0577-6619/2011/69(2)-0320-33 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

2009年中国东北夏季低温及其与前期海气系统变化的联系*

沈柏竹[1,2] 刘 实[1,2] 廉 毅[1,2] 封国林[3] 李尚锋[1,2] 龚志强[3]

SHEN Baizhu[1,2] LIU Shi[1,2] LIAN Yi[1,2] FENG Guolin[3] LI Shangfeng[1,2] GONG Zhiqiang[3]

1. 中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室,长春,130062
2. 吉林省气象科学研究所,长春,130062
3. 国家气候中心,北京,100081

1. *Laboratory of Research for Middle-high latitude Circulation and East Asian Monsoon*, *Changchun* 130062, *China*
2. *Jilin Meteorological Science Institute*, *Changchun* 130062, *China*
3. *National Climate Center*, *Beijing* 100081, *China*

2010-05-04 收稿, 2010-06-29 改回.

Shen Baizhu, Liu Shi, Lian Yi, Feng Guolin, Li Shangfeng, Gong Zhiqiang. 2011. An investigation into 2009 summer low temperature in Northeast China and its association with prophase changes of the air-sea system. *Acta Meteorologica Sinica*, 69(2): 320-333

Abstract Under the background of global warming, a summer (JJA) low temperature event, which has not occurred for about 15 years since 1994, happened in 2009 in the central and northern region of northeast China. By using the NCEP/NCAR reanalysis data, the one-hundred year observed temperature data from the stations at Changchun and Harbin, and the Hadley Center sea surface temperature (SST) data, this paper tries to reveal the reason of the northeast China summer low temperature (NESLT) event. Some results were found as follows: The study on both horizontal and vertical circulation structures over northeast China during the period when summer low temperature events occurred, reveals that when it occurred both the horizontal and vertical circulation over northeast China were associated with a low-value system and anomalous activities of the Northeast China cold vortex (NECV) were the most direct influential factor to the low temperature events. The decadal variability (≥9 years) of temperature was favorable to the occurrence of summer low temperature in 2009: the decadal oscillation of summer average temperature of Harbin and Changchun in 2009 was still in an obviously downward trend from the late 1990's to the early 2010's with its declining change rate from 1999 to 2008 reached 0.8 ℃/10 years, obviously exceeding the linear rising tendency of 0.2 ℃/10 years of the regional warming of northeast China from 1961 to 2000. And the previous winter North Pacific polar vortex (NPPV) area index, which was significantly positively related with the observed summer temperatures of Harbin and Changchun, was also in a significantly declining tendency. In addition, in the summer of 2009, the Arctic Oscillation (AO) appeared a negative phase distribution, and the Northeast Asia, the Aleutian Islands and the North Atlantic were significant negative anomaly regions, which are opposite to the pattern of summer average 500 hPa height anomalies over 1994－2008 when the NESLT event was absent. Furthermore, the negative phase of the North Pacific Oscillation (NPO) in the preceding winter of 2009 was obviously strong, just as it once happened in 1972, when a summer low temperature and cool injury event occurred in northeast China. Meanwhile, the SSTA in the eastern-central equatorial Pacific Ocean showed a La Nina phase in the preceding winter of 2009 but the strength of La Nina phase weakened obviously in the spring of 2009. The ab-

* 资助课题:国家科技支撑计划(2009BAC51B04 和 2007BAC29B01)、国家自然科学基金面上项目(40575047)、青年基金项目(40705036)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY:20106020,201106016)。

作者简介:沈柏竹,从事气候与环境研究。E-mail:jlsbz2008@sina.com

通讯作者:廉毅,从事全球变化区域响应、气候与环境研究。E-mail:lianyi1103@sina.com

normally strong activity of the NECV in the June and July of 2009 was related with the fact that the disturbances of stationary wave replaced the original ones of ultra-long wave over the North Pacific region in the April and May of 2009. By employing the method of the singular value decomposition (SVD) and harmonic analyzing, it is found that the phase of NPO was not only an important precursor for summer temperature variations over northeast China, but also a stable component on the planetary scale that we can extract from the atmosphere in addition to the chaos component on the synoptic scale.

Key words Global warming, Northeast China, Summer low temperature event, Interdecadal variability, Northeast China cold vortex, Polar vortex, North Pacific Oscillation, North Pacific SST

摘 要 依据中国东北地区拥有百年地面观测记录的长春和哈尔滨测站气温资料、NCEP/NCAR 再分析资料和英国哈得来中心海表温度资料,揭示 2009 年东北地区发生的迄今已有 15 年没有出现的夏季低温事件成因。结果表明:发生东北夏季低温时的水平和垂直环流结构均为低值系统,东北冷涡异常活动是其最直接的影响因子;有利的年代际变化背景是,哈尔滨和长春 6—8 月平均气温年代际尺度(≥9 a)的振荡值 1999—2008 年约 -0.8 ℃/10 a,显著低于全球变暖东北区域响应的线性增暖值 0.2 ℃/10 a(1961—2000 年),与长春和哈尔滨夏季气温呈正相关的前一年冬季太平洋极涡面积指数年代际振荡亦呈显著下降趋势。与 1994—2008 年东北夏季高温的 500 hPa 平均环流距平场显著不同,北极涛动呈强的负位相分布,东北亚、阿留申和北大西洋上空为显著负距平区;2009 年前一年冬季与明显低温的 1972 年的前一年冬季北太平洋涛动均呈显著的负位相,春季仍持续,且 2009 年前一年冬季赤道中东太平洋 SSTA 为拉尼娜位相,2009 年春季明显减弱;2009 年 6—7 月夏季东北冷涡活动异常强与 4—5 月 500 hPa 北太平洋地区超长波扰动转为定常波扰动槽有关;SVD 和谐波分析表明,北太平洋涛动的异常位相不仅是东北夏季气温变化的重要前期信号,还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。

关键词 全球变暖,东北夏季低温,年代际变化,东北冷涡,极涡,北太平洋涛动,北太平洋海温

中图法分类号 P461^{+}.2

1 引 言

20 世纪 50—70 年代,中国东北地区夏季及农业生长季(5—9 月)低温冷害频发。与低温冻害不同,低温冷害一般指作物生长发育期间 0℃以上的低温,有时甚至是接近 20℃条件对农作物产生的危害(章少卿,1990;王书裕,1995)。1969、1971、1972、1976 和 1979 年,低温冷害使吉林省粮食总产大约减产 20%,其中水稻减产 30%—50%(据吉林省统计年鉴),于 20 世纪 70 年代末引起中国学者的关注,相关研究发现:东北夏季低温与北半球中高纬度(60°N 除外)偏冷基本一致,具有行星尺度特征(吉林省气象台,1980;章名立等,1982,1983);哈尔滨 1881—1983 年冷暖阶段性变化显著(王书裕,1995);在东北夏季气温冷阶段,厄尔尼诺相当于加了一个负的权重数,使得在冷阶段气温比常年更低(章少卿,1990);东北地区冷、热夏季的出现与北半球大范围内各层主要环流形势有密切联系(东北低温科研协作组,1979;吉林省气象台,1980);通过典型个例分析得出当冬春季北半球积雪面积和大西洋海冰面积增大时,东北夏季温度偏低的结论(符淙斌,1980);章少卿等(1985)、刘宗秀(1986)在研究东北低温与极地涡旋月际变化的联系时,定义了一个有关极涡与中纬度地区环流作用量——极涡活动的面积和强度指数,其中,亚洲至中太平洋区域极涡面积与东北及中国大部分区域气温呈反相关,极涡强度亦与东北气温呈反相关。

中国学者对影响东北夏季气候前期海气系统信号场做了初步研究,比较关注具有季节异常的正压结构特征变化的系统——大气半永久活动中心(丑纪范,1986,2007),揭示了前一年冬季阿留申群岛低压与其南侧副热带地区形成北太平洋涛动振荡位相,与东北冷涡和中国东部夏季降水存在较显著的遥相关(刘宗秀等,2002,2003;廉毅等,2007),东北夏季冷涡活动强弱与前冬 2 月北半球环状模(NAM)呈正相关(何金海等,2006)。还注意到东北夏季低温年代际变化的某些特征(CLIVAR,1997),20 世纪 50—70 年代东北冷夏频发的阶段往往与厄尔尼诺相对应,而 20 世纪 80 年代以来厄尔尼诺则往往对应暖夏年或者弱的冷夏年(王敬方等,1997;廉毅等,1998;Lian, et al, 2002①,安刚等,1998;郑维忠等,1999;孙建琦等,2006),表明东北地区气

① A new reappraisal of impact of El Niño events on temperature China (Lian, et al,2001), APN, 49, Macaw in 5-7 February 2002 (Summary Meeting).

候主要要素的年际变异既受到年际尺度变化短周期的影响,也受到年代际(10 年或以上)较长周期气候变化制约(丁一汇,2003,2007),但是究竟如何制约,还需要做进一步的研究。然而,有些区域年代际背景可能与年际变化存在一致性(陆日宇,2003)。

20 世纪 90 年代,全球进入了百年以来最暖的时期(IPCC 第四次评估报告,2007),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(《气候变化国家评估报告》编写委员会,2007),夏季气温从 20 世纪 80 年代开始冷夏频率明显减少,尤其是 1994—2008 年未发生大范围的夏季低温(陈隆勋等,2004;杨青等,2005)。2009 年东北地区的吉林和黑龙江两省夏季发生显著低温,对目前暖阶段的延伸提出了疑问,是属于暖阶段偶然出现低温现象?还是进入类似 20 世纪 50—70 年代的低温群发阶段的预警信号? 目前,IPCC 所列举的模式各种情景下全球继续显著变暖的结论,大都没有考虑或较少考虑自然强迫的影响(赵宗慈等,2005;Zhao, et al, 2008)。就如何适应全球变暖而言,开展相应的科学研究,是有益的(叶笃正等,2008),中国东北地区已将喜温的水稻耕作,向着纬度较高的黑龙江省集中,如果,一旦东北地区气候变化进入相对冷阶段,它将对占中国粮食总产量 1/6 的东北粮食主产区构成重大威胁,这关系到国家的粮食安全问题! 因此,对 2009 年东北夏季低温进行个例分析,为进一步深入研究东北夏季低温的年代际变异,就显得尤为必要了。

本文初步诊断了 2009 年东北夏季低温同期的环流特征,着重揭示与前期海气系统变化的某些联系和夏季低温发生有利的年代际背景,尝试分析大气中除了有天气尺度的混沌分量外还有哪些可提取的行星尺度稳定分量(丑纪范,1986,1997;封国林等,2006;任荣彩等,2010;林美静等,2010;支蓉等,2010),给出可能出现 2009 年 6 月和夏季低温的多时空尺度预测因子判断理由[①②],以供讨论。

2 资料和方法

本文利用长春测站 1909—2008 年和哈尔滨测站 1881—2008 年的逐日气温观测资料,利用 NCEP/NCAR 1948—2009 年全球再分析资料和 ECWMF 的 1958—2002 年再分析资料,英国哈得来中心 1881—2005 年海表温度资料。对上述资料作年代际变化(≥9 a)和年际变化(<9 a)的两种时间尺度滤波分析,进而分别计算上述资料在年代际和年际变化两个频谱的相关性。

本文利用长春和哈尔滨两测站的百年气温观测资料进行标准化分析,依据气温资料标准化值的特征,给出东北地区夏季低温极端气候事件的时间尺度定义为:东北地区任一测站,$\overline{T}_{6-8} \leqslant -1.0\sigma$,即为一次严重冷夏 A 事件,$-1.0\sigma < \overline{T}_{6-8} \leqslant -0.4\sigma$ 即为一次冷夏 B 事件,当 $-0.4\sigma < \overline{T}_{6-8} \leqslant 0.3\sigma$ 时为夏季正常年,而当 $0.3\sigma < \overline{T}_{6-8} \leqslant 0.8\sigma$ 时为一次暖夏 C 事件,当 $\overline{T}_{6-8} > 0.8\sigma$ 时为一次显著暖夏 D 事件。

廉毅等(1998)分析表明,长春和哈尔滨测站可做为代表东北地区气候基本规律的典型代表站。

从表 1 和图 1 可见,长春测站百年资料表明:6—8 月 A 事件(1—3 级)频率为 14%,B 事件(4 级)频率为 23%,哈尔滨测站百年以上资料表明,6—8 月 A 事件频率为 15%,B 事件频率为 20%;由此可见,A 事件发生频率比 B 事件低,属小概率事件。

分别选取 1954、1957、1969、1971、1972、1976 和 1993 年东北区(以长春和哈尔滨为代表)的 A 和 B 事件年(计7年),选取1952、1955、1982、1988、

表 1 长春和哈尔滨 1909—2008 年夏季平均气温年际变化标准方差阈值频率分布

Table 1 The threshold frequency statistics of Changchun and Harbin summer average temperature's standard deviation for the period 1909-2008

分级数	夏季平均气温年际变化标准方差阈值分类(σ)								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
分级标准	≤-2.0	(-2.0,-1.4]	(-1.4,-1.0]	(-1.0,-0.4]	(-0.4,0.3]	(0.3,0.8]	(0.8,1.4]	(1.4,2.2]	>2.2
长春(频率%)	2	2	10	23	28	18	8	6	3
哈尔滨(频率%)	2	5	8	20	29	18	9	6	3

① 关于 2009 年 6 月以及夏季出现东北低温机率增大的可能性分析. 科研内参,2009 年 6 月 2 日.

② 关于 2009 年 6 月以及夏季出现低温机率增大的可能性分析和对策建议. 咨询报告,2009 年 6 月 11 日.

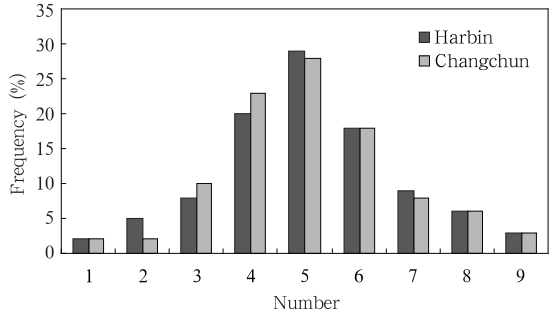


图 1 长春、哈尔滨夏季平均气温
年际变化标准方差阈值的频率分布
Fig. 1 Threshold frequency distribution of the average temperature's standard deviation of Changchun and Harbin during summer

1994、1997 和 2000 年为东北区夏季高温年(计 7 年),分别绘制 500 hPa 高度距平场,分别选取东北 A 事件年 1969、1971、1972 和 1976 年和典型高温年 1982、1988、1994和1997年(各4年)做风场、W-V 合成和温度距平时间-纬圈剖面分析。W(垂直运动)的计算方法参见文献(丁一汇,1989)。

东北冷涡和北太平洋涛动的定义区参见文献(刘宗秀等,2003),有关极涡指数的计算和太平洋极涡区等分区定义参见文献(刘宗秀,1986)。

3 东北夏季低温的环流背景与 2009 年的实况分析

3.1 2009 年 6—8 月 500 hPa 高度距平场

从 2009 年 6—8 月 500 hPa 高度距平场(图 2a)可见,亚洲上空呈两槽一脊扰动,东北亚 55°N 以南为稳定的低值扰动,距平中心偏东位于俄罗斯的滨海地区,西北侧贝加尔湖至东北侧的鄂霍次克海的正距平区,为阻塞高压持续活动区,形成东北亚(包括中国东北地区在内)的稳定偶极子形势并持续了两个月之久,这也与阿留申群岛上空半永久大气活动中心呈现稳定的低涡活动有一定联系。

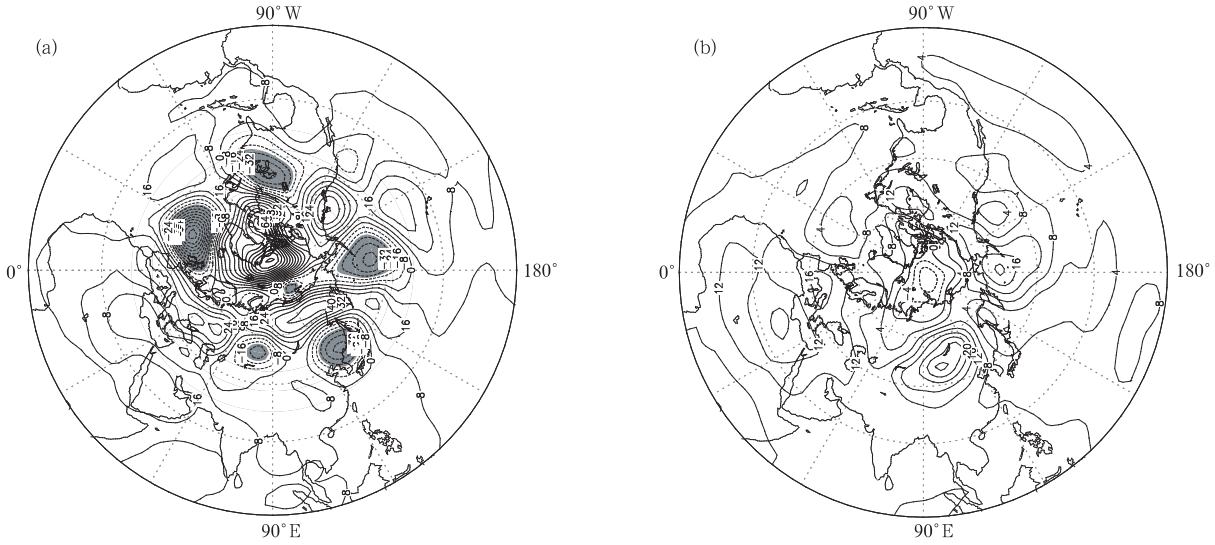


图 2 500 hPa 高度距平场分布
(a. 2009 年夏季,b. 1994—2008 年夏季;阴影区为≤-20 的区域,等值线间隔 4,单位:gpm)
Fig. 2 Spatial distribution of 500 hPa geopotential height anomaly field of June-August
(a. 2009, b. 1994-2008; Light shadings illustrate the value less than 20, contour is in the interval of 4, unit:gpm)

图 2b 为未出现东北夏季低温的 1994—2008 年 6—8 月 500 hPa 高度平均距平场,从图 2b 与 2a 对比可见,北半球极地和中高纬度大气环流异常的位相分布近于相反:1994—2008 年夏季极地为强的负距平,表明北极涛动呈显著正位相,而 2009 年夏季极地则为正距平,北极涛动呈显著负位相;东北亚、阿留申群岛和北大西洋上空 1994—2008 年为正距平,而 2009 年夏季为显著的负距平。

3.2 2009 年夏季中国气温距平分布

2009 年中国地面测站 6—8 月平均气温的距平分布(图 3)可见,在吉林省和黑龙江省的中东部发生了较为严重的冷夏事件,负距平大都在 -0.5—-1.0 ℃。由于冷空气主体较偏东,长春 6—8 月平均气温标准差为 -0.49σ($<-0.4\sigma$),达到冷夏 B 事件的标准。

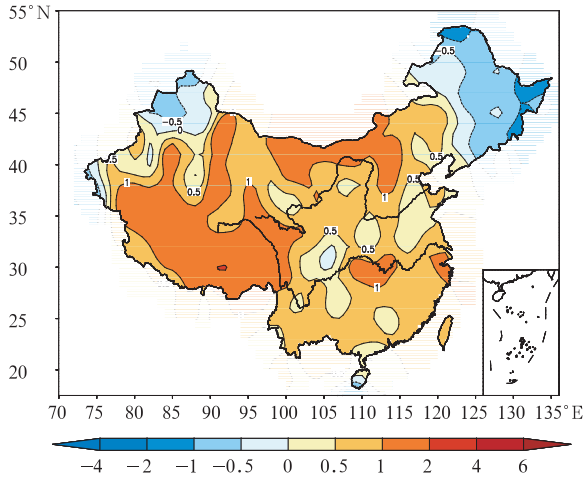


图 3 2009 年夏季中国温度距平场分布(单位:℃)

Fig. 3 Spacial distribution of the summer temperature anomaly field of 2009 in China (unit: ℃)

3.3 东北冷涡活动和长春、哈尔滨夏季低温

从表 2 可知,长春和哈尔滨 11 个夏季 A 和 B 事件年(其中哈尔滨测站 2009 年未达到 A、B 事件标准)中有 8 年冷涡活动天数多,1 年正常,只有 2 年稍少,即使 6—8 月冷涡活动少的 1976 和 1979 年的 6 月冷涡活动天数也是正常稍多(表略),典型的东北区夏季高温年的 1982、1988、1994、1997 和 2000 年的冷涡活动天数均比常年少 10—15 d(表略)。由此可以看出,东北冷涡活动异常多(少)是造成东北夏季低温(高温)最直接的大气环流影响系统。

3.4 长春、哈尔滨夏季温度典型年 500 hPa 高度场距平合成场特征

对比东北区夏季7个A事件年和7个高温年的 500 hPa 高度距平合成场(图 4a、4b)可知,从亚洲的

表 2 长春、哈尔滨夏季低温年标准方差和东北冷涡活动天数距平

Table 2 The temperature standard deviation of Changchun and Harbin and the cold vortex activity anomaly days in typical years of low temperature event occurred in northeast China

	1957	1964	1969	1971	1972	1976	1979	1983	1986	1993	2009
冷涡天数距平(d)	+29	+13	+21	+4	0	−3	−7	+6	+8	+7	+13
长春(σ_T)	−1.848	−1.390	−2.076	−1.172	−1.274	−1.527	−0.878	−1.155	−0.970	−0.865	−0.490
哈尔滨(σ_T)	−0.654	−1.109	−1.488	−1.298	−1.602	−0.578	−0.388	−1.867	−0.426	−1.222	−0.274

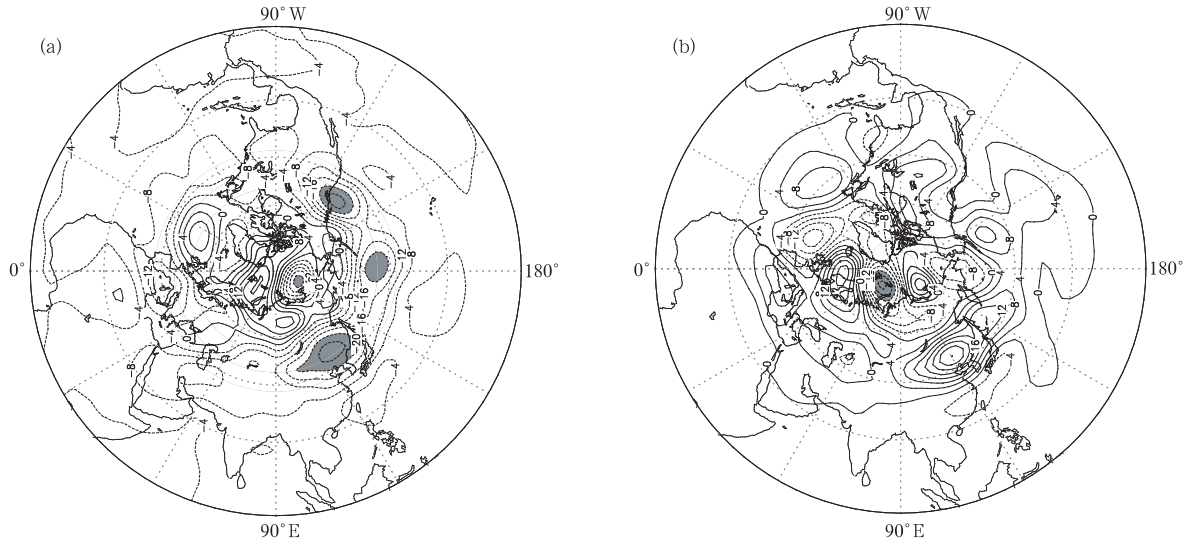


图 4 东北区夏季温度典型年的 500 hPa 高度距平合成场

(a. A 事件年,b. 高温年;阴影表示≤−20,等值线间隔为 8,单位:gpm)

Fig. 4 Anomaly synthesis of the 500 hPa height field of northeast China during typical summer temperature years(a. A-event years, b. high-temperature years; light shadings illustrate the value less than 20, contour is in the interval of 8, unit: gpm)

中高纬度地区一直经北太平洋的阿留申群岛至北美洲西北部上空分别为半球尺度的宽广负、正距平带,在负(正)距平带中有两个低值(高值)中心,分别位于中国东北区和阿留申群岛的上空。东北夏季低温的北半球夏季大气环流有两个低值活动中心,其中一个是造成东北区夏季低温的主要直接影响系统,由此推论,另一个低值中心所对应的北太平洋中高纬度洋面上的气温亦较低(图 4a)。

从东北区的典型代表测站长春和哈尔滨夏季平均气温(廉毅等,1998)与 500 hPa 高度场相关系数分布(图 5a 和 5b)可见,相关系数≥0.3(显著性水平 $\alpha \leqslant 0.05$)的相关带从中亚一直延伸到北太平洋的中部上空,其中有两个大值中心分别位于中国东北区和阿留申群岛上空,其中与东北区上空高度场相关系数≥0.7(显著性水平 $\alpha \leqslant 0.01$),与500 hPa 高度合成场相似(图 4),表明东北区夏季气温与该区 500 hPa 高度场呈显著正相关,东北夏季低温(高温)对应 500 hPa 高度场低值(高值区)。

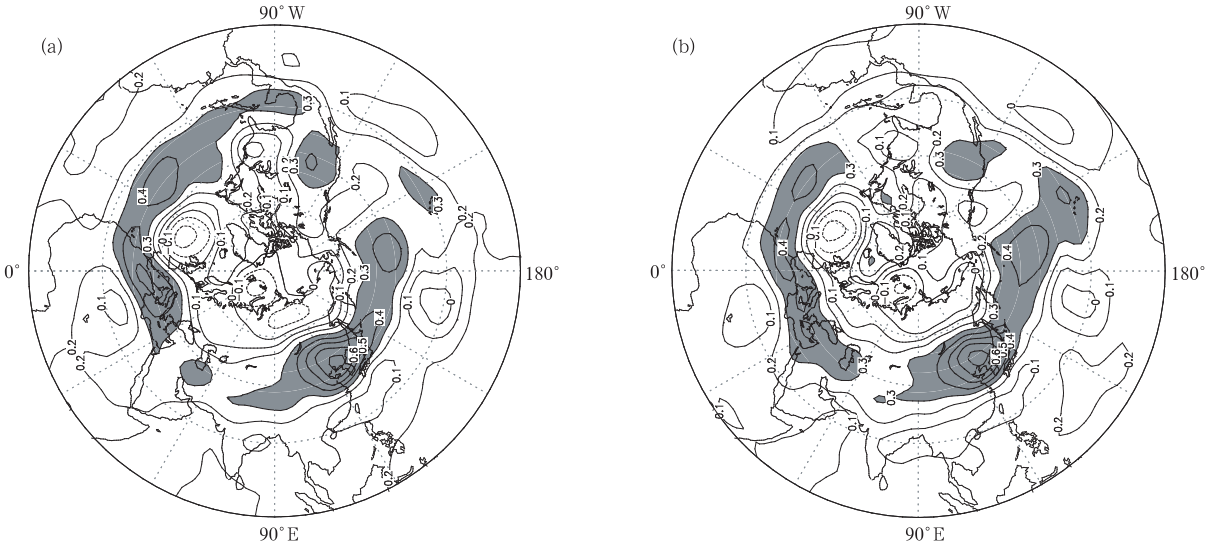


图 5 长春和哈尔滨夏季气温与 500 hPa 高度场相关分布

(a. 长春, b. 哈尔滨; 阴影表示显著性水平 $\alpha \leqslant 0.05$,等值线间隔:0.1)

Fig. 5 Correlation patterns of the summer temperatures of Changchun or Harbin with the 500 hPa geopotential height

(a. Changchun, b. Harbin; the area with ocrrelation exceeding significancely the 95% confidence level are shaded, contour is in the interval of 0.1)

3.5 经圈垂直环流

图 6a、6b 为东北夏季 A 事件年 1969、1971、1972 和 1976 年与高温年 1982、1988、1994 和 1997 年沿 120°E 的 *W*-*V* 距平合成和温度距平纬圈剖面图,平均场为 1958—1997 年,从图 6a 可见,与平均气流相比,来自北半球极地附近的气流,与来自赤道附近的气流交汇于 50°—52°N 强烈上升,在 600—200 hPa 对流层中上层呈明显的辐合,与此相对应的 850—250 hPa 为深厚的冷空气层,核心层 500—400 hPa 距平中心为 -1.5 ℃,控制整个中国东北地区,在 200—100 hPa 为一个暖的对流层顶,150 hPa 附近为一个暖核中心值为 0.9℃;从图 6b 可见,与平均气流相比,高温年的剖面图则表现为,极地冷空气在对流层顶附近才能平流到 75°N 附近,而来自赤道附近的暖空气在行星边界层中可一直平流到 50°N 以北,表明低层暖空气势力很强,在 40°—50°N 有一个 1.5 ℃的暖核,其暖舌一直延伸到对流层中上层附近,对应的气流也一直上升并平流到极地附近。由此可以揭示,东北夏季低温的冷核位于对流层中层 500 hPa 附近,因此,500 hPa 大气环流系统的演变可以作为东北夏季低温诊断和预测的核心层。

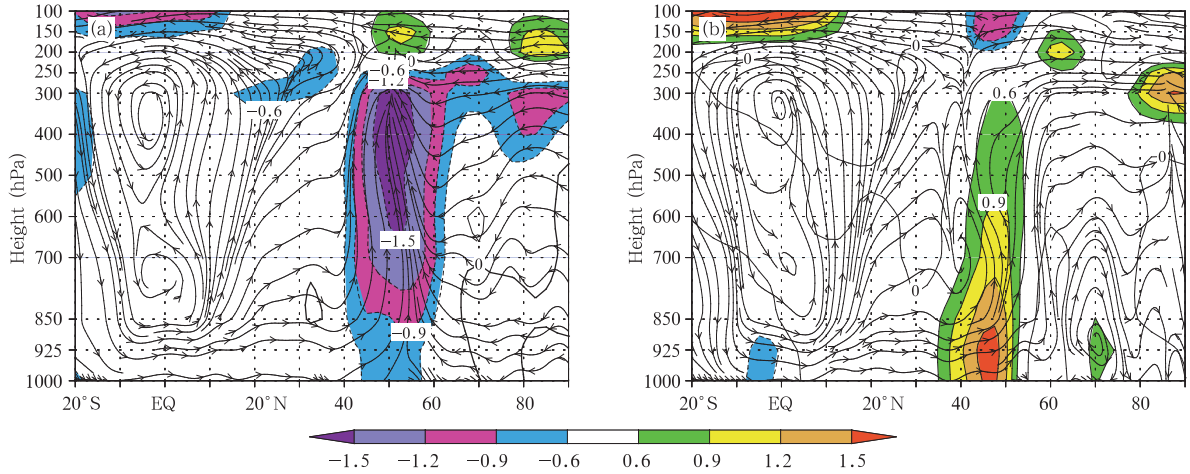


图 6 东北区严重冷夏 A 事件年和高温年沿 120°E *W-V* 合成和温度距平纬圈剖面

(a. 1969、1971、1972 和 1976 年夏季 A 事件年合成，b. 1982、1988、1994 和 1997 年夏季高温年合成；流线为 *W-V* 合成，等值线是温度距平，实线：正温度距平，虚线：负温度距平，单位：1 ℃)

Fig. 6 Synthesis patterns of the latitude-height cross section showing the *W-V* and temperature anomaly zonal profiles for the northeast China summer during typical summer temperature years along the longitude of 120°E

(a. A-event summer synthesis of 1969, 1971, 1972 and 1976, b. high temperature summer synthesis of 1982, 1988, 1994 and 1997; vector lineis *W-V* is the synthetizd, isoline is temperature anomalies, solid line: positive temperature anomalies, dashed line: negative temperature anomalies, unit: 1 ℃)

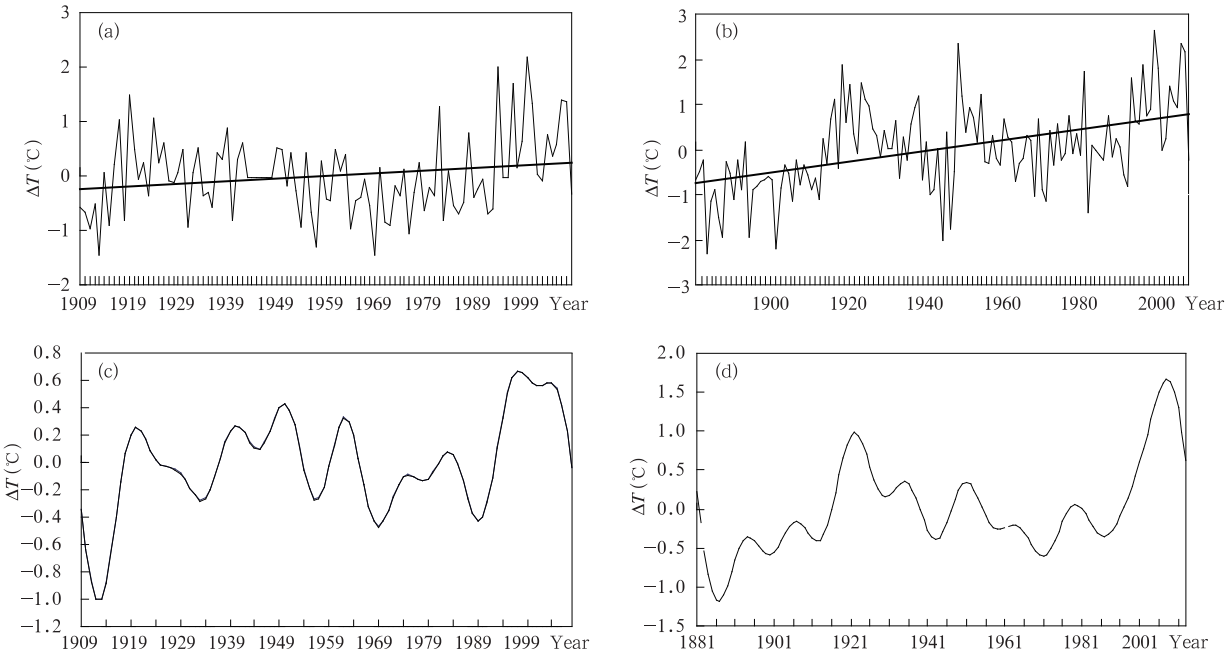


图 7 长春、哈尔滨夏季(6—8 月)平均气温距平序列(a. 长春，b. 哈尔滨；细实线表示：温度距平，粗实线表示：线性趋势)和年代际变化时间序列(c. 长春，d. 哈尔滨；细实线表示：温度年代际变化时间序列)

Fig. 7 Time-series diagram of the Changchun and Harbin average temperature during summer (June − August) (a. Changchun and b. Harbin; thin solid line: temperature anomalies, thick solid line: linear trend) and the interdecadal variation time-series diagram

(c. Changchun and d. Harbin; thin solid line: interdecadal variations time-series)

4 长春和哈尔滨夏季平均气温与极涡、北太平洋海气系统年代际变化

4.1 长春和哈尔滨的夏季气温

从长春和哈尔滨夏季(6—8 月)平均气温距平时间序列变化可见(图 8a 和 8b),20 世纪 20 年代开始均呈上升趋势,自 1994 年未出现明显的负距平,长春站 2009 年夏季出现负距平为 - 0.34 ℃,哈尔滨为 - 0.24 ℃。

从长春和哈尔滨夏季(6—8 月)平均气温的年代际(≥9 a)时间序列变化(图 7c、7d)可见,由于哈尔滨比长春资料长 27 年(图 7d),可以完整呈现 80 年左右的分布,1881—1913 年为冷阶段,1914—1954 年为暖阶段,1955—1992 年为冷阶段,1992—2008 年为暖阶段。长春则周期要短一些为 70 年左右(图 7c),1918 年以前为冷阶段,1919—1953 年为暖阶段,1954—1991 年为冷阶段,1991—2008 年为暖阶段,长春和哈尔滨尽管周期长短不一样,所处的冷暖阶段大都重叠,特别是在 20 世纪末至 21 世纪初达到百年测站纪录中年代际变化的最高峰值之后,均出现显著的下降阶段,峰值下降了约(0.7—0.8) ℃/10 a,尤其是全球变暖的明显阶段出现显著下降趋势令人关注,并且显著低于全球变暖东北区域响应的线性增暖数值 0.2 ℃/10 a(1961—2000 年)(闫敏华,2007)。长春夏季平均气温年际变化功率谱(图 8a)分析表明,长春温度原序列为白噪音,0、1、2 通过 $\alpha \leqslant 0.05$ 显著性检验,即显著周期为无穷、66、33 年,哈尔滨原序列为红噪音,1、27、36 波,即 82、3、2.3 年为通过 $\alpha \leqslant 0.05$ 显著周期(图 8b)。从长春站和哈尔滨的夏季年均气温年际变化的功率谱可进一步证明,30—40 年的冷和暖阶段变化通过了 $\alpha \leqslant 0.05$ 的显著性检验。

4.2 太平洋极涡年代际变化

从 1948—2008 年前一年冬季(相对当年夏季而言)北太平洋极涡面积指数的年代际变化时间序列(图 9a)可见,1958—1963 年指数处于迅速上升阶段之后,于 1964—1992 年处于低指数阶段,与长春夏季气温年代际变化 1959—1992 年的变化阶段十分相似(图 7c)。太平洋春季极涡面积指数(图 9b)与前一年冬季太平洋极涡面积指数年代际变化基本相似(图 9a),只是在 1998 年以后没有出现一个次高峰值,从而表明太平洋极涡面积指数的年代际变化,在前一年冬季至当年春季有较强的持续性,这种半年尺度持续性异常变化可能为东亚夏季气候变异的短期气候预测提供了比较强的前期信号场。

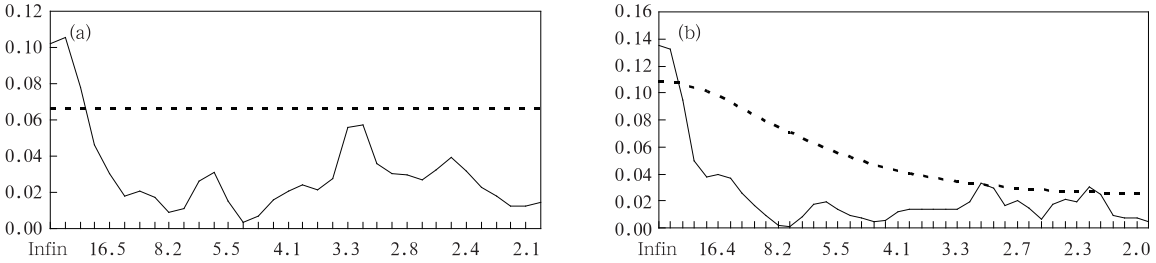


图 8 长春、哈尔滨夏季气温年际变化功率谱分析
(a. 长春, b. 哈尔滨; 折实线为夏季气温年际变化功率谱值,点线为夏季气温年际变化功率谱通过 $\alpha \leqslant 0.05$ 的显著性水平检验的阈值线)

Fig. 8 Power spectrum analysis of the observatory summer temperature
(a. Changchun and b. Harbin; solid line is for the inter-annual changes in the summer temperature power spectrum value, and dotted line is for threshold line for the inter-annual changes in summer temperature power spectrum passing the significance test at the 95% confidence level)

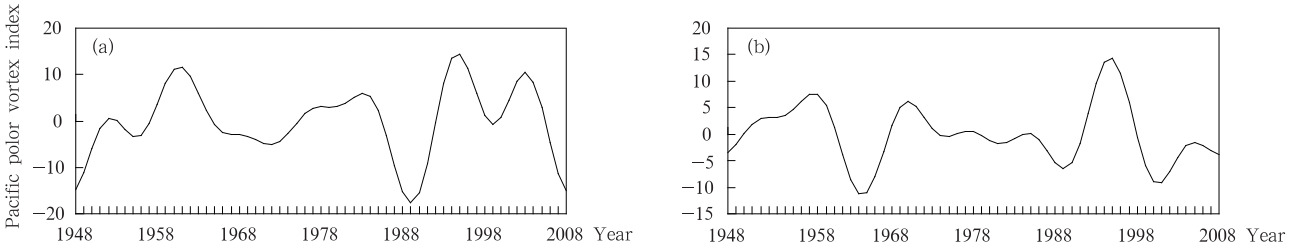


图 9 太平洋极涡面积指数年代际变化序列 (a. 前一年冬季, b. 春季)

Fig. 9 Interdecadal variations diagram of the Pacific polar vortex area index (a. preceding Winter and b. Spring)

4.3 长春和哈尔滨夏季气温与极涡及北太平洋SST年代际振荡相关

从表3可知,长春和哈尔滨夏季平均气温与前一年冬季和春季西风漂流区和Nino3+4区SST相关关系均没有通过$\alpha=0.05$的显著性检验,只是与夏季、秋季西风漂流区SST呈显著的同期和滞后正相关($\alpha\leqslant0.05$)。从表4可知,如果将长春和哈尔滨夏季平均气温滤为年际和年代际振荡两个频谱,则表明,长春和哈尔滨夏季平均气温年代际变化与前一年冬季北太平洋极涡面积指数的年代际变化呈显著正相关关系(显著性水平分别为$\alpha\leqslant0.05$和$\alpha\leqslant0.01$),长春显著性水平稍高,长春夏季平均气温年际变化与夏、秋两季北太平洋极涡面积指数的年际变化及前一年冬季西风漂流区SST的年际变化呈显著负相关关系($\alpha\leqslant0.05$),从表4还可知,长春夏季平均气温年代际变化与西风漂流区四季SST年代际变化均呈显著正相关,与前一年冬季Nino3+4区SST年代际变化亦呈现显著正相关关系($\alpha\leqslant0.05$);哈尔滨夏季平均气温的年代际变化与夏季西风漂流区SST年代际变化呈显著正相关($\alpha\leqslant0.05$),而与Nino3+4区SST相关不显著。从而表明,前一年冬季的北太平洋极涡面积指数在年代际尺度上均为哈尔滨和长春测站夏季气温变化的重要前期信号场;前一年冬季西风漂流区的SST变化是长春测站夏季气温变化的比较重要的前期信号场,前一年冬季Nino3+4区的SST变化对长春测站夏季气温亦有一定影响。2009年前一年冬季赤道中东太平洋SSTA为拉尼娜位相,2009年春季明显减弱(图略)。

表3 北太平洋海表温度与长春和哈尔滨测站气温相关系数

Table 3 The correlation coefficient statistics of the North Pacific sea surface temperature with the temperature of Changchun/Harbin

		前冬	春季	夏季	秋季
长春(1909—2005)	西风漂流区	−0.07	0.01	**0.26**	**0.35**
	Nino3+4	−0.01	−0.01	−0.02	−0.04
哈尔滨(1881—2005)	西风漂流区	−0.02	0.08	**0.33**	**0.34**
	Nino3+4	−0.03	−0.06	−0.05	−0.04

* 黑体表示显著性水平通过$\alpha\leqslant0.05$检验。

表4 北太平洋极涡面积指数、海表温度与长春、哈尔滨四季平均气温变化年际和年代际变化的相关系数

Table 4 The correlation coefficient statistics of the interdecadal variations/annual variations among the North Pacific polar vortex area index, the sea surface temperature of North Pacific and the average temperature changes of Changchun or Harbin in all seasons

		北太平洋极涡面积指数				北太平洋SST							
						西风漂流区				Nino3+4			
		前冬	春季	夏季	秋季	前冬	春季	夏季	秋季	前冬	春季	夏季	秋季
长春	年际	0.08	0.05	**−0.28**	**−0.36**	**−0.21**	−0.14	−0.12	−0.02	**0.21**	0.15	0.08	0.10
	年代际	**0.56**	−0.08	−0.16	**0.23**	**0.24**	**0.23**	**0.40**	**0.53**	−0.15	−0.17	−0.07	−0.05
哈尔滨	年际	0.06	0.02	−0.14	−0.16	0.04	0.04	−0.02	−0.02	**0.17**	0.08	−0.07	−0.02
	年代际	**0.26**	−0.09	−0.08	0.07	−0.11	0.02	**0.25**	0.07	0.08	0.10	0.09	**0.21**

注:黑体数字为通过显著性水平$\alpha\leqslant0.05$的检验。长春、哈尔滨与北太平洋极涡面积指数相关计算,资料年为:1948—2008年;长春与北太平洋SST相关计算,资料年为:1909—2005年;哈尔滨与北太平洋SST相关计算,资料年为:1881—2005年。

5 东北夏季气温与北太平洋涛动的半年—季节尺度遥相关

5.1 半年尺度的遥相关

图10a、10b分别为1961—2005年前一年冬季500 hPa北太平洋涛动区高度场与当年夏季中国东北区80个测站平均气温场的第1对奇异向量同性相关分布(SVD1),前冬500 hPa北太平洋涛动区高度场与夏季中国东北区气温平均场呈近似南北的"−、+"相关波列的位相分布,阿留申群岛西南侧的负相关区中心值≤−0.8,其北侧(65°N,145°E)附近上空有一正相关中心值≥0.6(图10a)。与前一年冬季高度场对应的东北区夏季平均气温呈一致的正值分布,相关系数均在0.7—0.9,两个场的半年尺度遥相关显著性水平$\alpha\leqslant0.01$,SVD1占总协方差平方和贡献率达75%,权重较高(图10b)。

图11a、11b分别为1961—2005年前冬500 hPa北太平洋涛动区高度场与东北区夏季平均气温场第2对奇异向量的同性相关分布(SVD2),与图10a、10b相关分布呈相反趋势,北太平洋阿留申群岛至

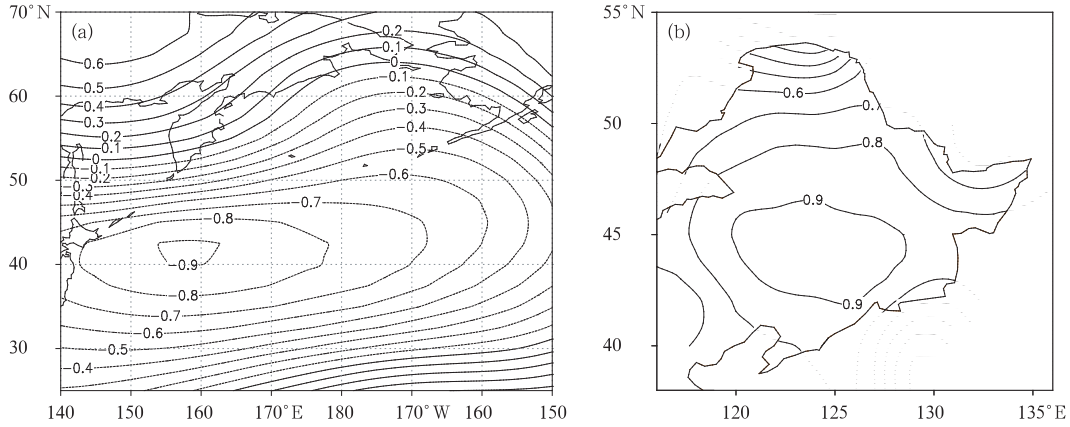


图 10 前一年冬季 500 hPa 北太平洋涛动区高度场与当年夏季中国东北区 80 个测站平均气温场第 1 对奇异向量同性相关分布(a. 前冬 500 hPa 高度场,b. 夏季气温场)

Fig. 10 First SVD correlation of the 500 hPa geopotential height field in winter at previous year and the average temperature of 80 stations in Northeast China in summer (a. 500 hPa height field in over the winter, b. Temperature field in summer)

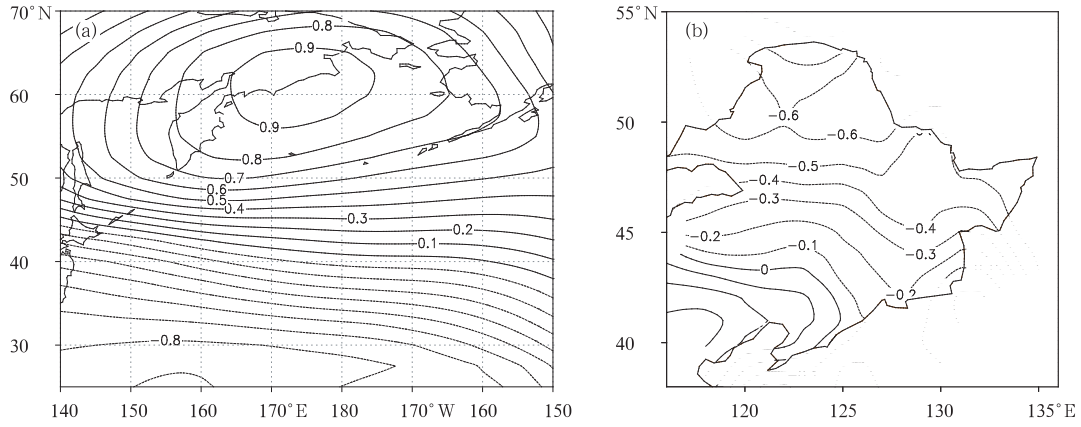


图 11 前一年冬季 500 hPa 北太平洋涛动区高度场与当年夏季中国东北区 80 个测站平均气温场第 2 对奇异向量同性相关分布(a. 前冬 500 hPa 高度场, b. 夏季气温场)

Fig. 11 As in Fig. 10 but for second SVD

堪察加半岛上空有一个大面积的正相关区域,其中心值≥0.80,45°N 以南为一个面积稍小的负相关带,中心值≤－0.8(图 11a),对应的中国东北地区则大部分为负相关,吉林省和黑龙江省负相关值更明显一些,相关系数在－0.25—－0.5,大部分通过显著性水平检验($\alpha \leqslant 0.05$)(图 11b),该模态的相关本质同 SVD1 是一样的,即如果前一年冬季北太平洋涛动区呈由北向南的"＋、－"或"－、＋"分布,则东北夏季气温为低温或高温。SVD2 占总协方差平方和贡献率的 12%,SVD1 和 SVD2 占总协方差平方和贡献率的 87%,足以表明前一年冬季北太平洋涛动区(类似于西太平洋遥相关型)位相分布是东北夏季平均气温的很重要的前期强信号场,这与北太平洋涛动位相的异常持续很有可能成为大气环流中可提取的行星尺度稳定分量有关。

5.2 2009 年与 1972 年前一年冬季和春季北太平洋涛动形势很相似

从图 12a、12d 可见,1972 年和 2009 年前一年冬季500 hPa高度距平场分布十分相似,北半球 500 hPa大气环流基本呈2波扰动分布,最强的正距平

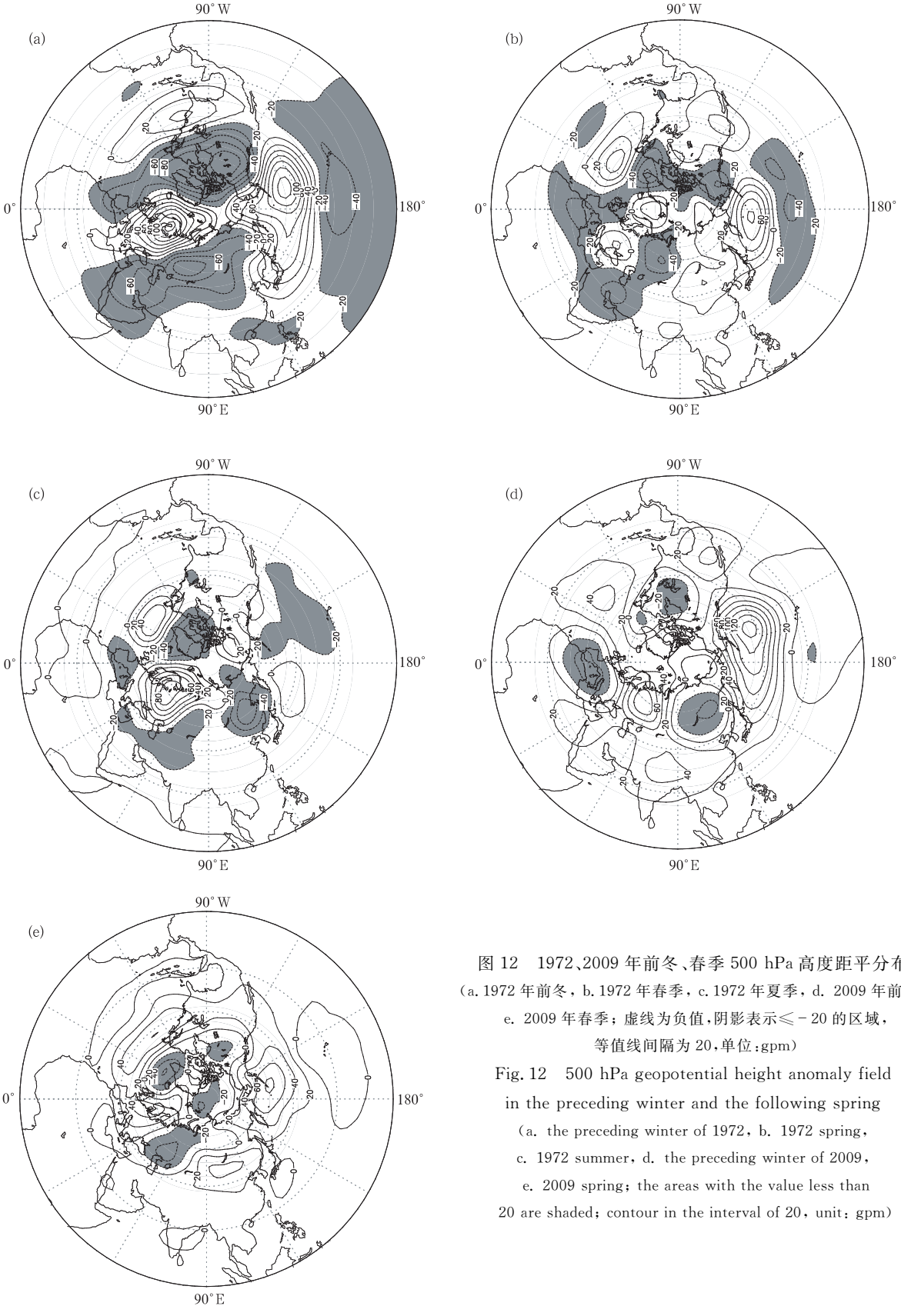


图 12 1972、2009 年前冬、春季 500 hPa 高度距平分布

(a. 1972 年前冬，b. 1972 年春季，c. 1972 年夏季，d. 2009 年前冬，e. 2009 年春季；虚线为负值，阴影表示≤－20 的区域，等值线间隔为 20，单位：gpm)

Fig. 12 500 hPa geopotential height anomaly field in the preceding winter and the following spring

(a. the preceding winter of 1972, b. 1972 spring, c. 1972 summer, d. the preceding winter of 2009, e. 2009 spring; the areas with the value less than 20 are shaded; contour in the interval of 20, unit: gpm)

中心均位于北太平洋阿留申群岛以南的洋面上空,北太平洋涛动区呈典型的由北向南的"+、-"分布的负位相阶段,2009 年正距平中心比 1972 年稍强,中心值达 140 gpm,1972 年的 2 波扰动形势比 2009 年更清晰,且在大西洋面上空的北大西洋涛动也处于较强的由北向南的"+、-"分布的负位相阶段,而 2009 年的北大西洋面上空北大西洋涛动负位相比较弱;从图 12b、12e 可见,1972 和 2009 年春季 500 hPa 距平场仍很相似,在北太平洋的中高纬度洋面上空仍持续北太平洋涛动的负位相扰动分布,只是阿留申群岛以南的洋面上空的正距平中心值比冬季明显减弱,但仍是北半球春季 500 hPa 高度距平场最强的扰动中心。

由此可以看出,1972 和 2009 年的前一年冬季至春季北太平洋涛动负位相均较强,并且持续了半年之久,将会对夏季的北半球 500 hPa 大气环流的异常产生重要影响,1972 年夏季发生了显著的东北严重冷夏 A 事件(表 2),从图 12c 可见,1972 年东北区呈现较强的负距平,一直是低值系统控制,而 2009 年夏季的东北亚 500 hPa 高度场负距平中心偏东,位于俄罗斯的滨海地区上空,表明冷空气活动区亦偏东(图 2a),东北区的夏季低温主要发生在吉林和黑龙江两省的中东部。1972 和 2009 年前一年冬季、春季北太平洋涛动呈负位相变化的一致性,均导致东北夏季低温的发生,再次表明北太平洋涛动位相的异常变化是大气行星尺度中一种值得关注的稳定分量。

5.3 东北冷涡活动异常的前期 500 hPa 高度场谐波分析

从 2009 年 4—5 月 500 hPa 高度场沿45°N 超长波扰动分布(图 13)可见,120°E—180°始终为超长波扰动槽区(1—3 波),并且稳定在北太平洋地区,只是 5 月上旬明显东移、中旬开始又明显西退,这是东北冷涡活动异常强的前期典型特征(沈柏竹等,2008)。表明北太平洋区的 45°N 超长波扰动槽的稳定转变为定常波扰动槽,这显然与北太平洋地区春季北太平洋涛动持续呈由北向南的"+,-"负位相波列有关,是东北冷涡 6 月活动异常的前期环流演变主要特征,也是 6 月东北冷涡活动异常的重要前期信号,由实况分析可知,2009 年 6—7 月东北冷涡活动比常年多达 18 d,活动异常的距平百分率约达 54% 。

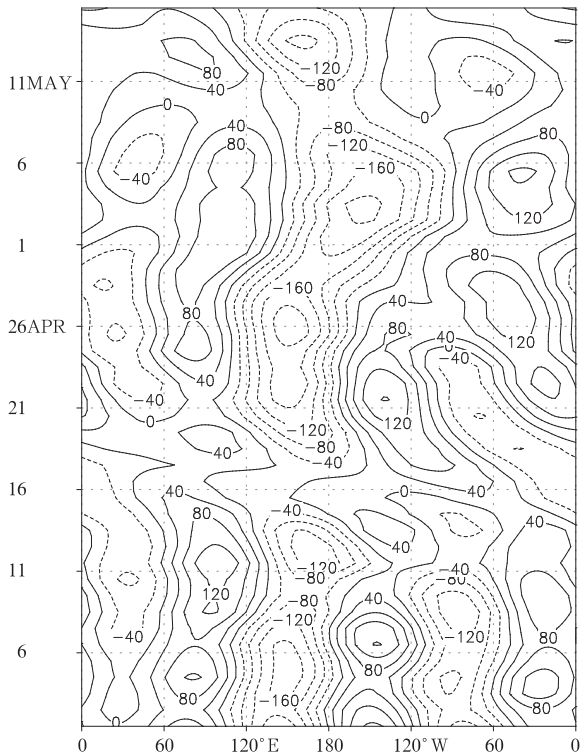


图 13 2009 年 4—5 月 500 hPa 高度场(单位:gpm)沿 45°N 谐波分析超长波扰动

Fig. 13 Time-longitude cross section showing the ultra-long-wave disturbance along 45°N on 500 hPa geopotential height field as produced via the harmonic analysis (unit: gpm)

6 结论与讨论

(1) 2009 年夏季,在中国东北地区中部和北部出现了一次低温事件。按本文的定义,其中长春测站为 -0.49σ 达到冷夏 B 事件标准。

(2) 东北冷涡活动异常强是导致 2009 年夏季中国东北地区中部和北部低温事件最直接的环流系统。长春和哈尔滨夏季气温与同期 500 hPa 高度场相关显著,在东北地区上空的相关系数≥0.7(显著性水平 $\alpha \leqslant 0.01$)。典型东北夏季低温年的经圈垂直环流特征为在 850—250 hPa 对流层形成控制整个东北地区的深厚冷空气层,水平和垂直结构表明,东北冷涡活动异常是其最直接的影响环流系统。2009 年 6—7 月东北冷涡活动比常年多达 18 d,活动异常的距平百分率约达 70%,影响东北区夏季低温的夏季 500 hPa 高度距平负中心区偏东,位于俄罗斯的滨海地区上空。

(3) 长春和哈尔滨百年夏季气温观测资料的年代际尺度滤波(≥9 a)近 10 年呈现显著下降趋势,是 2009 年吉林和黑龙江两省发生夏季低温的重要年代际变化背景条件。长春和哈尔滨百年夏季气温观测资料功率谱分析具有显著 30—40 年冷暖阶段性变化,自 20 世纪末至 21 世纪初呈现显著下降趋势,1999—2008 年下降趋势约 -0.8 ℃/10 a,显著低于全球变暖东北区域响应的 1961—2000 年的线性增暖值(0.2 ℃/10 a)。2009 年夏季出现的有利于东北低温的环流特征与 1994—2008 年没有出现东北夏季低温的同期极地和中高纬度大气环流位相分布近于相反,北极涛动呈显著负位相,东北亚、阿留申群岛和北大西洋上空负距平等都值得关注。

(4) 前一年冬季太平洋极涡活动的年代际变化是东北夏季气温变异的很重要大气环流背景场。与长春和哈尔滨夏季气温呈显著正相关的前一年冬季太平洋极涡面积指数,其年代际振荡亦呈显著下降趋势,依据北太平洋地区 SST 与东北夏季气温相关的显著性水平可知,北太平洋西风漂流区的 SST 影响次之,赤道中东太平洋 SST 也有一定的影响。2009 年前一年冬季赤道中东太平洋 SSTA 为拉尼娜位相,2009 年春季明显减弱。

(5) 北太平洋涛动位相是东北夏季气温变化的重要前期信号和预测因子,也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。500 hPa 前一年冬季北太平洋涛动区高度场与中国东北区 80 个测站夏季气温场的 SVD1 + SVD2 均表明,北太平洋涛动的正(负)位相与东北区夏季气温变化的正(负)异常呈显著的相关关系,占总协方差平方和的 87%。2009 前一年冬季北太平洋涛动为 20 世纪 80 年代中期以来最强的负位相且春季持续,与发生严重低温冷害的 1972 年的演变十分相似,因此,2009 年夏季低温已显露出可能转入类似 20 世纪 70 年代夏季低温阶段的端倪。

(6) 北太平洋地区 4—5 月沿 500 hPa 高度场 45°N 谐波分析表明,超长波活动呈现为定常波扰动槽形式,是 2009 年 6—7 月东北冷涡活动异常强的前期信号。2009 年 4—5 月沿 500 hPa 高度场 45°N 谐波分析表明,北太平洋地区超长波扰动槽为定常波扰动槽,与北太平洋地区春季北太平洋涛动持续呈由北向南的"+,-"负位相波列有关,构成了有利于 6—7 月冷涡活动异常多的前期中高纬度环流演变背景。

(7) 分析东北地区长春、哈尔滨两个测站拥有的百年地面气温观测资料和北太平洋地区极涡活动作年代际变化表明,近 10 年均呈显著下降趋势,在年和季节尺度上,揭示前冬至春季北太平洋地区海气系统有利发生东北夏季低温和冷涡活动的前期信号,并采用谐波分析方法进一步寻找季内到月际尺度有利于 6—7 月冷涡活动异常强的高度场低频信号(因为篇幅有限,本文仅给出沿 45°N 的 500 hPa 高度场谐波分析结果)。2009 年 6 月初,利用上述资料、方法,并参考当时 500 hPa 高度场呈现冷涡活动频繁的 10—16 d 的预报场之后,在有限范围内发出东北地区可能出现 6 月和夏季低温的预测,是一次注重提取大气中除了有天气尺度的混沌分量外还有行星尺度的稳定分量,采用多时空尺度因子预测东北夏季低温较为成功的尝试。

本文只是初步分析了 2009 年东北夏季低温的同期某些环流特征,着重分析 2009 年东北夏季低温发生有利的年代际变化背景、东北夏季低温和东北冷涡活动与前期北太平洋地区海气系统变化的联系,以及如何运用多时空尺度预测因子作出 2009 年夏季东北冷涡活动强和可能发生东北低温的科研判断,但不清楚影响东北夏季低温的北半球海-气与陆-气系统的基本配置和重要模态年代际变化与全球变暖的联系,因此,不具备较充分的理由判断 2009 年东北夏季低温究竟属于偶然,还是进入一个新的群发期预警信号,以及有关东北夏季低温与海气系统联系的机制等问题,还需作深入一步的研究。

致谢:对在撰写过程中丁一汇研究员给予的指教表示感谢!吉林省气象科学研究所的高枞亭、陈长胜、郭春明、苏丽欣、涂钢和隋波等亦参加了部分研究和讨论工作,一并表示感谢!

参考文献

安刚,廉毅,王琪. 1998. 近九十年吉林省松辽平原作物生长季气温变化的小波分析. 气象学报,56(4):458-465

陈隆勋,周秀骥,李维亮. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. 气象学报,62(5):634-646

丑纪范. 1986. 长期数值天气预报. 北京:气象出版社,329pp

丑纪范. 1997. 大气科学中非线性与复杂性研究进展. 中国科学院院刊,5:325-329

丑纪范. 2007. 数值天气预报的创新之路—从初值问题到反问题. 气象学报,65(5):673-682

东北低温科研协作组. 1979. 东北地区冷夏、热夏长期预报的初步研究. 气象学报,37(3):44-58

丁一汇. 1989. 天气动力学中的诊断分析. 北京:科学出版社,292pp

丁一汇等. 2003. 气候系统的演变及其预测. 北京:气象出版社,137pp

丁一汇. 2007. 序言. 地理科学,27(增刊):1

封国林,董文杰,龚志强等. 2006. 观测数据非线性时空分布理论和方法. 北京:气象出版社,227pp

符淙斌. 1980. 北半球冬春冰雪面积变化与我国东北夏季气温的关系. 气象学报,38(2):187-192

何金海,吴志伟,祁莉. 2006. 北半球环状模和东北冷涡与中国东亚夏季降水关系分析. 气象与环境学报,22(1):1-5

吉林省气象台. 1980. 造成东北区夏季(5—9 月)持续低温的长期天气过程分析. 大气科学,4(1):54-67

廉毅,安刚. 1998. 东亚季风 El Nino 与中国松辽平原夏季低温关系初探. 气象学报,56(6):724-735

廉毅,高枞亭,沈柏竹等. 2007. 吉林省现代气候变化对粮食生产影响的简析. 气候变化研究进展,3(1):46-49

林美静,范可,王会军. 2010. 西北太平洋区纬向风垂直切变的气候特征研究. 气象学报,68(3):309-314

陆日宇. 2003. 华北汛期降水量年代际和年际变化之间的线性关系. 科学通报,48(7):718-722

刘宗秀. 1986. 北半球极涡强度指数的计算及其与我国温度变化的关系. 气象,12(增刊 II):84-89

刘宗秀,廉毅,高枞亭. 2002. 东北冷涡持续活动时期的北半球 500 hPa 环流特征分析. 大气科学,26(3):361-372

刘宗秀,廉毅,沈柏竹等. 2003. 北太平洋涛动区 500 hPa 高度场季节变化特征及其对中国东北区降水的影响. 应用气象学报,14(5):553-561

《气候变化国家评估报告》编写委员会. 2007. 气候变化国家评估报告. 北京:科学出版社,422pp

任荣彩,向纯怡. 2010. 平流层极涡振荡与 ENSO 热带海温异常的时空联系. 气象学报,68(3):285-295

沈柏竹,李尚锋,廉毅. 2008. 初夏季东北冷涡活动的谐波分析. 吉林大学学报(地球科学版),38(增刊):204-208

孙建琦,王会军. 2006 . 东北夏季气温变异的区域差异及其大气环流和海表温度的关系 . 地球物理学报,49(3):662-671

王敬方,吴国雄. 1997. 持续性东北冷夏的变化规律与相关特征. 大气科学,21(5):523-532

王书裕. 1995. 农作物冷害的研究. 北京:气象出版社,246pp

闫敏华. 2007. 东北地区器测时期气候变化及其地域差异研究. 北京:科学出版社,37-38

杨青,廉毅,何金海. 2005. 利用奇异值分解方法预测东北地区夏季气温. 气象,31(3):31-35

叶笃正,严中伟. 2008. 全球变暖的有序适应问题. 气象学报,66(6):855-856

章名立,符淙斌,王铭如等. 1982. 七十年代全球地面气温的初步研究(一)——七十年代全球气温的特征和我国东北低温冷害. 大气科学,6(3):229-235

章名立,符淙斌,王铭如等. 1983. 七十年代全球地面气温的初步研究(三)——我国东北冷、暖夏季年全球温度场分布. 大气科学,7(1):23-31

章少卿,于通江,李方友等. 1985. 北半球极涡面积、强度的季节变化及其与中国东北地区气温的关系. 大气科学,9(2):178-185

章少卿. 1990. 我国东北低温与厄尔尼诺的关系∥国家科学技术委员会. 中国科学技术蓝皮书. 第 5 号. 气候. 北京:科学技术文献出版社,311-316

赵宗慈,王绍武,徐影等. 2005. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因. 气候与环境研究,10(4):808-817

郑维忠,倪允琪. 1999. 热带和中纬度太平洋海温异常对东北夏季低温冷害影响的诊断分析研究. 应用气象学报,10(4):394-401

支蓉,封国林,龚志强等. 2010. 关于矩阵理论的全球气温的时空关联性研究. 气象学报,68(4):501-513

International CLIVAR Project Office. 1997. A research programme on climate variability and prediction for the 21st century. CLIVAR, World Climate Research Programme. Bundsstr: Max-Plank-Institute für Meteorologie,48pp

IPCC. 2007. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report. Cambridge, UK: Cambridge University Press

Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying. 2008. Challenge on Prediction of East Asian Winter Monsoon as a Global Warming. International Symposium on Climate and Change in East Asia-North Pacific-North America(ISCCE). 2008 September,6-10,Changchun China