

# 2010—2011年冬季 La Niña 事件 对北半球极涡的影响分析

石柳 付遵涛<sup>†</sup>

北京大学物理学院大气与海洋科学系, 北京 100871; <sup>†</sup> 通信作者, E-mail: fuzt@pku.edu.cn

**摘要** 为了探讨强极涡与 La Niña 事件之间的关系, 利用 NCEP/NCAR (日平均、月平均位势高度及温度场) 再分析资料对 2010—2011 年冬季进行个例研究。与气候态相比, 2010—2011 年冬季北半球平流层极涡偏强, 同时, 显著的强海温负异常(La Niña 事件)也持续整个冬季。结果表明, 受 La Niña 事件影响, 对流层环流场和温度场得到较大的调整, 出现 PNA (Pacific North American)型异常环流形势和相对应的温度异常分布。2010 年 12 月, 阿留申地区出现负值的热量经向输送, 使得该地区从对流层上升至平流层的行星波动与气候态相比明显减弱, 从而导致平流层极涡较气候平均态偏强。这一 La Niña 事件对平流层极涡影响的动力过程也从 1948—2010 年期间选出的 13 个冬季强 La Niña 事件的合成分析结果中得到证实。

**关键词** 极涡; 行星波; La Niña 事件; 合成分析

中图分类号 P421

## Winter 2010–2011: A Case Study of the Impact of La Niña on the Arctic Vortex

SHI Liu, FU Zuntao<sup>†</sup>

Department of Atmospheric and Oceanic Sciences, School of Physics, Peking University, Beijing 100871;

<sup>†</sup> Corresponding author, E-mail: fuzt@pku.edu.cn

**Abstract** The relationship between strong arctic vortex and the La Niña events is found out by a case study of winter 2010–2011, using the NCEP/NCAR (daily and month mean) dataset. During the winter 2010–2011, the Arctic vortex was extremely stronger and persistent longer than normal, at the same time La Niña signals were surprisingly strong and long-lasting. The impact of La Niña on the polar vortex was investigated. Results show that the Pacific/North American (PNA) Pattern and corresponding temperature anomalies were forced by this La Niña event and the atmospheric circulation was greatly modified, too. Due to the negative heat flux in Aleutian region, the wave activities from the troposphere to the stratosphere were much weaker than their climatology. In addition, composite analyses also verified this La Niña's impact on Arctic Vortex, where 13 strongest La Niña cases during the period of 1948–2010 were selected.

**Key words** arctic vortex; planetary waves; La Niña events; composite analysis

平流层和对流层大气是地球气候系统中的重要组成部分, 在北半球冬季, 两者的动力耦合十分密切。在过去的十几年里, 平流层与对流层相互作用的研究得到广泛关注<sup>[1–15]</sup>。

Polvani 等<sup>[12]</sup>指出, 平流层中的扰动主要来自

对流层行星波的破碎, 平流层的变化主要源于下方的对流层, 而不是平流层本身。许多因素(诸如太阳活动、地表等边界条件等)都可能影响极涡, 其中 El Niño-Southern Oscillation (ENSO)被公认是影响北半球冬季极涡最主要的因素<sup>[16–20]</sup>。首先, 伴随

着 El Niño 事件, 强行星尺度波动垂直上传至平流层, 在高纬度地区破碎, 使极涡减弱, 进而影响对流层的气候<sup>[21]</sup>。其次, Garfunkel 等<sup>[22]</sup>的研究表明, El Niño 事件产生北半球赤道外对流层遥相关, 冬季阿留申地区低压加深, 使得对流层波动产生相应的调整。数值模拟很好地证实了 ENSO 事件对北半球冬季极涡有很大的影响<sup>[23-27]</sup>。Manzini 等<sup>[24]</sup>和 Garcia-Herrera 等<sup>[25]</sup>通过分析模式的模拟结果, 发现冬季 El Niño 事件产生的大尺度环流模式加强了北半球中高纬度地区行星尺度波动向极区平流层的传播, 并造成极涡减弱, 进而使得对流层热带地区变冷, 高纬度地区变暖。Taguchi 等<sup>[26]</sup>用恒定的冬季 1 月海温强迫 WACCM 模式研究发现, 在 El Niño 事件发生年份, 爆发性增温事件产生的概率是 La Niña 事件发生年份的两倍。El Niño 事件中的海温强迫会给北半球高纬度地区对流层上层和平流层带来类似 1 波增强、2 波减弱的影响。

此前, 主要的研究都集中在模式模拟输出的分析, 并多集中研究 El Niño 事件的影响, 忽视了 La Niña 事件对平流层极涡的影响。对于 La Niña 事件影响平流层极涡的动力过程, 仍然很难找出一个严谨准确的答案。本文使用再分析资料, 将个例分析与合成分析相结合, 解释 La Niña 事件影响北半球冬季极涡的物理过程。

## 1 数据和方法

本研究使用的 1948—2011 年逐日、逐月位势高度及温度场资料来自 NCEP/NCAR (the National Center for Environmental Prediction/National Center

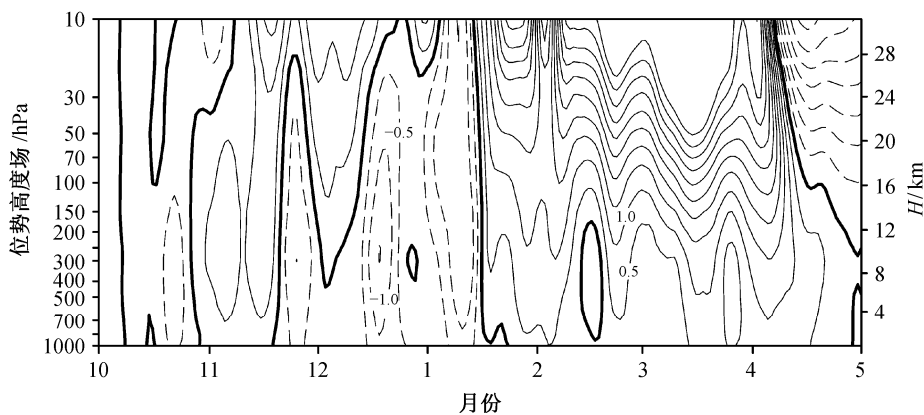
for Atmospheric Research)的再分析资料, 其水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。Nino3.4 区 ( $5^\circ\text{N} - 5^\circ\text{S}$ ,  $120^\circ - 170^\circ\text{W}$ )海温距平值来自 CPC/NCEP 网站(<http://www.cpc.noaa.gov/data/indices/sstoi.indices>)。PNA (Pacific North American)遥相关型是北半球赤道外低频变化中最重要的模态之一, 本文用到的 PNA 指数也来自 CPC/NCEP 网站 (<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml>)。三维 EP 通量的计算使用 Plumb<sup>[11]</sup>于 1985 年提出的方法。我们挑选 2010—2011 年冬季做个例分析, 在与气候态进行对比的同时, 也与合成分析方法得到的结果进行比较。

## 2 结果分析

### 2.1 平流层极涡事件的量化指标及 2010—2011 年的异常状态

北半球环状模 (Northern Hemisphere Annular Mode, NAM) 是展现北半球中高纬度地区对流层和平流层北极涛动 (arctic oscillation) 模态特征的有效变量。作为重要的指标, NAM 可用来研究平流层极涡的异常以及下传特点。本文计算 NAM 指数的方法与 Baldwin 等<sup>[15]</sup>一致。在平流层, NAM 可用来衡量极涡的强弱 (Baldwin 等<sup>[15]</sup>将强极涡事件的标准定为 NAM 指数大于 1.5, 弱极涡事件的标准定为 NAM 指数小于 -3.0)。

2010 年 11 月末至 2011 年 4 月初, 正的平流层 NAM 信号几乎持续整个冬季 (图 1), NAM 值从 1 月开始迅速增大, 在 3 月可达到 5.0 以上 (极涡异常强)。根据早期的观测资料, 平流层大尺度环流的变化首先出现在距离地面约 50 km 的高度, 然后下



计算方法来自 Baldwin 等<sup>[15]</sup>, 粗黑线为零等值线

图 1 2010 年 10 月至 2011 年 4 月 NAM 指数高度-时间图  
Fig. 1 Height-time diagram of NAM from Oct., 2010 to Apr., 2011

传至平流层的低层,最后下传至对流层,导致对流层出现天气的异常事件<sup>[15]</sup>。然而,2011年1月中旬之前,平流层的信号并没有充分下传至对流层,在此期间有显著的负AO信号维持在对流层中。2011年1月中旬起,平流层极涡明显增强,极区比常年冷,受平流层NAM影响,地面AO信号为正,对流层极区冷空气比较稳定,不易南下,中纬度大部分地区气温偏高。

到底是什么原因造成2010—2011年北半球冬季如此强的极涡事件?下面着重回答这个问题。

## 2.2 影响平流层极涡的机理:行星波的变化

已有研究证实,平流层中的扰动主要来自对流层行星波的破碎<sup>[12]</sup>。为了找出强极涡形成的动力原因,首先对2010—2011年北半球行星波的垂直传播特点进行研究。由于平流层强极涡事件主要从2011年1月开始发生,因此着重对前期(12月)对流层的行星波以及1月平流层的行星波进行讨论。对500 hPa上12月和10 hPa上1月的位势高度场进行纬向傅里叶分解,取纬向波数1~2波来表示行星波的活动(3波活动十分弱,且不易上传至平流层)。利用这种分析波动的方法,可以更直观地看出行星波强弱的变化和垂直方向上的传播特点,分解得到的位势高度场中心的绝对值可以体现行星波动的强弱,中心绝对值越大,行星波动越强。从12月500 hPa(图2(a))和1月10 hPa(图2(b))的多年平均波动图中可以看出,纬向波数为1的波动(1波),位势高度正负中心位置随高度逐渐向西倾斜(其他高度上的波动图略),500 hPa和10 hPa位势高度场中心位置相差近180°;纬向波数为2的波动(2波),位势高度正负中心位置随高度增加同样向西倾斜,但500 hPa和10 hPa上位势高度正负中心位置只相差45°左右,体现出更强的正压性。与多年平均的气候态相比,2010年12月(图2(c))500 hPa上,1波位势高度场中心的绝对值约为90 gpm,与气候态(中心绝对值约为55 gpm)相比明显偏弱,而2波略强于气候态(图2(a))。2011年1月(图2(d))10 hPa上,1波位势高度场中心的绝对值约为250 gpm,与气候态(中心绝对值约为400 gpm)相比明显偏弱,2波同样略强于气候态(图2(b))。由于1波的减弱远大于2波的增强,因此对流层上升至平流层的行星波明显减弱,使得2010—2011年冬季极涡稳定、偏弱。

此外,我们使用月平均再分析资料计算三维EP通量,分析行星波动在2010—2011年冬季的三

维活动特点(图3)。从12月多年平均(图3(a))的结果可以看出,行星波上传的区域主要位于西伯利亚至阿拉斯加地区,上传至平流层之后向东传播至格陵兰岛和北大西洋地区,并在这个区域下传回对流层。然而,在2010年12月(图3(b)),行星波动在阿留申地区显示出与气候态相反的下传活动(与多年平均相比)。

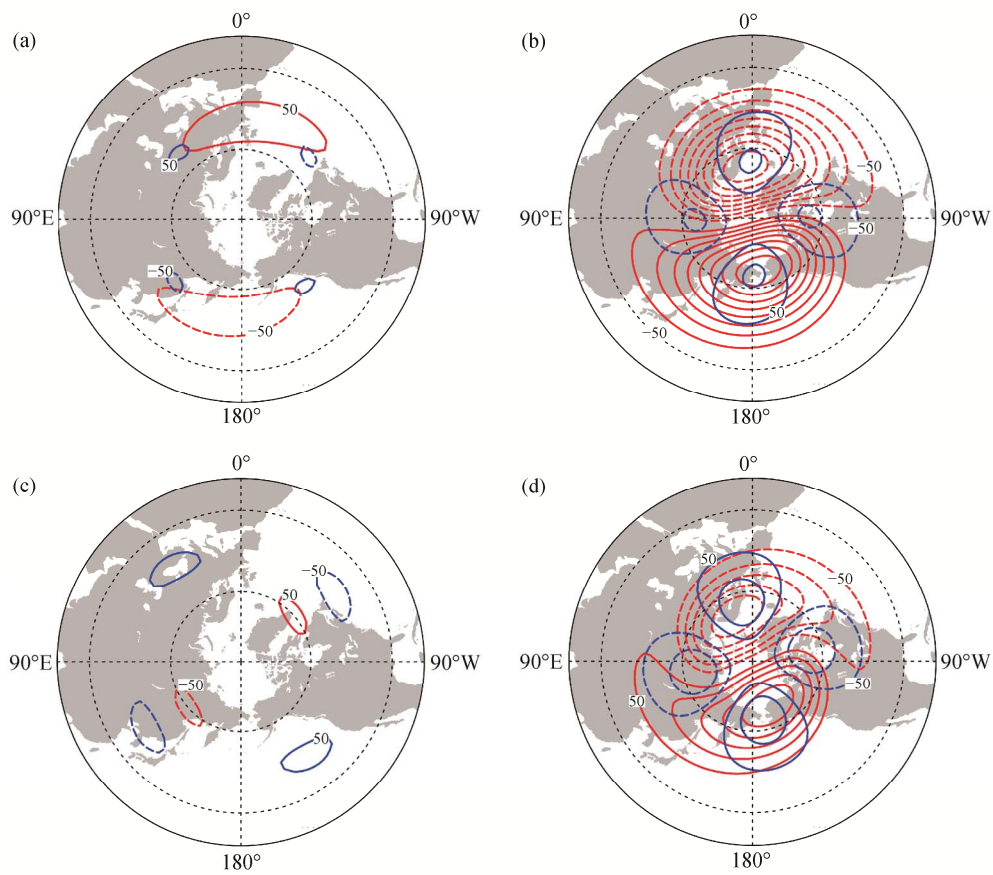
## 2.3 影响行星波的基本过程

Manzini等<sup>[24]</sup>和Garcia-Herrera等<sup>[25]</sup>通过分析模式,已经证实冬季ENSO事件产生的大尺度环流模态可以影响北半球中高纬度地区行星尺度波动的行为。

2010年6月开始,La Niña信号出现并持续2010—2011年整个冬季(图4(a)),在前冬(11,12月)达到最强,Nino3.4区域海温异常最低值为 $-1.7^{\circ}\text{C}$ 。这种赤道地区的强的持续性海温异常必然引起大尺度大气环流结构的调整,其中影响中高纬地区最重要的大气环流模态是PNA(Pacific North American)。虽然PNA是气候系统内部变化的模态,但是ENSO确实对PNA有很大的影响。在冬季,PNA的正位相与ENSO暖位相(El Niño)相关,PNA的负位相与ENSO冷位相(La Niña)相关。此外,La Niña与PNA-的对应关系比El Niño与PNA+的对应关系要好<sup>[28]</sup>。因此,冬季La Niña信号在2010年11月进入成熟期后,PNA转为负位相(图4(b)),最低值出现在12月,PNA指数为-2.1)。太平洋地区较低纬度的海温异常通过PNA影响较高纬度的阿留申地区的环流。在PNA处于负位相时,阿留申地区环流产生相应的调整。由于阿留申地区对流层大气环流以及行星波的传播受太平洋海温影响较大<sup>[29]</sup>,因此,下面着重研究2010—2011年冬季阿留申地区行星波动产生的异常是否与赤道地区海温的异常有关。

为了更好地研究阿留申地区对流层环流异常对行星波传播的影响,我们计算了2010年12月500 hPa的三维EP通量距平值(图5(a))。阿留申地区出现垂直方向EP通量的负值异常,有极端异常的行星波动下传,与50 hPa波动传播的特点基本上一致。异常下传的行星波在数值上超过异常上传的行星波(亚欧大陆东北部以及北大西洋局部地区),因此,2010年12月对流层上传至平流层的行星波偏少。

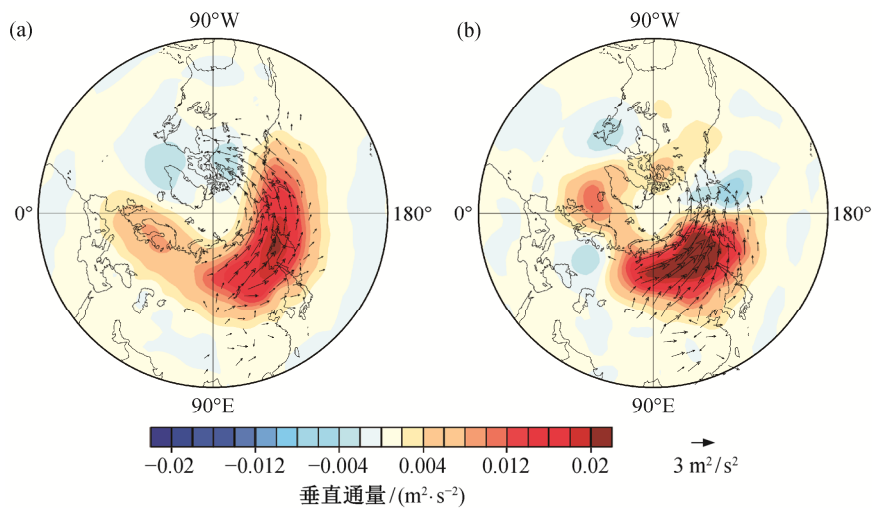
将2010年12月500 hPa位势高度场和温度场(图5(c))与气候态(图5(b))进行对比,也发现在气候



(a) 12月 500 hPa 气候态; (b) 1月 10 hPa 气候态; (c) 2010年 12月, 500 hPa; (d) 2011年 1月, 10 hPa。  
实线表示正值, 虚线表示负值, 等值线间隔 50 gpm

图 2 纬向波数 1 波(红色线)和 2 波(蓝色线)位势高度图

Fig. 2 Geopotential height fields, zonal wave number 1 in red and 2 in blue



(a) 12月 50 hPa 三维 EP 通量气候态矢量图; (b) 2010年 12月 50 hPa 三维 EP 通量矢量图。  
箭头表示水平的波动通量, 颜色填充表示垂直的波动通量(正值表示向上)

图 3 12月三维 EP 通量气候态矢量图

Fig. 3 Three-dimensional EP-fluxes in Dec. for climatology

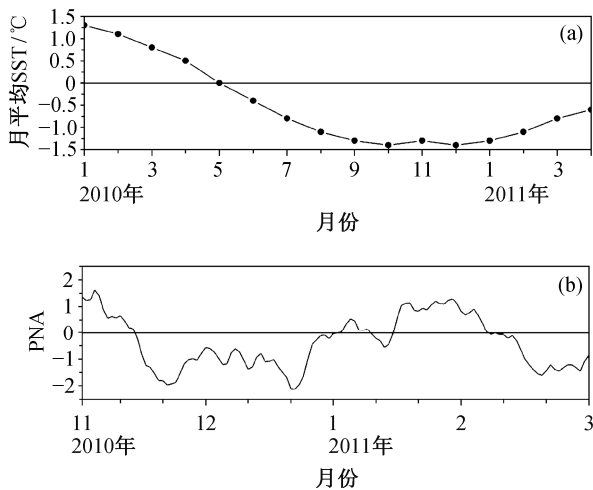


图 4 (a) 2010 年 1 月至 2011 年 4 月, Nino3.4 区海温月平均距平值; (b) 2010 年 11 月至 2011 年 2 月冬季逐日 PNA 指数<sup>①</sup>

Fig. 4 (a) Time series of monthly SST anomalies of Nino3.4 region from Jan., 2010 to Apr., 2011; (b) time series of daily PNA index from Nov., 2010 to Feb., 2011<sup>①</sup>

态背景下,阿留申地区多被纬向环流占据,经向扰动少。但是,2010 年 12 月在阿留申地区出现较明显的位势高度场高值区,伴随相应的温度场暖异常,在阿留申地区存在明显的负的经向热量输送,限制了该地区行星波动向上的传播。

为了证明 La Niña 是通过 PNA 对阿留申地区产生影响,我们使用合成分析的方法进行验证。从 La Niña 信号较强、持续时间较长的年份中挑选出 13 个 La Niña 事件(表 1),与已有的研究结果<sup>[29]</sup>比较一致。对冬季 La Niña 事件进入成熟阶段之后 12 月的 500 hPa 位势高度场和温度场进行合成分析,结果如图 6 所示。在 La Niña 事件发生之后,与气

表 1 1948—2011 年期间的 13 个 La Niña 事件  
Table 1 13 La Niña events selected during 1948—2011

序号	事件发生年份	序号	事件发生年份
1	1950—1951	8	1988—1989
2	1955—1956	9	1995—1996
3	1964—1965	10	1998—1999
4	1970—1971	11	1999—2000
5	1971—1972	12	2000—2001
6	1973—1974	13	2007—2008
7	1975—1976		

① 来自 CPC/NCEP 网站(<http://www.cpc.noaa.gov/data/indices>)。

候态相比,阿留申地区的经向环流增强(图 6(a))。从去纬向平均的距平环流场和温度场(图 6(b))可以看出,与 PNA- 一致的对流层环流异常模式出现时,阿留申地区出现正的位势高度异常,并伴有明显的暖中心。David 等<sup>[28]</sup>曾对“ENSO 是否激发了 PNA 模态?”这个问题进行回答:对于 ENSO 暖位相,海温的异常无法引起 PNA;对于 ENSO 冷位相,还没有得到准确的结论。通过本节分析,可以很明显地得出结论:在冬季,当 ENSO 处于冷位相且进入成熟阶段之后,更容易出现与 PNA- 模态一致的高度场和温度场异常。

为了检验 La Niña 事件对行星波活动的影响,我们同样对行星波进行 13 个 La Niña 事件的合成分析(图 7),与气候态(图 2)相比,上传至平流层的 1 波较弱(位势高度中心绝对值约为 350 gpm)。我们同样检验了二维 EP 通量的计算结果(图略),与气候态进行相较,上传至极区平流层的行星波动较弱。因此,La Niña 事件对北半球冬季对流层-平流层垂直方向上的行星波传播有显著的影响,从而影响极涡的强度。

### 3 结论和讨论

通过对 2010—2011 年 La Niña 事件对北半球冬季极涡的影响的分析,La Niña 事件影响北半球冬季极涡的动力过程可以概括如下(图 8):当赤道东太平洋海温偏低时,受强海温负异常(La Niña 事件)的影响,出现 PNA- 的对流层环流异常,通过该 PNA,强海温负异常可以影响到较高纬度的阿留申地区。阿留申地区经向扰动增强,配合温度场的异常变化,使得该地区产生负的热量经向输送,抑制了行星波的上传。与气候态相比,从对流层上升至平流层的行星波动明显减弱,并伴有行星波 1 波减弱、2 波增强的特征,使得极涡与气候态相比更强,且持续的时间更长。这一个例分析的基本过程与从 1948—2011 年挑选出的 13 个 La Niña 事件合成结果比较一致。

从 1948—2010 年冬季 Nino3.4 区域海温距平值指数与平流层 NAM 指数的散布图(图 9),可以更好地看出 La Niña 事件与极涡强弱的密切联系:当 Nino3.4 区域海温距平值满足典型 La Niña 事件发生的条件,且海温距平值低于  $-0.75^{\circ}\text{C}$  时(过去 63

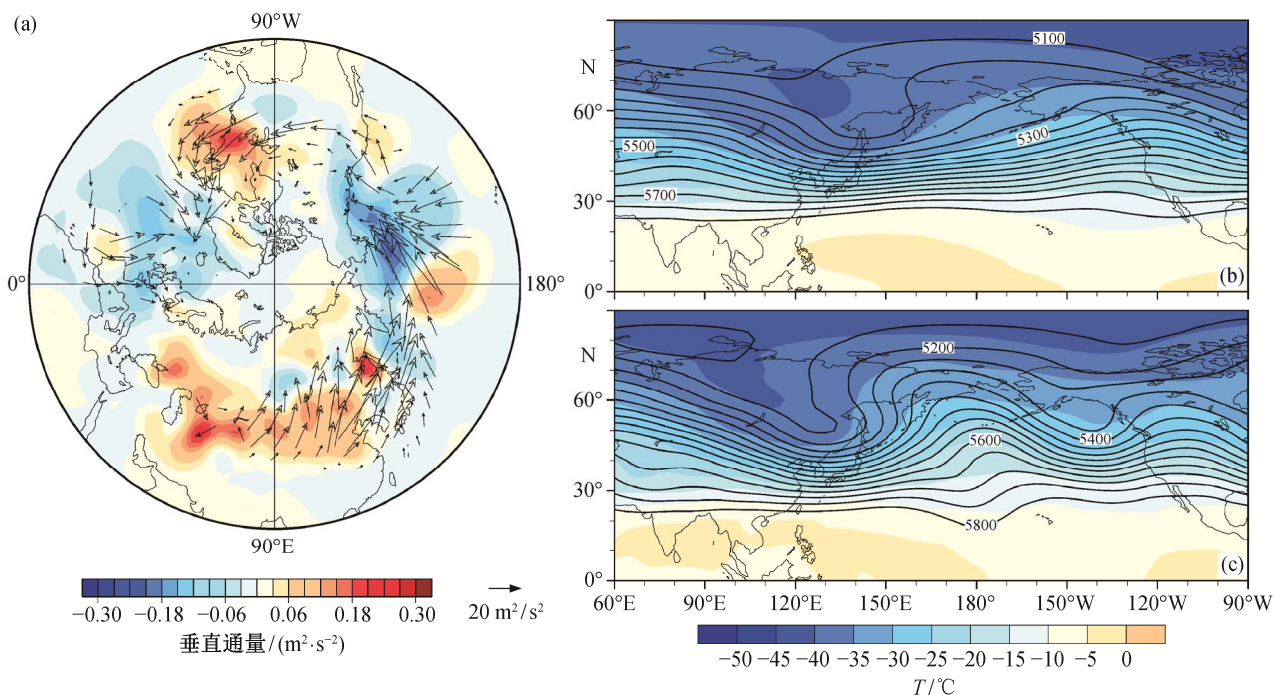


图 5 (a) 2010 年 12 月 500 hPa 三维 EP 通量距平矢量图, 直线箭头表示水平的波动通量, 颜色填充表示垂直的波动通量(正值表示向上); (b) 12 月 500 hPa 温度场-高度场气候态, 等值线为位势高度场(gpm); (c) 同(b), 2010 年 12 月  
 Fig. 5 (a) 500 hPa three-dimensional EP-fluxes anomalies in Dec., 2010 (horizontal momentum component is marked as vectors and the vertical heat component is shaded in colors); (b) Spatial pattern of height and temperature for climatology in Dec.; (c) The same as (b), but in Dec., 2010

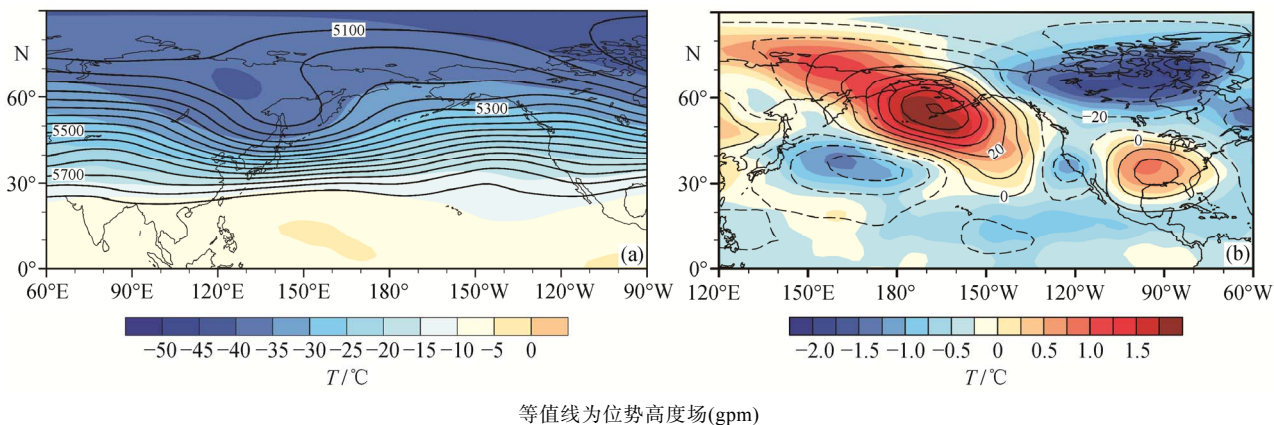
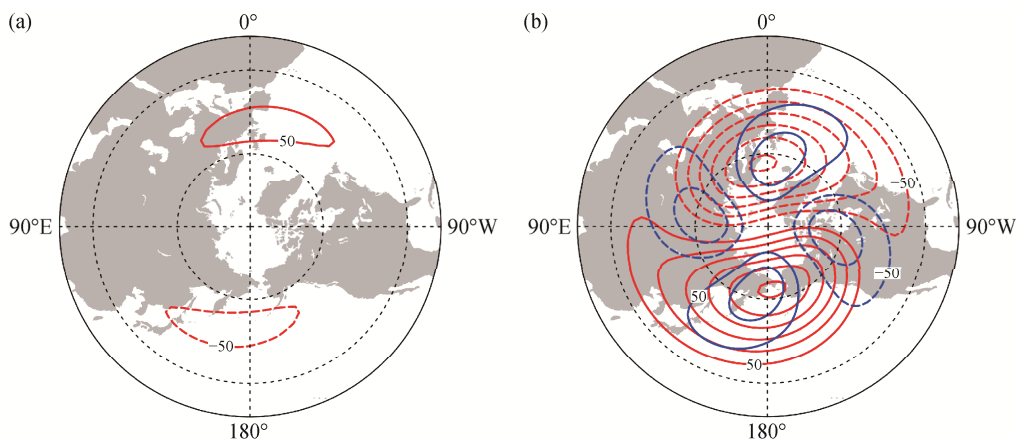


图 6 (a) La Niña 年 12 月 500 hPa 温度场-高度场合成图; (b) La Niña 年 12 月 500 hPa 温度场-高度场去纬向平均距平合成图  
 Fig. 6 (a) Spatial pattern of height and temperature for the composite of La Niña years in Dec.; (b) Spatial pattern of height and temperature anomalies for the composite of La Niña years in Dec. (zonal mean was removed)

年里, 总计有 13 次满足这一条件), 平流层冬季极涡基本上都是偏强的(过去 63 年里, 13 次中有 12 次符合)。唯一的一次例外是 1970—1971 年冬季, 虽然赤道东太平洋地区形成显著的 La Niña 事件, 但平流层在 1 月出现弱的极涡(NAM 异常信号未能下传至地面)。

从超前一个月的冬季 Nino3.4 区域海温距平值

与滞后一个月的 NAM 指数的对应关系中可以看出, 较强的 La Niña 事件(Nino3.4 区域海温距平值低于  $-0.75^{\circ}\text{C}$ )可以看做平流层强极涡出现的重要前兆信号之一。可以将 Nino3.4 区域海温异常值作为一个预测冬季强极涡事件发生的重要指标, 当冬季出现较强的 La Niña 事件(Nino3.4 区域海温距平值低于  $-0.75^{\circ}\text{C}$ )时, 强极涡事件发生的概率比较大。这将



(a) La Niña 年 12 月 500 hPa 的合成; (b) La Niña 年 1 月 10 hPa 的合成。实线表示正值, 虚线表示负值, 等值线间隔 50 gpm

图 7 纬向波数 1 波(红色线)和 2 波(蓝色线)位势高度图

Fig. 7 Geopotential height fields, zonal wave number 1 in red and 2 in blue

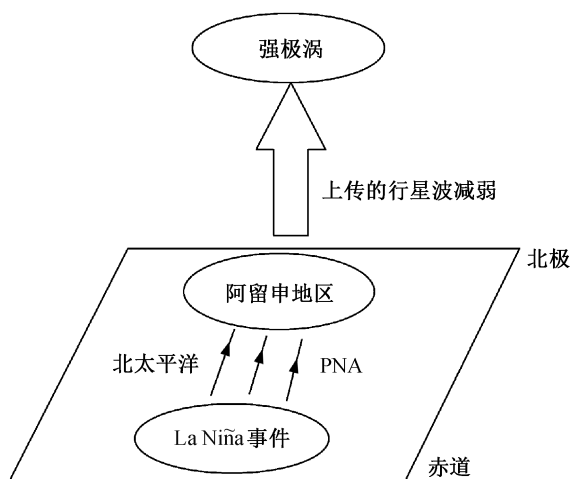
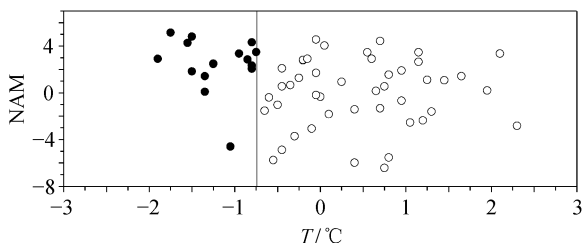


图 8 La Niña 事件影响极涡的概念图

Fig. 8 Schematic diagram for La Niña event's effect on Arctic vortex



实心圆点为海温距平值低于 $-0.75^{\circ}\text{C}$ 的强 La Niña 事件, 空心圆圈为海温距平值大于 $-0.75^{\circ}\text{C}$ 的事件

图 9 1948—2010 年冬季 11, 12 月平均 Niño3.4 区海温距平值与 1 月 NAM 指数的散布图

Fig. 9 SST anomalies of Niño3.4 region (Nov. and Dec. mean) and NAM index (Jan.) during 1948–2010

有利于提高中期天气预报的准确性, 对我国冬季对流层短期气候预测或中长期天气预报具有显著的指示意义。

需要指出, 强的 La Niña 事件仅仅是平流层极涡的充分条件而不是必要条件, 强极涡事件在其他非强 La Niña 事件发生时段也可以形成。对于这些比较弱的 La Niña 事件, 海温对极涡的影响过程需要进一步研究和确认, 因为极涡同时受到其他因素的影响。例如, 当 QBO (quasi-biennial oscillation, 准两年周期振荡) 处于西风位相时极涡更强, 当 QBO 处于东风位相时极涡偏弱, 将 QBO 的作用和 ENSO 的作用区分开是十分困难的<sup>[20]</sup>。

### 参考文献

- [1] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation Signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Lett*, 1998, 25: 1297–1300
- [2] Baldwin M P, Dunkerton T J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J Geophys Res*, 1999, 104(24): 30937–30946
- [3] 吕达仁, 卞建春, 陈洪滨, 等. 平流层大气过程研究的前沿与重要性. *地球科学进展*, 2008, 24(3): 221–228
- [4] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation I: month to month variability. *J Climate*, 2000, 13(5): 1 000–1016
- [5] Baldwin M P, Holton J R. *Climatology of the*

- stratospheric polar vortex and planetary wave breaking. *J Atmos Sci*, 1988, 45: 1123–1142
- [6] Baldwin M P, Thompson D W J, Shuckburgh E F, et al. Weather from the Stratosphere?. *Science*, 2003, 301: 317–318
- [7] Baldwin M P, Dameris M, Shepherd T G. How will the stratosphere affect climate change?. *Science*, 2007, 316: 1576–1577
- [8] Baldwin M P, Thompson D W J. A critical comparison of stratosphere-troposphere coupling indices. *Q J R Meteor Soc*, 2009, 135: 1661–1672
- [9] Edmon H J, Hoskins B J, McIntyre M E. Eliassen-Palm cross-sections for the troposphere. *J Atmos Sci*, 1980, 37: 2600–2616
- [10] Kodera K, Kuroda H. Tropospheric and stratospheric aspects of the Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 2000, 27: 3349–3352
- [11] Plumb R A. On the three-dimensional propagation of stationary waves. *J Atmos Sci*, 1985, 42: 217–229
- [12] Polvani L M, Waugh D W. Upward wave activity flux as a precursor to extreme stratospheric events and subsequent anomalous surface weather regimes. *J Climate*, 2004, 15: 3548–3553
- [13] Thompson D W J, Baldwin M P, Wallace J M. Stratospheric connection to Northern Hemisphere wintertime weather: implications for prediction. *J Climate*, 2002, 15: 1421–1428
- [14] Wallace J M, Gutzler D S. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Mon Wea Rev*, 1981, 109: 784–812
- [15] Baldwin M P, Dunkerton T J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 2001, 294: 581–584
- [16] Baldwin M P, O’Sullivan D. Stratospheric effects of ENSO related tropospheric circulation anomalies. *J Clim*, 1995, 8: 649–669
- [17] Bronnimann S, Luterbacher J, Stahelin J, et al. Extreme climate of the global troposphere and stratosphere in 1940–42 related to El Niño. *Nature*, 2004, 431: 971–974
- [18] Camp C D, Tung K K. Stratospheric polar warming by ENSO in winter, a statistical study. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L04809
- [19] Garfinkel C I, Hartmann D L. Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the Quasi-Biennial Oscillation on polar temperatures in the stratosphere. *J Geophys Res*, 2007, 112: D19112
- [20] Wei K, Chen W, Huang R. Association of tropical Pacific sea surface temperatures with the stratospheric Holton-Tan Oscillation in the Northern Hemisphere winter. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L16814
- [21] Amy H B, Lorenzo M P. El Niño, La Niña, and stratospheric sudden warmings: a reevaluation in light of the observational record. *Geophys Res Lett*, 2011, 38: L13807
- [22] Garfinkel C I, Hartmann D L. Different ENSO teleconnections and their effects on the stratospheric polar vortex. *J Geophys Res*, 2008, 113: D18114
- [23] Sassi F, Kinnison D, Bolville B A, et al. Effect of El Niño-Southern Oscillation on the dynamical, thermal, and chemical structure of the middle atmosphere. *J Geophys Res*, 2004, 109: D17108
- [24] Manzini E, Giorgetta M A, Kornbluth L, et al. The influence of sea surface temperatures on the northern winter stratosphere: Ensemble simulations with the MAECHAM5 model. *J Clim*, 2006, 19: 3863–3881
- [25] Garcia-Herrera R, Calvo N, Garcia R R, et al. Propagation of ENSO temperature signals into the middle atmosphere: a comparison of two general circulation models and ERA-40 reanalysis data. *J Geophys Res*, 2006, 111: D06101
- [26] Taguchi M, Hartmann D L. Increased occurrence of stratospheric sudden warming during El Niño as simulated by WAACM. *J Climate*, 2006, 19: 324–332
- [27] Bronnimann S, Schraner M, Muller B, et al. The 1986–1989 ENSO cycle in a Chemical Climate Model. *Atmos Chem Phys*, 2006, 6: 4669–4685
- [28] David M S, Shukla J. Does ENSO force the PNA?. *J Clim*, 2002, 15: 2340–2358
- [29] 兰晓青, 陈文, 王林. 北半球平流层准定常行星波与平均流的相互作用及其对 ENSO 事件的响应. *地球科学*, 2012, 42(1): 10–23