

东北冷涡活动及其短期气候预测研究进展

廉毅 沈柏竹 刘刚 李尚锋 杨旭 苏丽欣

(中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 吉林省气象科学研究所, 长春 130062)

摘要: 东北冷涡是亚洲东部中纬度的重要天气系统之一, 尤其在春末至初夏对我国东北、华北地区, 甚至江淮及以南地区的气候异常具有举足轻重的影响。自20世纪70年代以来, 国内对东北冷涡的研究, 从着重天气结构、中尺度特征和暴雨发生的物理过程等, 转向东北冷涡活动的机器自动监测、气候学特征、影响东北夏季低温的东北冷涡活动频率, 以及预测信号等; 今后, 研究更可能关注于东北冷涡的天气尺度与气候尺度诊断并重、高相关与物理过程预测信号提取研究并重, 以及诊断与数值预报方法密切结合。通过年际、季节与月等多时空尺度融合方法研究, 对于进一步提高东北冷涡短期气候预测水平将是十分有益的。

关键词: 东北冷涡, 活动特征, 短期气候预测, 技术方法

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.01.005

An Overview of the Northeast China Cold Vortex and Short-Term Climate Forecast

Lian Yi, Shen Baizhu, Liu Gang, Li Shangfeng, Yang Xu, Su Lixin

(Laboratory of Research for Atmospheric Circulation over Middle-High latitudes and East Asian Monsoon, Jilin Province Institute of Meteorological Science, Changchun 130062)

Abstract: The Northeast China cold vortex (NECV) is an important synoptic system in the Eastern Asia. It plays a very important role on the climate anomaly over the Northeast China, North China, even the Changjiang-Huaihe region and south of the region in late spring and early summer. Since 1970s, the research of NECV has been focused on weather structure, mesoscale features and the physical process of rainstorm and so on. Now the attentions turn to its activity automatic monitoring by computer, climatic characteristics, frequency impacting on the region summer low temperature and the predictable signals. In the future, we should pay more attentions on the synoptic and climatic scale diagnosis, abstracting its predictable signals from high correlations and physical processes, and on combination of diagnosis and numerical prediction. In all, it is helpful to improve the prediction of NECV by merging the multiple spatial and temporal scales.

Keywords: northeast China cold vortex, activity characteristics, short-term climate forecast, technology

0 引言

陶诗言先生等^[1]早在20世纪80年代初就指出, 东北冷涡型是中国东北与华北北部造成暴雨或雷阵雨的环流形势。在吉林省气象局组织科技人员编写的《预报员指导手册》中, 首次给出东北冷涡的分布与定义标准^①。孙力等^[2]进一步给出利用500hPa高度场判别东北冷涡的定义。20世纪80—90年代, 我国科技人员主要集中研究了东北冷涡活动的天气尺度特征与能量收支^[3-4], 中国气象局曾设置“八五”重点课题, 通过初步分析得出东北冷涡的一些中尺度系统及其大尺

度背景场, 廉毅^[5]也做过类似研究。20世纪末至21世纪初, 人们开始关注东北冷涡持续性活动的气候学特征研究, 探讨了东北冷涡持续性活动与大气环流异常之间的联系。结果表明, 东北冷涡持续活动是导致东北地区夏季低温的关键因子, 同时对降水也有重要影响^[6], 东北冷涡持续性活动不仅与前期、同期和后期北半球的大气环流异常密切相关, 而且也是异常区的重要组成部分^[7], 也与北半球环状模有一定联系^[8]。何金海等^[9]首次揭示作为天气尺度特征显著的东北冷涡, 尚具有“气候效应”, 不仅对东北地区有影响, 而且对东亚梅雨期也具有影响作用。因此, 人们加快对夏季东北冷涡“气候效应”, 以及短期气候预测方法的研究, 这不仅对我国东北地区, 还对华北、淮河与长江及其以南地区的气候异常预测有着重要作用。

收稿日期: 2015年9月8日; 修回日期: 2016年4月9日
 第一作者: 廉毅(1945—), Email: lianyi1103@sina.com
 资助信息: 国家自然科学基金项目(41175083, 41275096, 41405094, 41630424)

① 吉林省气象局. 预报员指导手册(一), 1984.

1 东北冷涡的定义与机器自动识别

1.1 定义与定义域

在吉林省《预报员指导手册（一）》中，首次将东北冷涡定义为东北地区夏季常见的天气系统，其标准是， 40° — 55° N， 117° — 135° E，在500hPa（或700hPa）高度场，有一个与冷中心或冷槽相配合的切断低压（有一根或一根以上的闭合等高线），并且在该区持续3d及以上；其采用的是中国气象局的1956—1963年、1969—1977年6—8月的历史天气图，还将冷涡活动路径分为北、中、南三路，进入该区 50° N以北为北路，进入该区 45° — 50° N为中路， 45° N以南为南路，这三路分型延续至今，该手册还给出大量的预测三种路径的短期预报指标，由于当时研究主要着眼于吉林省，冷涡活动区域较窄，20世纪90年代吉林省科技人员将此区域拓展至 35° — 60° N， 115° — 145° E^[2]。21世纪初，鉴于计算机硬件与软件水平的迅速提高，科研人员采用人工制定标准与机器自动识别相结合的方法，给出监测东北冷涡活动的日历与过程。但是，由于对东北冷涡制定的标准和方法不同，结果差别比较大：一种方法取500hPa等高线闭合圈持续2d，夏季东北冷涡活动天数占总天数的77.3%^[10]；另一种坚持东北冷涡活动必须持续3d及以上为标准，其中将冷涡活动天数视为随机变量，其概率分布约占夏季总天数的42%^[7]，刘刚等^[11]采用机器识别方法认为东北冷涡活动约占夏季总天数的53%；另一方法基于高斯分布模型的概率方法提取东北冷涡的平均态，以此定义了表征东北冷涡强度的东北冷涡偏离指数，得出1981—2010年，夏季发生东北冷涡的天数站总天数的22%^[12]。还有一些方法大同小异，可见，夏季东北冷涡活动天数的检测结果不尽相同，如何提出较为接近东北冷涡活动实况的检测方法，仍是今后对其短期预测方法研究的首要问题。

1.2 冷涡指数

在自动检测东北冷涡活动天数的基础上，为了进一步研究东北冷涡的变化，及其对我国不同区域天气气候的影响，定量表征东北冷涡活动指数，包括其持续时间、中心强度（高度场和温度场）及活动区域等，是一项重要的基础性工作^[13]，苗春生等^[14]选用我国160个测站5—6月地面气温，以东北地区地面气温变率最大的测站为基准，计算160个测站与此站的相关性，计算通过0.05显著性水平检验的连片区域平均值的标准化序列，将该序列前附加一个负号，定义为前汛期东北冷涡强度指数NECVI。这是一种从地面气象要素来定义5—6月东北冷涡活动强度指数，

的确是一种有益的尝试。但是，5—6月160测站的气温并不都是与东北冷涡活动有关的。李超等^[15]也定义了类似的东北冷涡指数，对东亚地区（ 20° — 60° N， 100° — 140° E）夏季1000hPa平均气温进行旋转EOF分解，取第一模态大于或等于0.6的正值中心覆盖区域（ 33° — 47° N， 124° — 145° E），将该区域内的夏季1000hPa平均气温标准化后取反向数，定义为东北冷涡强度指数，该指数反映明显偏东活动的东北冷涡与江淮流域夏季降水有着较好的相关性。杨涵涓等^[12]则从冷涡环流的统计特征出发，定义了表征东北冷涡强度的东北冷涡偏离指数，物理意义是很清楚的，稍有遗憾的是，检测出1981—2010年东北冷涡活动天数，仅约占夏季总天数的1/5，似乎偏少，与刘宗秀等^[7]检测天数在50%左右的结论差异较大。谢作威等^[16]采用对500hPa高度场滤掉8d以下的天气尺度扰动，然后再按照众所周知的冷涡标准进行机器检测，结果表明，1965—2007年5—8月东北冷涡事件占总天数的29%，与杨涵涓等^[12]的结果类似。还有学者专门定义一个华北冷涡强度指数，该指数异常强年500hPa上贝加尔湖地区有气旋式环流发展，冷空气活跃并随后槽后引导气流扩散南下，影响华北冷暖空气在华北交汇，华北和东北地区上空低层上升运动发展^[17]。

2 东北冷涡活动天气学特征

刘刚等^[11]较为详细地统计了1948—2012年东北冷涡累计发生频次与活动天数随东北冷涡过程维持天数的变化（图1）。由图1可知，东北冷涡发生频次与活动天数随冷涡过程维持时间的增长迅速减少，冷涡维持时间以生命期3~6d的过程居多，有745次（3309d），占总次数的77.9%（总天数77%）；东北冷涡持续9d及以上的过程较少，共发生有37次（383d），占总频次的3.9%（占总天数的8.9%）。维持天数在3d的东北冷涡过程最为明显，充分体现了东北冷涡的天气尺度环流系统特征。孙力^[3]对一次典型的东北冷涡过程进行能量学分析，东北冷涡活动具有鲜明的阶段性能量学特征，其早期阶段扰动动能边界通量作用是至关重要的，东北冷涡的减弱，从有大量扰动动能转换成纬向平均动能开始，随后加上扰动有效位能向扰动动能转换及边界通量作用的减弱，使得冷涡逐渐衰亡。

陶诗言先生等^[1]最早指出，东北冷涡型是造成中国东北与华北北部暴雨或雷阵雨的环流形势。廉毅^[5]对东北冷涡暴雨的地面中尺度特征作了初步分析，揭示地面南风风速脉动超过4m/s时，加之地形高度（ ≥ 500 m）迎风坡抬升，所导致的近地面辐合与辐散

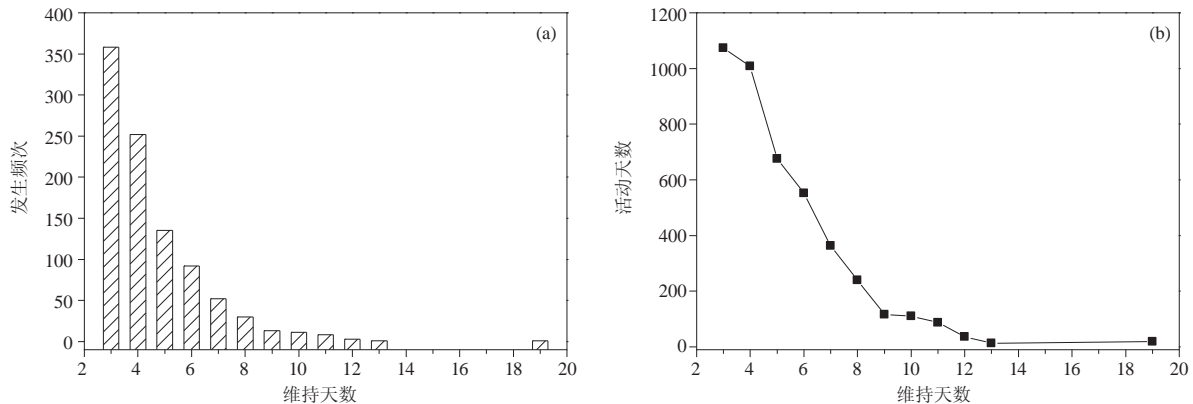


图1 1948—2012年逐年5—8月东北冷涡发生频次(a)和活动天数(b)随东北冷涡过程维持时间的变化

Fig. 1 The change of the NECV occurrence frequency (a) and active days (b) with the NECV process maintaining time in summer in 1948–2012

可激发近地面的重力惯性波，并由此产生对流暴雨中尺度雨团（1h雨量外包线 $\geq 5\text{mm}$ ）。钟水新等^[18]详细分析了一次东北冷涡形成、发展衰亡阶段垂直结构、急流分布与干冷空气的对流层顶高位涡（PV）特征。魏铁鑫等^[19]利用HYSPLIT v4.9轨迹追踪模式，以分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的再分析资料驱动模式，对东北地区308例冷涡暴雨过程中的目标气块进行后向轨迹追踪模拟，结果显示东北冷涡暴雨主要有4个水汽源地。

布和朝鲁等^[20]对东北冷涡与大气环流联系的天气学特征做了较详细的归类，指出共有地形、欧亚阻塞环流及低频活动、东北亚地域特点、阻塞环流间的冷空气活动、环流与瞬变扰动与大气环流主模态的遥相关等方面的联系。张立祥等^[21]还特别对东北冷涡强对流的研究进展、东北冷涡强降水、强天气预报技术等方面作了较为详细的综述。

3 东北冷涡的气候学特征

在1998年东北地区松嫩流域夏季的持续性特大暴雨，以及持续15年暖夏的背景下，2009年首次出现夏季低温，科研人员相继开展关于东北冷涡持续性活动的气候学特征研究，探讨其与大气环流异常之间的联系。

3.1 气候学特征

刘刚等^[11]按照孙力等^[2]的东北冷涡定义的标准，采用机器自动识别的方法，统计表明，1948—2012年的5—8月各月东北冷涡活动平均天数分别为14、18、18和14d，5月和8月平均天数相等，5—8月东北冷涡活动具有明显空间分布特征，经圈活动集中区位于 $121^\circ\text{—}131^\circ\text{E}$ ，占总活动天数的51.5%；纬圈活动集中区位于 $48^\circ\text{—}53^\circ\text{N}$ ，占总活动天数40.2%。

3.2 持续活动的环流特征

孙力等^[6]利用NCEP/NCAR的1958—1997年月平均再分析资料，探讨了东北冷涡持续性活动与大气环流异常之间的联系，冷涡活跃年夏季，500hPa高度场呈现以东北地区为中心的南北向、东西向分布的正一负一正距平波列，表明冷涡与东亚阻塞高压势力偏强、西太平洋副热带高压（以下简称副高）位置偏南等大尺度环流背景相联系，在对流层中上层，高空西风急流有明显的分支现象，特别是亚洲中纬西风急流位置偏南。刘宗秀等^[7]揭示了东北冷涡持续活动的北半球500hPa环流特征，5月和6—8月东亚东北冷涡活动的典型多寡年，其北半球500hPa高度距平场合成、频次累积和相关分析，结果表明：东亚东北冷涡持续性活动不仅与前期、同期和后期北半球的大气环流异常密切相关，而且也是异常区的重要组成部分。布和朝鲁等^[20]从高频与低频动力学角度总结了东北冷涡环流及其动力学特征。苗春生等^[14]还分析东北冷涡异常活动与海温强迫的联系，前汛期东北冷涡异常强年，前期对应着La Niña的成熟阶段或发展阶段；而前汛期东北冷涡异常弱年，则对应着El Niño的成熟阶段或发展阶段。

3.3 持续活动的气候效应

孙力等^[6]不仅分析了1998年松嫩流域东北冷涡暴雨过程天气学特征，揭示1998年松嫩流域的冷涡雨季中所发生的多次东北冷涡暴雨过程，是大气环流由春末夏初到盛夏过渡不同进程中的产物^[22]，还总结了夏季东北冷涡持续性活动对东北地区天气气候的影响。何金海等^[9]指出，东北冷涡虽然是东亚中高纬地区重要的天气系统，尽管其时间尺度为天气尺度，但是频繁的东北冷涡活动具有显著的“气候效应”，东北冷

涡越强,梅雨量很可能偏多,东北冷涡越弱,梅雨量很可能偏少。苗春生等^[14]还发现前汛期东北冷涡强度与华南降水存在显著的正相关,前汛期东北冷涡与前期中国近海海温存在显著的负相关关系,东北冷涡强年,前期东亚冬季风偏弱,同期东亚夏季风异常爆发提前且偏强,副高位置偏南,华南地区低层上升运动发展,降水偏多;东北冷涡偏弱年,前期东亚冬季风偏弱,同期东亚夏季风爆发推迟且偏弱,副高位置偏北,华南地区低层下沉运动发展,降水偏少。胡开喜等^[10]研究表明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和中纬度地区的东风异常,局地水汽通量辐合增强,进而有利于降水的偏多。沈柏竹等^[23-24]尝试将东北夏季分为东北冷涡和副热带两个雨季,初步揭示青藏高原积雪与夏季东北冷涡雨季联系的事实,还揭示了两个雨季的主要环流特征。隋波等^[25]统计表明,当初夏纬向环流指数偏弱时,中国东北和华北大部分地区降水量偏多,这表明东亚中高纬地区盛行阻塞和冷涡偶极子系统,呈现有利于东北冷涡的雨季形势,中国盛夏降水带从东北地区开始,由北向南分四个雨带。沈柏竹等^[26]对2009年东北夏季低温的成因作了分析,揭示东北冷涡异常频繁活动是最直接的影响因子。刘刚等^[27]统计表明,夏季阻塞高压与同期东北冷涡活动天数呈显著正相关,与长春、哈尔滨同期平均气温呈显著负相关。崔锦等^[28]对造成东北夏季低温的东北冷涡与环流系统作了详细综述。李尚锋等^[29]给出东北冷涡与东北亚阻塞高压的不同配置,以及影响东北地区6月极端低温事件的大气环流特征。

4 东北冷涡活动的短期气候预测方法

刘宗秀等^[7]统计分析表明,5月冷涡活动与前6个月500hPa高度场相关显著区,主要分布在极圈、中东太平洋和北非乍得盆地,与2月极圈的阿拉斯加和亚洲接壤部为正相关,与前一年12月和当年5月中太平洋副热带地区呈正相关,与2、4和5月乍得盆地均呈负相关;6—8月东北冷涡典型多寡年的同期距平场,均与前冬(12—2月)的主要异常区反位相,存在半年尺度的遥相关,与北太平洋涛动(NPO)类同的500hPa高度距平场,如前冬呈正位相,预报6—8月东北冷涡持续活动弱,反之,冷涡持续活动强;合成场和相关场通过显著性水平检验的关键区,主要位于东亚中高纬度至阿留申群岛,及其以南的副热带地区、青藏高原接近巴基斯坦一侧和北非乍得盆地与撒哈拉大沙漠等地区。何金海等^[9]指出,前期北太平洋海温

的异常,可能是导致梅雨期东北冷涡异常的因素之一,夏季的海陆热力差异对东北冷涡起着促进作用,而冬季的差异对东北冷涡起着抑制作用,为东北冷涡和梅雨的短期气候预测提供了有意义的结果。

沈柏竹^[30]曾对2009年东北夏季东北冷涡活动异常多作出判断,其做法是综合各种时空尺度预测因子,首先,在年际变化尺度上,2009年前一年冬季500hPa高度距平场,与夏季低温的1972年的前一年冬季很相似,北太平洋涛动呈显著的负位相,且春季仍持续;4—5月500hPa北太平洋地区超长波扰动转为定常波扰动槽,均预示2009年6—7月夏季东北冷涡活动异常强。奇异值分解(SVD)和谐波分析还表明,北太平洋涛动的异常位相是大气中除了天气尺度的混沌分量外,可提取的一种行星尺度稳定分量^[26]。各种尺度因子综合预测出2009年夏季东北冷涡活动异常频繁,与实况东北冷涡活动偏多期集中在6—7月基本吻合^[31]。

谢作威等^[16]总结,5—9月东北冷涡的形态根据其上游高压脊的位置可分为四种:叶尼塞河型、贝加尔湖型、乌拉尔—雅库茨克型和鄂霍次克海—北冰洋型。西太平洋遥相关(WP)型为东北冷涡活动的同期背景环流型,东北冷涡在其负位相易于生成。此外,5—6月东北冷涡活动与太平洋/北美(PNA)型、8月东北冷涡活动与北大西洋涛动(NAO)密切联系,这些研究结论为东北冷涡的短期气候预测提供了有力的环流背景。

5 结论与讨论

1)我国在东北冷涡的标准确定与自动检测结合研究方面,取得了长足的进步,这与20世纪80年代以来计算技术迅速发展相适应,为分析东北冷涡的天气与气候活动特征奠定了坚实的基础。但是,也应看到由于选择东北冷涡活动标准的人为差异,在东北冷涡活动检测上还需进一步的研究,只有较为贴近实况的检测结果,与确定较为科学的东北冷涡活动指数,是将东北冷涡天气尺度扩展到气候尺度的重要基础。东北冷涡的活动检测可能要比检测东亚季风活动简单一些,因为,东北冷涡活动属单个环流系统,自动检测便于与目视天气图实况的融合,而东亚季风由多个环流系统构成。

2)有关东北冷涡的气候效应研究也拓展许多,较20世纪50—70年代对大气环流系统的研究水平推向新的阶段^[32]。主要表现在,一次东北冷涡过程虽多为天气尺度系统,但是,其在1个月甚至2~3个月的持续活动,或者活动很少,均可能引起中高纬度大气环流异常,甚至是对副热带与热带大气环流产生重要影

响。因此,我国学者相继在研究东北冷涡的“气候效应”,引起其异常活动的海洋外强迫等预测因子方面取得重要进展,还开展了东北冷涡活动短期气候预测的实践,对东北夏季低温的预测取得良好效果,在短期气候预测方法研究上,试图将高频与低频信号结合方面进行了有益的尝试。

3) 但是,必须充分看到气候系统的复杂性,东北冷涡本身具有显著的混沌性质,前期信号的提取同样存在较大的不确定性,不能只满足某些诊断的主客观比较一致的初步结果,更不能满足某一两次短期气候预测的良好效果。今后,可能应更加注意东北冷涡的天气尺度与气候尺度诊断并重、显著相关与物理过程模型信号提取研究并重、诊断与数值预报方法密切结合。总之,通过年际、季节与月等多时空尺度因子融合方法的研究,对东北冷涡短期气候预测水平的进一步提高将是十分有益的。

参考文献

- [1] 陶诗言,等. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980.
- [2] 孙力, 郑秀雅. 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, 1994, 5(3): 297-303.
- [3] 孙力. 一次东北冷涡发展过程中的能量学研究. 气象学报, 1998, 56(3): 349-361.
- [4] 孙力. 东北冷涡持续活动的分析研究. 大气科学, 1997, 21(3): 297-307.
- [5] 廉毅. 一次东北冷涡暴雨中分析//北方暴雨课题技术组. 暴雨文摘. 北京: 气象出版社, 1987.
- [6] 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 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, 2000, 58(6): 704-714.
- [7] 刘宗秀, 廉毅, 高枫亭, 等. 东北冷涡持续活动时期的北半球500hPa环流特征分析. 大气科学, 2002, 26(3): 361-372.
- [8] 何金海, 吴志伟, 祁利, 等. 北半球环状模和东北冷涡与中国夏季降水关系分析. 气象与环境学报, 2006, 22(1): 1-5.
- [9] 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响. 科学通报, 2006, 51(23): 2803-2809.
- [10] 胡开喜, 陆日宇, 王东海. 东北冷涡及其气候效应. 大气科学, 2011, 35(1): 179-191.
- [11] 刘刚, 廉毅, 等. 5—8月东北冷涡客观识别分类及其北半球大气环流特征分析. 地理科学, 2015, 35(8): 1042-1050.
- [12] 杨涵涌, 封国林, 沈柏竹, 等. 中国夏季东北冷涡强度的量化分析. 大气科学, 2012, 36(3): 487-494.
- [13] 朱占云, 何金海. 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, 2010, 33(4): 1-8.
- [14] 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 近50年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的欢喜分析. 大气科学, 2006, 30(6): 1249-1256.
- [15] 李超, 韩桂荣, 孙燕. 2015. 近50a东北冷涡异常特征及其淮河流域降水关系. 气象科学, 35(2): 216-222.
- [16] 谢作威, 布和朝鲁. 东北冷涡低频活动特征及背景环流. 气象学报, 2012, 70(4): 704-716.
- [17] 郁珍艳, 何立富, 李泽春. 1999—2008年夏季华北冷涡的异常特征. 气象科技, 2012, 40(2): 256-261.
- [18] 钟水新, 王东海, 张人禾, 等. 一次东北冷涡降水过程的结构特征与影响因子分析. 高原气象, 2011, 30(4): 951-960.
- [19] 魏铁鑫, 缪启龙, 段春峰, 等. 近50a东北冷涡暴雨水汽源地分布及其水汽贡献率分布. 气象科学, 2015, 35(1): 60-65.
- [20] 布和朝鲁, 谢作威. 东北冷涡环流及其动力学特征. 气象科技进展, 2013, 3(3): 34-39.
- [21] 张立祥, 李泽春. 东北冷涡研究概述. 气候与环境研究, 2009, 14(2): 218-228.
- [22] 孙力, 安刚. 1998年松嫩流域东北冷涡大暴雨过程的诊断. 大气科学, 2001, 25(3): 342-354.
- [23] 沈柏竹, 廉毅. 青藏高原积雪与夏季东北冷涡雨季降水关系初探. 吉林大学学报学报, 2004, 34(增刊): 112-118.
- [24] 沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等. 影响东北初夏与盛夏降水年际变化的环流特征分析. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(3): 402-412.
- [25] 隋波, 隋戈, 隋丹. 太平洋副热带高压、西风环流、极涡指数变化与中国夏季降水相关的研究. 地理科学, 2007, 27(S): 69-77.
- [26] 沈柏竹, 刘实, 廉毅, 等. 2009年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系. 气象学报, 2011, 69(2): 320-333.
- [27] 刘刚, 沈柏竹, 廉毅, 等. 亚洲阻塞高压分类及其与东北冷涡活动和东北夏季低温的联系. 地理科学, 2012, 32(10): 1269-1274.
- [28] 崔锦, 李辑, 张爱忠, 等. 东北夏季低温的研究进展. 气象, 2007, 33(4): 3-9.
- [29] 李尚锋, 应爽, 姚耀显, 等. 东北夏季月低温事件的定义及大气环流年代际特征分析. 气象与环境学报, 2014, 30(3): 38-45.
- [30] 沈柏竹, 李尚锋, 廉毅. 初夏东北冷涡活动的谐波分析. 吉林大学学报(地球科学版), 2008, 38(增刊): 204-208.
- [31] 中国气象局国家气候中心. 气候系统监测诊断年报. 北京: 气象出版社, 2010.
- [32] 帕尔们, 牛顿. 大气环流系统. 程纯枢, 卢鎏, 雷雨顺, 等译. 北京: 科学出版社, 1978.