

于超越, 周天军, 李博, 等. 2011. 对流层和平流层温度中 ENSO 信号的多种资料比较 [J]. 大气科学, 35 (6): 1020–1032. Yu Chaoyue, Zhou Tianjun, Li Bo. 2011. ENSO signals in the tropospheric and stratospheric temperatures: A comparison among different datasets [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (6): 1020–1032.

对流层和平流层温度中 ENSO 信号的多种资料比较

于超越^{1, 2} 周天军¹ 李博^{1, 2} 张丽霞^{1, 2}

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球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 本文利用 1980~1999 年卫星资料 Microwave Sounding Unit (MSU) 和 5 种再分析资料 (ERA40、JRA25、NCEP1、NCEP2、MERRA), 分析了北半球冬季全球对流层中层和平流层低层温度变化中的 ENSO 信号, 讨论了 ENSO 暖冷位相时温度异常的对称性和非对称性, 并以 MSU 卫星资料为标准, 评估了各再分析资料描述 ENSO 信号的准确性。结果表明, 在对流层中层, 伴随 ENSO 暖、冷位相的温度异常的对称分量, 在东太平洋呈典型的“哑铃型”变暖信号, 太平洋—北美遥相关型显著, 暖异常中心位于赤道东太平洋和北美洲北部地区, 最大值 3℃左右; 而北太平洋、南亚、南太平洋为冷异常中心, 最大值在中国西南部, 可达-3.2℃。其非对称分量在北半球中高纬地区较大, 冷暖异常可达±1.5℃。在平流层低层, 伴随 ENSO 暖、冷位相出现的温度异常的对称分量, 在东太平洋、格陵兰岛及北大西洋为显著冷异常, 最大值出现在北大西洋地区, 为-7℃左右; 在北半球中高纬 30°N 以北、70°W~70°E 之间的地区为较强暖异常, 最大值出现在 70°N 的俄罗斯东北部, 为 6℃左右。温度异常只在北半球高纬度地区表现出较强的非对称性, 最大值可达 5.7℃。对比而言, 在东太平洋、南太平洋、北太平洋、中国南部地区、格陵兰岛以及北大西洋部分地区, 平流层—对流层 ENSO 信号温度异常反号; 北美洲北部对流层—平流层温度变化同号。不同再分析资料的 850~300 hPa 和 100~30 hPa 的平均温度, 均能很好地反映对流层中层和平流层低层的 ENSO 信号特征。

关键词 ENSO 对流层中层 平流层低层 温度异常

文章编号 1006-9895 (2011) 06-1020-13

中图分类号 P732

文献标识码 A

ENSO Signals in the Tropospheric and Stratospheric Temperatures: A Comparison among Different Datasets

YU Chaoyue^{1, 2}, ZHOU Tianjun¹, LI Bo^{1, 2}, and ZHANG Lixia^{1, 2}

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

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Signals of global tropospheric and stratospheric temperature anomalies associated with ENSO events in boreal winter during the period of 1980–1999 are investigated by using the Microwave Sounding Unit (MSU) data. Results derived from five reanalysis datasets (ERA40, JRA25, NCEP1, NCEP2, and MERRA) are compared with the MSU data. The symmetric and asymmetric components of temperature anomalies associated with warm and cold

收稿日期 2010-11-19, 2011-05-18 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40890054、40821092, 国家科技支撑计划 2007BAC29B03

作者简介 于超越, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事对流层和平流层 ENSO 信号的观测分析和数值模拟研究。E-mail: chaoyu-eyu@mail.iap.ac.cn

episodes of ENSO are revealed. The MSU data are taken as a benchmark to evaluate the veracity of ENSO signals described by different reanalysis datasets. The results show that, in the middle troposphere, the symmetrical components of temperature anomalies associated with ENSO feature a dumbbell-shaped pattern in the eastern Pacific, while the wave structures are evident, stretching from the Pacific to North America, with 3°C maximum located in the eastern Pacific and northern North America; on the contrary, negative values turn up in the North Pacific, South Asia, and the South Pacific, with the minimum of -3.2°C centered in southwestern China. The asymmetrical components are only evident in most of the high latitudes of the Northern Hemisphere. In the lower stratosphere, the symmetrical components of ENSO-related temperature anomalies are negative in the eastern Pacific, Greenland, and the North Atlantic, with the minimum -7°C located in the North Atlantic. The positive values occupies the region north of 30°N during $70^{\circ}\text{W}-70^{\circ}\text{E}$, with the maximum 6°C centered in northeastern Russia. The asymmetrical components are obvious in the high latitudes of the Northern Hemisphere, and the maximum is 5.7°C . The reverse signals between the middle troposphere and the lower stratosphere are found in the equatorial eastern Pacific, the South Pacific, the North Pacific, southern China, Greenland, and some areas of the North Atlantic, while northern North America sees the same signals. Further studies indicate that temperatures averaged over 850–300 hPa and 100–30 hPa can well represent the ENSO-related signals in the middle troposphere and the lower stratosphere respectively.

Key words ENSO, middle troposphere, lower stratosphere, temperature anomaly

1 引言

El Niño-Southern Oscillation (ENSO) 是海气耦合系统重要的年际变率现象, 它作为热带地区的热源强迫, 能够直接或通过遥相关, 对热带和中高纬地区气候异常产生显著影响 (Yulaeva and Wallace, 1994; Trenberth and Hoar, 1996; 龚道溢和王绍武, 1999a, 1999b; Trenberth and Caron, 2000; Trenberth et al., 2002; 朱艳峰等, 2003; 黄菲和许士斌, 2009; Li et al., 2010)。学术界很早就注意到 ENSO 现象对全球温度的重要影响 (Newell and Weare, 1976; Horel and Wallace, 1981; Kiladis and Diaz, 1989)。

围绕对流层温度变化与 ENSO 的关系, Yulaeva and Wallace (1994) 发现, 在 El Niño 期间, 中东太平洋、印度洋的绝大部分地区以及非洲东南部, 对流层温度存在明显的暖异常。基于 ERA-40 和 JRA-25 再分析资料, 利用主分量分析 (EOF) 方法, Trenberth and Smith (2006, 2009) 揭示了热带对流层温度变化的两种主导模态及其三维环流结构, 其中第一个主导模态表现为对流层中层热带地区整体偏暖, 第二个主导模态为经典的 ENSO 型分布的温度异常形态, 即东太平洋呈“哑铃型”暖异常, 西太平洋为冷异常。对流层温度的上述变化特征, 在 MSU (Microwave Sounding Unit) 卫星温度资料中同样存在 (Calvo et al., 2004)。Zhou and

Zhang (2011) 分析了“国际大气模式比较计划”AMIP2 的 10 余个大气环流模式所模拟的热带对流层温度年际变率模态, 从数值模拟的角度, 证实了 ENSO 对上述对流层温度年际变率模态的强迫作用。不过, 此前关于对流层温度变化中 ENSO 信号的研究工作, 多集中在热带地区, 对热带外地区尤其是副热带地区关注甚少。

近年来, 平流层气候异常逐步受到重视 (李崇银等, 2008; Ren et al., 2009; 任荣彩和向纯怡, 2010)。在年代际尺度上, 有研究发现对流层温度变化和平流层温度变化存在关联, 并且影响到东亚夏季风的年代际变化 (Yu et al., 2004; Yu and Zhou, 2007; 宇如聪等, 2008; Zhou et al., 2009)。在年际变率尺度上, 利用太平洋无线探空站资料 (Reid et al., 1989)、MSU 卫星温度资料 (Yulaeva and Wallace, 1994; Calvo et al., 2004) 以及再分析资料 (Trenberth and Smith, 2006, 2009) 的研究, 都表明在热带地区平流层低层温度的 ENSO 信号和对流层相反。在纬向平均温度场上, 伴随 El Niño 事件的发生, 热带地区对流层变暖, 平流层低层变冷, 且热带对流层的变暖和热带平流层的变冷幅度相当 (Lau et al., 1998; Free and Seidel, 2009; Randel et al., 2009)。不过, 现有关于平流层温度 ENSO 信号的研究主要集中于热带, 对热带外地区的关注较少。

卫星资料 MSU 的对流层中层温度资料 T24,

其中心高度位于 4 km 左右 (Christy et al., 2000), 能够很好地反映对流层中层温度的年际变化特征; 平流层低层温度资料 T4 为 20 hPa 到 120 hPa 温度垂直积分结果, 峰值位于 60~70 hPa (Fu and Johanson, 2005), 很好地描述了平流层低层温度的变化的特征。目前, 再分析资料已经被广泛地应用于各种气候变率研究中, 但是已经有分析发现, 再分析资料本身存在误差, 针对研究问题的不同, 不同再分析资料在不同区域、不同时段表现出不同的偏差 (Marshall and Harangozo, 2000; Simmons et al., 2004; Uppala et al., 2005; Zhao and Li, 2006; Bromwich et al., 2007)。不同再分析资料所揭示的与 ENSO 关联的对流层和平流层温度异常特征如何, 是一个需要回答的问题。在这方面, MSU 卫星温度资料可以作为一个重要参考, 来对不同再分析资料的结果进行检验。此外, 此前关于与 ENSO 相关联的对流层和平流层温度异常的讨论, 多假设温度对冷、暖事件的响应是对称的。而实际上, 大气环流对 ENSO 冷暖位相的响应表现出很强的非对称性 (Wu et al., 2010)。对流层和平流层温度对 ENSO 冷暖位相响应的对称分量和非对称分量特征如何, 亦是一个亟待回答的问题。

本文拟使用卫星资料, 结合现有的 5 种不同再分析资料, 针对北半球冬季的对流层和平流层温度异常, 重点回答以下问题: (1) 对流层温度对 ENSO 冷、暖位相的响应, 其对称分量和非对称分量特征如何? 不同资料揭示的与 ENSO 联系的对流层温度异常的特征有何异同? (2) 平流层温度对 ENSO 冷暖位相的响应, 其对称分量和非对称分量特征如何? 不同资料揭示的与 ENSO 联系的平流层温度异常的特征有何异同? (3) 与 ENSO 相联系的对流层和平流层温度变化的联系如何?

2 资料和方法

本文所用卫星资料为 MSU 的平流层低层温度资料 T4 和对流层中层温度资料 T24 (Mears et al., 2003)。资料水平分辨率均为 2.5° 经度 $\times$ 2.5° 纬度, 范围覆盖 $82.5^\circ\text{S}\sim 82.5^\circ\text{N}$ 。

本文使用的再分析资料包括: (1) EAR-40 再分析资料, 水平分辨率为 2.5° 经度 $\times$ 2.5° 纬度, 垂直方向分为 23 层 (Uppala et al., 2005); (2) JRA-25 再分析资料, 水平分辨率为 1.25° 经度 $\times$ 1.25° 纬

度, 垂直分辨率为 17 层 (Onogi et al., 2007); (3) NCEP2 再分析资料, 水平分辨率为 2.5° 经度 $\times$ 2.5° 纬度, 垂直方向分为 17 层 (Kanamitsu et al., 2002); (4) NCEP1 再分析资料, 水平分辨率为 2.5° 经度 $\times$ 2.5° 纬度, 垂直方向分为 17 层 (Kalnay et al., 1996); (5) NASA (National Aeronautics and Space Administration) 的 MERRA 再分析资料, 水平分辨率为 1.25° 经度 $\times$ 1.25° 纬度, 垂直方向分为 42 层 (http://gmao.gsfc.nasa.gov/research/mer-ra/MERRA_FileSpec_DRAFT_09_02_2008.pdf [2010-10-19])。本文重点关注 1980~1999 年间 $80^\circ\text{S}\sim 80^\circ\text{N}$ 范围内的温度异常。

国际上对 ENSO 事件的判断标准是: 赤道中东太平洋 SST 距平连续 6 个月以上大于 0.5°C (小于 -0.5°C), 则定义 10 月至次年 9 月为 El Niño (La Niña) 年 (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.-shtml [2010-10-19])。根据美国气候预报中心发布的 Niño3.4 区 ($5^\circ\text{N}\sim 5^\circ\text{S}$, $120^\circ\text{W}\sim 170^\circ\text{W}$) SST 距平值, 本文选取 7 个典型的 ENSO 事件进行分析, 其中包括 4 个暖事件 (El Niño) 年: 1982/1983、1986/1987、1991/1992、1997/1998 和 3 个冷事件 (La Niña) 年: 1984/1985、1988/1989、1998/1999。本文关注 ENSO 成熟位相, 即冬季 (发生当年的 12 月及后一年的 1、2 月) 的情况。按照 Hoerling et al. (1997) 和 Wu et al. (2010) 的方法, 本文定义合成的 El Niño 和 La Niña 事件的差值为 ENSO 暖冷位相的对称分量, 而把它们和作为非对称分量。合成温度异常的对称分量中, 我们用各个事件的空间分布与合成结果的空间分布的空间相关系数, 作为每个事件对合成场的贡献率。

为了与 MSU 资料进行对比, 本文分别选取了再分析资料中与 T24、T4 空间相关较高的层面, 滤去了低于地表气压 p_s 的虚假资料后, 进行垂直积分, 结果发现 100~30 hPa 和 850~300 hPa 的平均温度, 分别能够很好地代表平流层低层和对流层温度的年际变化特征, 其中各种再分析资料与 MSU 卫星资料合成分析的空间相关系数均可达 0.94 以上。因此, 本文分别利用再分析资料的 850~300 hPa 和 100~30 hPa 温度的平均值, 来代表对流层中层和平流层低层的情况。此外, 我们使用对流层中层和平流层低层温度异常的乘积来表示对流层和

平流层温度异常信号的位相关系, 乘积为负值表示信号反相, 乘积为正值表示信号同相。

3 结果分析

3.1 对流层温度中的 ENSO 信号特征

利用 MSU 资料和 5 种再分析资料, 图 1 给出了北半球冬季 (以下简称冬季) 对流层中层温度异常和冬季 Niño3.4 指数的同时相关, 彩色阴影部分为通过 10% 显著性水平检验的区域。其中, 热带地区、北美洲北部、东南太平洋海盆地区为显著正相关, 最大相关出现在热带东太平洋地区; 北太平洋东北部、北美洲南部、中国南部、南太平洋中部、南大西洋地区为显著负相关, 大值中心位于北太平洋东北部和西南太平洋地区。基于不同资料的结果

很相近。

为定量揭示温度异常的强度, 对选取的 7 个典型的 ENSO 事件进行合成分析。图 2 给出冬季对流层中层温度 ENSO 事件合成异常的对称分量空间分布情况。MSU 资料中在东北太平洋为典型的“哑铃型”变暖信号, 太平洋—北美遥相关型 (PNA) 非常明显, 在东南太平洋以及南半球高纬地区表现为微弱的暖异常, 大值中心位于赤道东太平洋和北美洲北部地区, 最大值为 3°C 左右; 而副热带北太平洋、北美洲南部、中国南部以及副热带南太平洋、南大西洋地区表现为冷异常, 其中副热带南、北太平洋地区以及中国西南部地区均有一大值中心, 最大值在中国西南部可达 -3.2°C , 在副热带南、北太平洋地区略小, 但仍可达 -2°C 左右。

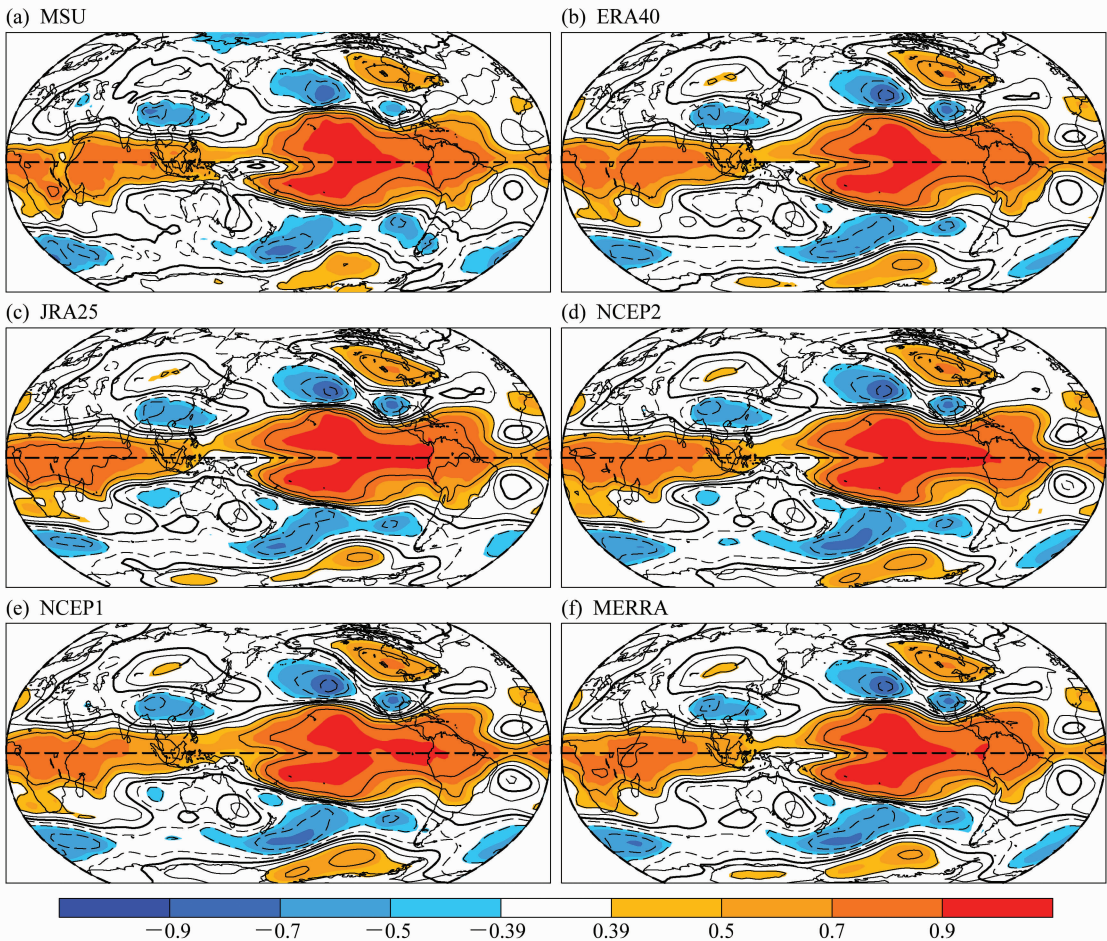


图 1 不同资料所得到的北半球冬季对流层中层温度异常与 Niño3.4 指数的同期相关: (a) MSU; (b) ERA-40; (c) JRA-25; (d) NCEP2; (e) NCEP1; (f) MERRA。彩色: 通过 10% 显著性水平检验的区域

Fig. 1 Correlation coefficients between the boreal winter temperature anomalies in the middle troposphere and the simultaneous Niño 3.4 index according to different datasets: (a) MSU; (b) ERA-40; (c) JRA-25; (d) NCEP2; (e) NCEP1; (f) MERRA. Colored areas are statistically significant at the 10% level

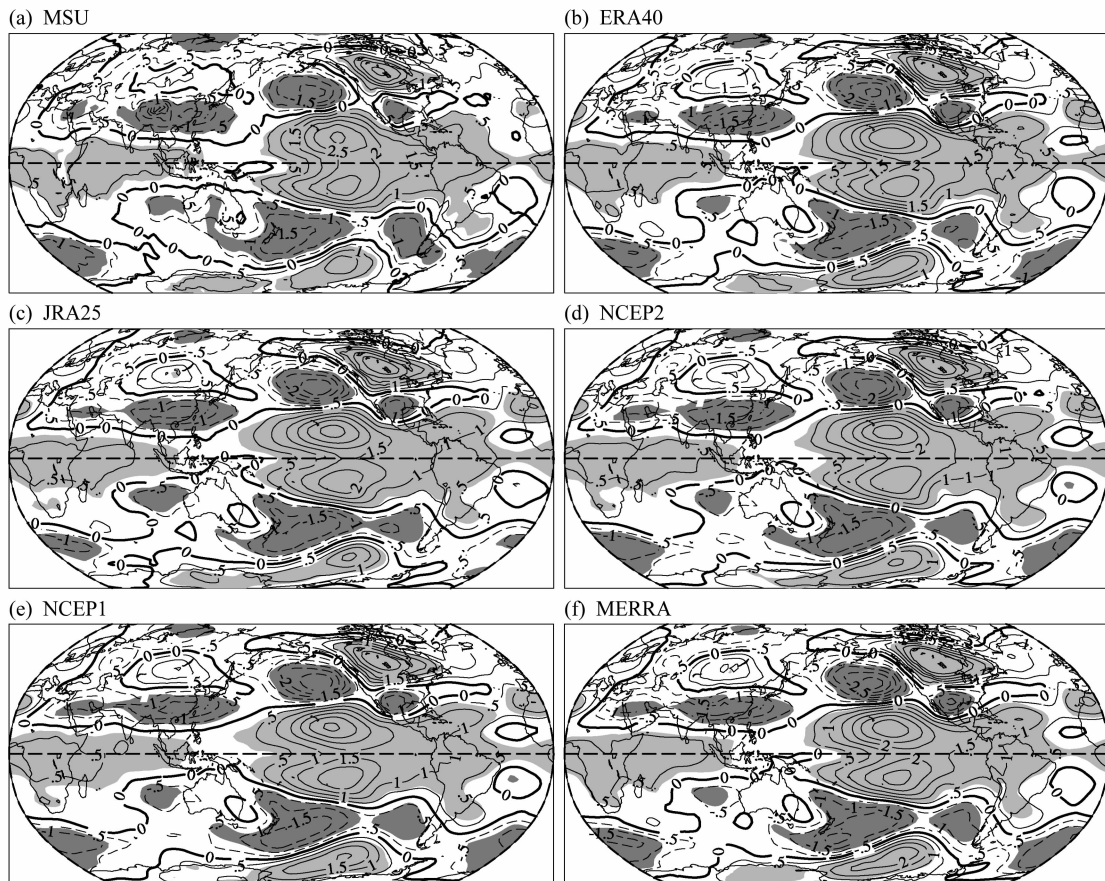


图2 用不同资料根据 ENSO 事件合成的冬季对流层中层温度异常(单位: $^{\circ}\text{C}$)的空间分布(El Niño—La Niña),其余同图 1。深、浅阴影:负、正值区(通过 10% 显著性水平检验的区域)

Fig. 2 Same as Fig. 1, but for the spatial distributions of wintertime temperature anomalies ($^{\circ}\text{C}$) composites based on ENSO events in the middle troposphere (denoted by El Niño minus La Niña). Dark (light) shaded areas represent negative (positive) values, and both are statistically significant at the 10% level

与 MSU 资料相比,各再分析资料描述的对流层中层 ENSO 温度信号的空间分布非常相似,但大值中心强度略有不同。在北美洲北部、北半球热带东太平洋、东南太平洋海盆,各再分析资料暖异常幅度均高于 MSU 资料,尤其是 ERA-40 和 MERRA,在北美洲北部地区偏暖 1°C 左右;在北太平洋、北美洲南部地区冷异常幅度偏强,偏冷 0.5°C 左右。而在南半球热带东太平洋暖异常幅度偏低,尤其是 JRA-25、NCEP2 和 NCEP1,平均偏低 0.5°C 左右;在中国西南部地区各再分析资料冷异常偏低 1°C 以上。

针对 ENSO 冷暖位相合成的对流层中层温度异常的对称分量,我们计算了各再分析资料和 MSU 资料的空间相关系数和均方根误差(如表 1 所示)。各资料和 MSU 的空间相关系数都达到

0.94 以上,均方根误差在 0.35 以下,表明各再分析资料都可以很好再现 MSU 资料显示的温度异常空间分布型。相比而言,ERA-40 的相关系数最高,误差最小,其次为 MERRA, JRA-25 最差。因此,在研究温度 ENSO 信号时,利用再分析资料中 850~300 hPa 的平均,可以很好地描述对流层中层的特征。

表 1 再分析与卫星资料中 ENSO 合成对流层温度的相关系数和均方根偏差

Table 1 The pattern correlation coefficients and root-mean-square differences for the tropospheric temperature anomalies during ENSO between the reanalysis and MSU data

再分析资料	ERA40	JRA25	NCEP2	NCEP1	MERRA
相关系数	0.96	0.94	0.94	0.94	0.95
均方根偏差/ $^{\circ}\text{C}$	0.30	0.34	0.34	0.34	0.33

不同 ENSO 事件, 由于其强弱程度和发生位置的不同, 相应的全球温度异常空间分布也不同。我们计算了用于合成的各个事件对整体合成空间分布的贡献率。如图 3 所示, 各事件均有 40% 以上的贡献

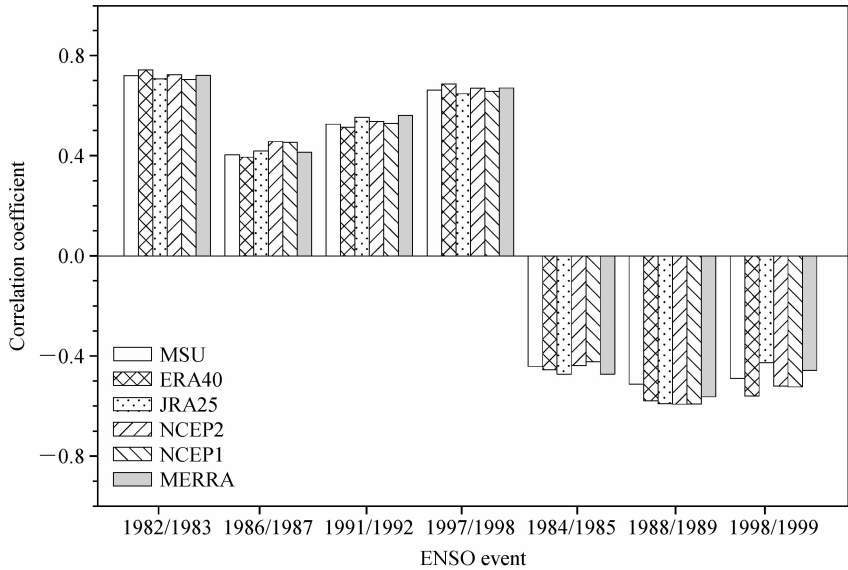


图 3 不同资料所得到的根据 ENSO 事件合成的各资料冬季对流层中层温度异常中各事件的贡献率
Fig. 3 Pattern correlation coefficients between the wintertime temperature anomalies in respective ENSO events and the composite values in the middle troposphere according to different datasets

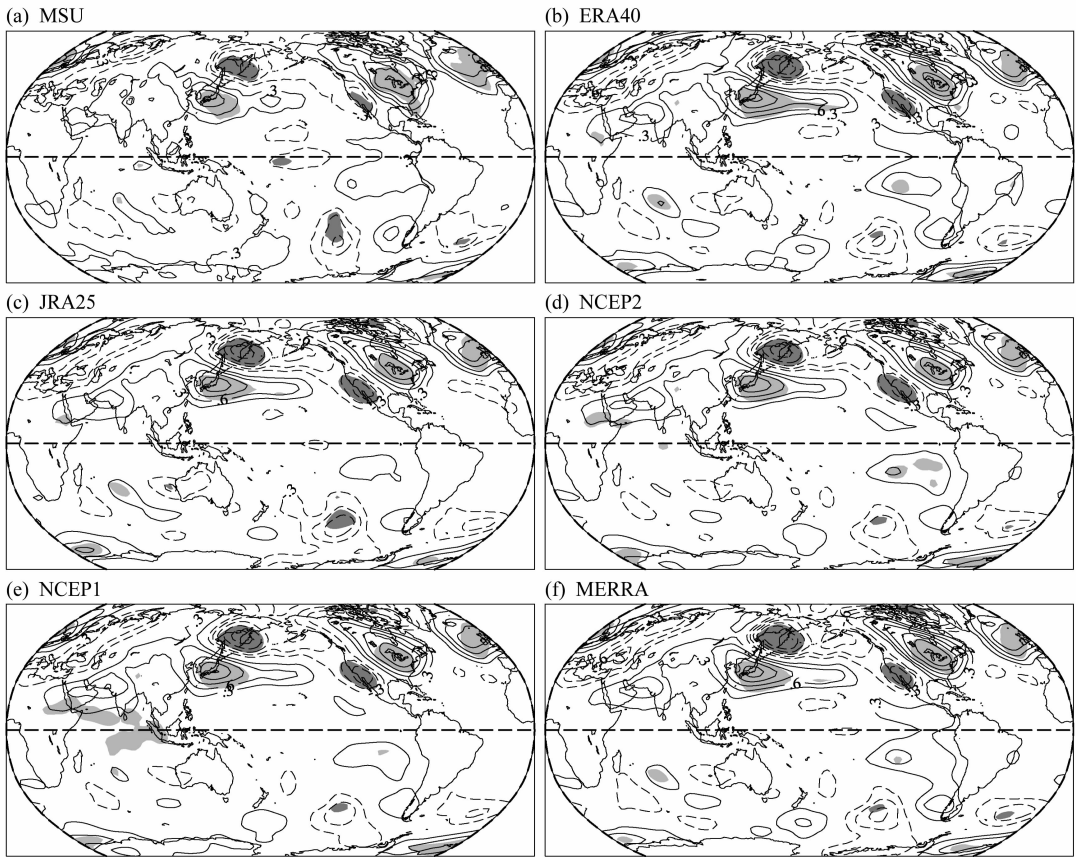


图 4 同图 2, 但为非对称分量的空间分布 (El Niño + La Niña)
Fig. 4 Same as Fig. 2, but for the asymmetric component (El Niño + La Niña)

献率。相比而言,该空间分布型主要描绘了 1982/1983、1997/1998 年 El Niño 事件和 1988/1989 年 La Niña 事件的特征。各资料间各事件的贡献率大小基本相当,相比 MSU 资料, NCEP1 和 NCEP2 资料过多地描述了 1986/1987 年 El Niño 事件的特征;而各再分析资料对 1988/1989 年 La Niña 事件均有过高描述。

ENSO 的温度信号在 El Niño 年和 La Niña 年并非完全对称。图 4 给出了冬季对流层中层温度 ENSO 合成异常的非对称分量的空间分布情况。结果表明,热带地区及南半球绝大部分地区非对称分量较小,而在北半球中高纬部分地区非对称分量较大,说明在这些地区 ENSO 信号的非对称性较高。

MSU 资料中暖异常中心主要位于北美洲、北大西洋、日本及其附近海域,最大值在 1.5°C 左右;

冷异常中心位于俄罗斯东北部以及美国加州沿岸,最大值在 -1.5°C 左右。各资料间空间分布很相似,但相比 MSU 资料,在北美洲、北大西洋以及东亚东北部地区暖异常偏大,尤其是 ERA-40 和 MERRA,偏暖 0.5°C ;在俄罗斯东北部和加州沿岸冷异常偏大,尤其是 ERA-40 和 MERRA,在俄罗斯东北部地区偏冷 0.5°C 。

3.2 平流层温度中的 ENSO 信号特征

图 5 给出了冬季平流层低层温度异常和冬季 Niño3.4 指数的同时相关,阴影部分为通过 10% 显著性检验的区域。MSU 资料中在东太平洋、南半球副热带地区、北大西洋、北太平洋、北美洲部分地区以及中国南部地区均存在显著相关。其中,南半球副热带地区、中国南部、北太平洋和北美洲部分地区为显著正相关,最大值出现在副热带南太平洋地区,最强可达 0.67;赤道东太平洋和北大西洋

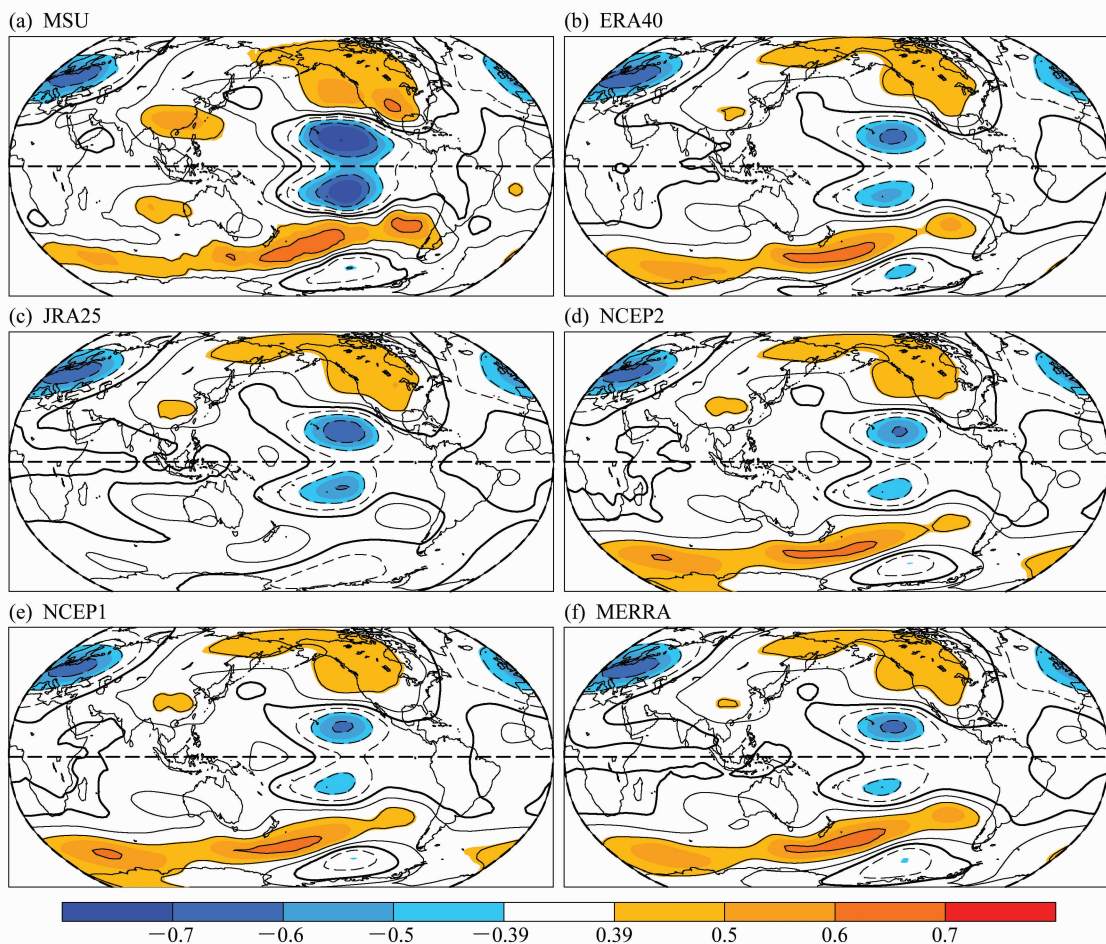


图 5 同图 1, 但为平流层低层

Fig. 5 Same as Fig. 1, but for the lower stratosphere

为显著负相关, 负相关最强位于赤道东太平洋地区, 最大为 0.8。不同资料 ENSO 温度信号与 Niño3.4 指数的相关分布略有差异。

与 MSU 资料相比, 再分析资料在北太平洋及北美洲大部分地区正相关较弱, 赤道东太平洋相关明显偏小, 尤其在南半球赤道东太平洋地区, 再分析资料中相关系数仅为 0.5 左右, 在南半球副热带地区, JRA-25 资料的温度与 Niño3.4 指数的相关没有通过显著性检验, 其余 4 种再分析资料中相关系数最大值中心位置较 MSU 中偏西。

对选取的 7 个典型的 ENSO 事件, 对平流层低层的 ENSO 信号进行合成分析。图 6 为合成的冬季平流层低层温度异常的空间分布情况, 各资料整体分布型非常一致。MSU 资料中, 热带中东太平洋及北大西洋为显著冷异常, 最大值出现在北大西洋地区, 可达 -7°C 左右; 在北半球中高纬 30°N 以北、 $70^{\circ}\text{W}\sim 70^{\circ}\text{E}$ 之间的地区为较强暖异常, 在南半球副热带部分地区也有微弱暖异常,

最大值出现在 70°N 的俄罗斯东北部, 可达 6°C 左右。相比于 MSU 资料, 各再分析资料在东太平洋地区的冷异常强度明显偏弱 1°C 左右且范围偏小。其中, JRA-25 没有再现南半球副热带地区的信号, 并且在东南太平洋海盆地区冷异常强度略为偏强。

针对 ENSO 冷暖位相合成的平流层低层温度异常的对称分量, 表 2 给出了各再分析资料与卫星资料的空间相关系数和均方根误差。各资料和 MSU 的空间相关系数都很高, 在 0.95 以上, 均方根误差也较小, 在 0.3 以下, 因此都可以很好地再现 MSU 资料所显示的 ENSO 信号的空间分布型。相比而言, NCEP2 资料和 MSU 的空间相关系数最大, 同时均方根误差也最小, 表明其和 MSU 资料最为接近。其次是 NCEP1 及 ERA-40, JRA-25 最差。因此, 在研究温度 ENSO 信号时, 利用再分析资料中 100~30 hPa 的平均, 可以很好地描述平流层低层的特征。

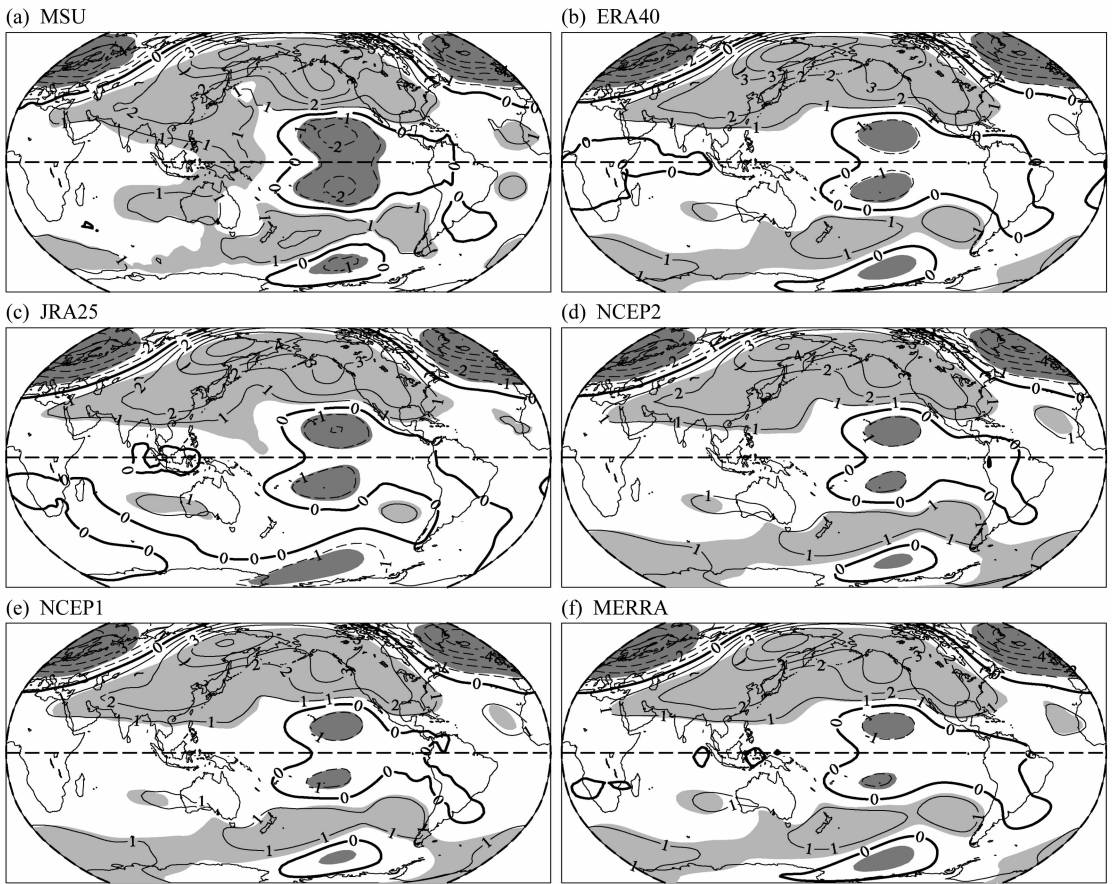


图 6 同图 2, 但为平流层低层
Fig. 6 Same as Fig. 2, but for the lower stratosphere

表 2 同表 1, 但为平流层温度结果

Table 2 Same as Table 1, but for the stratospheric temperature

再分析资料	ERA40	JRA25	NCEP2	NCEP1	MERRA
相关系数	0.98	0.96	0.99	0.99	0.98
均方根误差/℃	0.17	0.28	0.15	0.16	0.18

图 7 计算了平流层低层 ENSO 事件合成的各事件对合成后整体空间分布的贡献率。和对流层不同, 该合成的空间分布主要反映的是 1991/1992、1982/1983 及 1997/1998 年 El Niño 事件和 1988/1989 年 La Niña 事件特征, 同时对 1984/1985 和 1998/1999 年的 La Niña 事件也有一定的合成反映, 但几乎没能反映出 1986/1987 年 El Niño 事件的特征。相比 MSU 资料, 各再分析资料对 1982/1983 和 1991/1992 年 El Niño 事件描述不足, 对三次 La Niña 事件特征描述较为合理。

图 8 给出了合成的冬季平流层低层温度异常的非对称分量的空间分布。MSU 资料中在北半球高纬度地区表现为显著的暖异常, 最大值可达 5.7℃, 即该地区表现为明显的非对称性; 其余地区非对称性不显著。各再分析资料描述的非对称性的空间分布很相似, 高纬地区暖异常略弱于 MSU 资料, ERA-40 资料中最强的暖中心强度为 5.4℃, 其余 4 种再分析资料为 5℃。与平流层情况 (图 6) 类似,

JRA-25 在南半球仍然存在与 MSU 和其他再分析资料相异的信号, 暖异常在部分地区可达 1℃以上。因此, 在讨论南半球中高纬地区平流层 ENSO 信号时使用 JRA-25 资料要慎重。

3.3 平流层和对流层 ENSO 信号的位相特征

本节考察全球范围内的平流层—对流层温度 ENSO 信号位相特征。图 9 给出合成的冬季平流层低层和对流层中层 ENSO 期间温度异常信号的乘积, 以表示对流层和平流层温度异常信号的反相关系。MSU 资料中, 在中东太平洋、南太平洋、北太平洋、中国南部地区、格陵兰岛以及北大西洋部分地区为显著的平流层—对流层反相信号区域; 而北美洲北部地区为显著的对流层—平流层同相信号区域; 其余地区信号不明显。相比 MSU 资料, 各再分析资料在蒙古高原出现一同相信号区域, 且在南半球赤道太平洋地区信号较弱且范围较小。

为何对流层和平流层的 ENSO 型温度变化反号? Lau et al. (1998) 认为, 由于在对流层顶以上温度递减率反相, 在 El Niño 年, 暖空气的膨胀和对流中心的上升运动, 会推动对流层上层较冷的气体进入平流层低层, 从而使得平流层低层呈现变冷的信号, 与对流层温度的变化反相。Calvo et al. (2008) 从动力学的角度认为在冬半球, ENSO 信号以 Rossby 波的形式向平流层传播, 在中纬度

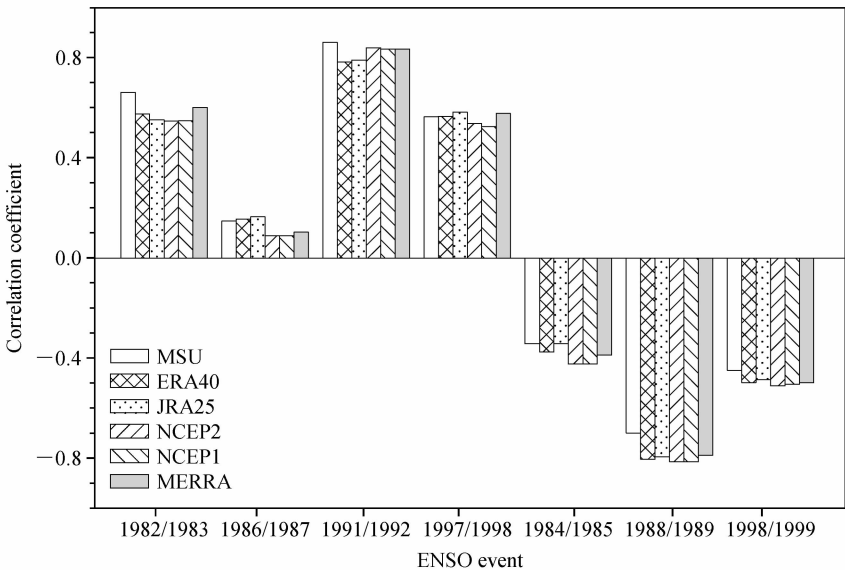


图 7 不同资料所得到的各资料根据 ENSO 事件合成的冬季平流层低层温度异常中不同事件的贡献率
Fig. 7 The pattern correlation coefficients between the wintertime temperature anomalies in the lower stratosphere in respective ENSO events and the composite values according to different datasets

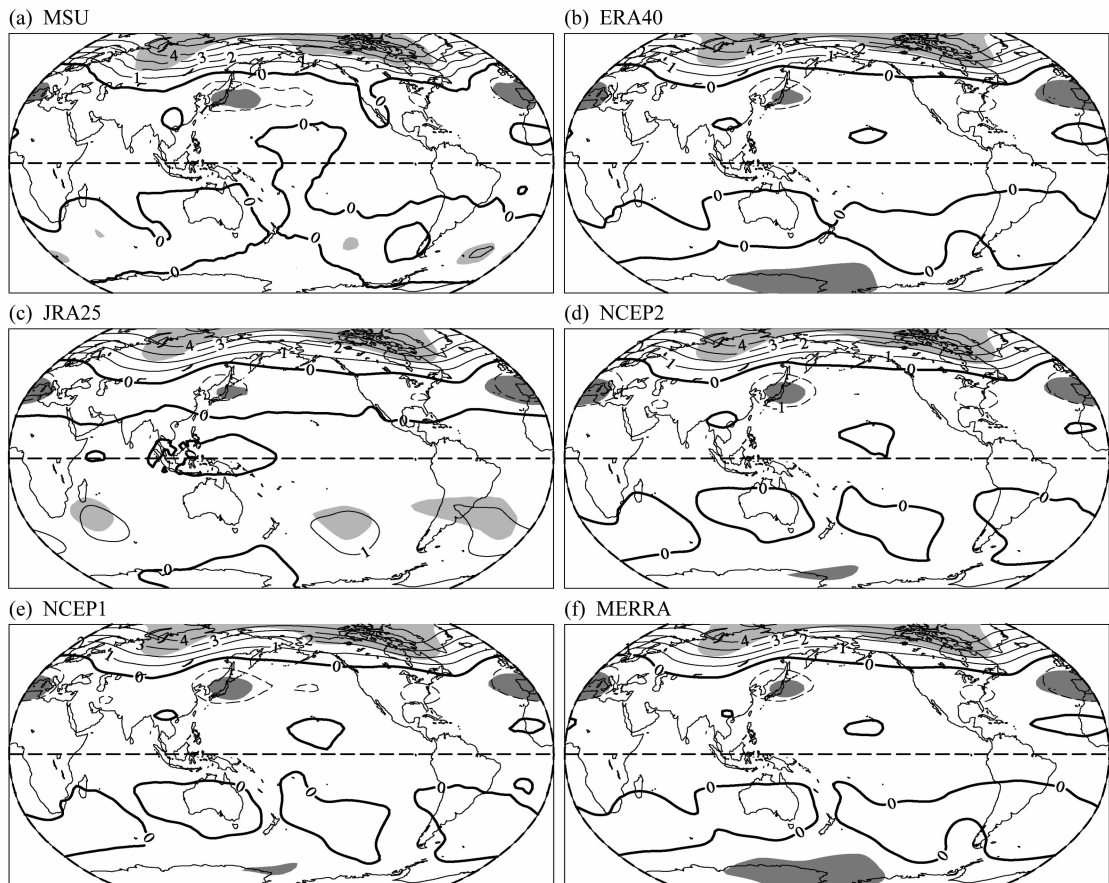


图 8 同图 6，但为非对称分量的空间分布 (El Niño + La Niña)
Fig. 8 Same as Fig. 6, but for the asymmetric component (El Niño + La Niña)

Rossby 波频散，削弱了平均流的东风动量，削弱了极涡，导致平流层经圈环流增强，使得空气在热带平流层上升，极地平流层下沉，使得热带地区平流层空气绝热冷却，产生冷异常信号。

4 结论

本文利用 1980~1999 年卫星资料 MSU 和 5 种再分析资料 (ERA-40、JRA-25、NCEP1、NCEP2、MERRA)，研究了北半球冬季对流层中层和平流层低层温度中的 ENSO 信号，揭示了伴随 ENSO 暖、冷位相出现的温度异常的对称性和非对称性特征，比较了不同资料结果的异同。主要结论如下：

(1) 各再分析资料 850~300 hPa 及 100~30 hPa 平均的温度场与 T2、T24 资料温度场 ENSO 信号合成场的相关很高，可以很好地表征 ENSO 期间卫星资料 MSU 所反映的对流层中层和平流层低层的温度变化情况。其中 ERA-40 资料的

流层中层温度信号与 MSU 最为接近，NCEP2 的平流层低层温度信号与 MSU 最为接近。在讨论南半球中高纬地区平流层 ENSO 信号时，JRA-25 资料与其他资料差异较大，使用时应慎重。其余地区各资料间差异不大。

(2) 对流层中层，伴随 ENSO 暖、冷位相出现的温度异常的对称分量，在东太平洋为典型的“哑铃型”变暖信号，太平洋—北美遥相关型非常明显，在东南太平洋以及南半球高纬地区表现为微弱的暖异常，大值中心位于赤道东太平洋和北美洲北部地区，最大值为 3℃ 左右；而副热带北太平洋、北美洲南部、亚洲地区南部以及副热带南太平洋、南大西洋地区表现为冷异常，其中副热带南、北太平洋地区以及中国西南部地区均有一大值中心，最大值在中国西南部可达 -3.2℃。该分布型主要描绘了 1982/1983、1997/1998 年 El Niño 事件和 1988/1989 年 La Niña 事件的特征。伴随 ENSO

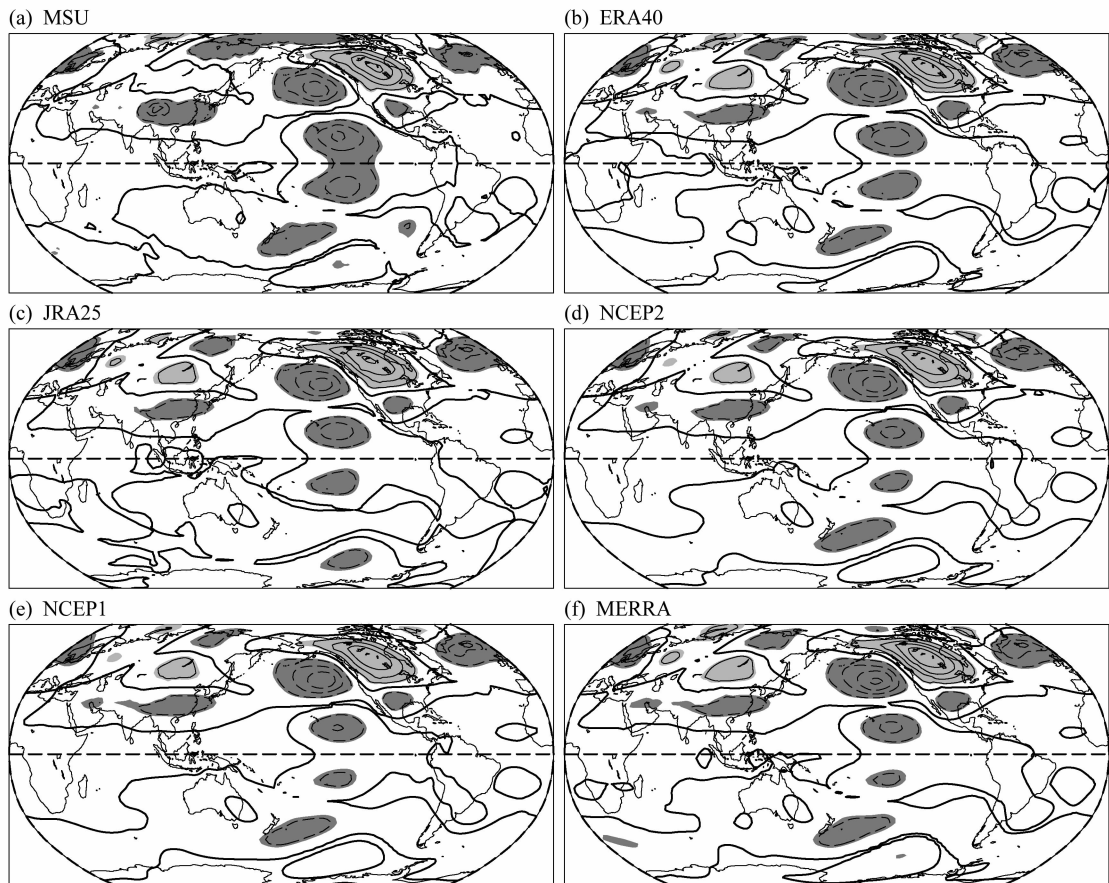


图 9 不同资料所得到的根据 ENSO 事件合成的冬季平流层低层和对流层整层温度异常的信号反相情况 (用对流层温度异常与平流层温度异常之积表示)。深、浅阴影：负、正值区

Fig. 9 The reverse signals of the wintertime temperature anomalies between the lower stratosphere and the middle troposphere composited based on ENSO events according to different datasets (denoted by the product of the anomalies in the middle troposphere and those in the lower stratosphere). The dark (light) shading areas represent the negative (positive) values

暖、冷位相出现的温度异常的非对称分量在北半球中高纬大部分地区较大。

(3) 平流层低层, 伴随 ENSO 暖、冷位相出现的温度异常的对称分量, 在东太平洋、格陵兰岛及北大西洋为显著冷异常, 最大值出现在北大西洋地区, 可达 -7°C 左右; 在北半球中高纬 30°N 以北、 $70^{\circ}\text{W}\sim 70^{\circ}\text{E}$ 之间的地区为较强暖异常, 在南半球副热带部分地区也有微弱暖异常, 最大值出现在 70°N 的俄罗斯东北部, 可达 6°C 左右。该分布型主要描绘了 1991/1992、1982/1983、1997/1998 年 El Niño 事件和 1988/1989 年 La Niña 事件。伴随 ENSO 暖、冷位相出现的温度异常的非对称分量, 只在北半球高纬度地区表现出较强的非对称性。

(4) ENSO 期间, 在东太平洋、南太平洋、北太平洋、中国南部地区、格陵兰岛以及北大西洋部

分地区, 平流层—对流层 ENSO 信号在温度变化上反号, 而北美洲北部为显著的对流层—平流层温度变化同号区域。

参考文献 (References)

Bromwich D H, Fogt R L, Hodges K I, et al. 2007. A tropospheric assessment of the ERA-40, NCEP, and JRA-25 global reanalyses in the polar regions [J]. *J. Geophys. Res.*, 112, D10111, doi: 10. 1029/2006JD007859.

Calvo N, Herrera R G, Puyol D G. et al. 2004. Analysis of the ENSO signal in tropospheric and stratospheric temperatures observed by MSU, 1979–2000 [J]. *J. Climate*, 17: 3934–3946.

Calvo N, García-Herrera R, García R R. 2008. The ENSO signal in the stratosphere [J]. *Ann. N. Y. Acad. Sci.*, 1146: 16–31.

Christy J R, Spencer R W, Braswell W D. 2000. MSU tropospheric temperatures: Dataset construction and radiosonde comparisons [J]. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 17: 1153–1170.

- Free M, Seidel D J. 2009. Observed El Niño – Southern Oscillation temperature signal in the stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D23108, doi: 10.1029/2009JD012420.
- Fu Q, Johanson C M. 2005. Satellite-derived vertical dependence of tropical tropospheric temperature trends [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L10703, doi: 10.1029/2004GL022266.
- 龚道溢, 王绍武. 1999a. 近百年全球温度变化中的 ENSO 分量 [J]. *地球科学进展*, 14 (5): 518–523. Gong D Y, Wang S W. 1999a. The influence of ENSO on global temperature during the last 100 years [J]. *Advance in Earth Science (in Chinese)*, 14 (5): 518–523.
- 龚道溢, 王绍武. 1999b. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响 [J]. *科学通报*, 44 (3): 315–320. Gong D Y, Wang S W. 1999b. The Influence of ENSO on the precipitation of global earth and China during the last 100 years [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 44 (3): 315–320.
- Hoerling M P, Kumar A, Zhong M. 1997. El Niño, La Niña, and the nonlinearity of their teleconnections [J]. *J. Climate*, 10: 1769–1786.
- Horel J D, Wallace J M. 1981. Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109: 813–829.
- 黄菲, 许士斌. 2009. 西北太平洋超强台风活动特征及其与 ENSO 的关系 [J]. *中国海洋大学学报 (自然科学版)*, 39 (5): 883–888. Huang F, Xu S B. 2009. Characteristics of super typhoon activity over western North Pacific and its relationship with ENSO [J]. *Periodical of Ocean University of China (in Chinese)*, 39 (5): 883–888.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77: 437–471.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP–DOE AMIP-II reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83: 437–472. 1631–1643
- Kiladis G N, Diaz H F. 1989. Global climatic anomalies associated with extremes in the Southern Oscillation [J]. *J. Climate*, 2: 1069–1090.
- Lau K M, Ho C H, Kang I S. 1998. Anomalous atmospheric hydrologic processes associated with ENSO: Mechanisms of hydrologic cycle – radiation interaction [J]. *J. Climate*, 11: 800–815.
- 李崇银, 李琳, 谭言科, 等. 2008. 平流层气候 [M]. 北京: 气象出版社, 402pp. Li C Y, Li L, Tan Y K, et al. 2008. *The Stratospheric Climate (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 402pp.
- Li Y, Jin R H, Wang S G. 2010. Possible relationship between ENSO and blocking in key regions of Eurasia [J]. *J. Tropical Meteor.*, 16 (3): 221–230.
- Marshall G J, Harangozo S A. 2000. An appraisal of NCEP/NCAR reanalysis MSLP data variability for climate studies in the South Pacific [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 27: 3057–3060, doi: 10.1029/2000GL011363.
- Mears C A, Schabel M C, Wentz F J. 2003. A reanalysis of the MSU channel 2 tropospheric temperature record [J]. *J. Climate*, 16: 3650–3664.
- Newell R E, Weare B C. 1976. Factors governing tropospheric mean temperature [J]. *Science*, 194: 1413–1414.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA25 reanalysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85 (3): 369–432.
- Randel W J, Garcia R R, Calvo N, et al. 2009. ENSO influence on zonal mean temperature and ozone in the tropical lower stratosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 36, L15822, doi: 10.1029/2009GL039343.
- Reid G C, Gage K S, McAfee J R. 1989. The thermal response of the tropical atmosphere to variations in equatorial Pacific sea surface temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 94: 14705–14716.
- 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 [J]. *气象学报*, 68 (3): 285–295. Ren Rongcai, Xiang Chunyi. 2010. Temporal and spatial connections of the stratospheric polar vortex oscillation to the ENSO tropical SST anomalies [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (3): 285–295.
- Ren R C, Wu Guoxiong, Cai Ming, et al. 2009. Winter season stratospheric circulation in the SAMIL/LASG general circulation model [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 26 (3): 451–464.
- Simmons A J, Jones P D, da Costa Bechtold V, et al. 2004. Comparison of trends and low-frequency variability in CRU, ERA40, and NCEP/NCAR analysis of surface air temperature [J]. *J. Geophys. Res.*, 109: D24115, doi: 10.1029/2004JD005306.
- Trenberth K E, Hoar T J. 1996. The 1990–1995 El Niño–Southern Oscillation event: Longest on record [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 23: 57–60.
- Trenberth K E, Caron J M. 2000. The Southern Oscillation revisited: Sea level pressures, surface temperatures and precipitation [J]. *J. Climate*, 13: 4358–4365.
- Trenberth K E, Caron J M, Stepaniak D P, et al. 2002. Evolution of El Niño – Southern Oscillation and global atmospheric surface temperatures [J]. *J. Geophys. Res.*, 107, 4065, doi: 10.1029/2000JD000298.
- Trenberth K E, Smith L. 2006. The vertical structure of temperature in the tropics: Different flavors of El Niño [J]. *J. Climate*, 19: 4956–4970.
- Trenberth K E, Smith L. 2009. Variations in the three-dimensional structure of the atmospheric circulation with different flavors of El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 2978–2991.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961–3012.
- Wu Bo, Li Tim, Zhou Tianjun. 2010. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western North Pacific between El Niño and La Niña [J]. *J. Climate*, 23: 4807–4822.

- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 893–905. Yu R C, Zhou T J, Li J, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 893–905.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 31, L22212, doi: 10.1029/2004GL021270.
- Yu R C, Zhou T J. 2007. Seasonality and three-dimensional structure of interdecadal change in the East Asian monsoon [J]. J. Climate, 20: 5344–5355.
- Yulaeva E, Wallace J M. 1994. The signature of ENSO in global temperature and precipitation fields derived from themicrowave sounding unit [J]. J. Climate, 13: 4358–4365.
- Zhao Y F, Li J P. 2006. Discrepancy of mass transport between the Northern and Southern Hemispheres among the ERA-40, NCEP/NCAR, NCEP-DOE AMIP-2, and JRA-25 reanalysis [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L20804, doi: 10.1029/2006GL027287.
- Zhou T J, Gong D Y, Li J, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon recent progress and state of affairs [J]. Meteorologische Zeitschrift, 18 (4): 455–467.
- Zhou T J, Zhang J. 2011. The vertical structures of atmospheric temperature anomalies associated with two flavors of El Niño simulated by AMIP II models [J]. J. Climate, 24: 1053–1070.
- 朱艳峰, 陈隆勋, 宇如聪. 2003. 中国气候异常变化与 ENSO 准四年循环的联系分析 [J]. 热带气象学报, 19 (4): 346–356. Zhu Y F, Chen L X, Yu R C. 2003. Analysis of the relationship between the China anomalous climate variation and ENSO cycle on the quasi-four-year scale [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (4): 346–356.