

文章编号: 1000-2022(2002) 02-0145-08

东亚冬季风异常的空间结构及与海陆热力差异的联系

雷永荟, 吴洪宝

(南京气象学院 大气科学系, 江苏 南京 210044)

摘 要: 对 NCEP/NCAR 再分析资料采用经验正交函数和奇异谱分析方法研究东亚冬季风异常的空间结构和时间变率, 在进行相关分析的基础上用奇异值分解方法研究东亚冬季风异常与海陆热力差异的联系。分析结果表明: 在东亚季风区内冬季风异常有明显的地理差异, 根据经向风的气候平均图及均方差图上极值中心的位置、形态, 确定三个区域。WM1、WM2、WM3 区为东亚冬季风的三个子系统, 分别位于南海、东海、日本海上。三个子系统强度的年际、年代际变率都不同。近 40 a WM3 区冬季风呈减弱趋势, 而 WM1、WM2 区冬季风没有明显的减弱趋势。不同地区海陆热力差异影响不同子系统的强度, WM1、WM2 区冬季风与热带西太平洋海温相关紧密, WM3 区冬季风与高纬度海陆热力差异相关密切。

关键词: 东亚冬季风; 变率; 空间结构; 海陆热力差异

中图分类号: P732.6 **文献标识码:** A

东亚冬季风是北半球冬季最活跃的环流系统, 它的发展与运动可以引起全球范围大气环流的变化^[1-2], 它的异常不仅带来东亚地区冷害、大风等灾害天气, 还会影响到南半球汛期的旱涝^[1]。因此研究东亚冬季风活动具有重要的科学价值和经济意义。关于东亚冬季风的研究已取得丰硕的成果, 涉猎的内容有: 强度的年际、年代际变化^[3-4], 与其他气象要素场之间关系及可能机制^[5]等。从前人的工作可以看出, 大多数学者采用某一个冬季风指数来表征东亚冬季风, 常见的冬季风指数有冬季气温、海陆气压梯度、经向风等^[6]。基于季风形成是海陆分布、大地形和行星风带变化相互作用结果^[7]的认识, 有理由认为东亚冬季风是一个系统, 它不但有强度的变化, 也有空间结构的变化, 用一个反映区域平均状况的冬季风指数来表征季风显然是不够的。另一方面, 尽管普遍认为季风的形成与海陆热力对比的季节转换有关, 但在目前的研究工作中很多是单独地研究季风与海温或与陆温、积雪的关系, 而研究季风与海陆温度对比之间关系的工作很少, 因此, 本文将从新的思路, 即将东亚冬季风分出子系统来研究东亚冬季风的空间结构、年际变率以及与海陆温差年际异常分布间的联系。

收稿日期: 2001-07-02; 改回日期: 2001-09-29

基金项目: 《国家重点基础研究发展规划》项目 G1998040901-3

第一作者简介: 雷永荟(1976-), 女, 山西介休人, 硕士生。

1 资料与方法

常用的反映东亚冬季风强度的冬季风指数是由气压场决定的,季风最早是依据风场定义的,所以直接采用风场表征季风应该更贴切。因此本文采用了 NCEP/NCAR 再分析的 10 m 高度上的经向风、表面温度和 1 000 hPa 高度场的月平均资料,以下分别简称 V 场、 T_s 场和 H 场。 T_s 场在陆地上是地表温度,在海洋上是海表温度。考虑到季风的变率与周边环境有关, V 场的范围取得比传统的东亚冬季风区稍大些,取为 $90^{\circ}\text{E} \sim 180^{\circ}\text{E}$, $0^{\circ} \sim 70^{\circ}\text{N}$ 。为了表示出海陆热力差异, T_s 场需包括更多的海洋部分,取为 $90^{\circ}\text{E} \sim 140^{\circ}\text{W}$, $0^{\circ} \sim 70^{\circ}\text{N}$ 。所有格点的网格距为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。时间取 1958—1997 年冬季 12 月及次年 1、2 月。另外本文还采用了同时期的中国 160 站气温资料。

采用经验正交函数(EOF)方法研究东亚冬季风的时空结构特征,并且采用 North 等提出的特征值样本误差估计方法确定其中有统计意义的特征向量场。用奇异谱分析(SSA)方法提取序列的倾向成分和周期成分。在进行了相关分析的基础上,用奇异值分解(SVD)方法识别 V 场和 T_s 场之间相联系的空间型,并用蒙特卡罗方法检验其结果。

2 东亚冬季风的空间分布结构特征

2.1 气候平均分布状况

为了了解东亚冬季风在 1958—1997 年的平均分布状况,首先计算了 V 场冬季气候平均值及北风极值中心轴线(图 1)。从图 1 看出,北风区(负值区)集中在 105°E 以东的洋面上,极值中心连线位于海洋一侧,且大致上平行于海陆交界线,初步反映出 V 场的气候分布与海陆分布有关,这与传统的季风概念是吻合的。值得注意的是绝对值大于 $5\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的极值中心有三个,它们分别在低纬度(112.5°E , 10°N)、中纬度(125°E , 30°N)、中高纬度(132.5°E , 45°N),这三个中心的形态也有很大的差别。从均方差图(图略)看出,年际差异最大的地区位于气候平均北风极值轴线略偏东的海区。

2.2 异常的空间结构

施能等^[8]定义的冬季风指数(I_M)在研究东亚冬季风问题中应用比较广泛,它基本上表示 $110^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 区域里平均的经向地转风距平。依据这个定义选取近 40 a 中最强(弱)的两个冬季风年做个例分析,可以发现同是强(弱)冬季风年,季风区内冬季风异常有空间结构的差异。图 2 给出了两个强冬季风指数年(1967/1968 年和 1962/1963 年)冬季对应的 V 距平场,从图上可以看出,在 $110^{\circ}\text{E} \sim 160^{\circ}\text{E}$, $10^{\circ} \sim 50^{\circ}\text{N}$ 的区域内冬季风距平有正有负,且正负分布在图 2 的 a、b 两幅图中还明显不一致。这说明强冬季风年也有季风偏弱区,且强冬季风年经向风距平的地理分布存在明显差异。弱冬季风指数年也可以得到类似结论(图略)。

将 V 的标准化距平场作 EOF 展开,得到前 6 个空间型的方差贡献率分别为 18.29 %、

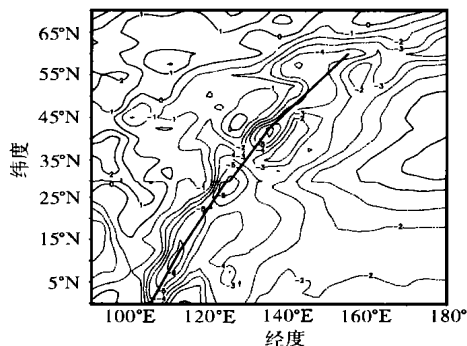


图 1 1958—1997 年冬季 V 的气候平均场及北风极值中心轴线

Fig. 1 Distribution of climate meridional wind field and the extreme value axis in winter of 1958—1997

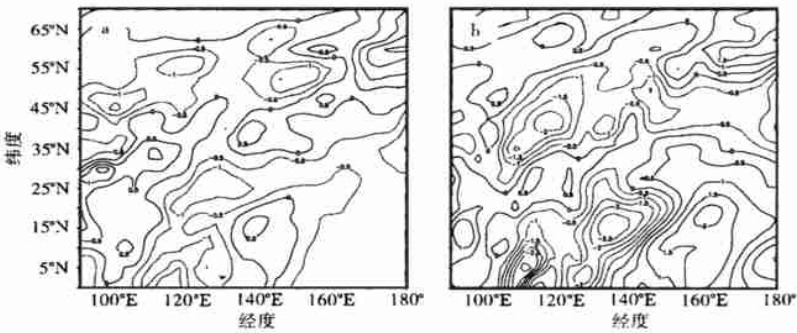


图 2 最强两个冬季风指数年对应的 V 距平场
a. 1967/1968 年; b. 1962/1963 年

Fig. 2 Anomalous meridional wind distribution in the two strongest winter monsoon years
a. 1967/1968; b. 1962/1963

13.66 %、12.86 %、10.75 %、6.19 %、4.86 %。根据 North 等的标准, 前 5 个特征值在统计上是有意义的。由于本文侧重讨论东亚冬季风异常的大尺度空间结构, 所以只分析前 2 个空间型(图 3)。图中的值是归一化的特征向量与对应特征值的均方根的乘积, 按 EOF 原理这些值也表示 V 的标准化距平与对应主成分序列间的相关系数, 因此可以从相关系数显著性的角度判断各空间型主要反映哪些地区的变率。本文 EOF 分析的样本容量是 40 a, 按相关显著性 0.05 的检验标准, 图上绝对值大于 0.3 的地区是有意义的。

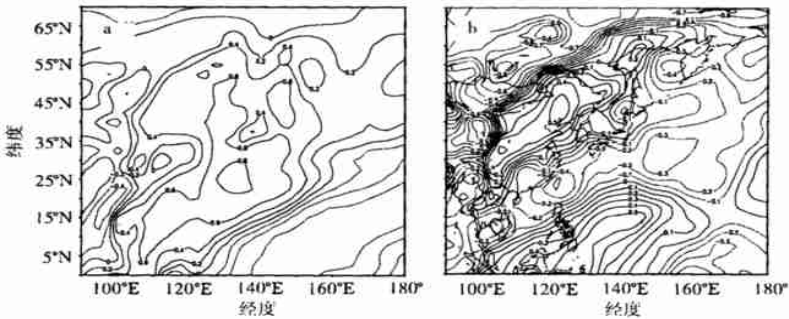


图 3 近 40 a 冬季 V 距平场的特征向量分布型
a. 第一 EOF 场; b. 第二 EOF 场

Fig. 3 Patterns of EOF of the winter meridional wind anomalies during 1958—1997
a. EOF1; b. EOF2

第一特征向量分布型(图 3a) 占总方差的 18.29 %, 从图上看: 整个季风区都呈现正相关, 这些区域 V 与第一主成分的相关系数普遍达到 0.6, 说明东亚冬季风异常的整体变化一致是主要特征, 特别是沿图 1 中北风极值轴线区, 冬季风异常符号有明显一致性。第二特征向量分布型(图 3b) 占总方差的 13.66 %, 从图上看: 在贝加尔湖附近、中国东北、台湾和印尼东北部洋面上是 4 个主要的极值中心, 中心绝对值都在 0.4 以上, 由中心向东北和西南方向都伸展出一个带状区。这 4 个区的排列是西北东南向的, 表明在同一个冬季这 4 个区冬季风异常有偏强与偏弱相间分布的特征。很有意思的是 1967/1968 年, 强冬季风异常对应的 V 距平分布

形势(图 2a)与第二特征向量分布型相似,而 1962/1963 年强冬季风异常对应的 V 距平分布形势(图 2b)与第二特征向量分布型相反。这些都充分说明东亚冬季风异常既存在地理差异又有空间相关结构。第三、四、五个特征向量分布型(图略)也反映出东亚冬季风异常存在地理差异和尺度较小的空间相关结构。

反映东亚冬季风异常变化呈一致性的第一特征向量分布型只占总方差的约 20%,而反映季风区冬季风异常变化存在地理差异的第二、三、四、五特征向量分布型在总方差中也占相当的比例,所以用整个季风区的平均异常来表征季风的异常是不够的。

根据上述分析,东亚冬季风的气候平均存在地理分布的差异,EOF 分解出东亚冬季风的年际变率有空间相关结构,即东亚冬季风在不同地理区域并不是总呈现一致变化的趋势。为了进一步确定东亚冬季风强度、形态和分布在近 40 a 的变化,并初步讨论其可能的影响机制,本文依据 V 场气候平均图及均方差图上极值中心的位置和形态给出三个关键区域:WM1 区(110~115 E, 7.5~15 N)、WM2 区(122.5~127.5 E, 25~30 N)、WM3 区(130~137.5 E, 40~45 N)作为东亚冬季风的三个子系统,它们处在不同纬度上,分别位于南海、东海和日本海上。用每个子系统包含的网格点上 V 的平均代表各个子系统东亚冬季风的强度,这也从一定的角度反映了东亚冬季风的形态和空间结构。为了进一步验证其优越性,本文分别计算了常用的东亚冬季风指数 $I_M^{[8]}$ 及三个子系统 WM1、WM2、WM3 区冬季 V 距平与冬季中国 160 站气温的相关系数。从得到的相关系数分布图(图略)上可以看到,WM1 区与中国气温的相关显著区集中在华南沿海;WM2 区与中国气温的相关显著区集中在华南、华北和内蒙古;WM3 区与中国气温的相关显著区集中在东北、新疆和内蒙古西部。三者的相关显著区之和与采用季风指数 I_M 所求的相关区范围相当,但相关最显著区域的相关系数绝对值普遍比后者大 0.2 左右,另外将东亚冬季风分出三个子系统后对相关区域的刻画也更细致。因此采用分系统的办法来描述东亚冬季风是必要且合理的。

2.3 年际、年代际变化

施能等^[3]、徐建军等^[4]认为在近 100 a 东亚冬季风稍有减弱,这个观点基于东亚冬季风是一个整体变化的系统。从上面的分析可知东亚冬季风异常有空间结构的差异,为了考察东亚冬季风年际变化的地理分布差异,采用奇异谱分析(SSA)方法对三个子系统 WM1、WM2、WM3 区的冬季风进行分解。在前几个主要的重建成分(RC)中,WM1 区和 WM2 区都只有第一、第二个 RC 满足成对周期成分条件,周期是 3 a 左右;WM3 区除了有第一、第二个 RC 满足周期为 10 a 的周期成分条件外,还有第三个 RC 满足倾向成分条件。从图上看(图略),WM1 区和 WM2 区诊断出的周期成分的振幅都从 70 年代开始减小,但 WM1 区不像 WM2 区那样保持缓慢减小。WM1 区振幅变化更复杂,在 70 年代振幅明显减小,80 年代变化不大,90 年代又出现增大趋势。WM3 区季风有减弱的长期趋势,与前人诊断的结论一致。

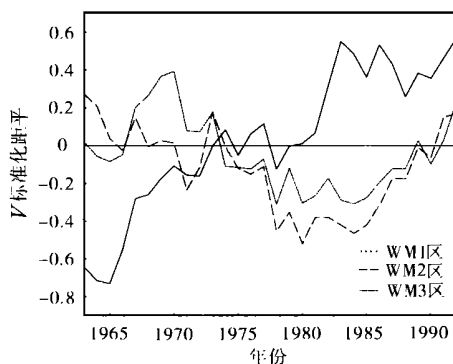


图 4 WM1, WM2, WM3 区 V 标准化距平的 11 a 滑动平均曲线

Fig. 4 The 11-year running mean curves of normalized meridional wind anomaly in WM1, WM2, WM3 regions

对三个子系统 WM1、WM2、WM3 区 V 的标准化距平做 11 a 滑动平均(图 4), 目的是进一步考察东亚冬季风区年代际变化的地理分布差异。从图 4 可看出, WM1、WM2 区和 WM3 区的年代际变化是不一致的。WM1 区的冬季风从 70 年代初到 80 年代中期缓慢增强(V 呈减弱趋势), 80 年代中期以后缓慢减弱(V 呈增强趋势); WM2 区冬季风缓慢增强的趋势出现在 60 年代中期到 80 年代中期, 80 年代中期以后冬季风也缓慢减弱, 整体趋势与 WM1 区比较吻合; WM3 区冬季风从 60 年代中期开始一直呈持续减弱趋势, 虽有小的波动, 但整体减弱趋势并没有改变, 这与前面诊断出的 WM3 区冬季风年际变化的结论一致。以上的分析说明近 40 a 只有 WM3 区的冬季风呈减弱趋势, 而 WM1 和 WM2 区的冬季风强度没有长期趋势变化。

3 东亚冬季风与同期表面温度的关系

3.1 WM1、WM2、WM3 区 V 与 T_s 场的相关结构

东亚冬季风的形成与海陆温差密切相关, 分别用三个子系统 WM1、WM2、WM3 区的平均 V 与 T_s 场求相关, 得到相关分布(图 5)。从图 5a 可以看到 WM1 区的季风与低纬度海、陆表温度相关强, 最明显的海陆对比出现在中南半岛和热带西太平洋之间; 从图 5b 可以看到 WM2 区季风与中纬度陆面温度、低纬度海表温度相关强, 最明显的海陆对比出现在华北、华南和热带西太平洋之间; 从图 5c 可以看到 WM3 区季风与中高纬度的海、陆温度相关强, 最明显的海陆对比出现在中国东北和鄂霍次克海之间。从这三张

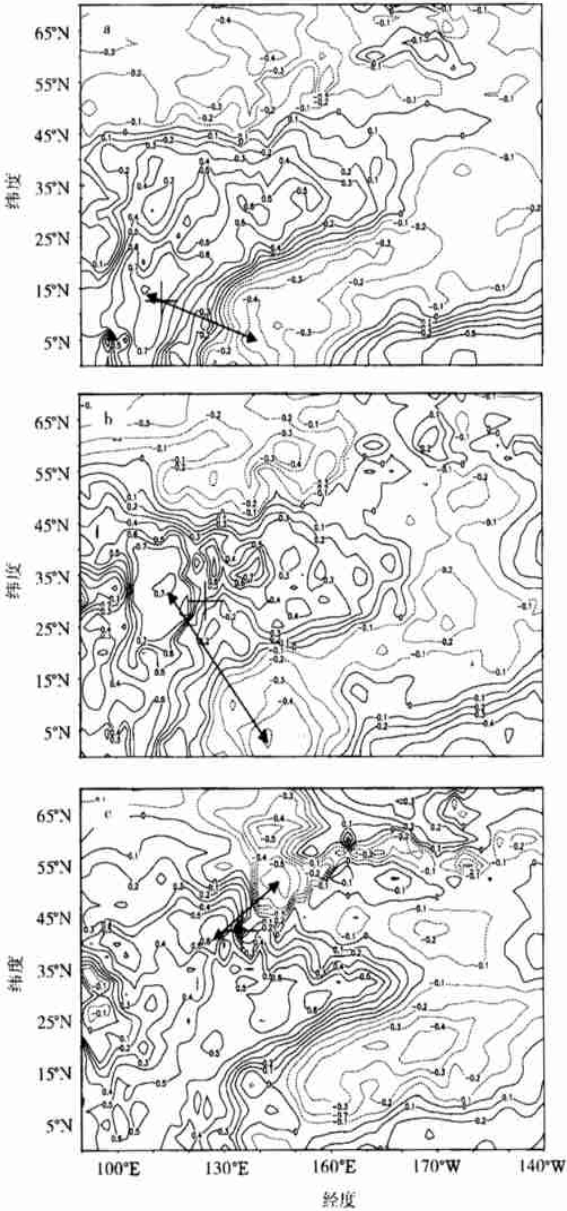


图 5 WM1(a)、WM2(b)、WM3(c) 区的平均 V 与 T_s 场的相关分布
(图中“+”表示 WM1、WM2、WM3 区的大概位置, 双箭头线标出对比显著区)

Fig. 5 Correlation coefficients between mean meridional wind over WM1(a); WM2(b); WM3(c) and T_s
(“+” for position of WM1、WM2、WM3, arrow line for obvious correlation fields)

图的差异,可以认为热带西太平洋对东亚冬季风的影响只在较低纬度,纬度偏北的季风受高纬度海陆差异影响大。

3.2 V 场与 T_s 场异常的大尺度相关型

为了进一步揭示冬季风与海表面温度之间的大尺度相关型,本文用 SVD 方法对 V 场和 T_s 场进行分解(图 6)。为检验其相关性是否显著还进行了蒙特卡罗检验,即用 V 场与随机场做 SVD,随机场由计算机产生的与 T_s 场格点数、序列长度相同的标准正态分布序列构成,通过比较 V 场与 T_s 场以及 V 场与 100 次随机场之间的协方差平方和(C^2)及各对 SVD 空间型解释协方差平方和的百分率(SCF_k),可以推断 V 场与 T_s 场的相关及单个 SVD 模态解释的协方差是否超过随机水平。根据 SVD 原理, C^2 表示两个场整体上联系紧密程度,从计算结果得到, V 场与 T_s 场的 C^2 是 104 157.9,而 V 场与 100 次随机场的 C^2 最大的为 42 520.2,可见 V 与 T_s 场整体间的联系是毋庸置疑的。比较 SCF_k 值的大小可见, V 场与 T_s 场的前 2 对 SVD 模态解释协方差平方和的百分率明显大于随机试验相应的最大值,是可信的,它们总共解释协方差平方和的 61.82 %,第 3 对略大于随机试验相应的最大值,基本可信,而从第 4 对开始已明显小于随机试验相应量的平均值,已没有统计意义了。

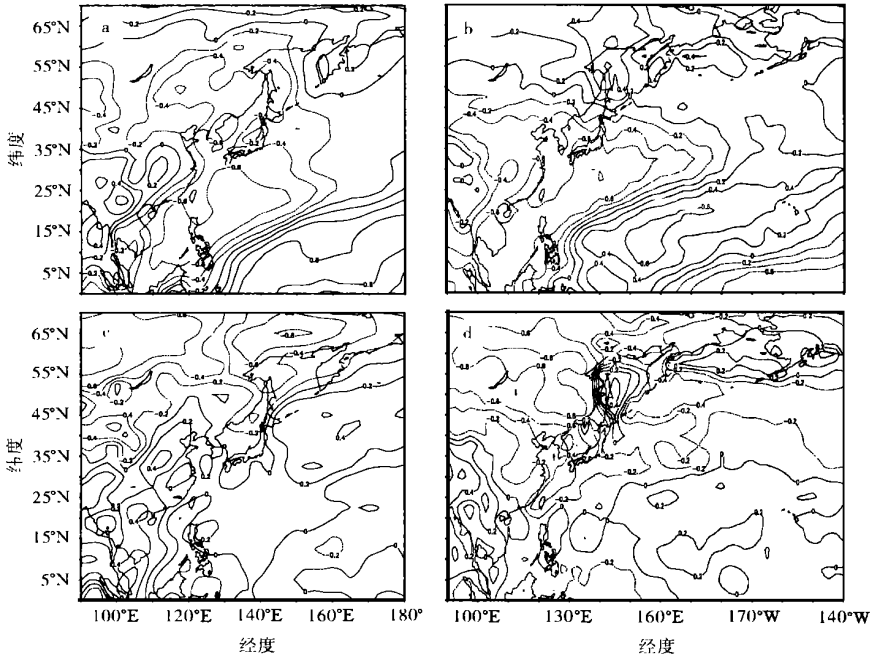


图 6 V 场与 T_s 场的前 2 对左、右异类相关图

a. 第 1 左异类; b. 第 1 右异类; c. 第 2 左异类; d. 第 2 右异类

Fig. 6 Heterogeneous correlation maps for the first and second SVD modes between meridional wind field and T_s field in winter

a. the first SVD mode of meridional wind; b. the first SVD mode of T_s ;
c. the second SVD mode of meridional wind; d. the second SVD mode of T_s .

图 6a、c 分别给出了 V 场与 T_s 场 SVD 展开的前 2 个时间系数序列的相关分布,称为第 1、2 左异类相关图;图 6b、d 分别给出了 T_s 场与 V 场 SVD 展开的前 2 个时间系数序列的相关

分布图, 称为第 1、2 右异类相关图。由图 6a、b 可以看出, 当中国大陆及近海表面温度场异常偏冷、西太平洋海温异常偏暖时, 与表面温度场异常相配合的东亚冬季风整体偏强。由图 6c、d 可以看出, 当表面温度场异常主要发生在中高纬度时, 鄂霍次克海异常偏暖、中国东北及贝加尔湖附近异常偏冷, 对应东亚冬季风在纬度偏北的地区加强、纬度偏南的地区减弱。

从上述分析看, SVD 的分析结果和三个子系统的 V 与表面温度求相关所得到的结论非常吻合。即不同区域的异常海陆温差影响不同地区的东亚冬季风子系统的异常, 将东亚冬季风作为一个只有强度变化的气候现象来描述是很不准确的。

4 结 论

(1) 东亚冬季风是一个系统, 作为一个整体它有强度的年际、年代际变化, 但是用一个指数描述的东亚冬季风强(弱) 年之间季风距平的地理分布有明显差异, 这说明用一个指数无法描述季风区内异常的空间结构。对季风区经向风作经验正交展开也可看到, 反映冬季风异常变化呈一致性的第 1 特征向量场只占总方差的 20 % 左右, 而有统计意义的其他特征向量分布型都从一定程度反映冬季风异常的地理差异。

(2) 为了讨论东亚冬季风强度、形态的变率和可能机制, 依据 V 场气候平均图及均方差图上极值中心的位置和形态, 可用 WM 1 区(110 ~ 115 E, 7.5 ~ 15 N)、WM 2 区(122.5 ~ 127.5 E, 25 ~ 30 N)、WM 3 区(130 ~ 137.5 E, 40 ~ 45 N) V 代表东亚冬季风区的三个子系统, 分别位于南海、东海及日本海上。

(3) WM 1、WM 2 区冬季风有 3 a 左右的振荡周期, 从 70 年代起冬季风异常在这两个区域强度减小; WM 3 区冬季风有 10 a 的振荡周期, 且有减弱的长期趋势。从年代际时间尺度考察, 可知在近 40 a 中, WM 1 和 WM 2 区的冬季风并没有明显的倾向特征, 只有 WM 3 区存在冬季风明显减弱的现象。

(4) WM 1、WM 2、WM 3 区作为东亚冬季风的三个子系统, 它们的异常变化是受不同区域海陆热力差异的影响。热带西太平洋的海温异常只对 WM 1、WM 2 区子系统有显著影响, 而 WM 3 区冬季风与中国东北和鄂霍次克海热力对比相关显著。

致谢: 全球表面温度资料由 NCEP/NCAR 的汪学良和朱跃建博士整理并提供, 谨致谢忱!

参考文献:

- [1] 陈隆勋, 朱乾根, 罗会邦. 东亚季风[M]. 北京: 气象出版社, 1991: 304.
- [2] 陈 隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 强弱冬季风影响的对比研究[J]. 大气科学, 1999, 23(1): 101-111.
- [3] 施 能, 鲁建军, 朱乾根. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化[J]. 南京气象学院学报, 1996, 19(2): 168-177.
- [4] 徐建军, 朱乾根, 周铁汉. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性[J]. 应用气象学报, 1999, 10(1): 1-8.
- [5] 陈 隽, 孙淑清. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 冬季风异常对全球热带海温变化的影响[J]. 大气科学, 1999, 23(3): 286-295.
- [6] Chen Longxun, Dong Min, Shao Yongning. The characteristics of interannual variations on the East Asian Monsoon [J]. J Meteor Soc Japan, 1992, 70(1B): 397-421.
- [7] 张家诚. 大气环流的季节变化和季风的科学概念[A]. 全国热带夏季风学术会议论文集[C]. 昆明: 云南人民出版社, 1982: 1-9.
- [8] 施 能, 朱乾根. 1873—1995 年东亚冬、夏季风强度指数[J]. 气象科技, 2000, 28(3): 14-18.

Spatial Structure of East Asian Winter Monsoon and Its Relationship with Sea-Land Thermal Contrast

LEI Yong-hui, WU Hong-bao

(Department of Atmospheric Sciences, NIM, Nanjing 210044, China)

Abstract: Using NCEP/NCAR reanalysis data, spatial structure and time variability of East Asian winter monsoon are discussed and relationship between East Asian winter monsoon and land-sea thermal contrast is investigated with the means of EOF, SVD and SSA. Results show that there is spatial distribution in East Asian when monsoon is anomalous. Three subsystems (WM1, WM2, WM3) are defined according to the situation and pattern of extremum centers of climate mean and the variance of meridional wind. Interannual and interdecadal variations of winter monsoon in WM1, WM2 are different from WM3. Winter monsoon in WM3 is becoming weaker in recent 40 years and the monsoons of WM1 and WM2 have a vague strengthening trend. Land-sea thermal contrast affects monsoon of different subsystems. Monsoon anomaly of subsystems WM1 and WM2 are well relative to temperature of tropical west Pacific. Monsoon anomaly of subsystem WM3 bears a close relation to the thermal contrast in high latitude.

Key words: east Asian winter monsoon; variability; spatial structure; land-sea thermal contrast