

东北初夏极端低温事件的空间分布特征 及其成因机理分析

李尚锋^{1,2}, 廉 毅², 陈圣波¹, 孙钦宏³, 姚耀显⁴

(1. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026; 2. 吉林省气象科学研究所, 中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 吉林 长春 130062; 3. 吉林省气象台, 吉林 长春 130062; 4. 吉林省气象局科技与预报处, 吉林 长春 130062)

摘要: 采用东北三省 150 个测站 1961~2008 年的逐日温度资料和同期美国环境预报中心(NCEP)、国家大气研究中心(NCAR) 2.5°×2.5°分辨率的全球再分析资料, 探讨东北三省初夏极端低温事件的空间分布及其大气动力学特征, 结果表明: 该区初夏气温与夏季气温变化在时空尺度上相关显著, 具有重要的预警作用; 给出初夏极端低温事件的定义, 其空间分布可归为 3 种类型, 随纬度的增加极端低温事件发生的频率也显著增加; 20 世纪 90 年代以来, 极端低温事件明显减少, 仅出现 2 次, 但影响范围遍布东北三省全境; 阻高与冷涡的配置和大气低频 Rossby 波扰动对初夏东北冷涡活动气候基本流的同位相强迫, 更增强了 500 hPa 位势高度距平场由北向南的“+、-”局域环流的异常, 是极端低温事件的强弱与空间范围大小的重要动力机制; 较为偏东的鄂霍次克海阻高和冷涡, 以及冷平流的作用与以黑龙江省(包括吉林省的一部分)为主出现极端低温 I、II 类事件的关系更加密切, 贝加尔湖阻高和鄂霍次克海阻高与偏南的强冷涡相互匹配、大气低频 Rossby 波扰动很强易出现第 III 类极端低温事件。

关 键 词: 东北; 东北冷涡; 冷平流; Rossby 波

中图分类号: P434+1; P466

文献标识码: A

文章编号: 1000-0690(2012)06-0752-07

东北地区是中国商品粮的主产区之一, 粮食生产在全国粮食供需平衡中具有重要地位, 粮食多年平均产量占全国的 13%, 其中玉米占 30%, 大豆占 35% 以上^[1,2]。20 世纪 50~70 年代, 中国东北地区夏季低温冷害频发, 由东北三省气象部门与中央业务、科研院所等单位组成的东北低温协作研究组, 对东北夏季低温的成因以及长期预报方法, 进行了系统的研究, 发现东北地区持续低温时, 自亚洲大陆到太平洋东部, 除亚洲南部、青藏高原和西伯利亚中部外, 气温几乎都是负距平, 同时还发现东北夏季低温具有群发性的特点^[3-5]。20 世纪 80 年代以来, 东北夏季低温冷害出现的频率明显减少^[6]。尤其是 90 年代以后, 全球进入了百年以来最暖的时期^[7], 中国东北地区成为全球变暖区域响应显著变暖的地区之一, 1994~2008 年未发生大范围的夏季低温气候事件, 2009 年夏季, 东北地区中

部和北部出现一次较为严重低温事件, 再次引起了人们的关注^[9,10]。

6 月和 10 月大气环流往往发生突变现象^[11], 而 6 月正值东北亚地区大气环流开始盛行阻高和东北冷涡活动(偶极子), 本文拟在这种环流背景下, 给出辽宁、吉林和黑龙江(以下简称东北三省)初夏极端低温事件的定义, 揭示其空间分布特征以及持续的天气动力机制, 探讨东北三省初夏气温变化是否对整个夏季气温变化趋势具有预警作用。

1 资料和方法

本文采用东北三省 150 个测站 1961~2008 年的逐日温度资料和同期美国环境预报中心(NCEP)、国家大气研究中心(NCAR) 2.5°×2.5°分辨率的全球再分析资料。依据沈柏竹等^[10]定义的东

收稿日期: 2011-10-12; **修订日期:** 2012-02-10

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41175083、41175084)、青年基金项目(40705036)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY: 201006020, 201106016, 201106015)资助。

作者简介: 李尚锋(1981-), 男, 湖北襄樊人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事天气与气候研究。E-mail: ice-lsf@163.com

北地区夏季低温极端气候事件的划分标准,用于东北三省测站初夏(6月)日平均气温低温事件的定义。

将同时满足下述2个条件的,定义为东北三省初夏(6月)1次极端低温事件:①任一测站日平均气温 $\bar{T}_{6d} \leq -1.0\sigma$ 为一个极端低温天气日,并持续 ≥ 5 d,其中 σ 为6月日平均气温变化的标准偏差;②东北三省某一区域(测站比较集中),达到 ≥ 5 个极端低温天气日的测站数 ≥ 20 个,且发生在同一个时间段,即:各个测站之间发生该次事件的开始日期不能相差2日以上。

将达到极端低温事件测站数最大的日期,定义为极端低温事件的代表日期,统计得到符合上述标准的样本11个,日期为:1964-06-06, 1967-06-10, 1969-06-29, 1974-06-24, 1977-06-16, 1983-06-09, 1983-06-15, 1983-06-30, 1989-06-19, 1992-06-09, 2002-06-15。

采用 Takaya 和 Nakamura 推导出的三维波作用通量^[12,13],来描述 Rossby 波能量频散过程^[14],其中,气候态取自1971~2000年500 hPa日平均场作为基本场,与此对应的异常场则为准地转扰动场,位势高度的单位为 gpm。

将同时满足下述2个条件的,定义为东北三省初夏(6月)1次典型高温事件:①任一测站日平均气温 $\bar{T}_{6d} \geq 1.0\sigma$ 为一个极端高温天气日,并持续 ≥ 5 d,其中 σ 为6月日平均气温变化的标准偏差;②东北三省某一区域(测站比较集中),达到 ≥ 5 个极端高温天气日的测站数 ≥ 20 个,且发生在同一个时间段,即:各个测站之间发生该次事件的开始日期不能相差2日以上;

将达到典型高温事件测站数最大的日期,定义为典型高温事件的代表日期。

根据刘刚等^①定义的阻高标准:① 500 hPa 位

势高度场上有高压中心;② 高压中心日移动不超过12.5个经度;③ 高压中心至少维持3 d或以上。

根据孙力等^[15]有关500 hPa高度场东北冷涡的定义:①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;②冷涡出现在(35°N~60°N、115°E~145°E)范围内;③冷涡在上述区域内的生命史至少为3 d或3 d以上。将影响初夏极端低温事件的东北冷涡和亚洲阻高的活动天数进行统计对比,找出这2个影响系统与东北初夏极端低温事件之间可能存在的联系。

从表1可见极端低温事件出现在9个年份之中(1983年初夏发生了3次),除了1977年冷涡天数较少(2002年冷涡活动正常)外,其余的极端低温事件均发生在初夏冷涡活动天数为正距平的年份;极端低温事件同样多发生在初夏阻高活动天数为正距平的年份(除1964年和1992年外)。

2 东北三省初夏与夏季气温相关性的空间分布

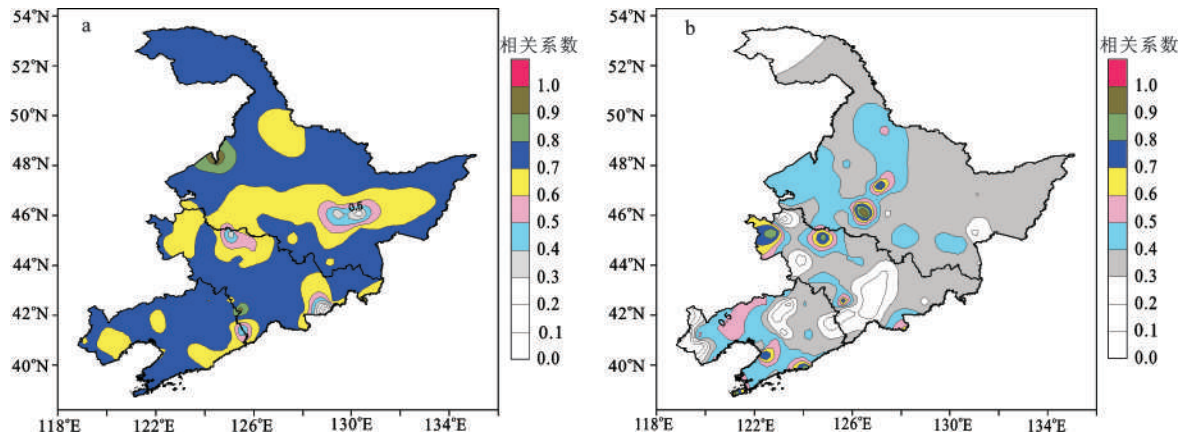
图1为东北三省150个测站1961~2008年6月与6~8月及6月与7~8月平均气温相关系数分布图,由图1a可见,东北三省150个测站初夏与夏季平均气温相关显著(除个别测站外),表明东北三省初夏平均气温变化趋势不仅在时间尺度上对整个夏季平均气温变化有很好的代表性,而且,东北三省无论是初夏还是夏季气温变化在空间尺度上具有整体一致性。图1b可见,除了黑龙江最北部、吉林省中南部和辽宁省中部有一部分区域没有达到显著性水平外,其余大部分地区的相关系数也都达到了 $\alpha=0.05$ 的显著性水平,说明东北地区的初夏温度变化在整个夏季有较好持续性。

表1 东北三省初夏极端低温事件的测站数和东北冷涡活动、亚洲阻高天数和天数距平

Table 1 Observatory stations numbers of extreme cool summer events, days and abnormal days of Northeast cold vortex and blocking high of Asian in early summer

	1964年	1967年	1969年	1974年	1977年	1983年	1989年	1992年	2002年
亚洲阻高天数(d)	30	49	55	51	46	62	48	36	52
亚洲阻高天数距平(d)	-11	8	14	10	5	21	7	-5	11
冷涡天数(d)	24	17	22	28	8	22	15	21	14
冷涡天数距平(d)	10	3	8	14	-6	8	1	7	0
极端低温事件站点数(个)	41	43	30	45	22	57	28	120	64

① 刘刚,沈柏竹,廉毅,等.亚洲阻塞高压及其与东北冷涡活动和东北夏季低温的联系[J].地理科学,待发.



注: 图中白色区域外部分的显著性水平 $\alpha=0.05$, 等值线间隔为 0.1。

图1 东北三省 150 个测站 1961~2008 年 6 月与 6~8 月(a)和 6 月与 7~8 月(b)平均气温的相关系数

Fig.1 Correlation between June and the whole summer average temperature (a), June average temperature and average temperature of July and August (b) in 1961-2008 of 150 observatory stations in Northeast China

3 极端低温事件空间分布类型

依据东北三省的地理特征, 由高纬度到低纬度, 将极端低温事件分为 3 类, 第 I 类为极端低温事件的测站和低温的大值区都集中在黑龙江境内(图 2a), 第 II 类为极端低温事件的测站和低温的大值区主要集中在黑龙江和吉林省(图 2b), 第 III 类为极端低温事件的测站和低温的大值区遍布东北三省(图 2c)。

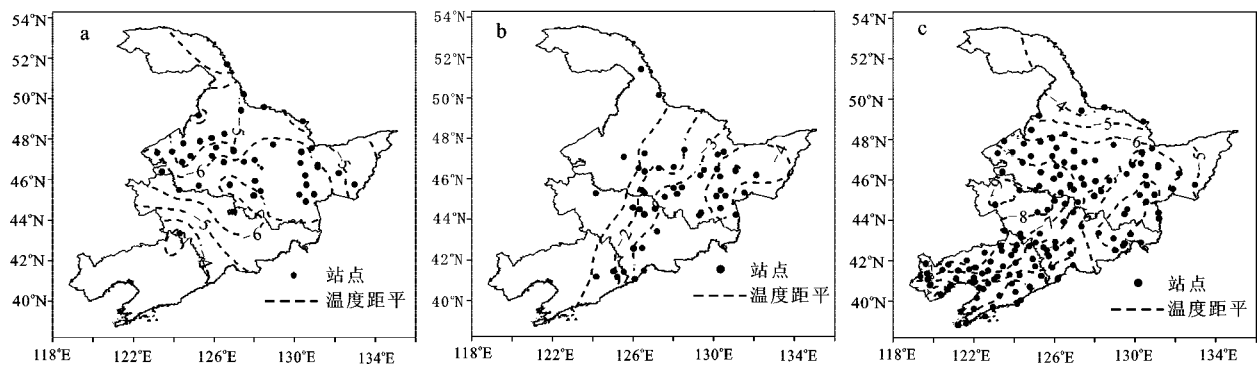
表 2 的 11 个极端低温事件中, 第 I 类有 4 个, 第 II 类 3 个, 第 III 类 4 个。20 世纪 90 年代以来仅有 2 次第 III 类极端低温事件发生, 表明由于东北地区是全球变暖响应的显著区域, 东北地区不仅整个夏季极端低温事件明显减少^[6,9,10], 而且发生的频率也明显降低, 但是, 一旦出现往往是大范围的, 1992 年和 2002 年 6 月出现的 2 次事件就是例证; 在东北三省范围内, 黑龙江省 3 类极端低温事件均有

发生(11 次, 见表 2), 吉林省多有第 II 和第 III 类事件发生(7 次, 见表 2), 而辽宁省则仅出现第 III 类事件(4 次, 见表 2), 说明东北三省初夏极端低温事件发生次数随纬度的增高而增加。

4 三类极端低温和一次典型高温事件的 Rossby 波能量频散

本文尝试从大气基本流与低频变化相互作用的角度出发, 进一步分析初夏极端低温事件发生的大气环流主要特征, 而北半球大气低频变化的水平结构就是二维的 Rossby 波, 往往有可能揭示出东北亚地区高空大气环流局域环流异常的某些动力机制^[16]。

图 3 为 3 种类型极端低温事件和一次典型高温事件的 Rossby 波波作用通量和 500 hPa 位势高度异常场分布图。从图 3 可以看出, 阻高和冷涡的位置和配置决定了极端低温事件的空间范围。第



a. 第 I 类(1964-06-06); b. 第 II 类(1974-06-24); c. 第 III 类(1992-06-09)

图2 典型极端低温事件站点分布及对应的站点温度距平(°C)

Fig.2 Distribution of extreme cool summer events and corresponding temperature anomalies

表2 初夏不同类型极端低温事件所对应的日期

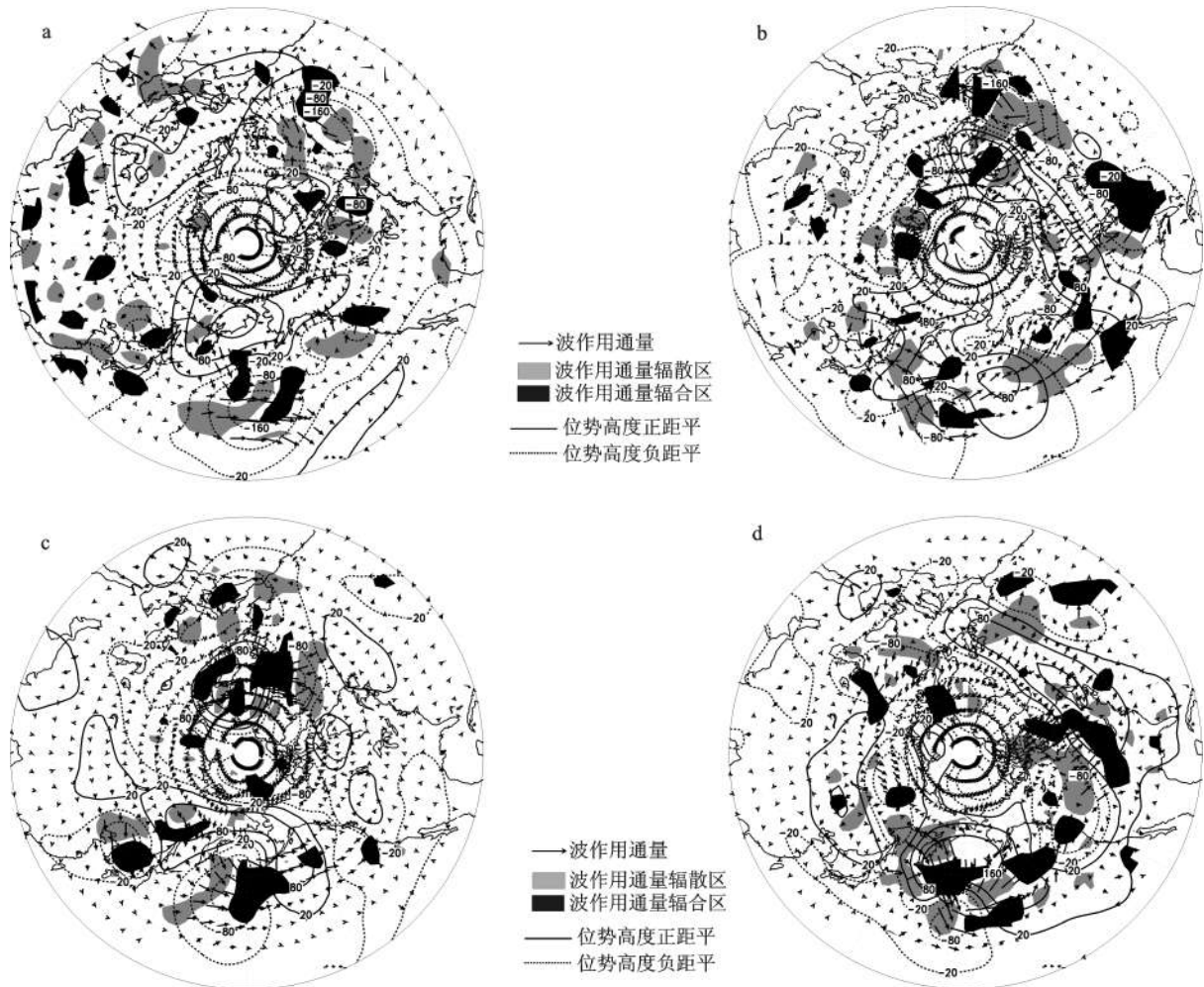
Table 2 The date of extreme cool summer events in early summer

极端低温事件类型	样本日期			
第Ⅰ类	1964-06-06	1969-06-29	1977-06-16	1983-06-15
第Ⅱ类	1974-06-24	1983-06-09	1983-06-30	
第Ⅲ类	1967-06-10	1989-06-19	1992-06-09	2002-06-15

I、II类事件中,阻塞高压出现在鄂霍次克海地区,与黑龙江省低温的关系更加密切,第III类事件中东北冷涡偏南,贝加尔湖阻高与鄂霍次克海阻高相互匹配,同时,该次事件东北冷涡中心异常强,达到 -40 gpm(图3c)。也说明发生低温事件时,东北亚地区与6月大气环流盛行的由北向南的阻塞高压和东北冷涡偶极子系统相比还要异常,也就是在原有基本流的基础上又增加了位相相同的

异常强迫,即,北面为“+”和南面为“-”的异常,表明东北亚地区比同时期偶极子还要强,尤其阻塞高压区的位势高度异常达到 $+100$ gpm,东北冷涡中心的位势高度异常相对弱一些,一般为 -20 gpm(图3a,b)。

东北亚地区都位于Rossby波能量频散大值区内,东北区西侧为显著波作用通量辐散区,表明该处有波源存在,其东侧为波作用通量辐合区,说明



a. 第Ⅰ类; b. 第Ⅱ类; c. 第Ⅲ类; d. 典型高温天气事件(1994-06-15)

注: 箭头长短表示波作用通量大小(m^2/s^2), 0.5cm 长度代表 $80 \text{ m}^2/\text{s}^2$; 彩色区域表示波作用通量辐散(辐合)大于(小于) 2×10^{-5} (-2×10^{-5}) m^2/s^2 的区域。

图3 500 hPa 位势高度异常场及其对应的波作用通量分布

Fig.3 The 500 hPa geopotential height anomalies and the corresponding wave activity fluxes

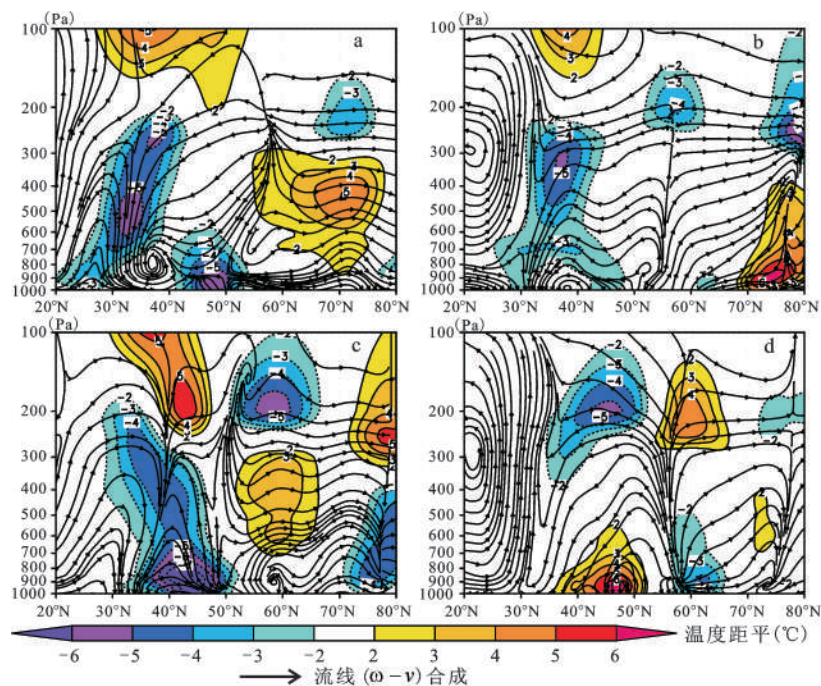
Rossby 波在该处被阻截,加强了该地区的局地环流异常,这种结构在第 II 类和第 III 类极端低温事件中尤其明显。从北向南呈典型的“+、-”波列结构,以及东亚至西北太平洋地区 500 hPa 位势高度呈“ ω ”形状的两槽一脊的异常场,从而形成有利于初夏极端低温事件发生的环流异常背景 and 低频动力条件,致使来自北方和东北方向的强冷空气南下在东北亚地区持续活动,该偶极子结构在其余的 6 次极端低温事件中也很明显(图略)。而在高温事件典型代表年份东北亚 500 hPa 位势高度异常场与极端低温事件相反,从北向南则呈典型的“-、+”波列结构,东亚至西北太平洋地区 500 hPa 位势高度呈倒“ ω ”形状的两脊一槽的异常场,即,阻高与冷涡的配置同低温事件相比基本相反。在勘察加半岛至阿留申群岛地区上空有两组显著的 Rossby 波能量辐散和辐合区,致使该区阻塞高压异常强,为东北亚地区典型高温异常“-、+”波列结构的维持提供了有利的环流异常背景 and 低频动力条件,不利于北方和东北方的强冷空气南下(图 3d)。

5 对流层垂直剖面特征

采用垂直剖面分析方法,揭示极端低温天气事件与冷空气的平流以及异常大气环流系统所伴随

强烈的上升运动之间的关系。

图 4 为 3 种典型极端低温事件和 1 次典型高温天气事件沿 125°E 的垂直速度 ω 与水平速度 v 的合成场 $[\omega-v]$ 和温度距平纬圈剖面图,平均场为 1971~2000 年。造成第 I 类和第 II 类极端低温事件是由于东北区上空的冷涡系统是切断低压系统,冷平流起主要作用,使得该区域温度降低,这两类事件在东北地区(40°N~50°N)的异常上升运动较弱,大都位于 800 hPa 及以下的对流层下层,异常强上升区位于 50°N 的偏北地区;而第 III 类极端低温事件则在整个东北地区呈现强烈的对流态势,异常上升运动延伸到对流层中上层 300 hPa 附近,有深厚的冷堆相对应,强冷中心为-7℃位于行星边界层的 900 hPa 附近,对流层顶至平流下层(250~100 hPa)则是较深厚暖中心(见图 4c),这也正好解释了为什么第 III 类事件分布在东三省全境且测站最多,面积也最广的机制。东北三省典型高温天气事件过程上空 $[\omega-v]$ 合成和温度距平场与上述 3 种典型极端低温事件的结构刚好相反,处于垂直运动的下沉区($[\omega-v]$ 合成的箭头指向下),暖堆则位于 580 hPa 及以下的对流层中下层,而冷中心位于对流层的上层,这样的垂直结构既不利于冷涡的发展,更不利极端低温天气的发生(见图 4d)。



a. 第 I 类; b. 第 II 类; c. 第 III 类; d. 典型高温天气事件(1994-06-15)

图 4 沿 125°E 垂直速度-水平速度合成和温度距平纬圈剖面

Fig. 4 Synthesis pattern of the latitude-high cross section showing the $[\omega-v]$ and temperature anomaly zonal profiles for the Northeast China along the longitude of 125°E

6 结 论

1) 东北三省 150 个测站 6 月与 6~8 月及 6 月与 7~8 月平均气温的相关显著,表明东北三省初夏与夏季气温相关显著(显著性水平 $\alpha=0.05$),在时空尺度变化上具有整体的一致性,因此,东北三省初夏气温的变化对整个夏季气温变化有着重要的预警作用。

2) 文中给出东北三省测站初夏极端低温事件的定义;揭示极端低温事件共发生 11 次并且可分 3 种类型,其中第 I 类、第 II 类和第 III 类事件各有 4 次、3 次和 4 次,说明东北三省随纬度的增加极端低温事件发生的频率也明显增大;自 20 世纪 90 年代以来,随着东北地区显著变暖,极端低温事件也明显减少,仅出现 2 次,一旦发生,便在东北三省全境出现。

3) 阻高与冷涡的位置和配置决定了极端低温事件的空间范围,鄂霍次克海阻塞高压与黑龙江省极端低温事件的关系更加密切,贝加尔湖阻高与鄂霍次克海阻高相互匹配,同时东北冷涡偏南的情形下易出现第 III 类极端低温事件。东北亚地区盛行北面阻高和南面东北冷涡这对偶极子气候平均态,由于受到大气低频 Rossby 波扰动的同位相强迫,更增强了 500 hPa 位势高度场由北向南的“+、-”局域环流的异常,东亚至西北太平洋地区上空呈“ ω ”形状的两槽一脊的异常场,形成有利于初夏极端低温天气事件发生的条件;在垂直方向上,发生极端低温事件,尤其是第 III 类的东北区域上空对流层上升运动异常强,第 I、II 类事件,由于冷涡系统是切断低压系统,冷平流的作用是造成这两类事件的主要原因,而典型高温事件则与极端低温事件相反。

本文仅仅给出了东北三省初夏发生的极端低温事件测站区域分布特征和天气动力一般特征分析。对于发生极端低温事件的瞬变强迫以及有关前期大气和海洋影响因子还要做进一步的研究。

致谢: 本文有关 Rossby 波的计算得到了施宁

博士和谢作威博士的帮助,在此表示感谢。

参考文献:

- [1] 程叶青,张平宇.中国粮食生产的区域格局变化及东北商品粮基地的响应[J].地理科学,2005,25(5):513~520.
- [2] 王书裕.农作物冷害的研究[M].北京:气象出版社,1995:246.
- [3] 崔 锦,李 辑,张爱忠,等.东北夏季低温的研究进展[J].气象,2007,33(4):3~9.
- [4] 东北低温长期预报方法和理论的研究技术组.对东北夏季低温长期预报问题的初步认识[C]//东北夏季低温长期预报文集.北京:气象出版社,1983:1~8.
- [5] 东北低温科研协作组.东北地区冷、热夏季的环流特征和海温状况的初步分析及长期预报[C]//东北夏季低温长期预报文集.北京:气象出版社,1983:103~126.
- [6] 廉 毅,安 刚.东亚季风 El Nino 与中国松辽平原夏季低温关系初探[J].气象学报,1998,56(6):724~735.
- [7] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report[R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- [8] 《气候变化国家评估报告》编写委员会.气候变化国家评估报告[R].北京:科技出版社,2007:422.
- [9] 陈隆勋,周秀骥,李维亮.中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制[J].气象学报,2004,62(5):634~646.
- [10] 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[J].气象学报,2011,69(2):320~333.
- [11] 叶笃正,陶诗言,李麦村.在六月和十月大气环流的突变现象[J].气象学报,1958,29(4):249~263.
- [12] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a wave-activity flux for stationary Rossby waves on a zonally varying basic flow [J]. Geophys. Res. Lett.,1997,24(33):2985~2988.
- [13] Takaya K, Nakamura H. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. J. Atmos. Sci.,2001,58(6):608~627.
- [14] 布和朝鲁,施 宁,纪立人,等.梅雨期 EAP 事件的中期演变特征与中高纬度 Rossby 波活动[J]. 科学通报,2008,53(1):111~121.
- [15] 孙 力,郑秀雅,王 琪.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,1994,5(3):297~303.
- [16] 徐祥德,高守亭.外源强迫与波流相互作用动力学原理[M]. 北京:海洋出版社,2002:291.

Distribution of Extreme Cool Events over Northeast China in Early Summer and the Related Dynamical Processes

LI Shang-feng^{1,2}, LIAN Yi², CHEN Sheng-bo¹, SUN Qin-hong³, YAO Yao-xian⁴

(1. College of Geoexploration Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China;

2. Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation and East Asian Monsoon,

Jilin Meteorological Science Institute, Changchun, Jilin 130062, China;

3. Jilin Meteorological Observatory, Changchun, Jilin 130062, China;

4. Department of Science and Technology and Forecast of Jilin Meteorological
Bureau, Changchun, Jilin 130062, China)

Abstract: In this study, the spatial distribution and dynamic characteristics of extreme cool summer events in Northeast China were investigated. It unveiled that: the temperature variation of early summer could be used as a predictor to herald that of the whole summer in Northeast China. The extreme cool summer event was defined in this paper and it was divided into three kinds. Apparently, with the increasing latitude in Northeast China, the frequency of cool event increased too. Since 1990s, there only two cool events happened, but it could sweep over the whole region of Northeast China. The influence scope of cool event was closely related with the position and arrangement of cold vortex and blocking high. On climate mean state, the blocking high dominated over north of Northeast Asian and cold vortex governed over south of Northeast Asian at 500 hPa level, while the low-frequency Rossby wave disturbance, on the same phase, acted on the climate state, enhanced the dipole of “+,-” wave train, which was the significant dynamic mechanism that affected the strength and scope of unusually cool summer events. Additionally, owing to the effect of cold vortex and blocking high in the district of Okhotsk further east, the first and second types cool events more easily occurred in Heilongjiang Province, and part of Jilin Province. Blocking high in Baikal and Okhotsk area matched very well, in addition, cold vortex further south and Rossby wave strongly disturbed, were all benefit for the third kind type cool event occurrence.

Key words: Northeast China; Northeast cold vortex; cold advection; Rossby wave