

孙诚, 李建平. 2012. 2009/2010年北半球冬季异常低温分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 259-273, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10070. Sun Cheng, Li Jianping. 2012. Analysis of anomalously low surface air temperature in the Northern Hemisphere during 2009/2010 winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 259-273.

## 2009/2010年北半球冬季异常低温分析

孙诚<sup>1,2</sup> 李建平<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 分析了2009/2010年冬季(2009年12月1日至2010年2月28日, 简称09/10年冬季)北半球地面气温异常特征及同期的水平与垂直环流场的异常结构。结果表明地面气温的异常呈现出带状的分布, 表现为在低纬度为正异常、中纬度负异常及高纬度正异常的“正负正”的分布特征, 最大的降温区在欧亚大陆和美国东部, 其中局部的降温超过了 $-4^{\circ}\text{C}$ 。09/10年冬季北半球中纬度的地面气温相比过去15年冬季的平均值下降了近 $1^{\circ}\text{C}$ , 而在欧亚大陆的局部地区降温超过了 $-8^{\circ}\text{C}$ 。水平环流场的异常特征为: 海平面气压和位势高度均表现为高纬度正异常而中纬度负异常的“北高南低”的分布特征, 与此同时, 中纬度出现气旋式的异常环流而高纬出现反气旋式的异常环流, 这种分布形势在高低层表现得较为一致。经圈环流异常特征为: 费雷尔环流减弱, 中纬度出现异常的上升运动而高纬度出现异常的下沉运动, 与此同时, 中纬度对流层气温降低, 而低纬度和高纬度的对流层气温升高, 副热带急流增强, 而极地急流减弱。09/10年冬季北半球环流的异常特征与北半球环状模(NAM)负位相时的极为相似。对多年冬季北半球地面气温和NAM指数进行合成和相关分析, 结果表明当NAM处于正(负)位相时, 北半球中纬度地面气温出现正(负)异常带, 并且在欧亚大陆和美国东部最为显著, 局部升温(降温)的幅度达到 $2^{\circ}\text{C}$ 。

在热带外地区, 经向温度平流是控制温度局地变化的关键因子。NAM影响北半球地面气温的物理机制分析表明, NAM主要是通过影响经向温度平流来影响北半球中纬度气温的。当NAM为正位相时, 北半球费雷尔环流加强, 中纬度带和高纬度带发生大气质量的交换, 海平面气压场表现为中纬度异常高压而高纬度异常低压的“南高北低”的分布特征, 中纬度地表出现异常的南风, 进而经向暖平流加强, 最终导致中纬度地面气温升高, NAM负位相年时与之相反。这个结果揭示了NAM作为自然变率对中纬度地面气温的调控作用。

**关键词** 北半球环状模 地表气温异常 经向风 经向温度平流

**文章编号** 1006-9585(2012)03-0259-15 **中图分类号** P462 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10070

## Analysis of Anomalously Low Surface Air Temperature in the Northern Hemisphere during 2009/2010 Winter

SUN Cheng<sup>1,2</sup> and LI Jianping<sup>1</sup>

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

**收稿日期** 2010-05-21 收到, 2012-01-10 收到修定稿

**资助项目** 国家国家重点基础研究发展计划项目 2010CB950400, 国家自然科学基金委创新群体 40821092

**作者简介** 孙诚, 男, 1985年出生, 博士, 主要从事环状模及其影响研究。E-mail: scheng@lasg.iap.ac.cn

**通讯作者** 李建平, E-mail: ljpl@lasg.iap.ac.cn

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

**Abstract** The anomalously low Surface Air Temperature (SAT) and the corresponding atmospheric circulation anomalies in the Northern Hemisphere during the winter (DJF) of 2009/2010 are investigated. Surface Air Temperature Anomalies (SATA) were zonally distributed with a “positive-negative-positive” pattern from tropical to polar region which was characterized by positive SATA in low latitudes, negative SATA in middle latitudes, and positive SATA in high latitudes. The coldest SATA were located in Eurasia and eastern USA, and in some parts SATA exceeded  $-4^{\circ}\text{C}$ . SAT in middle latitudes decreased by nearly  $1^{\circ}\text{C}$  compared to the average of the last 15 years, and in Eurasia SAT even decreased by  $-8^{\circ}\text{C}$ . The anomalous features of horizontal circulation was that, both sea level pressure and geopotential height fields exhibited positive anomalies in high latitudes and negative anomalies in low latitudes, associated with anticyclonic circulation anomalies in high latitudes and cyclonic circulation anomalies in middle latitude, and both high levels and low levels exhibited this feature. The anomalous features of zonally mean meridional circulation indicated that, Ferrel cell was weakened, with anomalous ascending motion in middle latitudes and anomalous descending motion in high latitudes, at the same time, atmosphere temperature of troposphere in middle latitudes was anomalously low and that in high latitudes was warmer, with a stronger jet in subtropics and a weaker jet in the polar region. Composite and correlation analysis of the Northern Hemisphere Annular Mode (NAM) and SATA shows that, during positive (negative) phase of NAM, there was a positive (negative) band in middle latitudes, and it was most significant in Eurasia and eastern USA, with nearly  $2^{\circ}\text{C}$  warming (cooling) in some regions.

Analysis of air temperature equation shows that meridional temperature advection anomalies associated with anomalous meridional wind play a very important role in the variability of local temperature, and its distribution closely resembled the SATA in 2009/2010 winter. With composite and correlation analysis, the mechanism for the relationship between NAM and SATA is investigated. During the positive phase of NAM, the Ferrel cell is anomalously strong, the mass between two latitude zones exchanges, in sea level pressure positive anomalies is in middle latitudes and negative anomalies is in high latitudes, which forces southerly surface wind anomalies in the middle latitude. As a result, the meridional temperature advection is enhanced, which results in warmer SAT in middle latitudes. The situations is opposite during negative phase of NAM. The above-mentioned physical mechanism reveals that surface air temperature in mid-latitude is modulated by NAM as a natural variability.

**Key words** Northern Hemisphere annular mode, surface air temperature anomaly, meridional wind, meridional temperature advection

## 1 引言

2009/2010 年（以下称 09/10 年）北半球冬季是比较异常的一年，中高纬度大部分地区的气温较常年同期明显偏低，俄罗斯中部、蒙古国东部、美国中西部和北部地区的平均气温都极端偏低。低温伴随着暴风雪的频繁爆发，对多个国家和地区造成了巨大的经济损失。09/10 年北半球冬季异常低温似乎与全球变暖的主旋律背道而驰，这次低温事件有哪些环流背景和特征？是什么样的物理过程导致了这次低温事件的形成？本文将试图对这一问题进行分析。

北半球环状模 (NAM) 是由 Thompson and Wallace (1998, 2000) 首次通过经验正交函数分解 (EOF) 提出，其主要特征是北半球中纬度和高纬度海平面气压呈现出带状的反位相变化。NAM 是北半球中高纬度大气环流的最主要变率，其对北半球环流变率的解释方差可以达到  $20\% \sim 30\%$ 。

Thompson and Wallace (1998, 2000) 用 EOF 方法提出 NAM，而 EOF 本身存在缺陷且物理意义不明晰 (Ambaum et al., 2001; Dommenges and Latif, 2002)，因此无法解释 NAM 的物理本质。Lorenz (1951) 指出了经向的气压变化是由于大气质量在不同纬度带的交换造成的。最近 Li

and Wang (2003) 及李建平 (2005a) 提出了大气环状活动带的新概念 (大气活动具有纬向带状分布的特点), 并将费雷尔环流的异常变化与 NAM 联系起来, 指出了异常的费雷尔环流会在不同纬度带之间输送质量和热量, 最终阐述了费雷尔环流在 NAM 活动中扮演着重要角色, 解释了 NAM 的物理本质。不过, 他们在文中并没有用实际资料计算质量或热量的输送, 本文将在热量输送方面对其进行补充。

NAM 对北半球气候的影响受到了国内外学者的关注。最近的研究表明, 冬季 NAM 活动与北美大陆和欧亚大陆的气温和降水都有显著的联系 (Thompson et al., 2000; Thompson and Wallace, 2001; 李建平, 2005a, 2005b)。冬季 NAM 会对同期中国地区的气温和降水产生影响 (Gong et al., 2001; 龚道溢和王绍武, 2003; 何春和何金海, 2003; 龚道溢等, 2004; 杨辉和李崇银, 2008), 并且会影响后春西北地区的沙尘暴活动 (Ding et al., 2005)。很多研究揭示了 NAM 影响区域气候的内在机理 (Gong et al., 2001; 陈文和康丽华, 2006; Liu and Ding, 2007)。鉴于有关 NAM 影响北半球区域气候的研究较多, 而关于 NAM 影响北半球行星尺度气候的研究较少, 因此有必要在更大的空间尺度上探讨 NAM 对北半球气候的影响及其机理。

最近所玲玲等 (2009) 通过干空气的温度方程分析了水平风场对温度平流作用, 解释了 NAM 活动对对流层中下层温度异常影响的机理, 但是 NAM 活动与温度平流之间的物理联系还不清楚。本文将结合 NAM 的物理本质 (费雷尔环流异常) 和经向温度平流, 从 09/10 年北半球冬季异常低温个例分析及多年资料诊断入手, 深入地解释 NAM 影响北半球地面气温的物理机制。

## 2 资料和指数

本文所使用的资料是美国国家环境预测中心/国家海洋大气管理局 (NCEP/NOAA) 月平均再分析资料 (Kalnay et al., 1996)。高层资料包括温度、位势高度、水平风场和垂直速度, 前 3 个物理量场在垂直方向上从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层, 而垂直速度资料从 1000 hPa 到 100 hPa 共

12 层; 地面资料包括地面温度、海平面气压和地面水平风场。资料的水平分辨率均为  $2.5^\circ$  (纬度)  $\times 2.5^\circ$  (经度), 时段从 1948 年 1 月至 2010 年 2 月, 气候平均的基准时段取为 1958~2000 年。冬季 (DJF) 为 12 月至次年 2 月。

Angell (2006) 指出 Li and Wang (2003) 提出的新的 NAM 指数 (NAMI) 相比旧指数 (Thompson and Wallace, 1998, 2000) 能够更好的反映 NAM 的环状空间特征, 并且计算简单方便, 物理意义清晰。因此, 本文使用 Li and Wang (2003) 的 NAMI, 定义如下:

$$NAMI = \hat{P}_{35^\circ N} - \hat{P}_{65^\circ N},$$

其中,  $\hat{P}_{35^\circ N}$  和  $\hat{P}_{65^\circ N}$  分别代表  $35^\circ N$  和  $65^\circ N$  标准化的纬向平均海平面气压。这里冬季 NAMI 的时段为 1873/1874~2009/2010 年。

## 3 09/10 年冬季北半球地面气温和环流背景场的异常特征

图 1 给出了北半球冬季地面气温、海平面气压和地表水平风场的气候平均分布以及 09/10 年冬季的异常空间分布。由图 1a 所示的气候平均场可见, 地面气温从低纬向高纬变冷, 但由于海陆热力性质的不同, 在同纬度上海洋面的温度高于陆地面的温度; 在高纬度, 北大西洋与冰岛和北太平洋上分别存在两个低压中心, 对应于冰岛低压和阿留申低压, 欧亚大陆存在一个高压中心, 即西伯利亚高压, 在副热带存在半永久性的高压带, 即副热带高压; 地表水平风场表现为在低压区的气旋性环流和在高压区的反气旋环流。从图 1b 可见, 09/10 年北半球冬季大气的异常特征表现为: 地面气温异常呈现出类似于带状的分布特征, 即  $0^\circ \sim 35^\circ N$  (低纬度) 为弱的正异常,  $40^\circ N \sim 60^\circ N$  (中纬度) 呈现负异常, 而高纬度极区呈现出正异常。在中纬度负异常带中, 最大的降温区在欧亚大陆, 其中局部的降温超过了一  $4^\circ C$ , 另一个降温中心在美国东部, 最大降温在一  $2^\circ C$  以下; 海平面气压在中纬度表现为低压异常, 北太平洋和北大西洋分别出现了两个异常的负中心, 而在高纬度出现了纬向均匀分布的高压异常; 地表水平风场表现为中高纬为东风异常, 最大值出

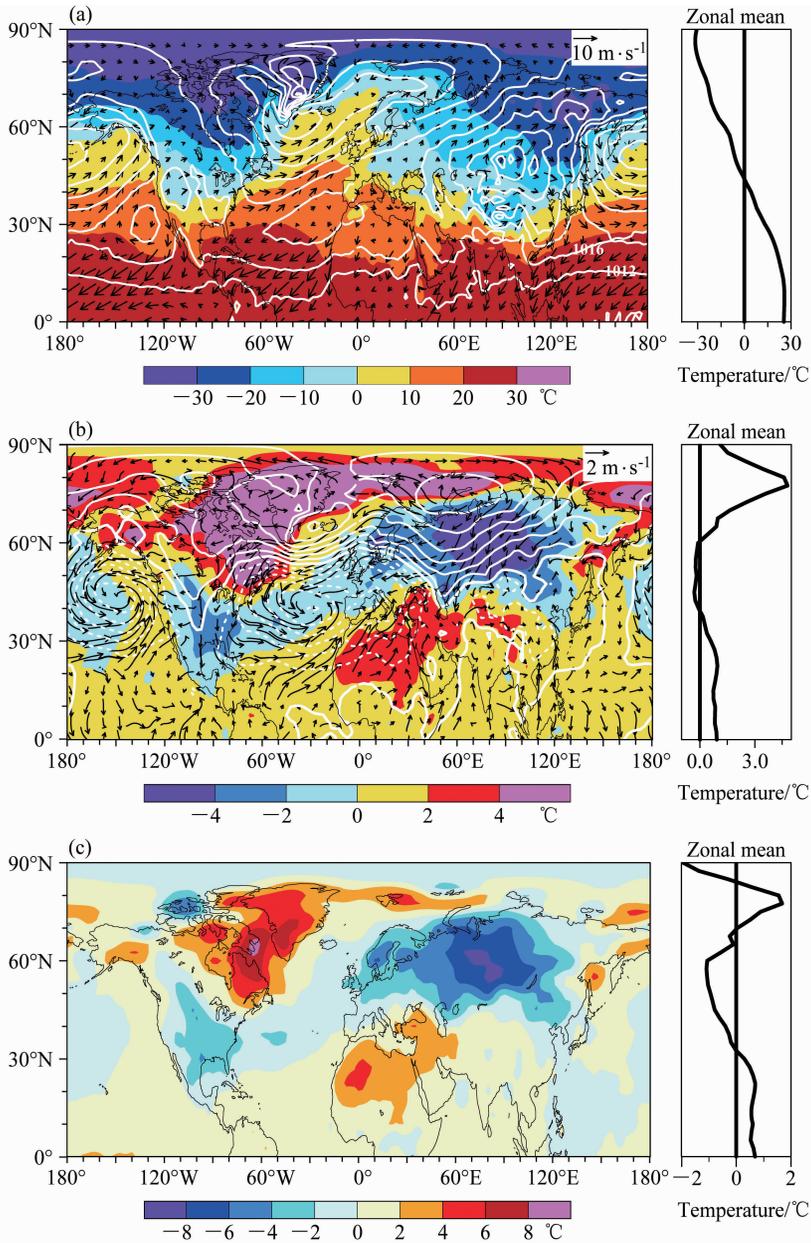


图1 (a) 北半球冬季气候平均 (1958/1959~2000/2001 年) 和 (b) 2009/2010 年冬季异常的地表气温 (彩色阴影)、海平面气压 (等值线, 单位: hPa) 和地表风场 (矢量箭头) 分布 (左), 以及地表气温的纬向平均廓线分布 (右); (c) 2009/2010 年冬季相对于 1994/1995~2008/2009 年冬季平均的地面气温变化 (左) 及其纬向平均廓线分布 (右)。(a) 等值线间隔为 4 hPa, (b) 等值线间隔为 2 hPa, 实 (虚) 线代表正 (负) 异常

Fig.1 (a) The horizontal distribution (left) of climatological (1958/1959 - 2000/2001) surface air temperature (color shadings), sea level pressure (contours, units: hPa), and surface winds (vectors) in winter season, and zonal mean profile of surface air temperature (right); (b) same as (a), but for the anomalies in 2009/2010 winter season; (c) surface air temperature differences between 2009/2010 winter and the average of last 15 years (1994/1995 - 2008/2009) (left), and zonal mean profile (right). In (a), isolines are drawn for every 4 hPa; in (b), isolines are drawn for every 2 hPa, and solid (dashed) lines stand for positive (negative) anomalies

现在 50°N~60°N 之间, 而欧亚大陆和北美大陆东海岸出现了强的北风异常。从图 1b 中的异常地面气温纬向平均廓线分布可知, 09/10 年地面温度冬季表现为低纬度正异常、中纬度负异常及高纬

度正异常的“正负正”的分布特点。从图 1c 可见, 09/10 年冬季中纬度平均地面气温相比过去 15 年冬季的平均值下降了近 1 °C, 欧亚大陆的局部地区降温超过了一 8 °C。以上分析表明, 09/10

年北半球冬季中纬度异常偏冷, 下面将着重对这一负异常形成的原因进行讨论。

为了分析 09/10 年冬季对流层高低层环流特征, 图 2 给出了 09/10 年冬季 200、500 和 850 hPa 上位势高度场、风场的异常分布。在 200 hPa 上, 位势高度场在高纬 (55°N 以北) 出现了正的高度异常带, 在格陵兰岛附近出现了正的异常中心, 中纬度存在多个负异常中心并且也呈现出带

状的分布特征; 45°N 以北中高纬是东风异常带, 最大东风异常出现在 55°N 附近, 45°N 以南中低纬是西风异常带, 最大西风异常出现在 30°N 附近。在 500 hPa 和 850 hPa 上呈现与 200 hPa 上类似的特征, 即中纬度是低压异常带, 高纬度是高压异常带, 45°N 以南和以北分别是西风异常和东风异常带。总体看来, 09/10 年冬季位势高度场和风场异常表现为从下至上的相当正压结构, 高

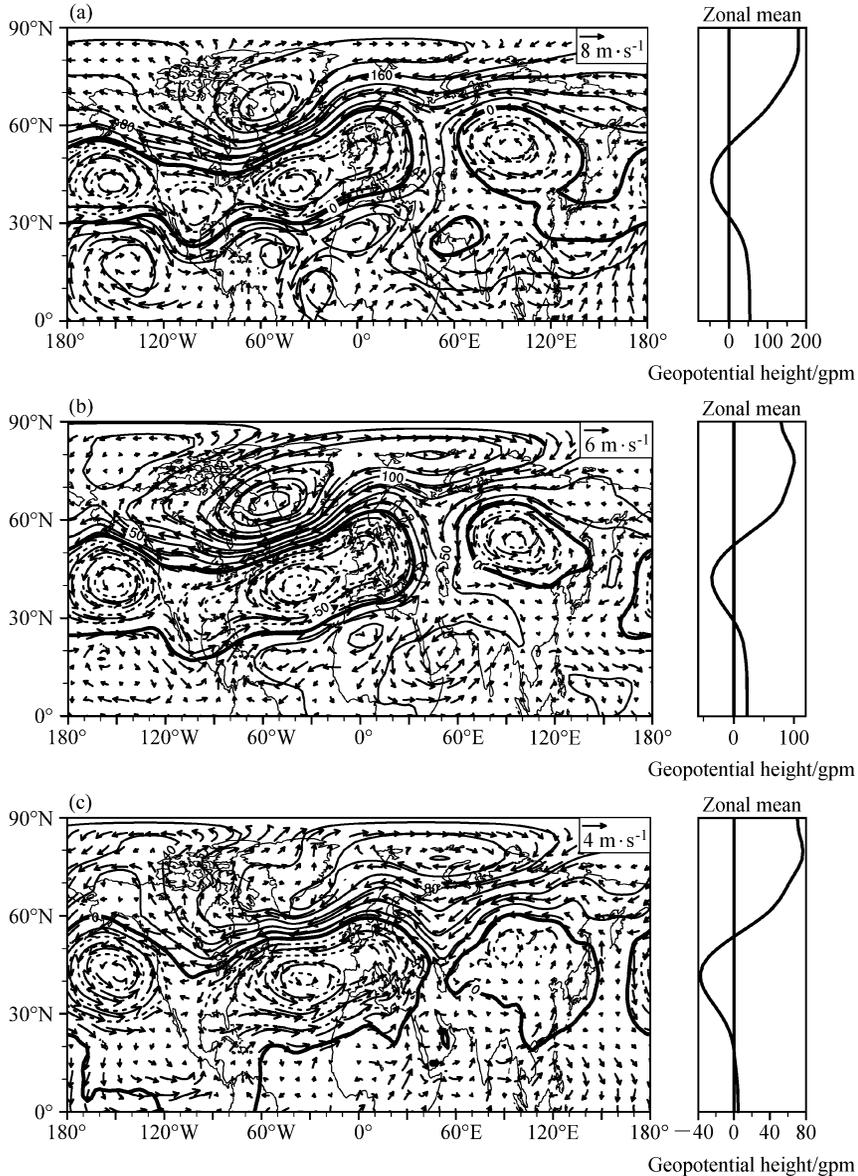


图 2 09/10 年冬季北半球位势高度场异常 (等值线, 单位: gpm) 和风场异常 (矢量箭头) 分布: (a) 200 hPa, 等值线间隔 40 gpm; (b) 500 hPa, 等值线间隔 25 gpm; (c) 850 hPa, 等值线间隔 16 gpm。粗实线为零线, 实 (虚) 线代表正 (负) 异常  
Fig. 2 (a) 2009/2010 winter geopotential height anomalies (contours, units: gpm) and winds anomaly (vectors) in the Northern Hemisphere; (a) 200 hPa, isolines are drawn for every 40 gpm; (b) 500 hPa, isolines are drawn for every 25 gpm; (c) 850 hPa, isolines are drawn for every 16 gpm. Thick solid lines indicate zero lines, and solid (dashed) lines stand for positive (negative) anomalies

纬度与中纬度呈现相反的异常变化，高纬为正的高度异常而中纬度为负的高度异常，55°N 附近出现异常的东风，维持了地转平衡的关系。高纬度极区反气旋式环流以下沉运动为主，而中纬度气旋式环流伴随着上升运动，因此，高纬度和中纬度相反的异常环流形势与图 1b 中地面气温的正负异常在空间位置存在一定的对应关系。

图 3 给出了北半球冬季气候平均的温度和经圈环流的纬向平均分布及 09/10 年冬季对应的异常场分布。09/10 年冬季纬向平均温度在中纬度的特征表现为近地层 (925 hPa 以下) 以及中上层

(500 hPa 以上) 为负异常结构；而在低纬和高纬则出现上下一致的正异常，极区的暖异常尤其显著。经圈环流方面，中纬度地表附近出现异常的北风，异常值大约在一  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，60°N 附近异常北风超过了一  $1.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。而在低纬出现异常南风，两者在 40°N 附近产生辐合形成异常的上升运动，进而中纬度表现出一个减弱的费雷尔环流。高纬度和低纬度出现的异常下沉运动对应了对流层大气的异常升温而中纬度出现的异常上升运动对应了对流层大气的异常冷却。

图 4 分别给出了北半球冬季气候平均的位势

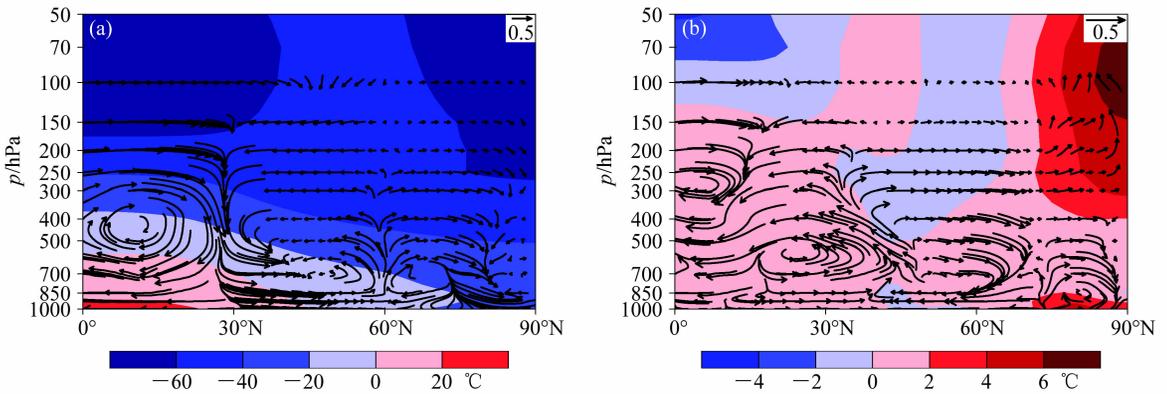


图 3 (a) 冬季气候平均和 (b) 09/10 年冬季的异常的气温 (彩色阴影) 和经圈环流 (矢量箭头, 经向风单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 垂直速度单位:  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的纬向平均分布

Fig. 3 (a) Zonal mean distribution of climatological temperature (color shadings) and meridional circulation (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$  for the meridional wind and  $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$  for the vertical velocity) in winter; (b) same as (a), but for the anomalies in 2009/2010 winter

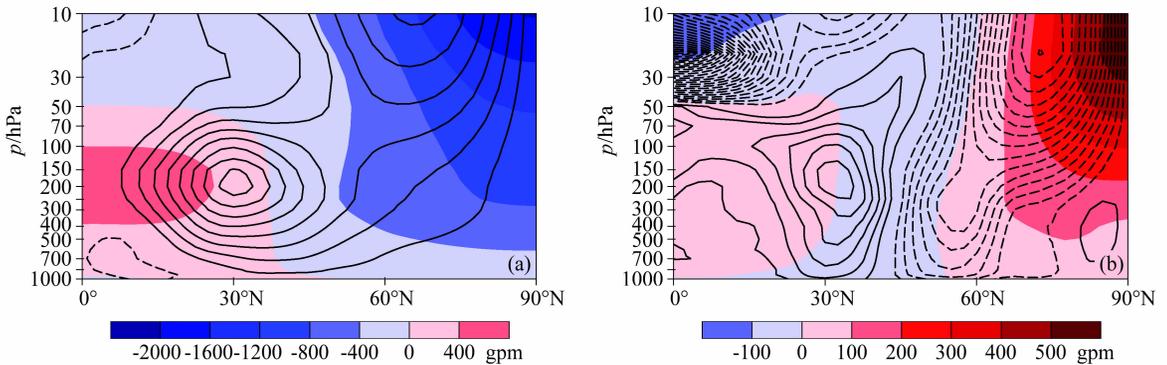


图 4 (a) 冬季气候平均和 (b) 09/10 年冬季的异常位势高度场 (彩色阴影) 和纬向风场 (等值线, 单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 的纬向平均分布。(a) 等值线间隔  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , (b) 等值线间隔  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , 实 (虚) 线代表正 (负) 异常。冬季气候平均的位势高度已减去相应等压面上标准大气的位势高度值, 标准大气的位势高度根据 1976 年美国标准大气得到

Fig. 4 (a) Zonal mean distribution of climatological geopotential height (color shadings) and zonal wind (contours, units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) in winter; (b) same as (a), but for the anomalies in 2009/2010 winter. In (a), isolines are drawn every  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; in (b), isolines are drawn every  $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , and solid (dashed) lines stand for positive (negative) anomalies. The geopotential height value based on the 1976 U. S. standard atmosphere is subtracted from the winter climatological mean geopotential height at each level

高度场和纬向风场的纬向平均分布和 09/10 年冬季对应的异常场分布。从图 4a 可见, 冬季气候平均的位势高度从赤道向极地逐渐减小, 纬向风场在副热带的对流层顶和极区平流层存在两股急流。09/10 年冬季的异常场(图 4b) 表现为: 位势高度场存在中纬度负异常而高纬度正异常的反位相变化结构, 并且异常场在垂直方向上有相当正压结构; 纬向风场方面, 副热带急流增强, 极地急流减弱, 并且在垂直方向上也存在相当正压的结构, 纬向风场和位势高度场的空间配置满足地转关系的约束。从图 3b 可见, 副热带温度异常的经向梯度在 200 hPa 附近出现了反转特征, 即 200 hPa 以下是负的经向温度梯度而 200 hPa 以上出现正的经向温度梯度; 极区的经向温度梯度始终为正值, 并随高度增加而增强。由热成风关系, 北半球正(负)的经向温度梯度对应于纬向风随高度减弱(增强), 因此, 在副热带 200 hPa 上存在纬向风正异常的中心, 而极区负的纬向风异常随高度增强。

综上所述, 09/10 年北半球冬季地面气温和环流异常的主要特点为: 气温在低纬度为正异常、中纬度负异常及高纬度正异常的“正负正”的分布特征, 最大降温区在欧亚大陆和美国东部, 其中局部的降温超过了一  $4^{\circ}\text{C}$ ; 海平面气压场呈现中纬度负异常, 高纬度正异常的带状分布结构; 位势高度场也存在类似于海平面气压场的异常结构; 费雷尔环流减弱; 副热带急流增强而极地急流减弱; 位势高度场和纬向风场的异常在垂直方向上存在相当正压结构。环流场的异常特征与 NAM 的负位相特征极为相似 (Thompson and

Wallace, 1998, 2000; Li and Wang, 2003)。图 5 给出了自 1873/1874 年以来逐年冬季的 NAMI, 可以看出 09/10 年冬季的 NAMI 为  $-5.38$ , 是自 1873/1874 年以来的最低值, 即 NAM 为显著的负位相。NAM 的极端负位相是否与北半球中纬度的异常低温存在内在的联系? 下面将就此进行讨论。

### 4 北半球地面气温异常和 NAM 的关系: 合成与相关分析

将冬季 NAMI 序列中数值大于 1 的定义为 NAM 正位相年, 小于  $-1$  的定义为 NAM 负位相年, 对应得到了 1948 年以来 19 个正位相年和 16 个负位相年。图 6 分别给出了正、负位相年地面气温异常的合成结果以及合成差的结果。从图 6a 和 6b 可见, 地面气温异常的空间结构在纬向上存在类似于带状的分布, 这种带状分布在中纬度最为明显, 并且在欧亚大陆和美国东部存在两个显著的中心区。当 NAM 为正(负)位相时, 北半球中纬度出现地面气温正(负)异常带, 在欧亚大陆局部地区的升(降)温超过  $2^{\circ}\text{C}$  ( $-2^{\circ}\text{C}$ ), 而在美国东部地区的升(降)温超过  $1^{\circ}\text{C}$  ( $-1^{\circ}\text{C}$ )。尽管地面气温异常的合成分析结果与其他学者的结果较为一致 (Thompson et al., 2000; Thompson and Wallace, 2001), 但他们的研究着重强调 NAM 对区域气候的影响, 而我们则强调地面气温异常对 NAM 活动存在半球尺度的响应。冬季 NAMI 与北半球地面气温异常的相关系数分布 (李建平 2005a, 2005b) 与合成差的结果 (图 6c) 在空间分布上较为一致, 表现为中纬度出现

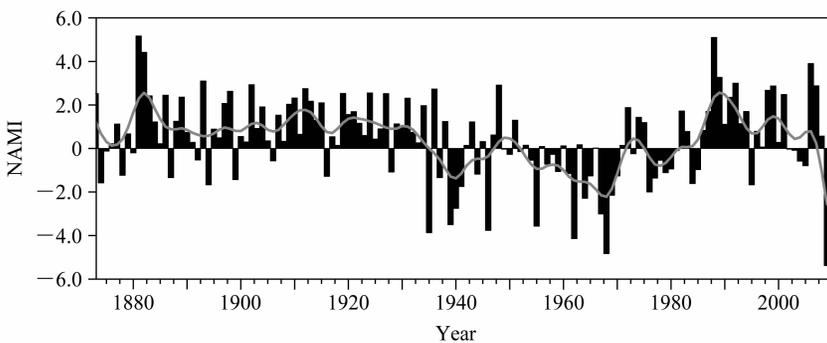


图 5 冬季 NAMI 的时间序列 (1873/1874~2009/2010 年)。图中粗实线是 9 年高斯滤波曲线  
Fig. 5 NAMI in winter season (1873/1874 - 2009/2010). The thick solid line indicates 9-year Gaussian-type filtered values

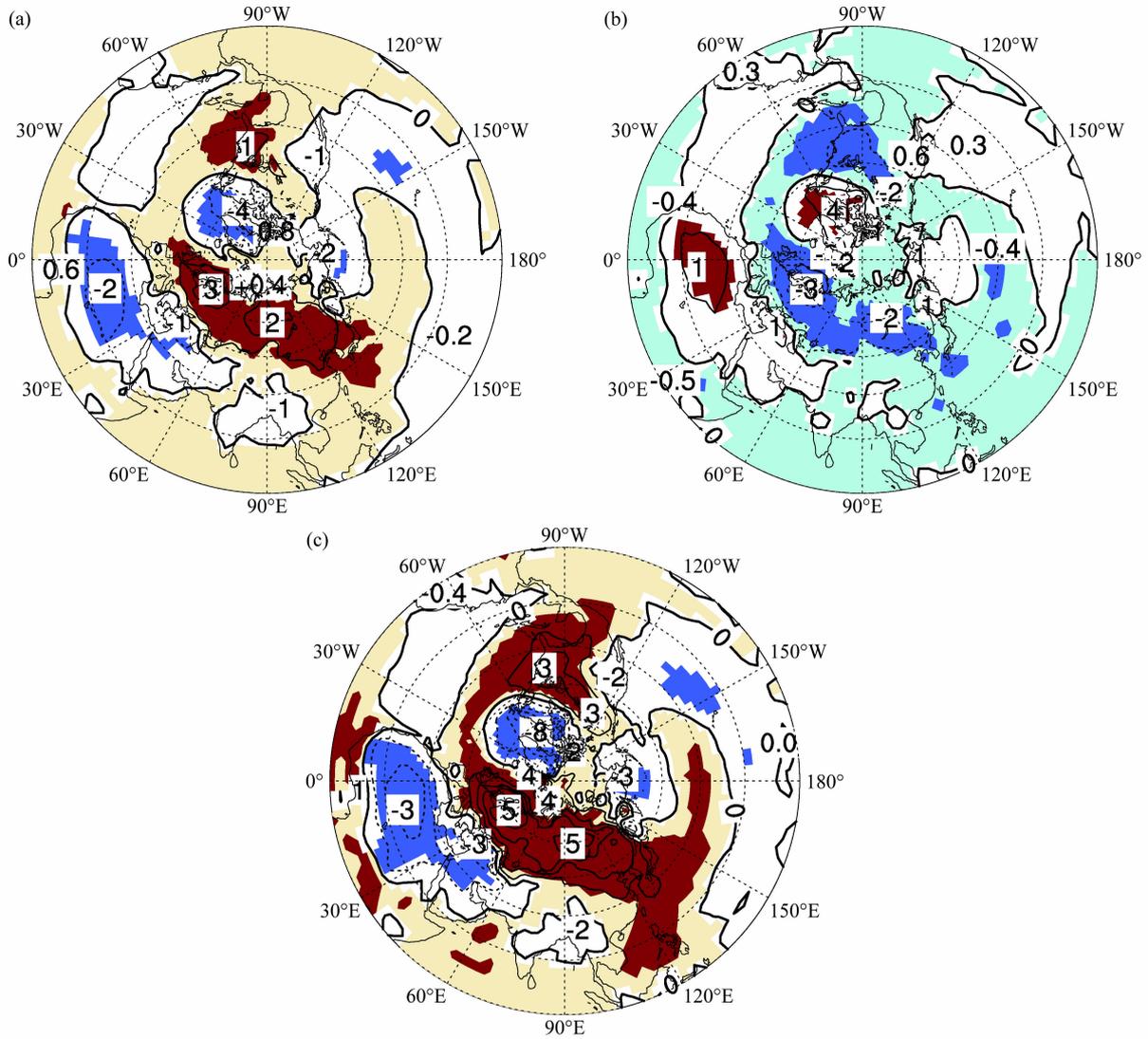


图6 冬季 NAM (a) 正位相年、(b) 负位相年和 (c) 正负位相年之差的北半球同期地面气温异常 (等值线, 单位: °C) 合成的空间分布。实线为正异常, 虚线为负异常, 粗实线为零线。深红 (蓝) 色阴影为正 (负) 合成值通过 95% 置信度的区域, 浅红 (蓝) 色阴影代表正 (负) 合成值未作显著性检验的结果

Fig. 6 Composite surface air temperature anomalies (contour, units: °C) in winter in the Northern Hemisphere; (a) Years of NAM in positive phase; (b) years of NAM in negative phase; (c) differences between years of NAM in positive phase and years of NAM in negative phase. Solid and dashed lines indicate the positive and negative anomalies, and thick solid lines indicate zero lines. Dark red (blue) shadings denote regions of positive (negative) composite values above 95% confidence level, and light red (blue) shadings denote regions of positive (negative) composite values without significance test

正相关带, 高纬和低纬是负相关带, 并且通过显著性检验的区域也是较为相似的。因此, 合成分析和相关分析的结果均表明, NAM 与北半球冬季的地面气温异常有内在的联系, 并且这种联系在中纬度带是最显著的。NAM 负位相年的合成结果与 09/10 年冬季北半球地面气温异常的空间分布特征是一致的, 但是 09/10 年冬季欧亚大陆和美

国东部的降温幅度均超过了 16 个 NAM 负位相年的合成结果, 说明了 09/10 年冬季 NAM 极端负位相的影响。

图 7 和图 8 分别是冬季 NAM 正负位相年北半球 500 hPa 水平环流及纬向平均的垂直环流对应的异常空间分布。从图 7 可见, 当 NAM 处于正位相时, 在北半球高纬度极区, 500 hPa 位势高

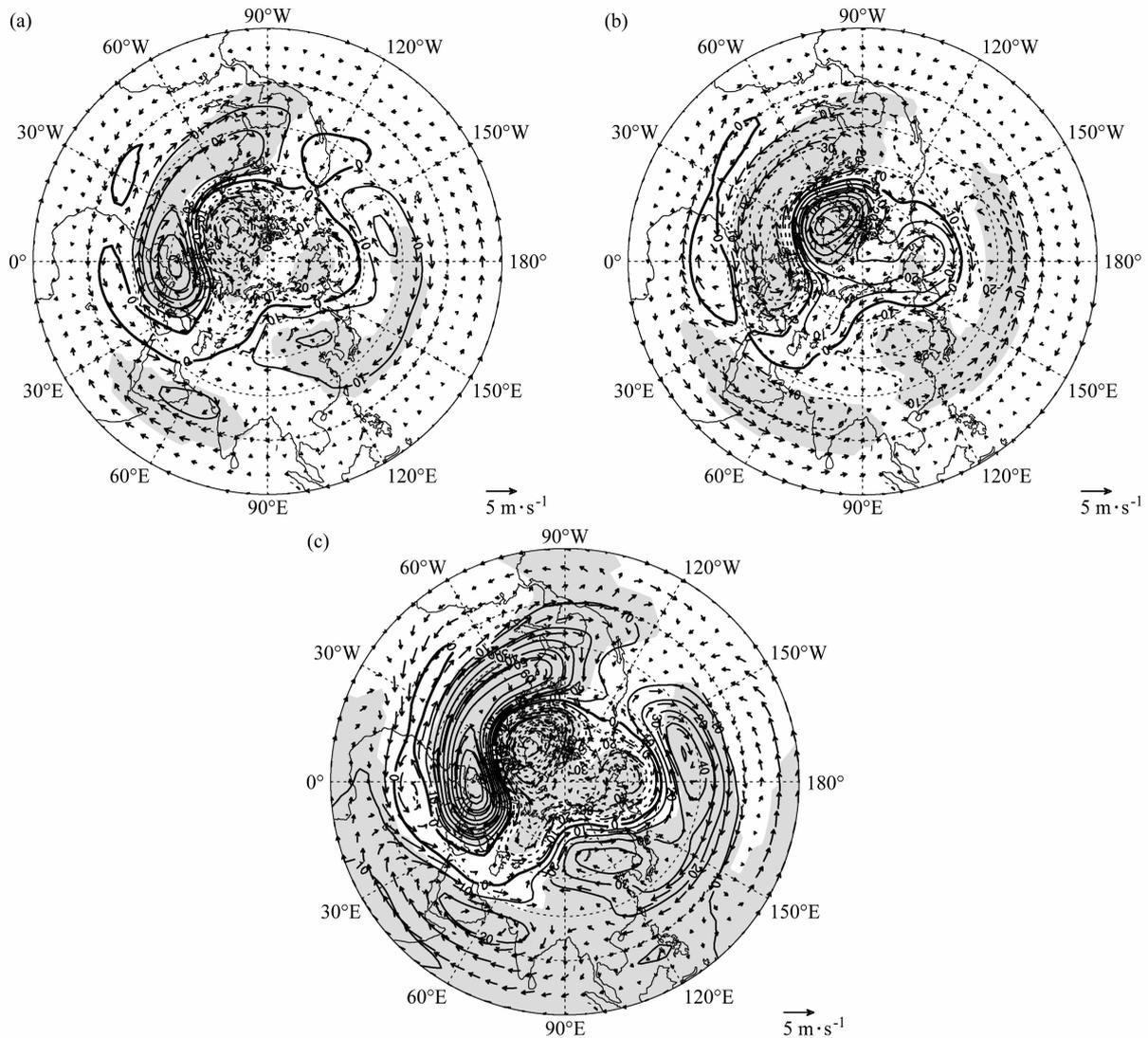


图 7 冬季 NAM (a) 正位相年、(b) 负位相年和 (c) 正负位相年之差的北半球同期 500 hPa 位势高度场异常 (等值线, 单位: gpm) 和风场异常 (矢量箭头) 合成的空间分布。等值线间隔 10 gpm, 实线为正异常, 虚线为负异常, 粗实线为零线, 阴影为通过 95% 置信度的区域

Fig. 7 Composite 500-hPa geopotential height anomalies (contour, units: gpm) and wind anomalies (vector) at 500 hPa in winter in the Northern Hemisphere: (a) Years of NAM in positive phase; (b) years of NAM in negative phase; (c) differences between years of NAM in positive phase and years of NAM in negative phase. Isolines are drawn every 10 gpm, solid and dashed lines indicate the positive and negative anomalies, thick solid lines indicate zero lines. Shadings denote regions above 95% confidence level

度场呈现出沿纬圈一致的负异常, 异常值接近  $-60$  gpm, 伴随着气旋式水平环流控制着极区; 与此同时, 中纬度地区出现沿纬圈一致的正异常, 异常值在 20 gpm 左右, 水平环流呈现出反气旋式的异常。位势高度南北向的异常变化与纬向风异常满足地转关系, 因此,  $45^{\circ}\text{N}$  以南出现东风异常, 异常中心在  $30^{\circ}\text{N}$  附近, 局部地区纬向风异常接近  $-4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;  $45^{\circ}\text{N}$  以北出现西风异常, 异常

中心在  $55^{\circ}\text{N}$  附近, 局部的纬向风异常超过  $5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ; NAM 负位相年的情形与之相反。冬季 NAM 正负位相年 200 hPa 和 850 hPa 上的水平环流异常分布特征 (图略) 与 500 hPa 上的相类似, 表明 NAM 异常时大气环流的异常在垂直方向是相当正压的。气旋 (反气旋) 式水平环流伴随着上升 (下沉) 运动, 从图 8 可见, 当 NAM 处于正位相时, 北半球中低纬度对流层大气出现异常

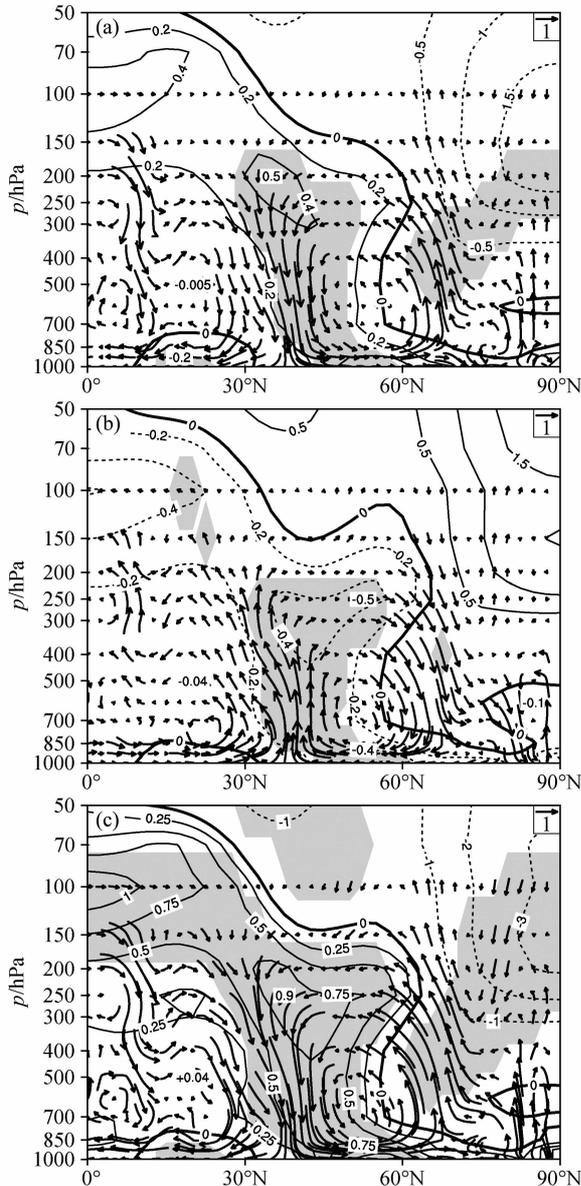


图8 冬季NAM (a) 正位相年、(b) 负位相年和 (c) 正负位相年之差的北半球同期大气温度异常(等值线, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )和经圈环流异常(矢量箭头, 经向风单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 垂直速度单位:  $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$ )的合成的纬向平均分布。实线为正异常, 虚线为负异常, 粗实线为零线, 阴影为通过95%置信度的区域  
Fig. 8 Composite zonal mean air temperature anomalies (contour, units:  $^{\circ}\text{C}$ ) and meridional circulation anomalies (vector) in winter in the Northern Hemisphere: (a) Years of NAM in positive phase; (b) years of NAM in negative phase; (c) differences between years of NAM in positive phase and years of NAM in negative phase. Isolines are drawn every 10 gpm, solid and dashed lines indicate the positive and negative anomalies, thick solid lines indicate zero lines. Shadings denote regions above 95% confidence level

的下沉运动, 高纬度和低纬度主要被上升气流所控制, 因此, 在中纬度表现为费雷尔环流增强, 与此同时, 中纬度对流层大气温度的异常升高, 异常温度达到  $0.5^{\circ}\text{C}$ , 而高纬度对流层大气温度的异常冷却, 在极区, 对流层顶的温度异常接近  $-1^{\circ}\text{C}$ ; NAM 负位相年的情形与之相反。图 8c 中纬向平均温度与经圈环流在 NAM 正负位相年的合成差结果与 Li and Wang (2003) 的结果是一致的。NAM 与对流层大气温度的对应关系与地面气温相同, 都表现为在中纬度显著性最强。

## 5 NAM 影响北半球地面气温的物理机制

上面的分析表明 NAM 与北半球地面气温异常有很好的对应关系, 那么 NAM 影响北半球地面气温的物理机制是怎样的? 下面从大气温度的控制方程出发来讨论这个问题。球面  $z$  坐标系下干空气的温度方程写为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \phi} + w \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{\rho_p} \frac{dp}{dt} = \frac{1}{c_p} \dot{Q}, \quad (1)$$

其中,  $T$  代表气温,  $u$ 、 $v$  和  $w$  分别代表纬向风、经向风和垂直速度,  $\lambda$ 、 $\phi$  和  $z$  分别代表经度、纬度和高度,  $\rho$  代表大气密度,  $c_p$  是大气定压比热 ( $1004 \text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ),  $p$  代表气压,  $\dot{Q}$  代表大气非绝热加热率,  $a$  代表地球半径。不考虑非绝热加热的影响, 并且对于中纬度大尺度运动有:

$$\frac{dp}{dt} \approx w \frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g w.$$

因此, (1) 式改写为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \phi} \frac{\partial T}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \phi} + w(\gamma_d - \gamma) = 0, \quad (2)$$

式中  $\gamma_d = g/c_p$ ,  $\gamma = \partial T / \partial z$ 。对 (2) 式进行量纲分析, 有:

$$u, v \sim U, a \sim L, z \sim H, t \sim L/U, T \sim T, \\ (\gamma_d - \gamma) \sim T/H, w \sim W,$$

其中  $U$ 、 $L$ 、 $H$ 、 $T$ 、 $W$  分别表示量级。对于大尺度运动有:

$$\frac{W}{H} \sim 10^{-6} \ll \frac{U}{L} \sim 10^{-5}.$$

因此, 大尺度大气温度的变化主要受水平风场对温度的平流作用控制。水平温度平流项是一个非

线性项, 分析时可以简化为线性项, 任意时刻的变量  $V$  可以分解为:

$$V = \bar{V} + V',$$

其中, 长横线上标代表长时间的气候平均值, “'”代表扰动 (异常)。地面气温的异常变化受到异常的水平温度平流作用, 因此:

$$\left(\frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial T}{\partial \lambda}\right)' = \frac{u'}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \lambda} + \frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial T'}{\partial \lambda} + \frac{u'}{a \cos \varphi} \frac{\partial T'}{\partial \lambda} - \frac{\bar{u}}{a \cos \varphi} \frac{\partial T'}{\partial \lambda},$$

$$\left(\frac{v}{a} \frac{\partial T}{\partial \varphi}\right)' = \frac{v'}{a} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varphi} + \frac{\bar{v}}{a} \frac{\partial T'}{\partial \varphi} + \frac{v'}{a} \frac{\partial T'}{\partial \varphi} - \frac{\bar{v}}{a} \frac{\partial T'}{\partial \varphi}.$$

由热力学变量的性质:

$$\frac{T'}{\bar{T}} \sim 10^{-2} \ll \frac{U'}{\bar{U}} \sim 10^{-1} \ll 1.$$

在此基础上得到影响地面气温异常的变化的水平温度平流项可以简化为:

$$-\frac{u'}{a \cos \varphi} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \lambda} - \frac{v'}{a} \frac{\partial \bar{T}}{\partial \varphi}.$$

所玲玲等 (2009) 计算了由水平风场异常和温度场异常共同带来的温度异常变化, 其量级要比上式导致的温度变化小一个量级, 因此, 对水平温度平流项做如上的简化是合理的。由于气候平均的地面气温随经度的变化较小, 因此, 水平温度平流作用以经向温度平流为主。进而纬向平均的气温异常方程可以写为:

$$\frac{\partial [T]'}{\partial t} = -\frac{[v]'}{a} \frac{\partial [T]'}{\partial \varphi}, \quad (3)$$

其中“[]”表示纬向平均。因此, 在不考虑非绝热加热的作用下, 大尺度温度的局地变化主要取决于经向风异常导致的经向温度平流作用。

利用实际资料计算了 09/10 年冬季异常的经向温度平流的水平和纬向平均分布。从图 9 可见, 09/10 年冬季地表经向温度平流异常的分布特征与地面气温异常分布特征有较好的吻合, 均呈现出带状的分布结构, 表现为在低纬度是正异常, 中纬度负异常和高纬度正异常的“正负正”分布特征。经向温度平流异常分布与地面气温异常分布的一致性说明, 09/10 年冬季中纬度地面气温的负异常主要是由经向温度平流的负异常造成的。

利用 NAMI 对多年冬季北半球纬向平均的经向风、经向温度平流和地面气温异常进行了合成 (图 10) 和相关 (图 11) 分析。从图 10a 可见, 当 NAM 处于正 (负) 位相时, 北半球中纬度地表会出现异常的南 (北) 风, 局部地区异常值超过  $0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $-0.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )。NAM 最主要的特征是北半球海平面气压的南北反位相变化, 因此, 当 NAM 是正位相时, 海平面气压呈现中纬度异常高压而高纬度异常低压的“南高北低”的异常特征, 中纬度气压梯度力为正, 在此作用下, 地表出现异常的南风; 反之亦然。经向风异常对应于异常经向温度平流, 当 NAM 是正 (负) 位相时, 北半球中纬度地表经向温度平流出现正 (负)

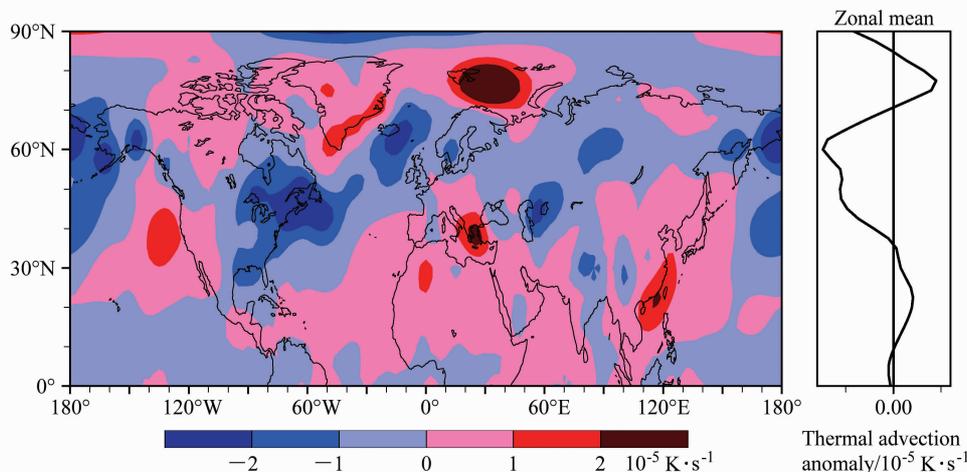


图 9 09/10 年冬季经向温度平流异常的水平分布 (左) 及其纬向平均分布 (右)

Fig. 9 Horizontal distribution (left) and zonal mean distribution (right) of meridional surface air temperature advection anomalies in 2009/2010 winter

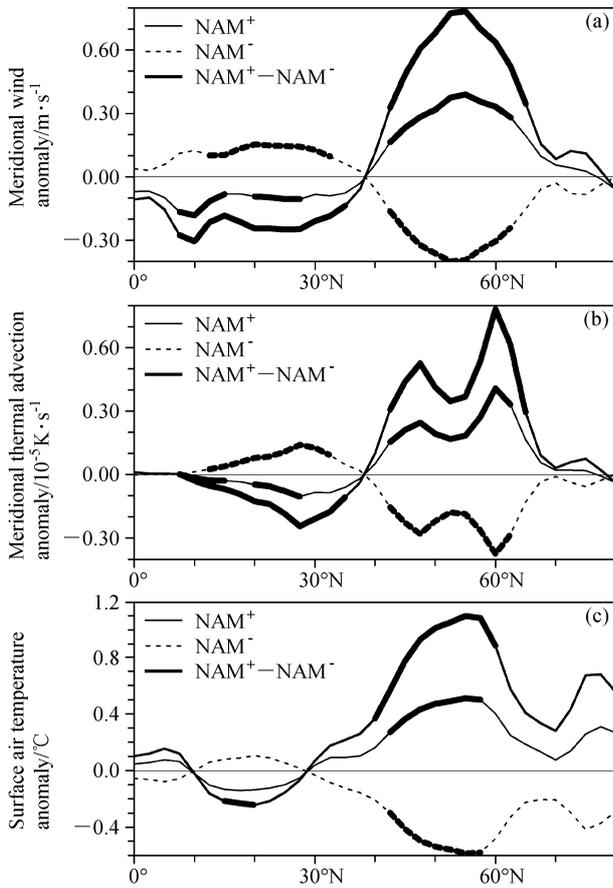


图 10 NAM 正位相年 (NAM<sup>+</sup>)、负位相年 (NAM<sup>-</sup>) 及正负位相年之差 (NAM<sup>+</sup> - NAM<sup>-</sup>) 的 (a) 地表经向风异常、(b) 地表经向温度平流异常和 (c) 地面气温异常合成的纬向平均分布。曲线上的加粗部分为通过 95% 置信度的区域

Fig. 10 Composite (a) zonal mean surface meridional wind anomalies, (b) meridional temperature advection anomalies, and (c) surface air temperature anomalies for years of NAM in positive phase (NAM<sup>+</sup>), in negative phase (NAM<sup>-</sup>), and their differences (NAM<sup>+</sup> - NAM<sup>-</sup>). Shadings denote regions above 95% confidence level

异常 (图 11b), 异常值接近  $0.3 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $-0.3 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ ), 因此, 北半球中纬度地面气温会异常升高 (冷却) (图 11c), 地面气温的异常值接近  $0.4 \text{ K}$  ( $-0.4 \text{ K}$ )。图 11 是上述 3 个物理量与 NAMI 的相关系数分布。由图可知, 经向风异常与 NAMI 的相关最好, 在北半球中纬度存在较大的正相关, 局部相关系数接近于 0.9, 在低纬度地区 ( $10^{\circ}\text{N} \sim 35^{\circ}\text{N}$ ) 是负相关, 局部相关系数达到  $-0.6$ ; 经向温度平流与 NAMI 的相关分布与经向风的较为类似, 但是在低纬度负相关

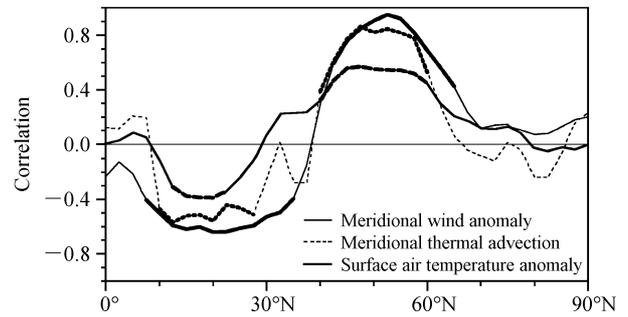


图 11 冬季 NAMI 与同期纬向平均的经向风异常 (细实线)、经向温度平流异常 (细虚线) 和地面气温异常 (粗实线) 的相关系数分布。曲线上的加粗部分为通过 95% 置信度的区域

Fig. 11 Correlation between NAMI and zonal mean meridional wind anomalies (solid line), meridional surface air temperature advection anomalies (dashed line), and surface air temperature anomalies (thick solid line). Shadings denote regions above 95% confidence level

的显著区域较小; 地面气温异常与 NAMI 在低纬度地区的相关不如中纬度地区好, 显著相关的区域很小, 表明, 经向温度平流的作用下中纬度与低纬度之间热量的传输对于低纬度的地面气温影响较小, 而对于中纬度的地面气温影响较大, 因此, 中纬度地区存在显著的相关, 局部超过了 0.5。上述合成分析与相关分析的结果表明, NAM 通过控制中纬度地区地表经向风和经向温度平流异常变化, 影响中纬度地区地面气温。

NAM 对北半球中纬度地面气温的影响反映了自然变率对地面气温的调控作用。利用 NAMI 与北半球中纬度地面气温异常的关系建立回归模型可以考察自然变率作用。图 12 是 1948/1949 ~ 2009/2010 年冬季北半球中纬度区域 ( $40^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$ ) 平均的地面气温异常、NAMI 指数和地表经向温度平流异常的序列图。从图 12 可见, 1948/1949 ~ 1968/1969 年, 地面温度出现下降的趋势, 在 1968/1969 年冬季出现极端的负值, 与此同时, 经向温度平流与 NAMI 也呈现出减弱的趋势, 1968/1969 年之后, 地面气温一直处于上升的趋势, 经向温度平流异常和 NAMI 也由负位相转为正位相, 但是在 1988/1989 年之后两者出现下降趋势, 表明地面气温与 NAMI 的关系发生了变化。经向温度平流异常与 NAMI 的年际尺度的相关系数达到 0.9, 而 NAMI 与地面温度异常的年际尺度相关系数为 0.56, 两者在年代际尺度上相

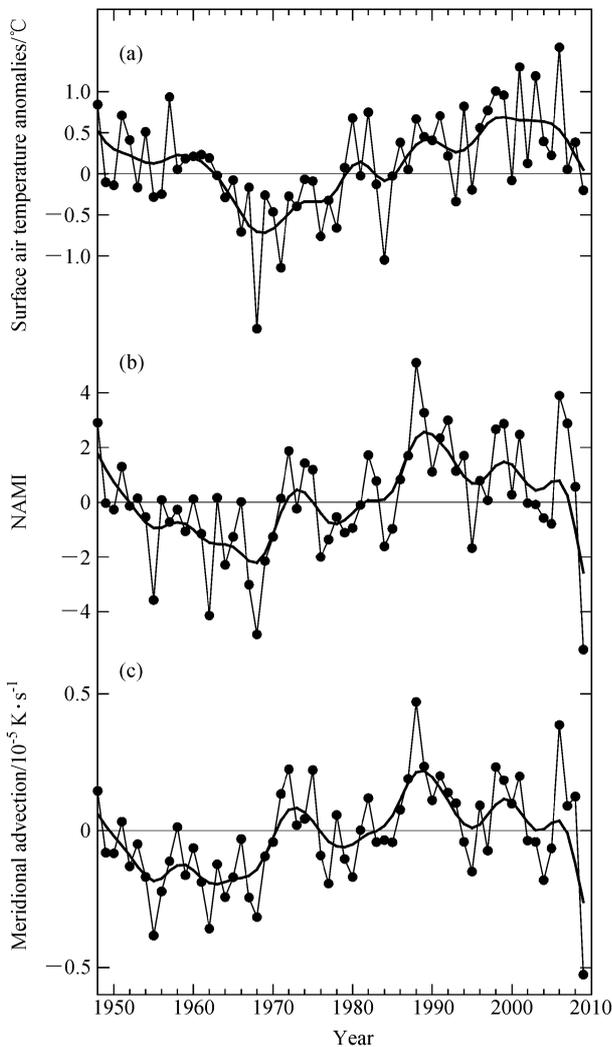


图 12 北半球中纬度冬季 (40°N~60°N) (a) 地面气温异常、(b) NAMI 和 (c) 经向温度平流异常的时间序列 (1948/1949~2009/2010 年)。图中粗实线是 9 年高斯滤波曲线

Fig. 12 (a) Surface air temperature anomalies in mid-latitude in Northern Hemisphere, (b) NAMI, and (c) meridional surface air temperature advection for 1948/1949 - 2009/2010. The solid line indicates 9-year Gaussian-type filtered values

关系数达到 0.64。利用线性回归方法可建立中纬度地面气温与 NAM 的如下模型：

$$SAT_a = 0.16 \times NAMI + 0.11,$$

其中,  $SAT_a$  代表北半球中纬度 (40°N~60°N) 平均地面气温异常。将 09/10 年冬季的 NAMI 代入上述回归方程, 得到的地面气温异常值为  $-0.7\text{ }^\circ\text{C}$ , 比实际的  $-0.2\text{ }^\circ\text{C}$  小, 说明地面气温的异常还受到其他因素的影响, 比如由大气中温室气体含量增加引起的辐射强迫增强。

## 6 结论与讨论

本文从 09/10 年北半球冬季异常低温个例入手, 分析了 09/10 年北半球冬季地面气温异常特征及对应的水平与垂直环流场的异常结构, 并且进一步分析了北半球大气温度及环流异常与 NAM 的关系, 最终结合 NAM 的物理本质, 解释了 NAM 影响北半球地面气温的物理机制。主要结论如下:

09/10 年北半球冬季地面气温、海平面气压和位势高度场异常都呈现出带状的分布特征, 表现为中纬度负异常而高纬度正异常的南北反相的异常变化。中纬度地面气温相比过去 15 年冬季的平均气温降温达到  $-1\text{ }^\circ\text{C}$ , 并且欧亚大陆和美国东部的降温最为明显, 最大降温超过了一  $-8\text{ }^\circ\text{C}$ ; 与此同时, 中纬度被气旋式环流异常控制而高纬度被反气旋式环流异常控制, 水平环流场在垂直方向上存在相当正压结构; 经圈环流表现为减弱的费雷尔环流, 中纬度出现异常上升运动而高纬度和低纬度出现异常下沉运动, 北半球对流层大气在中纬度出现负的温度异常而在高纬度和低纬度出现正的温度异常, 副热带急流异常增强, 而极地急流异常减弱。

NAM 作为冬季北半球中高纬大气活动的最主要模态, 与北半球地面气温和大气环流异常存在显著的关联。当 NAM 处于正位相时, 北半球中纬度地面气温及对流层大气温度均出现正异常, 与此同时, 费雷尔环流增强, 中纬度带和高纬度带之间大气质量发生交换, 海平面气压和位势高度场表现为中纬度异常高压而高纬度异常低压的“南高北低”的分布特征, 中纬度被反气旋式环流控制并伴随着异常的下沉运动, 高纬度被气旋式环流控制并伴随着异常的上升运动; NAM 负位相年与之相反。

热带外地区, 经向温度平流是控制温度局地变化的关键因子。09/10 年冬季 NAM 出现极端负位相, 并且 NAM 主要通过影响经向温度平流影响地面气温异常, 最终导致了北半球中纬度异常低温的形成。多年资料的分析结果表明, 当 NAM 为正位相时, 海平面气压在中纬度异常高压而在高纬度异常降低, 中纬度气压梯度力为正, 地表

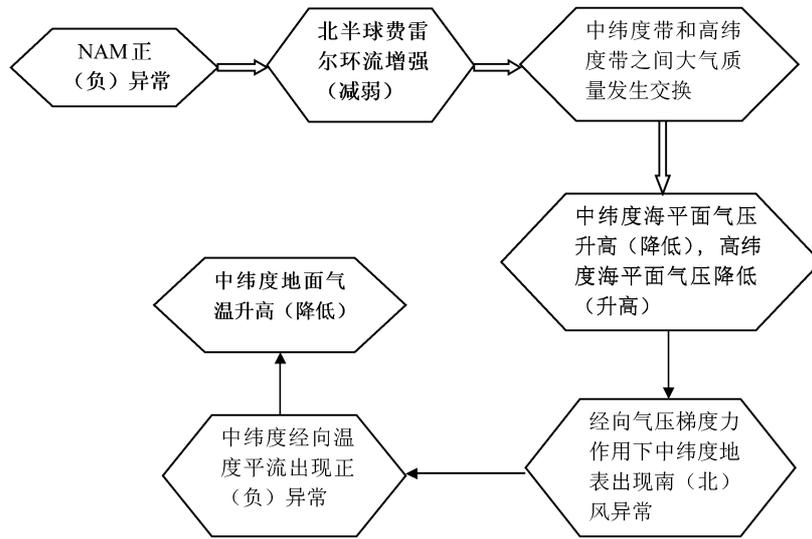


图 13 NAM 影响北半球中纬度地面气温机制示意图。镂空箭头代表对应关系，实箭头代表因果关系

Fig. 13 Schematic of the mechanism of NAM on the surface air temperature in the Northern Hemisphere. Empty arrows indicate correspondence relationship and solid arrows indicate consequence relationship

出现异常的南风，地表经向暖平流增强，因而中纬度地面气温异常升高；反之亦然。上述 NAM 影响北半球中纬度地面气温的机制示意图可见图 13。

本文主要研究了 NAM 与北半球中纬度地面气温的关系及其影响机制，但研究中发现 NAM 与北半球中纬度对流层大气温度异常也存在一定程度的关联，因此，地面气温的异常变化与对流层大气温度异常变化两者是否存在联系？NAM 影响对流层大气温度的物理机制是怎样的？另外，研究中发现，近几十年中纬度地面气温的变化趋势与 NAMI 相反，在全球增暖的背景下如何准确地分析大气自然变率对温度的调控作用？这些问题都有待进一步的讨论与分析。

### 参考文献 (References)

- Ambaum M H P, Hoskins B J, Stephenson D B. 2001. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation? [J]. *J. Climate*, 14 (16): 3495–3507.
- Angell J K. 2006. Changes in the 300-mb north circumpolar vortex, 1963–2001 [J]. *J. Climate*, 19 (12): 2984–2994.
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年际尺度上的联系: 准定常行星波的作用 [J]. *大气科学*, 30: 863–870. Chen Wen, Kang Lihua. 2006. Linkage between the arctic oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: Roles of quasi-stationary planetary waves [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30: 863–870.
- Ding R Q, Li J P, Wang S G, et al. 2005. Decadal change of the spring dust storm in northwest China and the associated atmospheric circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32: L02808, doi: 10.1029/2004GL021561.
- Dommenget D, Latif M. 2002. A cautionary note on the interpretation of EOFs [J]. *J. Climate*, 15: 216–225.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 28 (10): 2073–2076.
- 龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响 [J]. *地理学报*, 58 (4): 559–568. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 2003. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58 (4): 559–568.
- 龚道溢, 王绍武, 朱锦红. 2004. 北极涛动对我国冬季日气温方差的显著影响 [J]. *科学通报*, 49 (5): 486–492. Gong Daoyi, Wang Shaowu, Zhu jinhong. 2004. Arctic Oscillation influence on daily temperature variance in winter over China [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 49 (6): 637–642.
- 何春, 何金海. 2003. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系研究 [J]. *南京气象学院学报*, 26: 1–7. He Chun, He Jinhai. 2003. Relation between Arctic Oscillation and North China air temperature in winter [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 26: 1–7.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- 李建平. 2005a. 北极涛动的物理意义及其与东亚大气环流的关系 [C] // 俞永强, 陈文, 等著. 海—气相互作用对我国气候变化

- 的影响. 北京: 气象出版社, 169 - 176. Li Jianping. 2005a. Physical nature of the Arctic Oscillation and its relationship with East Asian atmospheric circulation [C] // Yu Yongqiang, Chen Wen, et al. Air-sea-land Interactions in Asia Monsoon Region and Their Impacts on the Climate Variation in China (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 169 - 176.
- 李建平. 2005b. 海气耦合涛动与中国气候变化 [C] // 秦大河. 中国气候与环境演变 (上卷). 北京: 气象出版社, 324 - 333. Li Jianping. 2005b. Coupled air-sea oscillation and climate variations in China [C] // Qin Dahe. Climate and Environmental Evolution in China (First Volume) (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 324 - 333.
- Li J P, Wang J X L. 2003. A modified zonal index and its physical sense [J]. Geophys. Res. Lett., 30 (12): 1632.
- Liu X H, Ding R Q. 2007. The relationship between the spring Asian atmospheric circulation and the previous winter Northern Hemisphere annular mode [J]. Theor. Appl. Climatol., 88 (1): 71 - 81.
- Lorenz E N. 1951. Seasonal and irregular variations of the Northern Hemisphere sea-level pressure profile [J]. J. Meteor., 8: 52 - 59.
- 所玲玲, 谭本旭, 黄嘉佑. 2009. 北半球环状模异常时温度场异常的成因再探讨 [J]. 科学通报, 54 (6): 798 - 803. Suo Lingling, Tan Benkui, Huang Jiayou. 2009. Further exploration on causes of temperature anomalies associated with the abnormal northern annular mode [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 54 (6): 798 - 803.
- Thompson D W J, Wallace J M. 1998. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. Geophys. Res. Lett., 25 (9): 1297 - 1300.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. J. Climate, 13 (5): 1000 - 1016.
- Thompson D W J, Wallace J M. 2001. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode [J]. Science, 293 (5527): 85 - 89.
- Thompson D W J, Wallace J M, Gabriele C. 2000. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends [J]. J. Climate, 13 (5): 1018 - 1036.
- 杨辉, 李崇银. 2008. 冬季北极涛动的影响分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 395 - 404. Yang Hui, Li Chongyin. 2008. Influence of Arctic Oscillation on temperature and precipitation in winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 395 - 404.