

各层北半球环形模态异常与地面 大气温度的关系研究^{*1}

谭本旭 所玲玲 黄嘉佑

北京大学物理学院大气科学系,北京,100871

摘 要

文中研究了不同气压层的北半球环形模态异常时,与之相应的北半球地面大气温度的变化及其月际变率特征。为衡量温度变化的程度,使用偏最小二乘回归方法定义了一个新的耦合指数。该指数定义为对地面气温距平场和北半球环形模态指数做偏最小二乘回归分析的第 1 主分量。分析表明,该指数可以较准确地表现出北半球环形模态异常时相应的整个温度场变化程度。通过该指数序列分析和环形模态异常时地面气温合成分析,比较了处于不同气压层面的北半球环形模态异常与地面大气温度的不同关系。(1) 不同层面的北半球环形模态异常与同时期的地面温度关系比较:1 月对流层中高层的北半球环形模态异常与 1 月地面温度异常关系最密切,密切程度超过其他气压层的北半球环形模态异常,与 2 月地面温度关系较显著的是 1 月平流层低层的北半球环形模态异常;(2) 环形模态异常与地面气温耦合关系的月际变率分析结果:1 月位于对流层中高层的北半球环形模态异常与 1 月地面气温耦合关系最强烈,与其他各月地面气温的耦合逐月递减,4 月之后变得不明显;1 月平流层低层的北半球环形模态异常除了与 1 月气温关系密切外,还与 2、3 月地面气温关系密切,4 月之后不明显。

关键词: 北半球环形模态, 地面气温, 偏最小二乘回归分析。

1 引 言

Thompson 和 Wallace^[1] 讨论了北极地区与中纬度地区海平面气压变化反相的现象,并将这种现象命名为“北极涛动”(the Arctic Oscillation, AO)。北极涛动指数定义为北半球位势高度场或气压场 EOF 分析的第一时间函数,对应的第 1 空间函数就可以反映北极涛动的空间分布特征。图 1 为对 1 月北半球 20°N 以北地区 1000 hPa 位势高度场做 EOF 分析得到的第 1 空间函数。如图所示:极地地区为负值,中纬度地区为正值,说明极地地区与中纬度地区气压/位势高度变化反相,当北极地区气压降低时,中纬度地区气压异常升高,中纬度地区存在两个高值区,分别在北大西洋和北太平洋地区。

很多研究者对北极涛动与地面天气要素的关系进行探讨。Thompson 和 Wallace 讨论了 AO 与地

面气温的密切联系:冬季 AO 正异常即极地地区气压降低中纬度地区气压升高时,伴随着欧亚大陆高纬地区、北加拿大地区地面气温正异常和北非、中东、加拿大东部地面气温负异常^[1-2]。研究表明^[1,3]:极地地区与中纬度地区气压/位势高度变化反相的现象不仅存在于地面而是存在于自地面至平流层,因此应将其看作为北半球热带外气压力场变化最主要的模态,并称为“北半球环形模态”(the northern annular mode, NAM)。存在于不同高度层的北半球环形模态异常与地面气温关系是否不同,是否与前面所述海平面 AO 与地面气温耦合形式有差异?

与以前只分析某一层 NAM 与地面气温关系的研究不同,本文比较了地面气温与处于不同高度层的 NAM 异常的不同关系,重点关注地面气温与平流层和对流层 NAM 异常的不同关系。本文试图回

* 初稿时间:2007 年 6 月 17 日;修改稿时间:2007 年 8 月 8 日。

资助课题:国家自然科学基金重点项目“北极平流层异常对亚洲及北太平洋地区的天气气候影响研究”(40533016)。

作者简介:谭本旭,研究方向大气动力学,E-mail:bktan@pku.edu.cn

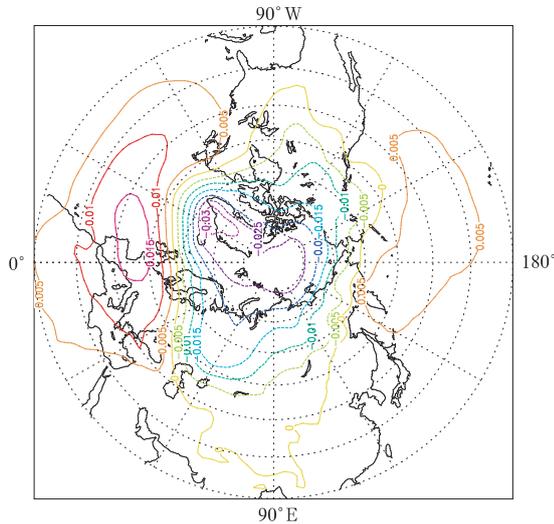


图1 1月北半球20°N以北地区1000 hPa月均位势高度场 EOF分析第1空间函数

Fig. 1 The first EOF mode of the January northern hemispheric 1000 hPa monthly mean geopotential height field (20°–90°N)

答以下问题:存在于哪个层面的 NAM 异常与地面气温耦合最强烈? 能持续多久? 如何衡量地面气温与 NAM 异常的关系密切程度?

2 数据和分析方法

我们使用了 NCEP/NCAR 再分析资料的数据,包括地面大气温度(surface air temperature, SAT)和位势高度的月均资料。数据的空间分辨率是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 时间长度是 1948—2005 年共 696 个月。资料包括 17 气压层(1000、925、850、700、600、500、400、300、250、200、150、100、70、50、30、20、10 hPa)数据。

因为强烈的 NAM 异常一般发生在冬季,1 月可作为冬季的代表月份。我们将分析 1 月 NAM 异常与各月地面气温的关系。NAM 指数定义为对 1 月北半球 20°N 以北地区的位势高度场做经验正交函数分析所得到的第 1 时间函数序列。对应于 17 个气压层面,计算得到 17 个相应的 NAM 指数序列。然后将此 17 个指数序列分别标准化。

对每一层的 NAM 异常年份都按照如下标准选取:当某一层某年的 1 月 NAM 指数标准化值大于 1,相应年份记录为该层 1 月 NAM 正异常年份,若值小于 -1,则记录为该层 1 月 NAM 负异常年份。对应于 17 气压层,共得到 17 组 1 月 NAM 正异常

年份和 17 组 1 月 NAM 负异常年份。对应于不同气压层面的异常年份有差别,因为在同一时刻位于不同气压层面的大气环流状态往往不同。然后,将 NAM 正异常年份和负异常年份的每个月的地面气温月均距平场(去除多年平均所得)分别做平均,得到 NAM 正负异常情况的合成分析结果。

为了衡量 SAT 变化与 NAM 异常的关系密切程度,我们定义了一个指数,该指数使用偏最小二乘回归方法(PLSR)计算得到。如 Stone 和 Brooks^[4] 及 Frank 和 Friedman^[5] 所讨论的,相较于通常的线性回归方法,PLSR 有几个突出的优点。尤其是应用于气象研究工作时,有两点很突出:(1) 适合于当变量高度相关时构建回归模型;(2) 适用于当样本数小于变量数时构建回归模型。相邻的气象要素通常强相关并且在很多分析工作中样本数远远小于变量数,此时使用普通的线性回归方法会有很大误差。

PLSR 基本计算公式:

$$E_0 = t_1 p'_1 + t_2 p'_2 + \dots + t_s p'_s$$

$$F_0 = t_1 r'_1 + t_2 r'_2 + \dots + t_s r'_s + F_s$$

t_i 是主分量, i 是分量个数, p_i 是自变量场 E_0 的荷载向量场, r_i 是另一变量场 F_0 投影到第 i 个主分量轴的向量,符号“'”代表转置。

文中将去掉多年平均的 SAT 距平场作为自变量场 E_0 , NAM 指数序列作为另一变量场 F_0 。然后,使用 PLSR 方法自 SAT 距平场中提取与 NAM 指数相关性最强的第 1 主分量。与普通主分量分析不同的是,PLSR 方法提取主分量时既考虑原始场(温度距平场)的信息也考虑另一变量场(NAM 指数)的信息。因此,提取出的第 1 主分量代表 SAT 距平场中与 NAM 指数相关最强的部分。于是,将 NAM 与 SAT 场计算得到的第 1 主分量定义为 SAT 与 NAM 的耦合指数。此指数可以很好的衡量整个 SAT 场与 NAM 异常的关系密切程度。模态定义为 SAT 场的第 1 荷载向量场,此模态可以反映 NAM 异常时 SAT 场异常的空间分布。指数与模态结合可以很好地反映原始 SAT 场变化与 NAM 异常关系。

为了突出中高纬地区的特征,图 2 给出了 20°—90°N 1 月的 SAT 与同期 1000 hPa NAM 耦合空间分布,它有如下特征:在格陵兰岛东部有一个负值中心,在中高纬度地区有一个近似环形的正值带环绕着此负值中心。欧亚大陆北部靠近北极地区为正荷

载中心,温度变化最显著。另一个相对较弱的正荷载中心在北美。这些分布特征与 Thompson 和 Wallace^[1-2]的分析结果非常相似,说明该模态可以很好的表现 NAM 异常时 SAT 的变化特征。耦合指数为一个时间序列,某一年的值代表此年 1 月整个 SAT 场对 1000 hPa NAM 的关系强度,绝对值越大,表示由 NAM 异常引起的 SAT 变化越显著。

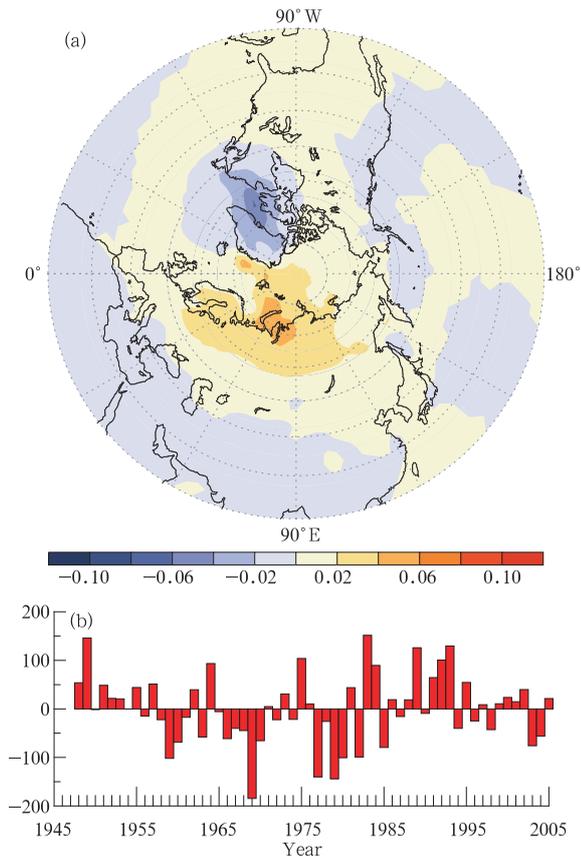


图 2 20°—90°N 1 月 SAT 与同期 1000 hPa NAM 异常耦合模态(a)和耦合指数(b)

Fig. 2 The coupling mode (20°—90°N) between the January SAT and 1000 hPa NAM anomalies (a) and corresponding coupling index (b)

图 3 显示了由模态和指数回归所得的回归场合成分析结果和由原始距平场计算所得的合成分析结果。从图中可以清楚地看出,图 3a 与 3c 非常相似,图 3b 与 3d 非常相似。相似性既表现在温度变化空间分布形状上还表现在平均变化强度上。1 月 1000 hPa NAM 正异常年份的回归平均场与原始平均场的相关系数为 0.842,负异常年份为 0.939。这些结果都表明了使用 PLSR 方法建立的回归模型可以很好的抓住原始 SAT 场与 NAM 异常的耦合主

要特征,既可以通过耦合模态来展现 NAM 异常时相应的 SAT 场变化的大尺度空间分布,也可以通过耦合指数来表现整个 SAT 场的变化强度。

3 分析结果

3.1 不同气压层面 NAM 异常与地面气温的关系

以前的研究已经表明强烈的 NAM 异常与 SAT 有密切联系,在此,我们重点探讨 SAT 与不同气压层面的 NAM 异常的关系密切程度,尤其是与对流层和平流层 NAM 异常的不同关系。

图 4 给出了 1 月和 2 月耦合指数的方差曲线。指数时间序列的方差代表了整个序列的平均耦合强度。1 月方差曲线自地面向对流层高层保持持续上升趋势,在大概 400 hPa 左右达到顶点,然后下滑。这意味着 1 月 SAT 与发生于对流层中高层的 NAM 异常要比发生在其他层面尤其是平流层的关系更密切。为特别说明这一点,我们分别选取 30(图 5a)和 400 hPa(图 5b)的情况来进行更详细的比较,发现当 1 月 400 hPa NAM 正异常时,伴随着几乎整个北极区域出现强烈降温,而当 1 月 30 hPa NAM 正异常时,降温区域相对较小较弱,只发生在格陵兰的北部。

2 月响应指数方差曲线变化与 1 月不同。该曲线自对流层中层一直缓慢上升至平流层下层,大概在 100 hPa 左右呈突起状。与图 5a 和 5b 相似,图 5c 和 5d 也是合成分析结果,不同的是前者是 1 月 SAT 变化,后者是 2 月 SAT 变化。比较图 5c 和 5d 发现,图 5c 中欧亚大陆北部的温度变化要比图 5d 中的变化略强一些,其他区域变化相差无几。这意味着 2 月 SAT 与 1 月发生于平流层的 NAM 异常的关系,要比发生在对流层中高层的 NAM 异常的关系略强一些。

比较图 4 中的两条曲线,发现对应于中高对流层的位置,1 月曲线远远高于 2 月。这说明 1 月发生于对流层的 NAM 异常与 1 月 SAT 的关系密切程度远远大于与 2 月 SAT 的关联。对应于平流层低层的位置,2 月方差曲线要略高于 1 月曲线。这说明 1 月平流层 NAM 异常与 2 月 SAT 的关系要略强于与 1 月 SAT 的关系。

Baldwin 和 Dunkerton^[3,6]揭示了冬季强烈的 NAM 异常往往首先出现在平流层,然后自平流层向对流层传播。平均来说自平流层传播到地面,时

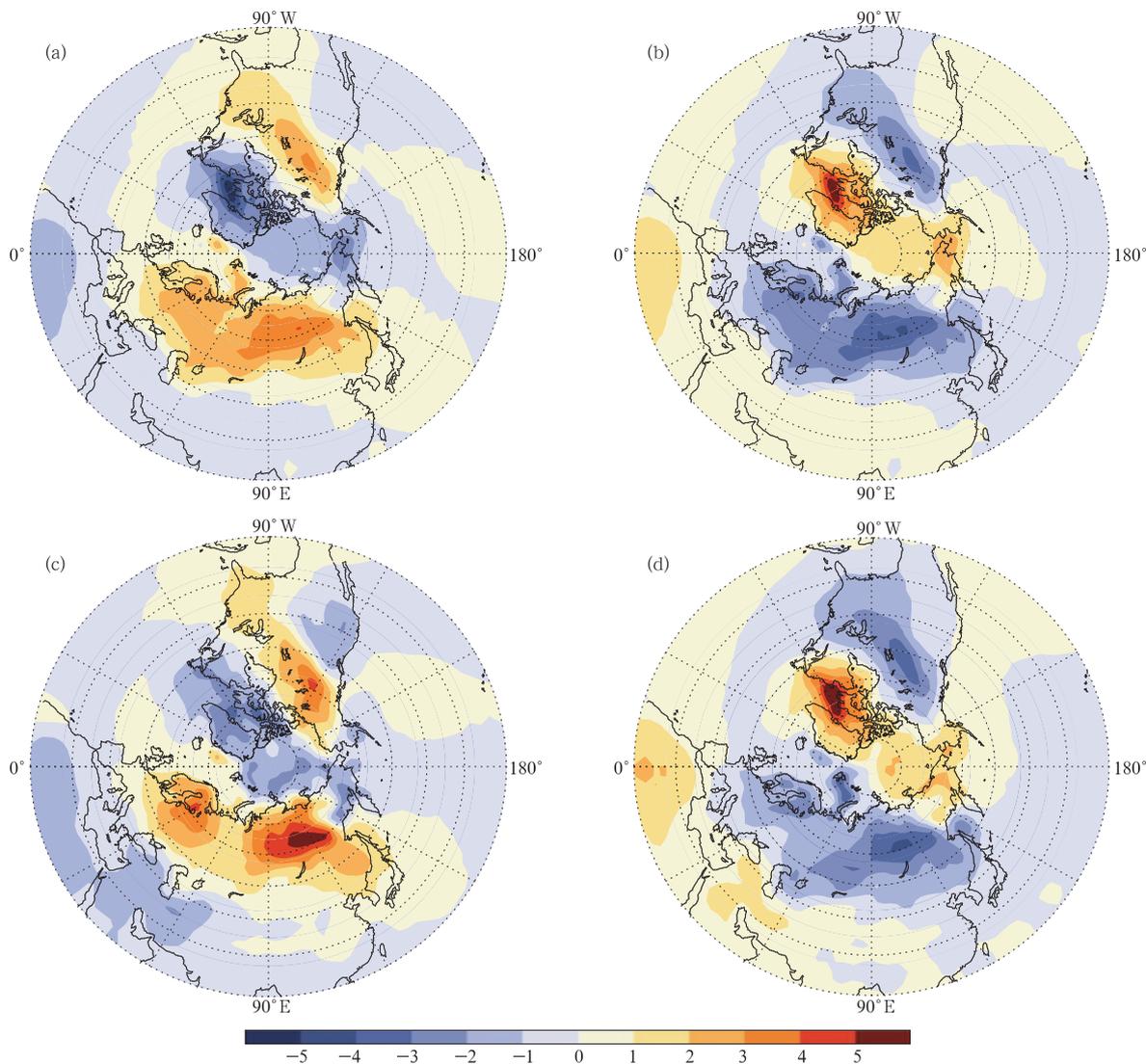


图3 20°–90°N 1月地面气温距平场合成分布
 (a/b. 耦合模态和指数回归场在 NAM 正/负异常年份的合成分析,c/d. 原始地面气温距平场在 NAM 正/负异常年份合成分析)

Fig. 3 Composite January SAT anomaly distributions (20°–90°N) for January strong positive/negative 1000 hPa NAM anomaly years(a,c/b,d) obtained by using the PLSR method (a/b) and the simple average method(c/d)

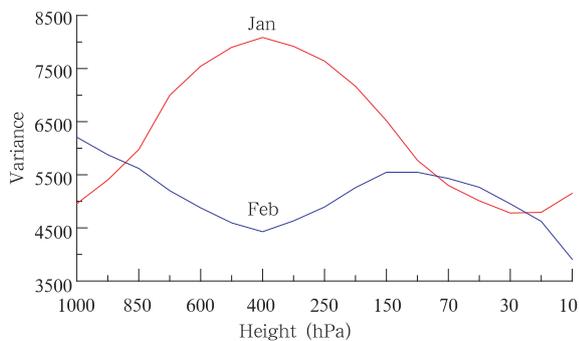


图4 1、2月耦合指数方差曲线

Fig. 4 Variance curves of the January (red line) and February (blue line) coupling indices

间需要大概几星期。那么前面的分析结果可能是由于1月平流层 NAM 异常需要一段时间下传至对流层然后影响到2月 SAT 场,因此有一个时间延滞过程。

3.2 SAT 与 NAM 关系的月际变率

位于不同气压层面的 NAM 异常与 SAT 关系的月际变化有一些共同特征(图6),NAM 异常时,相应的 SAT 变化自1月至3月都比较明显,到了4月则急剧下降,整个夏季都保持非常低的数值,到了10月至年底则略有增加。因此,可认为1月上层 NAM 异常时,相应的 SAT 明显变化可以持续大概

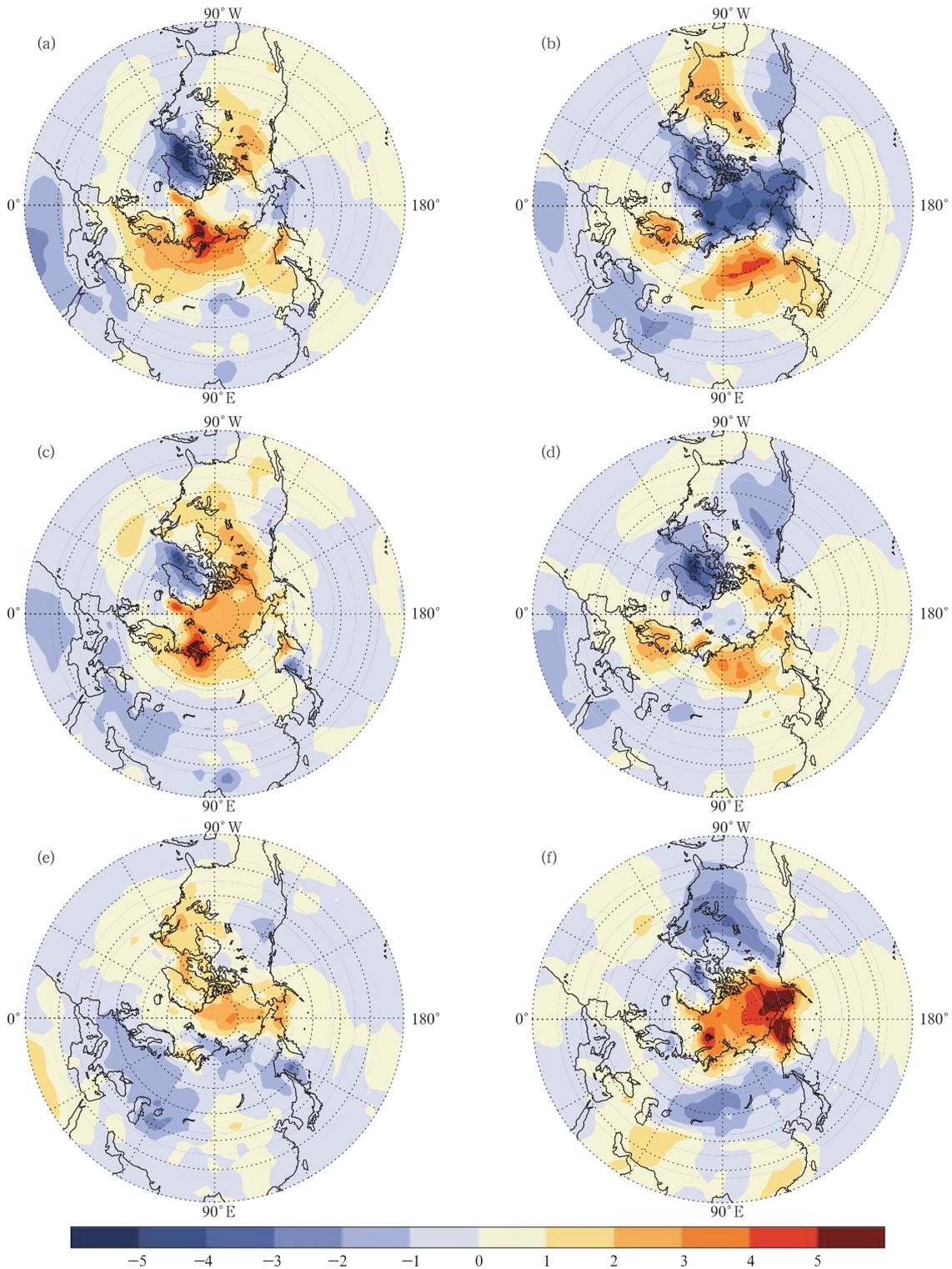


图5 1月30 hPa/400 hPa NAM 强烈正异常时,1月(a/b)、2月(c/d)地面气温距平分布,e和f分别是c-a与d-b的差值

Fig. 5 Average January/February SAT anomaly fields (20° – 90° N) for January strong positive(a,c) 30 hPa/(b,d)400 hPa NAM anomaly years, and (e,f)difference field of c minus a or d minus b

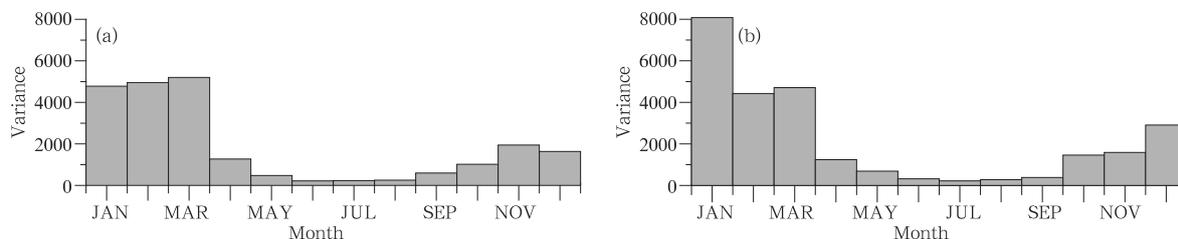


图 6 SAT 分别与 30 hPa (a)、400 hPa (b) NAM 的耦合指数序列方差月分布

Fig. 6 Variances of monthly (a) 30 hPa/ (b) 400 hPa NAM coupling index time series

2 至 3 个月,而当年春末和整个夏季的 SAT 变化则非常小。图 6a 和 6b 的显著差别在于 NAM 异常发生于 30 hPa 时,2 月和 3 月地面气温变化幅度要比 1 月地面气温变化略强(图 6a 所示);而 NAM 异常发生于 400 hPa 时,1 月 SAT 变化远远强过 2 月和 3 月 SAT 变化(图 6b 所示)。这里的分析结果与上一部分的分析一致。

由于当 NAM 异常时,相应的不同月份的 SAT 异常范围和性质存在差异,这种月际变化导致一些区域经历了急剧的 SAT 变率。比如发生在俄罗斯东北部和周围广阔的海洋区域的温度自 1 月至 2 月的急剧变化。与 Thompson 和 Wallace^[1-2]所讨论的欧亚大陆北部, Rigor^[7]讨论的北极地区, Higgins 等^[8], Wettstein 和 Mearns^[9]等所讨论的北美区域不同,这一区域应该由于急剧温度月际变率而受到关注。比较图 5a 与 5c 及 5b 与 5d,发现上层的 NAM 正(负)异常时,此区域相应的 SAT 变化为在 1 月降温(增温)在 2 月增温(降温)。图 5e 和 5f 是 2 月气温场变化减去 1 月气温场变化的结果(图 5e 为图 5c-5a;图 5f 为图 5b-5d),从中可以看到强调的这个区域相较于前面所提到的其他区域有更大或者至少相当的 1—2 月温度变化。此区域 SAT 与其他气压层面 NAM 异常也有类似关系(图略)。自 1 月至 2 月, SAT 异常区域的位移导致了这一区域快速的温度变化:1 月在欧亚大陆的正值中心在 2 月向北极方向入侵,覆盖了俄罗斯东北部和白令海;1 月原本覆盖北极的负值中心在 2 月变得弱小。尽管在单独某一月份内,此区域的 SAT 变化并不很大,但由于 1 月降温,2 月增温这样性质相反的温度变化使得 SAT 自 1 月至 2 月的变率很剧烈。

4 结 论

本文使用偏最小二乘回归、合成分析方法,提出

一个新耦合指数来分析比较处于不同气压层的环流模态异常与地面大气温度异常的不同关系。

(1) 发生在不同气压层的 NAM 与 SAT 的关系密切程度比较:1 月对流层中高层的 NAM 异常与 1 月 SAT 异常关系最密切,密切程度超过其他气压层的 NAM 异常;1 月平流层低层的 NAM 异常与 2 月 SAT 关系显著。

(2) SAT 异常与 NAM 异常耦合关系的月际变化:发生在对流层的 1 月 NAM 异常与 1 月 SAT 耦合关系最强烈,2 和 3 月相应的 SAT 异常开始减弱但仍较显著,4 月锐减;发生在平流层低层的 1 月 NAM 异常与 SAT 的关系则为 1 月、2 月和 3 月都较显著,强度相差无几,甚至 2 月会略强些,至 4 月锐减。

(3) NAM 异常时,一些区域比如白令海附近存在快速的气温变率变化。

参考文献

- [1] Thompson David W J, Wallace John M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophys Res Letters*, 1998, 25(9): 1297-1300
- [2] Thompson David W J, Wallace John M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability. *J Climate*, 2000, 13(5): 1000-1016
- [3] Baldwin Mark P, Dunkerton Timothy J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *J Geophys Res*, 1999, 104(D24): 30937-30946
- [4] Stone M, Brooks R J. Continuum Regression: Cross-validated sequentially constructed prediction embracing ordinary least squares, partial least squares and principal components regression. *J Royal Statistical Soc, Series B (Methodological)*, 1990, 52(2): 237-269
- [5] Frank Ildiko E, Friedman Jerome H. A statistical view of some chemometrics regression tools. *Technometrics*, 1993,

- 35(2): 109-135
- [6] Baldwin Mark P, Dunkerton Timothy J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science*, 2001, 294(5542): 581-584
- [7] Rigor Ignatius G, Colony Roger L, Martin Seelye. Variations in surface air temperature observations in the Arctic 1979-1997. *J Climate*, 2000: 896-914
- [8] Higgins R W, Leetmaa A, Kousky V E. Relationships between climate variability and winter temperature extremes in the United States. *J Climate*, 2002, 15(13): 1555-1572
- [9] Wettstein Justin J, Mearns Linda O. The influence of the North Atlantic-Arctic Oscillation on mean, variance, and extremes of temperature in the Northeastern United States and Canada. *J Climate*, 2002, 15(24): 3586-3600

VARIABILITY OF COUPLING BETWEEN SURFACE AIR TEMPERATURES AND NORTHERN ANNULAR MODES AT VARIOUS LEVELS

Tan Benkui Suo Lingling Huang Jiayou

Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871

Abstract

This article focuses on variability of the couplings between surface air temperatures (SAT) and northern annular modes (NAM) at various levels. To measure the coupling intensity of whole SAT and NAM anomaly fields, the coupling index has been defined as the leading principal component of the Partial Least Squares Regression model of SAT anomaly, and both the composite analysis and the coupling index have been used to reveal level-by-level and monthly variability of the coupling relations between upper anomalous northern annular mode and surface air temperature in the northern hemisphere. The major results are as follows: January SAT anomalies are stronger coupled with the January NAM anomaly at the middle-upper tropospheric levels than those at the other levels, while February SAT anomalies with the January NAM anomaly at the lower stratospheric level. The January NAM anomaly at the middle-upper tropospheric levels is strongest coupled with January SAT anomaly, and the coupling intensity is successively reduced month by month and becomes trivial after April; and the January NAM at the lower stratospheric level is stronger coupled with January as well as February and March NAM anomalies, but the coupling becomes trivial after April.

Key words: Northern annular mode, Surface air temperature, Partial least squares regression.