度/6 h)，则将它们视

为同一个系统(图 12c 中的 D 和 D')。否则，它们属于二个独立的冷涡系统。

参考文献 (References)

陈际龙, 黄荣辉. 2007. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 II. 夏季风水汽输送 [J]. 大气科学, 31 (5): 766 – 778. Chen Jilong, Huang Ronghui. 2007. The comparison of climatological characteristics among Asian and Australian monsoon systems. Part II: Water vapor transport by summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 766 – 778.

Chen W, Graf H F, Huang R H. 2000. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 17: 46 – 60.

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, 38 (3): 234 – 241. Ding Shisheng. 1980. The climatic analysis of low temperature in summer over the northeast China and influence for agricultural product [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 38 (3): 234 – 241.

Ding Y H. 1994. Monsoons over China [M]. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 419pp.

Gimeno L, Trigo R M, Ribera P, et al. 2007. Editorial: Special issue on cut-off low systems (COL) [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 96: 1 – 2.

何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006a. 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. 2006a. Climate effect of north-east cold vortex and its influences on Meiyu [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (23): 2803 – 2809.

何金海, 吴志伟, 祁莉, 等. 2006b. 北半球环状模和东北冷涡与我

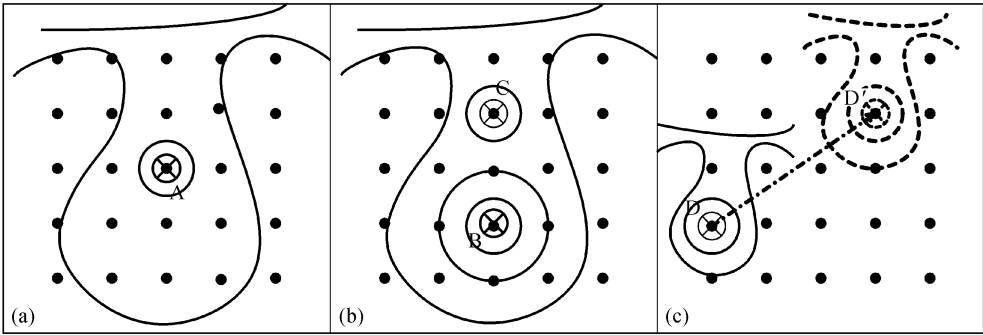


图 12 从格点资料自动识别、追踪东北冷涡示意图。(a)、(b)、(c) 分别为三步法中的“识别”、“归并”、“追踪”算法。实线：500 hPa 位势高度等值线；实心点： $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ 水平分辨率格点；长虚线： $t+\Delta t$ ($\Delta t=6\text{ h}$) 时刻的 500 hPa 位势高度等值线；点虚线箭头：相邻两时刻冷涡的移动距离。A、B、C、D、D'：满足某些条件的格点(即可能的冷涡中心)

Fig. 12 Schematic representation of the objective method used to detect and track cold vortex from grid-point dataset; (a), (b), (c) describe “detect”, “merge”, “track” algorithms of three-step method, respectively. Solid lines and solid dots denote geopotential height contour at 500 hPa at a given time t and grid points with $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$ resolution, respectively. Long-dashed lines denote geopotential height contour at 500 hPa at next time $t+\Delta t$ ($\Delta t=6\text{ h}$). Arrows with dash-dotted line denote moving distance of cold vortex at two consecutive times. A, B, C, D, and D' denote grid points satisfied with some terms for each step, namely potential centers of cold vortex

- 国东北夏季降水关系分析 [J]. 气象与环境学报, 22 (1): 1-4.
- He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. 2006b. Relationships among the Northern Hemisphere annual mode, the northeast cold vortex and the summer rainfall in Northeast China [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 22 (1): 1-4.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111: 877-946.
- Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 106: 37-48.
- 黄刚. 2006. NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料以及探空观测资料分析中国北方地区年代际气候变化 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 310-319. Huang Gang. 2006. The assessment and difference of the interdecadal variations of climate change in northern part of China with the NCEP/NCAR and ERA-40 reanalysis data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 310-319.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. 大气科学, 22 (4): 460-469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 460-469.
- Jhun J G, Lee E J. 2004. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon [J]. J. Climate, 17: 711-726.
- 蒋尚城, 杨向东, 商树荣, 等. 2002. 卫星多通道观测揭示的东北冷涡异常特征 OLR, HIRS-Tb12, ERB, VIS, SSMR 和 SSM/I 的观测研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 38 (5): 687-697. Jiang Shangcheng, Yang Xiangdong, Shang Shurong, et al. 2002. The diagnostic research on the anomaly of northeast cold vortex based on the multi-channel satellite observations with OLR, HIRS-Tb12, ERB, VIS, SSMR, SSM/I [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 38 (5): 687-697.
- Ju J H, Lü J M, Cao J, et al. 2005. Possible impacts of the Arctic Oscillation on the interdecadal variation of summer monsoon rainfall in East Asia [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (1): 39-48.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437-471.
- Kentarchos A S, Davies T D. 1998. A climatology of cut-off lows at 200 hPa in the Northern Hemisphere, 1990-1994 [J]. Int. J. Climatol., 18: 379-390.
- Kistler R, Kalnay E, Collins W, et al. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82: 247-262.
- Li J P, Wang J. 2003. A modified zonal index and its physical sense [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (12): 1632, doi: 10.1029/2003GL017441.
- Lin Z D, Lu R Y. 2005. Interannual meridional displacement of the East Asian upper-tropospheric jet stream in summer [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (2): 199-211.
- 刘宗秀, 廉毅, 高枫亭, 等. 2002. 东北冷涡持续活动时期的北半球 500 hPa 环流特征分析 [J]. 大气科学, 26 (3): 361-372. Liu Zongxiu, Lian Yi, Gao Zongting, et al. 2002. Analyses of the Northern Hemisphere circulation characters during northeast cold vortex persistence [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (3): 361-372.
- Lu R Y. 2004. Associations among the components of the East Asian summer monsoon system in the meridional direction [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 82 (1): 155-165.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006. 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 (6): 1249-1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. 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 (6): 1249-1256.
- 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: 3085-3103.
- Palmen E H, Newton C W. 1969. Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation [M]. New York: Academic Press, 603pp.
- Price J D, Vaughan G. 1992. Statistical studies of cut-off low systems [J]. Ann. Geophys., 10: 96-102.
- 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 the northeast cold vortex in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (3): 297-303.
- 孙力. 1997. 东北冷涡持续活动的分析研究 [J]. 大气科学, 21 (3): 297-307. Sun Li. 1997. A study of persistence activity of northeast cold vortex in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 21 (3): 297-307.
- 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 [J]. 气象学报, 58 (6): 704-714. Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2000. A study of the persistent activity of northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (6): 704-714.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 139pp. Tao Shiyan. 1980. The Torrential Rain in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 139pp.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East

- Asian summer monsoon in China [M]// Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford University Press.
- Uppala S. 2002. ECMWF reanalysis, 1957 – 2001, ERA-40 [J]. ERA-40 Project Report Series, 3: 1 – 10
- 王东海, 钟水新, 刘英, 等. 2007. 东北暴雨的研究 [J]. 地球科学进展, 22 (6): 549 – 560. Wang Donghai, Zhong Shuixin, Liu Ying, et al. 2007. Advances in the study of rainstorm in Northeast China [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 22 (6): 549 – 560.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2009. Interannual variations of East Asian trough axis at 500 hPa and its association with the the East Asian winter monsoon pathway [J]. J. Climate, 22: 600 – 614.
- Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian winter monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 29, doi: 10.1029/2002GL015373.
- 张立祥, 李泽椿. 2009. 东北冷涡研究概述 [J]. 气候与环境研究, 14 (2): 218 – 228. Zhang Lixiang, Li Zechun. 2009. A summary of research on cold vortex over Northeast China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (2): 218 – 228.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 56 (2): 199 – 211. Zhang Qingyun, Tao Shiy-an. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (2): 199 – 211.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2001. 1998 年嫩江、松花江流域持续性暴雨的环流条件 [J]. 大气科学, 25 (4): 567 – 576. Zhang Qingyun, Tao Shiy-an, Zhang Shunli. 2001. A study of excessively heavy rainfall in the Songhuajiang – Nenjiang River valley in 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 567 – 576.
- Zhao S X, Sun J H. 2007. Study on cut-off low-pressure systems with floods over Northeast Asia [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 96: 159 – 180.
- 郑秀雅, 张廷治. 1992. 东北暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 129pp. Zheng Xiuya, Zhang Tingzhi. 1992. Rainstorm in Northeast China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 129pp.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理与方法 (第三版) [M]. 北京: 气象出版社, 191 – 192. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. Principle and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 191 – 192.