

杨涵洧, 封国林, 沈柏竹, 等. 2012. 中国夏季东北冷涡强度的定量化分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 487–494, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11071. Yang Hanwei, Feng Guolin, Shen Baizhu, et al. 2012. The quantitative research on cold vortex in summer over Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 487–494.

中国夏季东北冷涡强度的定量化分析

杨涵洧¹ 封国林² 沈柏竹^{1,3} 支蓉²

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

2 国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

3 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

摘 要 本文利用 NCEP/NCAR 发布的 1981~2010 年全球日平均再分析位势高度场资料对东北冷涡进行检索并提取其平均态, 在此基础上定义东北冷涡的偏离指数, 并探讨其对东北冷涡强度特征的描述。结果表明: (1) 东北冷涡 500 hPa 闭合中心位势高度的概率分布近似为高斯分布, 以其期望值提取的东北冷涡平均态具有东北冷涡的共性, 表现出明显的大气斜压性及有利于系统维持和发展的温压配置关系特征; (2) 基于东北冷涡平均态定义的东北冷涡偏离指数不仅能够表征东北冷涡偏离平均态的程度, 还包含了低压面积的信息, 即能够直观地显示东北冷涡的强弱特征。

关键词 东北冷涡 平均态 强度 东北冷涡偏离指数

文章编号 1006-9895 (2012) 03-0487-08

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11071

The Quantitative Research on Cold Vortex in Summer over Northeast China

YANG Hanwei¹, FENG Guolin², SHEN Baizhu^{1, 3}, and ZHI Rong²

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

2 Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

3 Institute of Meteorological Science of Jilin Province, Changchun 130062

Abstract Using daily reanalysis data, released by NCEP/NCAR, about geopotential height from 1981 to 2010 (30 years in total) to retrieve and analyze the cold vortex over Northeast China (CVONC), to extract and analyze the average state of CVONC, the authors define a deviation index on CVONC and discuss its rationality to depict the intensity of CVONC. It shows that: (1) the probability distribution of CVONC's geopotential height of occlusive center at 500 hPa is similar to the Gaussian normal distribution, and the average state of CVONC extracted by the expected value of Gaussian normal distribution hold general characters of CVONC; (2) the definition of deviation index on CVONC based on its average state could represent not only the deflected degree from the average state of CVONC, but also some information about the areas of low pressure, which means that it could indicate the intensity characteristics of CVONC directly.

收稿日期 2011-04-10, 2012-02-06 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40930952、41105055, 公益性行业科研专项 GYHY201106016、GYHY201106015, 国家科技支撑计划项目 2007BAC29B01、2009BAC51B04

作者简介 杨涵洧, 男, 1988 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究。E-mail: yanghanw@mail3.sysu.edu.cn

通讯作者 封国林, E-mail: fenggl@cma.gov.cn

Key words cold vortex, average state, intensity, deviation index

1 引言

东北冷涡是东亚中高纬度大气环流中的重要组成部分,也是我国东北地区所特有的重要天气系统(刘宗秀等,2002),它一年四季均可出现,其中夏季是其频发的时段(孙力,1997)。东北冷涡出现后具有一定的静止性并可以持续发展,一般可维持四五天,最多可达十余天。研究表明(Li and Wang, 2003; Wu et al., 2006),中高纬天气系统对华南前汛期旱涝有着重要的影响,东北冷涡作为东亚地区中高纬度大气环流的重要组成部分,不仅对东北地区产生较大影响(陈力强等,2008; 张立祥, 2008),还能通过一定机制影响我国其它地方(白人海和孙永罡, 1997; 孙力等, 2000; 苗春生等, 2006; 张立祥和李泽椿, 2009)。有研究表明(孙力等, 2000; 何金海等, 2006a; 苗春生等, 2006; 王丽娟等, 2010),华南、江南以及长江流域等地区的洪涝和干旱天气与之相关。胡开喜等(2011)指出,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。

环流异常可能导致天气异常,而天气异常也常由环流异常导致。施能等(1994)提出,夏季大气环流异常对我国旱涝分布、季风及梅雨强度有非常重要的影响。作为一个对中国有着巨大影响的天气系统,东北冷涡异常往往能够引起我国部分地区的天气异常,甚至能够引发极端事件。在以往对东北冷涡异常的研究(何金海等, 2006b; 廉毅等, 2010; 苗春生等, 2006)中,将定义东北冷涡的区域进行多年平均,再通过距平的方式挑选异常进行合成,进而研究东北冷涡在平均状态和异常状态下的大气环流等特征。然而,这种方法却有以下几方面的缺陷:(1)所得到的平均标准场是东北冷涡发生区域的平均状态而不是东北冷涡的平均状态,由于在空间上气压的分布不均匀,在区域平均过程中必然会抵消掉很多信号;(2)东北冷涡异常的提取带有很强的主观性,这主要表现在临界值的选取

上;(3)由此方法提取的异常其偏离程度也有一定的缺陷,可能会导致对某些异常描述不准确。此外,对东北冷涡异常来说,达到何种水平其异常程度强,达到何种水平可能引发灾害性天气,这种种问题都还有待研究。

目前,在对东北冷涡强度定量化方面的研究也取得一定进展。何金海等(2006a)从温度资料入手,计算全国与东北地区地面气温变率最大的测站——乌兰浩特的气温空间相关图,将通过95%信度检验站点的夏季平均气温的相反数定义为夏季东北冷涡强度指数;何金海等(2006b)对东亚地区1000 hPa梅雨期平均气温进行旋转EOF分解定义了一个梅雨期东北冷涡强度指数;苗春生等(2006)利用站点温度资料定义一个前汛期东北冷涡强度指数。然而,上述各种对东北冷涡强度的描述方法都是从季节尺度入手,呈现的是东北冷涡在前汛期、梅雨期或夏季的平均强度。对于天气尺度东北冷涡而言,无法具体描述一次东北冷涡过程甚至每一天的强弱特征。

本文拟通过一种新的方式来描述东北冷涡的平均状态,并在此基础上定义一种具有明确物理意义的指标来定量、定性描述东北冷涡的异常状态,即直观地体现东北冷涡的强度。

2 资料和方法

本文使用NCEP/NCAR发布的1981~2010年全球日平均再分析格点资料(Kalnay et al., 1996),分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$,选取的要素场包括1000~100 hPa共12层的位势高度场、纬向风场、经向风场以及温度场资料等。

在对东北冷涡的检索上,本文采用孙力等(1994)对于东北冷涡的定义:(1)东北冷涡出现在($35^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$, $115^{\circ}\text{E} \sim 145^{\circ}\text{E}$)范围内;(2)在500 hPa天气图上至少能分析出一条闭合等高线,并有冷中心或明显冷槽配合的低压环流系统;(3)冷涡在上述区域内的生命史至少为三天或三天以上。由于我国气候在1970年代末1980年代初存在一次转变(林学椿等, 1995; 于淑秋等, 2003),为保证所研究的东北冷涡不包含气候转变的信息,因此采用20世纪80年代以后的资料对东北冷涡进行研究,本

文最终选取 1981~2010 年夏季（6~8 月）的 NCEP/NCAR 资料对其进行分析。

使用的方法主要有基于傅里叶变换的功率谱分析、高斯拟合以及本文定义的东北冷涡偏离指数。

3 东北冷涡统计特征

1981~2010 年夏季发生东北冷涡的次数为 134 次，共 614 天，占夏季天数的 22.22%（614/2760）；年均发生东北冷涡 4.47 次，年均发生天数为 20.47 天，每次冷涡过程平均持续时间为 4.58 天（表 1）。

表 1 东北冷涡 1981~2010 年夏季在年、月尺度上的统计特征

Table 1 Statistic characteristics of the cold vortex over Northeast China (CVONC) during 30 years and different months in summer from 1981 to 2010

	总天数	次数	年均次数	年均天数	均次持续天数
1981~2010 年	614	134	4.47	20.47	4.58
6 月	270	52	1.73	9.00	5.19
7 月	202	46	1.53	6.73	4.39
8 月	142	36	1.20	4.73	3.94

由于时间段及使用资料的不同，本文与孙力等（1994）统计的东北冷涡在发生次数上有较大的差异。鉴于此，我们对比了两者的检索结果，发现主要的差别在于日平均资料与实时资料 [08 时、20 时（协调世界时，下同）] 的差异。如 1983 年的第一次冷涡过程，两种资料的检索结果分别为 6 月 5 日~6 月 9 日和 6 月 5 日~6 月 10 日。在实时资料中我们发现，6 月 9 日 08 时~6 月 10 日 20 时共四个时次的资料上冷涡状态分别为：有一无一无，实时资料在 6 月 9 日 20 时东北冷涡定义范围内不存在闭合中心，即中间存在不连续现象。在日平均资料上，6 月 9 日为冷涡日，6 月 10 日为非冷涡日。按照东北冷涡的定义，在 500 hPa 位势高度上存在的闭合中心必须维持在 3 天或 3 天以上，而且每次冷涡过程平均持续天数较短，为 4.58 天，仅仅稍大于定义的时间阈值，因而不同时次及资料对检索的影响较大。

从月尺度（表 1）上看，1981~2010 年夏季 6~8 月累计的东北冷涡发生次数分别为 52 次、46 次和 36 次，所占百分比分别为 38.8%、34.3% 和 26.9%，即 6 月为夏季东北冷涡的多发阶段，而且

6 月恰恰是长江中下游地区入梅的时节，研究（何金海等，2006a；王丽娟等，2010）已表明，东北冷涡与江淮流域梅雨存在显著的相关关系：东北冷涡强年，东北冷涡引导北方“干冷”空气南侵，与低层强盛西南暖湿气流在梅雨区北缘交汇，形成“上干下湿”的不稳定层结，在上升运动的触发下，最终导致梅雨量偏多，东北冷涡弱年情况正好相反。

4 东北冷涡的平均态特征

本文将东北冷涡平均态定义为：在三维空间尺度上，具有东北冷涡空间结构的普遍特征，且为随机事件中发生概率最大的事件，因此，为了研究东北冷涡的平均态，应先了解其概率分布特征。将每次东北冷涡过程 500 hPa 出现的闭合中心等高线位势高度视为相互独立的随机变量，利用基于高斯分布模型的概率方法来研究其平均态特征。

由于利用期望 μ 和标准方差 σ 这两个参数就可以确定高斯分布，并且这两个参数只是确定高斯分布的位置与形状，因此，将统计出来的 134 次东北冷涡过程的 500 hPa 闭合中心等高线位势高度视为样本量，并将其计算得到的期望和方差作为高斯分布的期望和方差，然后将其与原始样本的频数进行比较（图 1）。

由图 1 发现，134 次东北冷涡过程的 500 hPa 闭合中心等高线位势高度的频数与该样本所得的高斯分布拟合的非常好，只有 5400、5520、5560 gpm 三个点与高斯分布略有偏差。因此，将东北冷涡在 500 hPa 闭合中心等高线位势高度视为随机变量的高斯分布，其发生概率最大事件即为高斯分布的期望。

因此，对 1981~2010 年 30 年夏季 134 次共 614 天东北冷涡过程提取每天 500 hPa 闭合中心等高线位势高度的经纬度，并向东西南北各个方向扩展 15 个经、纬度，形成 $30^{\circ} \times 30^{\circ}$ 的网格；再对 $30^{\circ} \times 30^{\circ}$ 网格的各个格点分别求样本量为 614 的算术平均，得到夏季东北冷涡在 500 hPa 位势高度的平均态。为了研究其三维的结构特征，沿垂直方向向下扩展至 1000 hPa，向上扩展至 100 hPa 形成由 1000 hPa 至 100 hPa 共 12 层的平均态。同时，为了研究其温、压、风的配置关系，利用 500 hPa 位势高度提取的网格，对 NCEP/NCAR 提供的温度场和风场资料进行累加求算术平均，得到一个由温

度、风和气压相互配置的从低空 1000 hPa 至高空 100 hPa 共 12 层的平均态。由于篇幅限制,本文只给出了平均态在 1000 hPa、850 hPa、500 hPa 和 200 hPa 的特征图(图 2)。

与传统的区域平均相比较,这一方法将每次东

北冷涡过程的三维结构提取出来,避免了由东北冷涡发生的地域差别引起的偏差,因而能够更准确地表现出东北冷涡的平均态特征。

由图 2 平均态的三维特征发现:(1)东北冷涡为典型的深厚西风带冷涡,从 1000 hPa 至 200 hPa

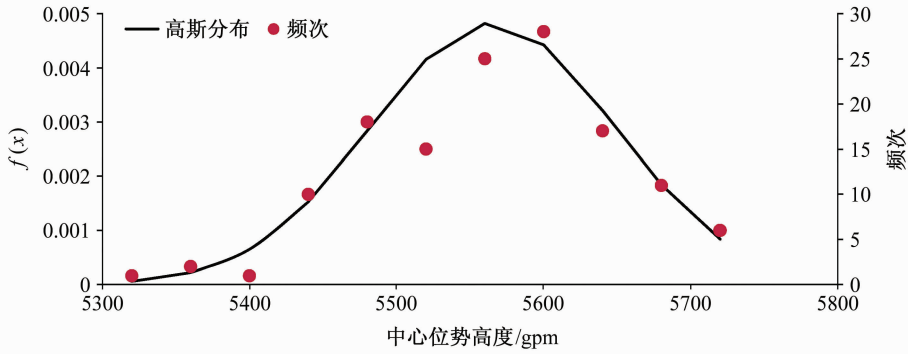


图 1 1981~2010 夏季共 134 次东北冷涡过程 500 hPa 闭合中心等高线位势高度的频数与该样本所得高斯分布的比较
Fig. 1 Comparison between frequency distribution and Gaussian normal distribution of CVONC's geopotential height of occlusive center at 500 hPa for 134 CVONCs from 1981 to 2010

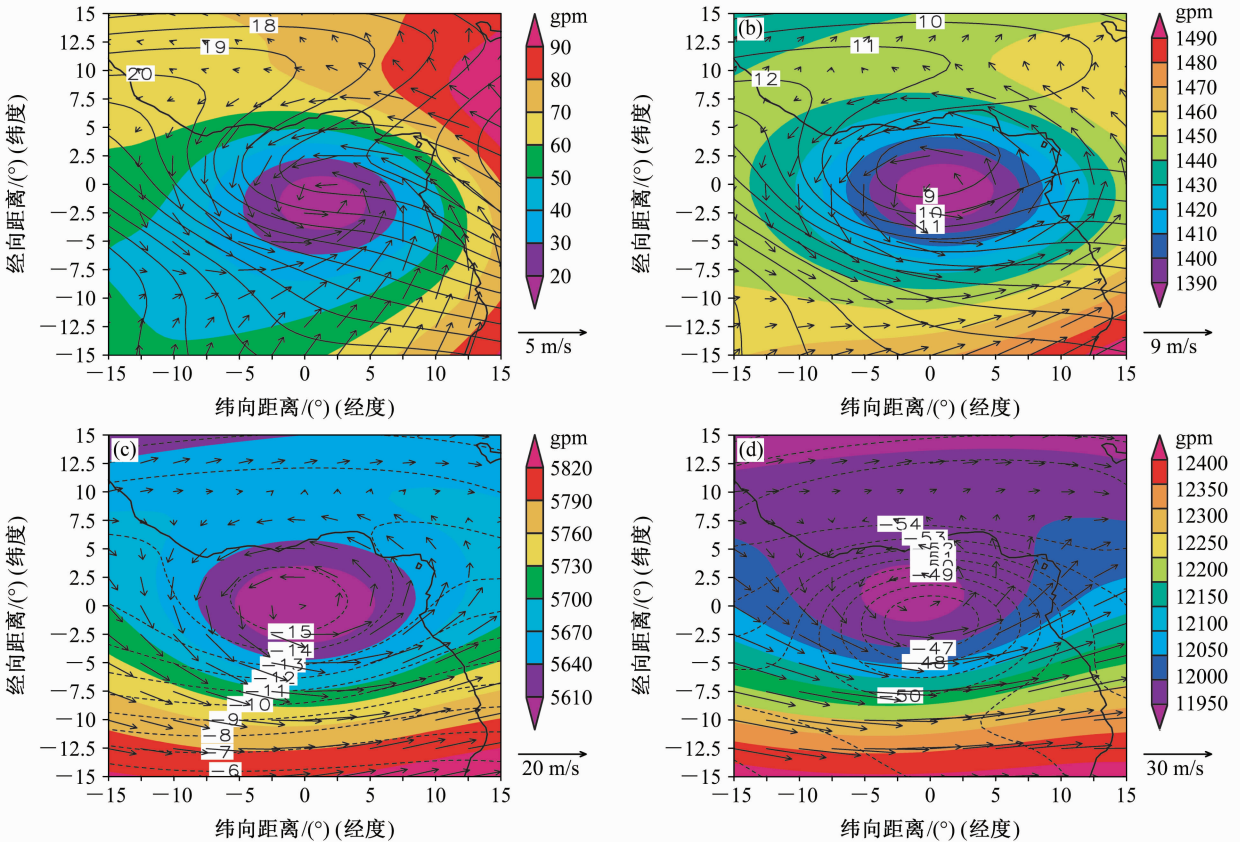


图 2 1981~2010 年东北冷涡的平均态:(a) 1000 hPa; (b) 850 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa。阴影:高度场(单位: gpm);实、虚线:温度场(单位: °C);箭头:风场(单位: m/s)
Fig. 2 Average state of CVONC from 1981 to 2010: (a) 1000 hPa; (b) 850 hPa; (c) 500 hPa; (d) 200 hPa. Shadings: geopotential height field; solid lines (dashed lines): temperature field (units: °C); arrows: wind field (units: m/s)

高空都有闭合中心, 气压中心从下往上向西北倾斜, 从底层偏东、偏南各 2.5 个经纬度至高层偏西、偏北各 2.5 个经纬度, 表现出中高纬地区的斜压性特征。而在 200 hPa (12 km) 以上, 则没有闭合中心存在, 主要由于高度达到了中高纬度地区对流层层顶。(2) 相比于位势高度场, 温度场从 850 hPa 至 400 hPa 出现低值闭合中心, 与同层位势高度相比, 温度场处于气压中心的西北部, 相对滞后, 因而在温、压、风的配置关系上, 在槽区有冷平流, 在槽前为正涡度平流, 有助于东北冷涡加深发展(朱乾根等, 2000)。(3) 在 250 hPa 及其以上的高空, 温度场则逐渐转变为高温脊乃至高温中心, 并且位于气压中心的东南侧, 至 100 hPa, 甚至形成了向南凸出的温度“倒脊”。此种低压与高温的配置方式, 不利于冷涡发展, 从高空的抑制作用方面解释了东北冷涡只能发展到 200 hPa 的原因。(4) 从底层到高层的风场上看, 气压中心南侧的风大于北侧, 东侧大于西侧。

为了检验东北冷涡的平均态确实具有东北冷涡的共性, 而不是多个低概率分布相互叠加形成的平均状态, 对东北冷涡的平均态进行了月际分析, 即分别对 6 月、7 月和 8 月按照以上的方法求得东北冷涡的月际平均态的变化特征(图略)。分析发现: 月际平均态的冷涡中心位势高度以及中心温度都围绕着东北冷涡的平均态振荡, 其中 6 月东北冷涡中心的位势高度(中心气压值)比 7、8 月稍低, 同时其冷涡中心温度也是三者中最低的。而除此之外, 无论从大气的斜压性特征、温、压配置关系还是整个 12 层东北冷涡的发展特征上, 月际平均态与东北冷涡的平均态都表现出很相似的分布特征, 而且在更短的时间尺度分析上, 东北冷涡的平均态仍然具备上述特征, 即所得的平均态具有共性, 不会因为时间尺度的变化而有较大的差异, 可以用来研究东北冷涡的异常特征。

5 东北冷涡偏离指数

5.1 东北冷涡偏离指数的定义

为了定性、定量描述东北冷涡的异常程度, 即偏离其平均态的程度, 本文定义了东北冷涡的偏离指数 δ 。具体做法如下: 以东北冷涡过程的每一天的 500 hPa 位势高度场中心所在的经纬度, 分别向东、西、南、北四个方向扩展 15° , 提取 $30^\circ \times 30^\circ$ 的

网格, 并将其网格 (j) 内数据与冷涡天数 (i) 排列成二维序列 X_{ij} , 对格点 j , 有

$$\overline{X_j} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_{ij}, j = 1, 2, \dots, n (n = 169),$$

第 i 天的东北冷涡偏离指数为:

$$\delta_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \left(\frac{X_{ij} - \overline{X_j}}{\overline{X_j}} \times 100\% \right),$$

$$i = 1, 2, \dots, m (m = 614 \text{ 天}),$$

式中, $\overline{X_j} (j=1, 2, \dots, n)$ 序列为东北冷涡 500 hPa 平均态所形成的一维序列, n 为提取网格的格点数, m 为总冷涡日数。从式中可以看出, 东北冷涡的偏离指数 δ 即为东北冷涡 500 hPa 距平百分率的场平均值。其代表的意义是: 东北冷涡在 500 hPa 高度上, 以中心位势高度值为中心 $30^\circ \times 30^\circ$ 的整个范围偏离平均态的程度, 偏离指数为正, 则冷涡在 500 hPa 高度上位势高度偏高; 偏离指数为负, 则冷涡在 500 hPa 上位势高度偏低; 而偏离指数的绝对值越大, 表明东北冷涡偏离平均态的程度越大, 反之亦然。

5.2 东北冷涡偏离指数与东北冷涡强度

环流强度的大小主要通过控制范围的大小及其自身的特征量来表示, 这两个特征量在东北冷涡的研究中就体现为低压面积和中心位势高度。为此, 我们提取出 1981~2010 年共 614 天冷涡日在 500 hPa 高度上的中心最低位势高度, 同时, 按照上述东北冷涡偏离指数的定义, 计算其相应的 δ , 并进行对比分析(图 3a)。发现两者存在非常好的对应关系, 且两者的相关系数达到了 0.83, 通过了 99.9% 的信度检验 (0.138)。这表明东北冷涡偏离指数能够很好地表现出东北冷涡在 500 hPa 高度上气压的信息。

由于不同冷涡过程在 500 hPa 的中心位置是不同的, 即平均态中同一个格点在不同冷涡过程的经纬度是不同的, 因而利用能够反映面积特征的格点数从侧面进行研究。为此, 分别统计了 614 天东北冷涡过程在 500 hPa 高度上以中心位势高度为中心的 $30^\circ \times 30^\circ$ 网格内低于 5600 gpm (东北冷涡平均态在 500 hPa 高度上最小闭合等高线) 的格点数, 同样将其与相对应的 δ 进行对比(图 3b)。结果发现两者有很好的负相关关系, 其相关系数达到了一 0.89, 通过了 99.9% 的信度检验 (0.138), 即东北冷涡偏离指数能够很好的体现东北冷涡低压面积这

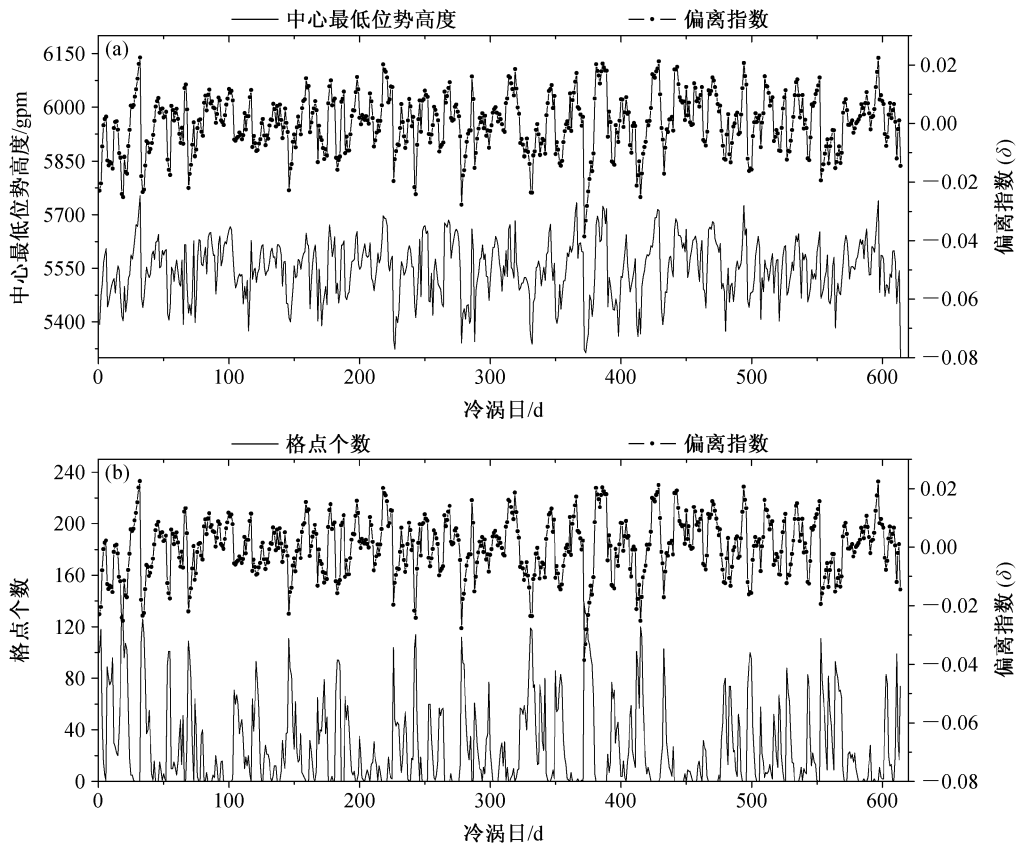


图 3 614 个冷涡日的偏离指数与中心最低位势高度 (a) 和低于 5600 gpm 的格点数 (b) 对比
Fig. 3 Comparison between the deviation index and (a) the lowest geopotential height, (b) the number of grid points below 5600 gpm in total 614 CVONC days

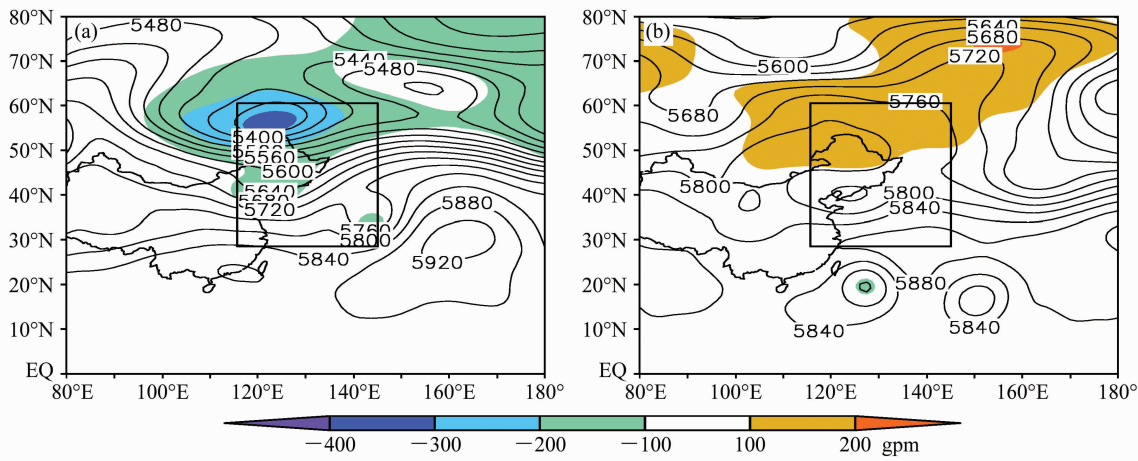


图 4 东北冷涡偏离指数最小值 (a) 和最大值 (b) 所对应的 500 hPa 距平场 (阴影) 和高度场 (等值线, 单位: gpm)。矩形方框为东北冷涡定义范围
Fig. 4 500-hPa geopotential height (contours, units: gpm) and its anomaly (shadings) corresponding to (a) the minimum and (b) the maximum of deviation index. The rectangle stands for the defined extent of CVONC

一特征。
为了更加直观地研究东北冷涡偏离指数对其强
度的描述, 我们提取 614 天东北冷涡偏离指数中的
最大值和最小值, 分别为: 1982 年 7 月 27 日 ($\delta =$

0.023) 和 1999 年 6 月 1 日 ($\delta = -0.039$), 并以 1971~2000 年的气候平均态作为基准场, 对这两日在 500 hPa 高度上的距平场进行对比分析 (图 4)。

对比图 4a 和图 4b, 我们可以看出, 最强冷涡日, 冷涡中心的最低闭合中心为 5360 gpm, 其负距平值超过 300 gpm, 并且距平值小于 -100 gpm 的低压面积范围较大, 囊括了整个冷涡中心, 并向南延伸, 影响范围覆盖了我国整个东北地区, 该日为双阻型, 冷涡位于两个阻塞高压中间; 而在最弱冷涡日, 冷涡中心及其控制的范围的负距平值均小于 100 gpm, 其最低闭合中心等高线位势高度较高, 并且控制范围较小, 冷涡位于一个较强阻塞高压内侧。

此外, 最强冷涡日和最弱冷涡日在距平场上表现出相反的分布型。以 40°N 为界, 以北地区前者主要为负距平控制区, 而后者为正距平控制区。在 40°N 以南地区, 两者都没有表现出很强的异常区域, 只有在以 5580 gpm 为标准的西太平洋副高控制面积上, 前者比后者更大。

综上, 东北冷涡偏离指数可以很好地表征偏离程度和低压面积这两方面的特征, 即可以很好地体现东北冷涡的强度, 因而利用东北冷涡的偏离指数可以定性、定量地描述东北冷涡的强度, 即: 东北冷涡偏离指数的值越小, 其对应的东北冷涡强度越强, 反之亦然。

6 结论

本文检索了 1981~2010 年夏季的东北冷涡过程, 以基于高斯分布模型的概率方法提取东北冷涡的平均态, 在此基础上, 定义了能够表征东北冷涡强度的东北冷涡偏离指数, 并探讨了该指数对东北冷涡强度的描述程度, 研究结果如下:

(1) 东北冷涡 500 hPa 闭合中心等高线位势高度的分布可以近似视为高斯分布。以其期望值提取的东北冷涡平均态, 具有该系统的共性, 不因时间尺度的变化而有较大的差异, 表现出很好的大气斜压性特征, 其温压配置关系有利于系统的维持和发展。

(2) 东北冷涡偏离指数与东北冷涡在 500 hPa 高度上的最低位势高度及低压面积相关性都非常高, 通过了 99% 的信度检验, 可以很好地表征偏离

程度和低压面积两方面的特征, 因而利用东北冷涡偏离指数可以定性、定量地描述东北冷涡强度。

参考文献 (References)

- 白人海, 孙永罡. 1997. 东北冷涡中尺度天气的背景分析 [J]. 黑龙江气象, (3): 6-12. Bai Renhai, Sun Yonggang. 1997. The background analysis study of meso-scale weather of the cold vortex in Northeast China [J]. Heilongjiang Meteorology (in Chinese), (3): 6-12.
- 陈力强, 张立祥, 周小珊. 2008. 东北冷涡不稳定能量分布特征及其与降水落区的关系 [J]. 高原气象, 27 (2): 339-348. Chen Liqiang, Zhang Lixiang, Zhou Xiaoshan. 2008. Characteristic of Instable energy distribution in cold vortex over northeastern China and its relation to precipitation area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 339-348.
- 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. 2007. “Climate effect” of the northeast cold vortex and its influences on Meiyu [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (5): 671-679.
- 何金海, 吴志伟, 祁莉, 等. 2006b. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析 [J]. 气象与环境学报, 22 (1): 1-5. 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): 1-5.
- 胡开喜, 陆日宇, 王东海. 2011. 东北冷涡及其气候影响 [J]. 大气科学, 35 (1): 179-191. 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.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77: 437-471.
- Li J P, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (12): 1632.
- 廉毅, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化 [J]. 大气科学, 34 (2): 429-439. Lian Yi, Bueh C, Xie Zuwei, et al. 2010. The anomalous cold vortex activity in Northeast China during the early summer and the low-frequency variability of the northern hemispheric atmosphere circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 429-439.
- 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 1995. 中国近百年温度序列 [J]. 大气科学, 19 (5): 525-532. Lin Xuechun, Yu Shuqiu, Tang Guoli. 1995. Series of average air temperature over China for the last 100-year period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 19 (5): 525-532.
- 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.
- 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.
- 施能, 朱乾根, 古文保, 等. 1994. 夏季北半球 500 hPa 月平均场遥相关型及其与我国季风降水异常的关系 [J]. 南京气象学院学报, 17 (1): 1–10. Shi Neng, Zhu Qiangen, Gu Wenbao, et al. 1994. Northern summer 500 hPa monthly mean field teleconnection patterns and its relation to monsoon rainfall anomaly in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 17 (1): 1–10.
- 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 the 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.
- 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.
- 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 (1): 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 (1): 89–97.
- Wu Z W, Li J P, He J H, et al. 2006. Occurrence of droughts and floods during the normal summer monsoons in the mid- and lower reaches of the Yangtze River [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L05813.
- 于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 2003. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 9–18. Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. 2003. The climatic change in Northwest China in recent 50 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 9–18.
- 张立祥. 2008. 东北冷涡中尺度对流系统研究 [D]. 南京信息工程大学大气科学学院博士学位论文. Zhang Lixiang. 2008. A study on MCS in cold vortex over Northeast China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 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.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2000. 天气学原理和方法 (第四版) [M]. 北京: 气象出版社, 123–126. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen, et al. 2000. The Theories and Methods of Synoptic Meteorology (4th ed.) (in Chinese)[M]. Beijing: China Meteorological Press, 123–126.