

多种东亚冬季风指数及其与中国东部气候关系的比较

张自银^{1,2}, 龚道溢¹, 胡 森¹, 雷杨娜³

(1. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;

2. 北京市气候中心, 北京 100089; 3. 陕西省气候中心, 西安 710014)

摘要: 利用 NCEP/NCAR 再分析资料及气温和降水观测资料, 对比分析了 12 种不同定义的东亚冬季风 (EAWM) 指数及其与中国东部冬季温度和降水的关系。结果显示: 多数 EAWM 指数具有较好的一致性, 同时也存在差异, 体现了不同定义的指数反映东亚冬季风整体性和局部性特征的侧重点有所不同。有 10 个 EAWM 指数均反映出近 60 年东亚冬季风呈减弱趋势, 尤其是近 30 年最为明显, 平均减弱速率达 $-0.25\sigma/10a$, 各指数均有强烈的年际变率和年代际波动。有 10 个 (8 个) EAWM 指数与我国东部冬季温度 (降水) 第 1 模态呈显著负相关; 其中西伯利亚高压指数对冬季温度年际变率方差解释率最高 (53.3%), 而对降水年际变率方差解释率最高的是对流层中高层东亚经向风指数 (50.4%)。此外, 不同 EAWM 指数与温度和降水的对应关系在 El Niño 状态、La Niña 状态有不同的变化, 表明在利用单个 EAWM 指数监测冬季气候时, 要考虑到各个指数在 ENSO 不同状态下具有的差异性参考意义。

关键词: 东亚冬季风; 年际变率; 中国东部; 温度

文章编号: 1000-0585(2012)06-0987-17

1 引言

东亚冬季风 (EAWM) 是东亚季风系统的重要组成部分, 是北半球冬季最活跃和影响我国冬季气候最重要的环流系统之一, 我国科学家历来都很重视对冬季风活动规律的认识, 并致力于提高对其变化的预测水平^[1~7]。强东亚冬季风会给我国带来低温冷害、寒潮活动频繁等灾害性天气, 相反弱冬季风常导致暖冬事件发生, 从而对人们的生产、生活环境产生深刻影响^[8,9]。此外, 东亚冬季风的强弱对同期和后期海气系统及区域气候都有着显著作用^[10~15], 冬季风的发展变化也对夏季风具有指示意义^[16]。

气候系统的年际及年代际变率是国际气候学研究的热点问题, 也是气候变化与可预测性研究计划 (CLIVAR) 的重要研究内容之一, 东亚冬季风的年际-年代际变率及其成因是我国气象学家非常关注的科学问题。已有研究发现 EAWM 自 20 世纪 80 年代以后呈明显减弱趋势^[11,17~20]。年代际气候变化是年际气候变化的重要背景, 同时也是叠加在更长期气候变化趋势上的扰动。然而值得注意的是, 在全球气候增暖和 EAWM 呈持续减弱趋势的大背景下, 不能忽视冬季风强烈年际变率增大的可能性及其可能带来的严重灾害, 例

收稿日期: 2011-05-13; 修订日期: 2012-01-18

基金项目: 地表过程与资源生态国家重点实验室开放基金资助项目 (2010-KF-06); 中国气象局气候变化专项 (CCSF-09-01); 国家科技支撑计划课题 (2007BAC29B02; 2009BAC51B05)

作者简介: 张自银 (1981-), 男, 安徽六安人, 博士, 主要从事气候变化研究。E-mail: zzy_ahgeo@163.com

如, 2007 年、2008 年冬季我国南方发生罕见的低温、雨雪、冰冻灾害天气与东亚冬季风环流系统的年际变率异常有着密切的关系^[9,21~23]; 此外, 2008 年北半球平均气温的偏低, 以及 2009 年、2010 年冬季北半球大范围持续的寒冬降雪过程, 也都与东亚季风系统的年际变率异常有关^[24,25]。

要更好地理解 EAWM 变率特征和长期趋势及其对我国的气候影响, 首先需要有能够刻画东亚冬季风活动强弱的指数。目前已经有不少学者从不同的角度定义了 EAWM 指数^[26]。东亚冬季风是一个十分复杂的系统, 不同角度的定义可能反映了构成或影响东亚冬季风的不同因素。本文的目的, 首先对已有的部分东亚冬季风指数进行对比分析, 了解各个指数之间的异同性、线性趋势和变率特征; 然后对比分析各个冬季风指数与中国东部冬季温度和降水的对应关系, 并进一步考察在赤道中东太平洋海温偏暖 (El Niño 状态)、偏冷 (La Niña 状态) 时, 不同东亚冬季风指数与中国东部冬季气候关系的稳定性特征。

2 资料来源与研究方法

本文所用资料主要有 NCEP/NCAR^[27]再分析资料, 包括逐月海平面气压场 (SLP), 近地面 (10m、1000hPa) 经向风场 (V), 温度场 (T_s), 850hPa 矢量风场 (U 、 V), 500hPa 位势高度场 (H), 300hPa 和 200hPa 纬向风场 (U), 以及中国大陆地区 160 气象站逐月温度和降水观测资料。为了消除随着纬度增大格点面积减小的影响, 本文中所有格点资料在应用之前均进行了处理, 即对原数据乘上格点中心纬度余弦值。本文中的冬季是指当年 12 月和次年 1 月、2 月共 3 个月的平均, 例如, 2000 年冬季是指 2000 年 12 月~2001 年 2 月平均。

所用到的分析方法主要有相关分析, 回归分析, 经验正交函数分析 (EOF)、多变量经验正交函数分析 (MV-EOF) 及要素场的合成分析等, 时间序列分析中还用到 Butterworth 滤波和功率谱分析等。

3 东亚冬季风指数对比

3.1 东亚冬季风指数简述

目前, 国内外科学家也已经在如何定量描述东亚冬季风强度变化方面开展了诸多有价值的研究工作 (表 1)。王宁^[26]对先前的研究工作进行了较全面的分析总结, 将 EAWM 指数的定义归纳为五类, 即海陆差异类、高压特征类、风场特征类、环流特征类和综合类 5 类, 其基本体现了 EAWM 系统从近地面到对流层中高层各个子系统的主要环流特征。Gao^[28]也对几个具有代表性的 EAWM 指数定义进行了对比分析。表 1 是本文中所分析的 12 个东亚冬季风指数列表, 对部分定义做了“ $\times (-1)$ ”的订正, 以便使各指数具有统一的意义, 即数值越大反映冬季风越强; 相反, 数值越小表示冬季风越弱。这里从近地面到对流层顶, 将主要的 EAWM 指数再做一个简要的认识。

郭其蕴^[4]较早地利用东西向 (110°E 与 160°E) 海平面气压差描述东亚冬季风强度, 之后施能等^[11]、徐建军等^[17]、Wu 等^[29]利用类似的思路定义了 EAWM 指数, 其差别在于后几者是利用标准化后的东西向海平面气压差来定义, 以消除不同格点海平面气压均方差不均匀的影响, 并且把南北跨度定义在 $20^\circ\text{N}\sim 50^\circ\text{N}$ 范围内。该类指数抓住了冬季风地面环流构成的最主要特征, 沿 110°E 与 160°E 两经度上的气压差反映了海陆热力性质差异所导致的海陆之间气压带和盛行风的季节性变化, 体现了季风概念的基本特征。西伯利亚

高压是冬季控制亚洲大陆近地面大气环流及气候要素的最重要环流系统，其强弱及位置变化对东亚地区及我国冬季气温的变化有重要影响，因此龚道溢等^[30]直接将西伯利亚高压指数用来描述东亚冬季风的强弱。西伯利亚高压强弱直接影响东亚地区寒潮爆发等冷空气活动，因此对我国及毗邻地区冬季气温有着较高的解释率^[20,30]。此外，刘实等^[7]利用西伯利亚高压和澳大利亚低压区域的平均海平面气压差来定义东亚冬季风强度，该指数是将东亚季风系统和澳大利亚季风系统的大气活动中心结合起来反映因海陆分布差异造成的东亚冬季风现象，并指出该指数与东北大部 and 西北大部冬季气温的关系密切。

表 1 东亚冬季风指数列表
Tab 1 List of the East Asian winter monsoon indices

指数	变量	表达式	订正	参考文献
I ₁	SLP	SLP (40~60°N, 70~120°E)	NO	龚道溢等 ^[20]
I ₂	SLP	SLP (20~60°N, 110°E) - SLP (20~60°N, 160°E)	NO	施能等 ^[11]
I ₃	SLP	SLP (45~70°N, 80~110°E) - SLP (0~30°S, 110~180°E)	NO	刘实等 ^[7]
I ₄	V _{10m}	V (20~60°N, 120~140°E) & (10~25°N, 110~130°E)	NO	Chen 等 ^[31]
I ₅	V _{1000hPa}	V (10~30°N, 115~130°E)	× (-1)	梁红丽等 ^[32]
I ₆	U&V _{850hPa}	U&V (25~50°N, 115~145°E)	NO	王会军等 ^[8]
I ₇	H _{500hPa}	H (35~40°N, 110~130°E)	× (-1)	崔晓鹏等 ^[18]
I ₈	H _{500hPa}	H (30~45°N, 125~145°E)	NO	孙淑清等 ^[10]
I ₉	H _{500hPa}	H (45~55°N, 75~85°E) - H (30~40°N, 130~140°E)	× (-1)	张自银等 ^[21]
I ₁₀	U _{300hPa}	U (27.5~37.5°N, 110~170°E) - U (50~60°N, 80~140°E)	NO	Jhun 等 ^[33]
I ₁₁	U _{200hPa}	{ [U (30~35°N, 90~160°E) - U (50~60°N, 70~170°E)] + [U (30~35°N, 90~160°E) - U (5°S~10°N, 90~160°E)] } / 2	NO	Li 等 ^[34]
I ₁₂	U _{850&200hPa} & SLP	(U _{850hPa} -U _{200hPa}) (0~10°N, 100~130°E) + (SLP (10~50°N, 160°E) - SLP (10~50°N, 110°E))	× (-1)	祝从文等 ^[35]

冬季东亚地区近地面至对流层中下层为盛行偏北风，Chen 等^[31]利用 20~60°N、120~140°E 和 10~25°N、110~130°E 范围内地面经向风平均值 (V) 定义冬季风指数。类似地，梁红丽等^[32]利用 10~30°N、115~130°E 范围内 1000hPa 上平均经向风定义 EAWM 指数，Ji 等^[36]将 10~30°N、115~130°E 区域内 1000hPa 上平均经向风定义为 EAWM 指数。而王会军等^[8]将 25~50°N、115~145°E 范围内 850hPa 上平均的矢量风场 (U、V) 定义为 EAWM 指数。此外布和朝鲁等^[13]、乔云亭等^[37]也定义了类似的冬季风指数，只是区域范围和风场选取上存在差别。这些从风场特征角度出发定义的冬季风指数，主要考虑了西伯利亚高压所产生的北风分量的变率，直观地强调了东亚冬季风强弱对低空或近地面风场的影响，因此对我国冬季气温变化也有着较好地体现。

孙淑清等^[10]利用 30~45°N、125~145°E 区域内 500hPa 位势高度场平均值定义为东亚冬季风指数，随后崔晓鹏等^[18]、晏红明等^[38]、曾琮等^[39]采用了类似的方法定义了 EAWM 指数并应用于诸多方面的研究，只是所选范围上略有差别。张自银等^[21]利用 500hPa 位势高度场上 (45~55°N、75~85°E) 与 (30~40°N、130~140°E) 两个区域内高度场平均值之差来描述东亚地区冬季经向风强度，其结果表明该经向风指数对中国南方冬季降水变化具有较高的解释率。该类定义的核心主要是 500hPa 位势高度场上东亚大槽

的变化,东亚大槽的强弱变化与东亚冬季风强度有密切关系,东亚大槽的加深能诱导地面蒙古高压冷空气的向南爆发。在对流层上层,Jhun等^[33]将(27.5~37.5°N、110~170°E)与(50~60°N、80~140°E)两区域内300hPa标准化的纬向风之差定义为东亚冬季风指数,该指数反映了对流层高层与西风急流相对应的经向风切变。类似地,最近Li等^[34]利用200hPa纬向风场上几个选定区域((30~35°N、90~160°E),(50~60°N、70~170°E),(5°S~10°N、90~160°E))构建了一个新的东亚冬季风指数。这两个指数均通过对流层上层风切变强弱变化来反映东亚冬季风的强度,该类指数强调了冬季风活动的高空动力学特征。此外,穆明权等^[40]尝试同时利用海平面气压、近地面气温和经向风、500hPa位势高度来描述EAWM的年际变率活动;祝从文等^[35]将东西向海平面气压差与低纬度高、低层纬向风切变相结合,定义了东亚季风指数用来反映东亚地区冬、夏季风的变化,是一个较为综合性的东亚季风指数。

3.2 单个东亚冬季风指数与东亚冬季风系统

东亚冬季风是一个复杂的气候系统,其组成成分众多,从地面到高空主要环流要素有:海平面气压场上主要表现为西伯利亚高压和阿留申低压两大活动中心,近地面至对流层中下层为盛行偏北风气流,在500hPa位势高度场上有明显的东亚大槽活动,在对流层中上层为西风气流所控制。整体上来看,冬季风系统从地面到对流层顶具有很强的斜压性结构,表现为很强的垂直风切变和冷平流活动。各要素彼此之间的相互联系、相互影响,共同构成了东亚冬季风的复杂性。不同角度定义的EAWM指数可能只反映了东亚冬季风系统的某一方面。

Wang等^[41,42]利用多变量经验正交函数分析方法(MV-EOF)研究了东亚夏季风系统各要素的整体性特征,这里利用该方法来简要考察东亚冬季风系统主要组成要素的协同变化关系。具体做法是:对表面温度场(T_s)、海平面气压场(SLP)、850hPa风场(U_{850} , V_{850})、500hPa位势高度场(H_{500})以及200hPa纬向风场(U_{200})共6个要素场做MV-EOF分解,分析区域是20°N~60°N、90°E~150°E,分析时段是1948/49~2010/11年的冬季。结果表明,前4模态方差贡献率分别为23.2%、15.3%、10.2%和9.1%,图1为各要素前两个主要空间模态分布图。MV-EOF分解第1模态可以视为最典型东亚冬季风系统各要素空间配置型态,反映了东亚冬季风整体性的最典型特征。由图1a、b可以看出,对流层中高层 U_{200} 场上东亚急流加强、 H_{500} 场上东亚大槽加深,伴随着中高层的流场特征,近地面850hPa风场上盛行偏北风,西伯利亚-蒙古高压偏强,对应的东亚大部分地区温度偏低,而在鄂霍次克海及孟加拉湾地区温度偏高,总体上从西南至东北呈“+、-、+”的“三极”型态,其中东海、黄海、朝鲜半岛、日本及其以南太平洋海域为低温中心。MV-EOF分解第1模态所表现的各要素场的空间配置,与Yang等^[43]指出的当东亚急流偏强时东亚大槽加深,有利于低层冷空气南下导致南方低温的现象相一致。MV-EOF分解第2模态(图1c、d)与第1模态有着明显差别,在对流层高层 U_{200} 风场上,相对于气候态的东亚急流分布^[44],其强度偏弱、位置偏南,伴随着对流层中层在贝加尔湖上空有明显的异常阻塞活动,近地面层异常北风且从东北向西南部延伸,导致我国西南地区及孟加拉湾东北部地区降温明显。MV-EOF分解的第3、第4模态各要素场空间分布也各不相同(图略)。总之,东亚冬季风各构成要素之间有着密切的协同变化关系,同时又有着各自特征,各要素时空变化关系复杂。前4个主模态(方差贡献率达57.8%)基本能表征东亚冬季风系统变率的综合性特征,其中第1模态是对最典型东亚冬

季风特征的反映。

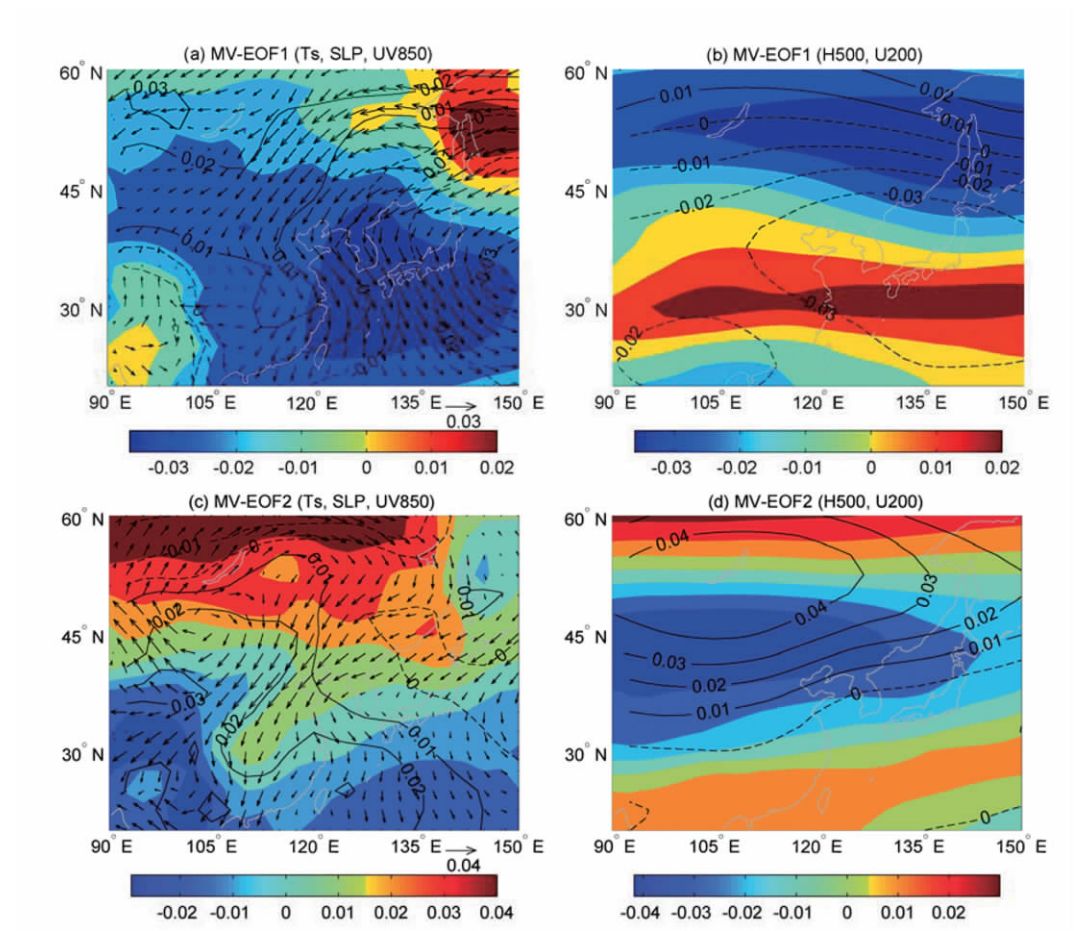


图 1 东亚冬季风 MV-EOF 分解第 1 模态 (a、b) 及第 2 模态 (c、d)
(图 a、c 中, 阴影为表面温度场, 等值为海平面气压场, 矢量为 850hPa 水平风场; 图 b、d 中, 阴影为 200hPa 纬向风场, 等值线为 500hPa 位势高度场)

Fig. 1 Spatial patterns of the first (a, b) and second (c, d) MV-EOF modes of the East Asian winter monsoon

(In Fig. 1a and Fig. 1c, the color shading denotes for surface temperature, the isolines for sea level pressure and the vectors for winds at 850hPa; in Fig. 1b and Fig. 1d, the color shading denotes for zonal winds at 200hPa and the isolines indicate geopotential height at 500hPa.)

表 2 给出了 12 个 EAWM 指数同东亚冬季风 MV-EOF 分解前 4 模态时间系数 (PC1、PC2、PC3、PC4) 的相关系数。统计表明, 12 个 EAWM 指数与 PC1 均为正相关, 相关系数最大、最小和平均值分别为 0.91 (I_8)、0.13 (I_6) 和 0.64; 与 PC2 相关系数变化范围为 -0.37 (I_3) \sim 0.6 (I_{12}), 平均值为 0.08; 与 PC3 相关系数变化范围为 -0.36 (I_1) \sim 0.51 (I_6), 平均值为 0.20; 与 PC4 相关系数变化范围为 -0.38 (I_8) \sim 0.39 (I_1), 平均值为 -0.07 。可以看出, 不同定义的 EAWM 指数与各主成分相关系数均有差异。除 I_6 和 I_{12} 外, 其余 10 个指数均与 PC1 达到了 0.1% 的显著性水平, 而 I_{12} 与

PC2 相关系数达 0.60 (0.1%显著性水平, 简记为 sig. 0.1%), 同时 I_3 与 PC3、PC4 均达到 1%显著负相关。结合各指数同时与六个要素场的相关系数分布 (图略), 可以看出不同定义的 EAWM 指数对东亚冬季风系统整体性及其各构成要素时空变率的刻画能力是不同的, 各指数在反映东亚冬季风系统的整体性、某一个或几个方面时所具有的优势是不同的, 因此需要针对不同的研究内容选用不同的定义。值得强调的是, 本文的目的不是要新建一个指数, 但是 MV-EOF 分解的第 1 模态体现了最典型的东亚冬季风特征, 其时间系数 PC1 (记为 MV-PC1) 在一定程度上反映了典型东亚冬季风系统的逐年变率, 因此在后面部分分析中也把 MV-PC1 作为一个参考性指数进行对比。

表 2 各 EAWM 指数与 MV-EOF 分解前四模态时间系数的相关系数
Tab 2 Correlation coefficients of the EAWM indices and the first four PCs from MV-EOF

	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}
PC1	0.68	0.73	0.66	0.71	0.64	0.13	0.89	0.91	0.66	0.78	0.72	0.21
PC2	-0.01	0.33	-0.37	0.20	0.16	-0.02	-0.14	-0.03	0.43	-0.05	-0.23	0.60
PC3	0.51	0.49	0.31	0.32	0.25	-0.36	-0.19	-0.01	0.12	0.42	0.39	0.16
PC4	0.39	-0.08	0.28	-0.03	0.22	-0.34	-0.32	-0.38	-0.17	-0.34	-0.06	0.01

注: 自由度为 58, 5%、1%、0.1%显著性水平的相关系数阈值分别是 0.25、0.33、0.41。

3.3 近 60 年东亚冬季风变率与趋势分析

图 2 是基于 NCEP/NCAR 再分析资料得到的 12 个 EAWM, 同时也给出了东亚冬季风 6 个要素场 MV-EOF 分解第 1 模态的时间序列 MV-PC1。由图可知, 近 60 年各个 EAWM 指数均表现出明显的年际变率和年代际波动特征, 利用功率谱分析方法考察了各

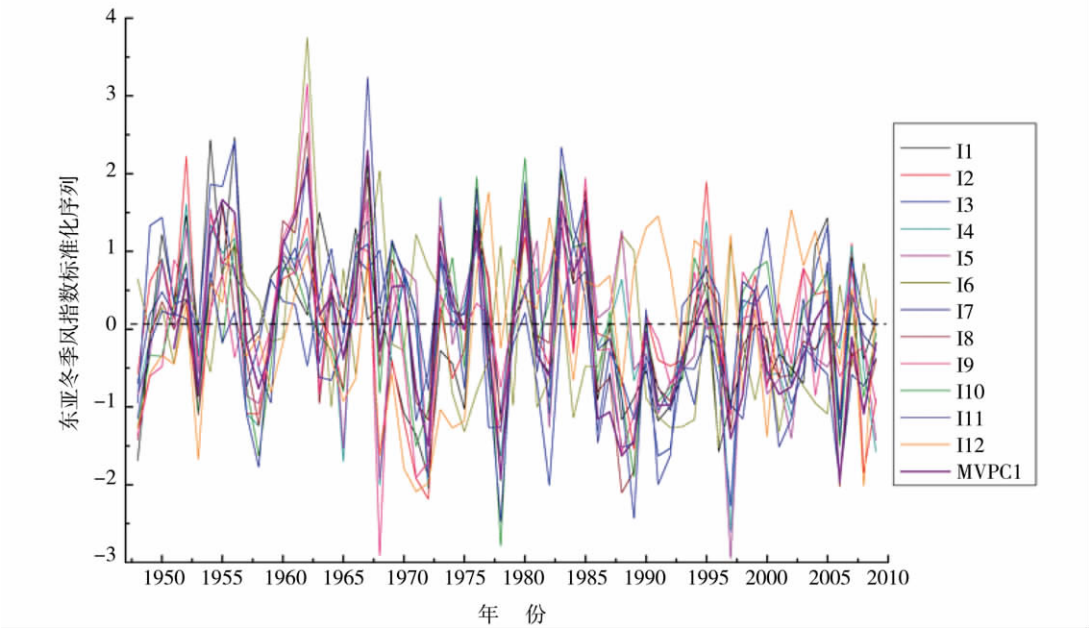


图 2 12 种不同定义的东亚冬季风指数标准化值及 MV-PC1 序列
Fig. 2 Time series of the twelve normalized EAWM indices and MV-PC1

个指数的变率周期情况（图略），结果表明，尽管各个 EAWM 指数突出的年际、年代际变率周期都不一致，但整体上来看，较突出的年际周期主要集中在 $\sim 2\sim 4\text{a}$ 、 $\sim 5\sim 8\text{a}$ ，而较突出的年代际周期有 $\sim 13\text{ a}$ 、 $\sim 20\text{a}$ 。各个 EAWM 指数之间即有相同的变化同时又有不一致的地方，例如多数 EAWM 指数都反映出 1980s 后期以来以负位相为主，同时多数指数也反映出了 1962、1967、1997、2005 等异常强、弱冬季风年份。用相关系数来判断各个 EAWM 指数之间的一致性程度，结果如表 3 所示。所分析的 12 个 EAWM 指数之间的 66 个相关系数中，正相关系数有 58 个，变化范围为 $[0.01, 0.97]$ ，平均值为 0.51，负相关系数有 6 个，另有 2 个相关系数为 0。各个 EAWM 指数之间相关系数 > 0.33 （sig. 1%）的有 46 个。各个指数与 MV-PC1 的相关性在上一节已经讨论过了，这里不再赘述。总体上来看，12 个 EAWM 指数之间具有较好的一致性变率，但同时也存在较大差异，反映了不同定义的指数对东亚冬季风系统整体性、某一方面或某几个方面的描述能力是有差别的。

表 3 中还给出了各个 EAWM 指数不同时段线性趋势。在整个时段（1948~2009）有 10 个 EAWM 指数表现为减弱趋势，减弱速率变化范围为 $-0.01\sigma/10\text{a}$ 至 $-0.23\sigma/10\text{a}$ ，平均为 $-0.13\sigma/10\text{a}$ ，同时有一个指数表现为增强趋势（ I_{12} ），另有一个指数长期趋势为 0（ I_{10} ）。整体上来看，大多数 EAWM 指数都反映出过去近 60 年东亚冬季风活动呈减弱趋势。同时还计算了各个 EAWM 指数在 1971~2000 年、1980~2009 年、2000~2009 年等 3 个时段的线性趋势，其中 1971~2000 时段有 6 个 EAWM 指数呈减弱趋势，减弱速率变化范围为 $-0.11\sigma/10\text{a}$ ~ $-0.4\sigma/10\text{a}$ ，平均速率为 $-0.22\sigma/10\text{a}$ ，同时也有 6 个指数表现出增加趋势，增加速率为 $0.03\sigma/10\text{a}$ ~ $0.35\sigma/10\text{a}$ ，平均速率为 $0.1\sigma/10\text{a}$ 。1980~2009 时段有 11 个 EAWM 指数呈减弱趋势，减弱速率变化范围为 $-0.01\sigma/10\text{a}$ ~

表 3 EAWM 指数之间的相关系数及线性趋势（单位： $\sigma/10\text{a}$ ）
Tab 3 Correlation coefficients and linear trends of each EAWM index

		I_1	I_2	I_3	I_4	I_5	I_6	I_7	I_8	I_9	I_{10}	I_{11}	I_{12}
相 关 系 数	I_1	1.00	0.71	0.74	0.55	0.47	0.01	0.44	0.49	0.34	0.63	0.53	0.31
	I_2		1.00	0.48	0.76	0.66	-0.08	0.51	0.68	0.63	0.73	0.64	0.51
	I_3			1.00	0.59	0.55	0.02	0.49	0.47	0.14	0.48	0.54	-0.17
	I_4				1.00	0.97	0.00	0.55	0.64	0.56	0.61	0.62	0.12
	I_5					1.00	0.02	0.54	0.58	0.52	0.54	0.55	0.05
	I_6						1.00	0.22	0.06	0.00	-0.16	-0.07	-0.15
	I_7							1.00	0.88	0.60	0.66	0.60	0.09
	I_8								1.00	0.78	0.76	0.76	0.20
	I_9									1.00	0.62	0.53	0.38
	I_{10}										1.00	0.87	0.31
	I_{11}											1.00	-0.01
	I_{12}												1.00
线 性 趋 势	1948~2009	-0.15	-0.09	-0.19	-0.12	-0.13	-0.19	-0.23	-0.13	-0.06	0.00	-0.01	0.14
	1971~2000	0.04	0.20	-0.11	-0.14	-0.26	-0.22	-0.40	-0.19	0.03	0.04	0.06	0.35
	1980~2009	-0.01	-0.16	0.23	-0.23	-0.33	-0.10	-0.51	-0.41	-0.34	-0.29	-0.13	-0.21
	2000~2009	0.79	-0.55	0.45	1.07	1.28	1.19	-0.22	-0.91	-0.14	-0.95	-0.65	-1.04

$-0.51 \sigma/10a$, 平均为 $-0.25 \sigma/10a$, 另有一个指数 (I_3) 表现出增加趋势。而近 10 年 (2000~2009), 分别有 5 个 EAWM 指数表现出增加趋势和有 7 个指数呈减弱趋势, 增加速率变化范围为 $0.45 \sigma/10a \sim 1.28 \sigma/10a$, 平均增加速率为 $0.96 \sigma/10a$, 减弱速率的变化范围为 $-0.14 \sigma/10a \sim -1.04 \sigma/10a$, 平均减弱速率为 $-0.64 \sigma/10a$ 。此外, 还计算了 MV-PC1 的线性趋势, 其线性趋势同多数 EAWM 指数一样, 过去 60 年整体上呈明显减弱趋势为 $-0.24 \sigma/10a$, 1971~2000 和 1980~2009 也呈明显减弱趋势, 分别为 $-0.19 \sigma/10a$ 和 $-0.26 \sigma/10a$, 而近 10 年没有明显的线性趋势 ($0.001 \sigma/10a$)。综合来看, 大多数 EAWM 指数都反映了自 1950s 以来东亚冬季风活动的长期减弱趋势, 尤其是近 30 年 (1981~2009) 最为明显 (平均速率为 $-0.25 \sigma/10a$)。而近 10 年 EAWM 指数的变化趋势中, 有 5 个指数为强烈的增强趋势 (平均速率为 $0.96 \sigma/10a$), 同时有 7 个指数为减弱趋势 (平均速率为 $-0.64 \sigma/10a$)。值得注意的是, 增强趋势的 EAWM 指数主要为海面平气压、近地面风场定义的, 而减弱趋势的 EAWM 指数主要为 500hPa 高度场、对流层顶纬向风场定义的 (I_2 除外), 即大致可以概括为近地面要素场定义的 EAWM 指数近 10 年表现为强烈的增强趋势, 而对流层中高层要素定义的 EAWM 指数近 10 年依然表现为明显的减弱趋势。这是否反映了近 10 年来东亚冬季风系统中对流层中高层要素为持续减弱趋势的同时, 近地面要素发生了增强的变化趋势? 有趣的是, 可视为反映东亚冬季风整体性演变特征的 MV-PC1 序列近 10 年的线性趋势基本为零, 这是否是因为冬季风系统近地面层增强而高层减弱的中和效应? 对这些现象及其成因机制还有待进一步研究。

4 东亚冬季风指数与中国东部冬季温度和降水

4.1 近 60 年中国东部冬季温度和降水时空变化特征分析

之所以非常重视东亚冬季风的变化, 是因为其与中国及周边地区的气候变率有着密切的联系^[2,4,36,37], 这里重点分析各个 EAWM 指数对中国东部地区冬季温度和降水的对应关系, 并考察当 ENSO 系统处于冷、暖状态时, 各 EAWM 指数与中国东部地区冬季温度和降水的对应关系是否稳定。

图 3 左列为中国东部 ($105^\circ E$ 以东) 120 站冬季温度距平 EOF 分解的前 3 模态, 分析时段为 1951/1952~2009/2010, 共 59 个冬季, 右列为冬季降水量距平 EOF 分解的前 3 模态。可以看出温度 EOF1 (记为 T-EOF1, 方差贡献率为 67.0%) 反映了中国东部冬季温度变化的整体一致性 (图 3a), 其对应的第 1 主分量 PC1 (记为 T-PC1, 图 4a) 呈明显增温趋势 (T-PC1 与东部 120 站平均冬季温度序列相关系数为 0.99, 而近 60 年中国东部 120 站平均的温度序列增温速率为 $0.34^\circ C/10a$), 这个 EOF 模态可能反映了全球变暖对中国东部整体的一致性影响。温度 EOF2 (T-EOF2, 方差贡献率 13.6%) 表现为东北地区与我国东部南方的强烈对比 (图 3b), 该模态即表现为当东北地区偏冷 (暖) 时我国南方偏暖 (冷), 其对应的第 2 主分量 PC2 (T-PC2, 图 4b) 也呈增加趋势, 可能说明了近 60 年来冬季温度变化出现该模态的概率也有增加趋势。温度 EOF3 (T-EOF3, 方差贡献率 4.1%) 表现为东北、中原和东南沿岸地区的“一、+、-”分布格局 (图 3c), 其对应的时间系数 PC3 (T-PC3, 图 4c) 有弱降低趋势。降水的前 3 模态也具有类似特征, 降水 EOF1 (P-EOF1, 方差贡献率 28.9%) 也反映了冬季降水的一致性 (图 3d), 即整个中国东部冬季降水偏多或偏少, 其对应的第 1 主分量 PC1 (P-PC1, 图 4d) 整体的长期趋势不明显 (降水第 1 模态时间系数 PC1 与东部 120 站标准化降水序列平均值相关系数为 0.97),

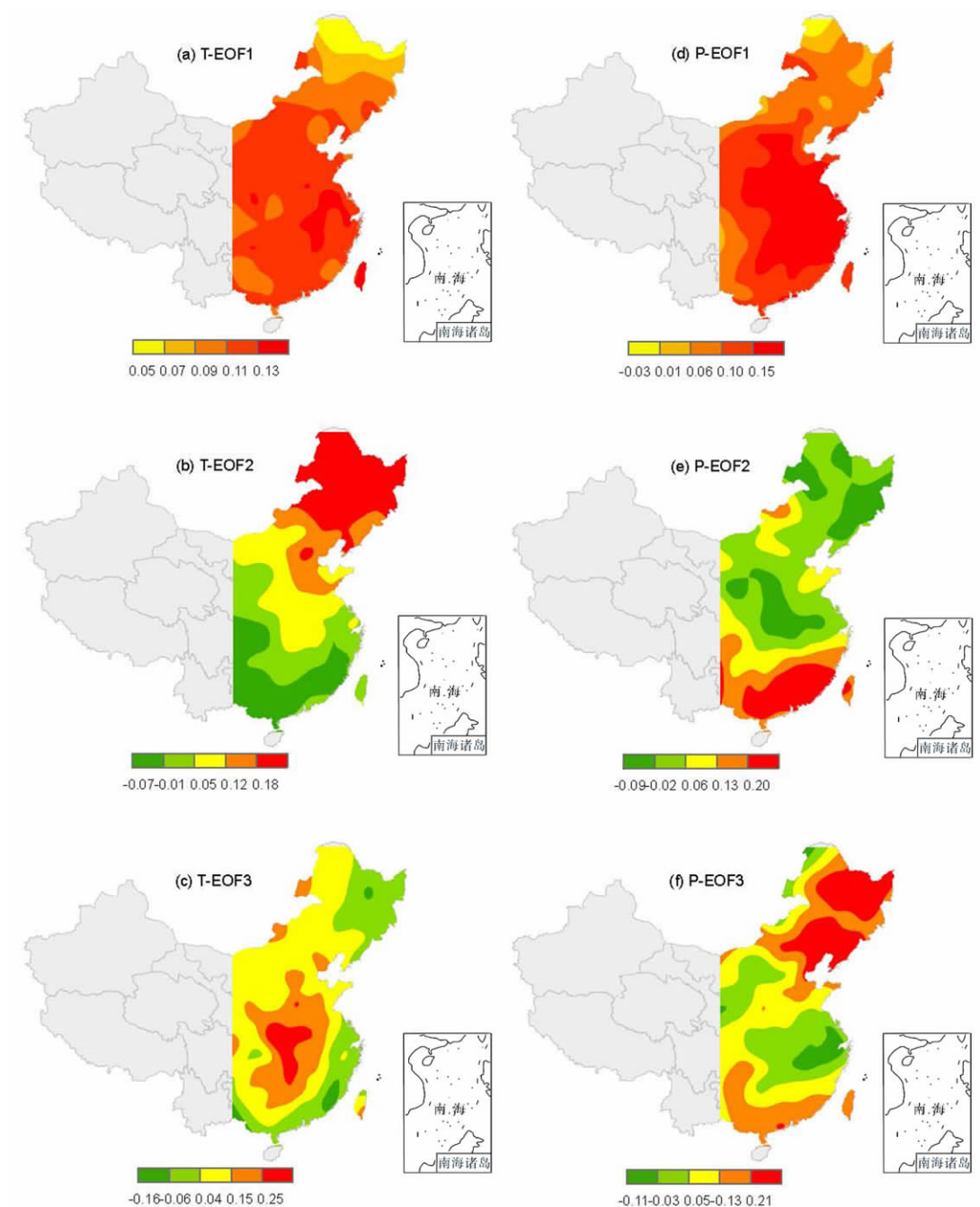


图 3 中国东部冬季平均温度（左）、降水量（右）EOF 分解前 3 模态

Fig. 3 The first three eigenvectors of temperature (left) and precipitation (right) EOF analysis

可以看出其自 1980s 中期以来 P-PC1 年际变率增强。降水 EOF2 (P-EOF2, 方差贡献率 10.8%) 也表现为长江流域以南和以北的强烈对比 (图 3e), 降水 EOF3 (P-EOF3, 方差贡献率 8.2%) 华南、长江中下游、华北东北地区的“+、-、+”分布格局 (图 3f), 降水的第 2、3 主分量长期趋势均很弱 (图 4e、f)。总之, 温度和降水的第 1 模态反映了

整体性变化特征,而第2、第3模态则是对温度、降水区域性变化特征的反映。下面通过相关和回归分析来考察12个EAWM指数对中国东部冬季温度和降水变化的对应关系。

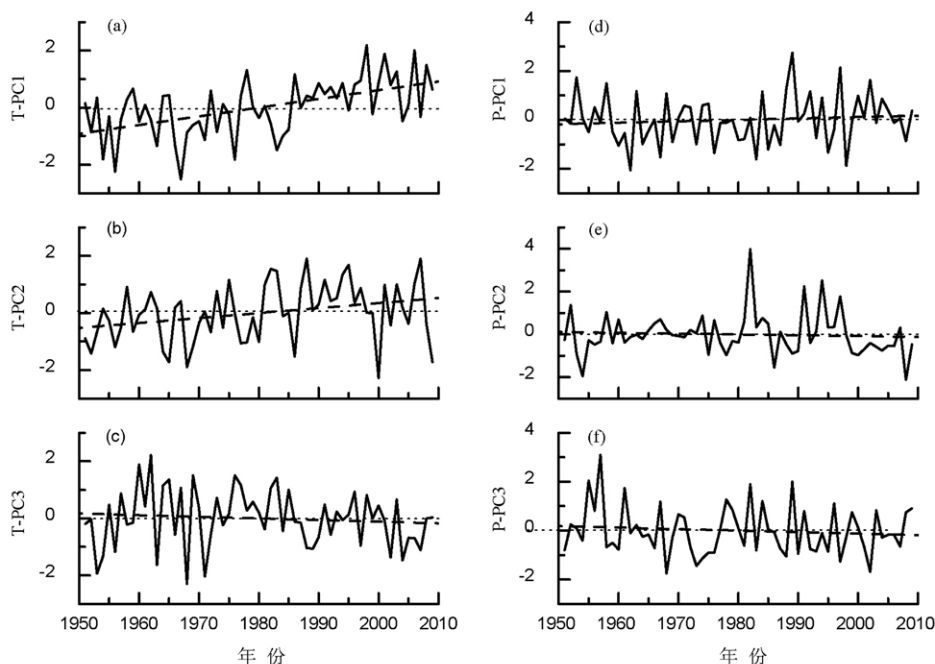


图4 温度(左)、降水量(右) EOF分解前3模态对应的时间系数(短虚线为整体趋势线)

Fig 4 Time coefficients (PC) of the first three eigenvectors for temperature (left) and precipitation (right)

4.2 东亚冬季风指数与中国东部冬季温度和降水

表4是1951/1952~2009/2010共59个冬季的各EAWM指数与中国东部冬季温度和降水前三模态时间序列的相关系数列表。为了减少序列中长期趋势和年代际周期对相关性的影响,同时计算了EAWM指数与温度、降水序列之间短于10年的高频相关系数(即反映了年际变率的对应关系),如表中方括号内所示。

由表4可知,所分析的12个EAWM指数与中国东部冬季温度第1模态所对应的时间序列T-PC1均为负相关,负相关表示当东亚冬季风增强(减弱)时,对应着中国东部冬季温度整体偏低(偏高)。与T-PC1原始相关系数和高频相关系数均达到0.1%显著性水平(即 $|r| > 0.41$)的EAWM指数有9个,分别是 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_7 、 I_8 、 I_{10} 和 I_{11} (其原始相关系数为-0.40,接近-0.41)。其中,原始相关系数最高的 I_7 (相关系数为-0.74),其次为 I_1 (相关系数为-0.62),而年际变率的高频相关系数中, I_7 略低为-0.63, I_1 相关性增强为-0.73。由前文可知, I_1 是利用西伯利亚高压强度来反映东亚冬季风强弱的, I_7 是利用500hPa位势高度场来刻画东亚冬季风指数的,可以看出经过区域挑选的地面西伯利亚高压指数和500hPa位势高度场指数均对我国东部地区冬季温度第1模态的逐年变化具有很高的方差解释率。在年际变率尺度上, I_1 单个指数对T-PC1的方差解释率达53.3%,其余8个EAWM指数对T-PC1的方差解释率基本在25%~40%左右。 I_6 、 I_9 和 I_{12} 三个指数与T-PC1的相关性较低,但同时注意到, I_{12} 与T-PC1的高频相关系数也达到-0.48(sig. 0.1%)。与温度PC2具有较高相关系数

的 EAWM 指数为 I_3 、 I_4 、 I_5 和 I_{12} ，其中高频相关较一致的是 I_4 、 I_5 。与温度 PC3 达 0.1% 显著相关的 EAWM 指数有 I_7 、 I_8 和 I_9 ，而且三者的原始相关系数和高频相关系数基本一致，表明该 3 个 EAWM 指数与中国东部冬季温度出现第 3 模态的对应关系密切而稳定，其中相关性最高的为 I_9 ，原始相关和高频相关系数分别为 0.74、0.76。同时，考察了 MV-PC1 与东部温度前 3 模态时间系数的相关，可以看出 MV-PC1 与 T-PC1 呈显著负相关，原始和高频相关系数分别为 -0.72、-0.69；与 T-PC3 也达到了显著的正相关，而与 T-PC2 相关性接近于 0。可以看出 MV-PC1 对中国东部温度整体变率具有较高的方差解释率（51.8%、47.6%）。

表 4 EAWM 指数与中国东部冬季温度和降水相关系数
Tah 4 Correlation coefficients of each EAWM index and temperature and precipitation

	温度			降水		
	T-PC1	T-PC2	T-PC3	P-PC1	P-PC2	P-PC3
I_1	-0.62 [-0.73]	-0.10 [0.01]	-0.02 [-0.06]	-0.21 [-0.17]	0.00 [0.07]	-0.07 [-0.32]
I_2	-0.46 [-0.64]	0.17 [0.18]	0.29 [0.32]	-0.47 [-0.51]	0.08 [0.08]	-0.10 [-0.18]
I_3	-0.57 [-0.54]	-0.25 [-0.05]	-0.07 [0.00]	-0.24 [-0.29]	-0.28 [-0.23]	-0.03 [-0.16]
I_4	-0.53 [-0.51]	0.26 [0.34]	0.24 [0.28]	-0.54 [-0.58]	-0.06 [-0.15]	-0.03 [-0.05]
I_5	-0.52 [-0.44]	0.26 [0.38]	0.25 [0.30]	-0.55 [-0.60]	-0.12 [-0.22]	-0.01 [-0.03]
I_6	-0.18 [0.01]	-0.14 [0.04]	-0.04 [-0.15]	-0.07 [0.02]	-0.10 [-0.09]	0.11 [0.04]
I_7	-0.74 [-0.63]	-0.07 [0.12]	0.50 [0.53]	-0.51 [-0.46]	0.20 [0.09]	0.19 [0.18]
I_8	-0.52 [-0.46]	-0.07 [-0.02]	0.63 [0.61]	-0.67 [-0.62]	0.15 [-0.02]	0.04 [0.02]
I_9	-0.17 [-0.16]	0.15 [0.20]	0.74 [0.76]	-0.69 [-0.71]	0.15 [0.03]	0.17 [0.16]
I_{10}	-0.53 [-0.63]	0.01 [0.04]	0.35 [0.34]	-0.46 [-0.41]	0.19 [0.12]	-0.06 [-0.09]
I_{11}	-0.40 [-0.44]	0.01 [0.04]	0.35 [0.34]	-0.55 [-0.52]	0.02 [-0.13]	-0.18 [-0.20]
I_{12}	-0.10 [-0.48]	0.30 [0.16]	0.14 [0.16]	-0.04 [-0.09]	0.24 [0.39]	0.10 [0.02]
MV-PC1	-0.72 [-0.69]	-0.07 [0.06]	0.39 [0.38]	-0.49 [-0.45]	0.07 [-0.02]	0.09 [0.02]

注：方括号内为<10a 的高频相关系数；自由度为 58，5%、1%、0.1% 显著性水平的相关系数阈值分别是 0.25、0.33、0.41。

类似地，所分析的 12 个 EAWM 指数与中国东部冬季降水第 1 模态所对应时间序列 P-PC1 也基本为负相关，其统计意义是当东亚冬季风增强（减弱）时，对应着中国东部冬季降水整体偏少（偏多）。与 P-PC1 原始相关系数和高频相关系数均达到 0.1% 显著性水平的 EAWM 指数有 8 个，分别是 I_2 、 I_4 、 I_5 、 I_7 、 I_8 、 I_9 、 I_{10} 和 I_{11} 。其中，不管是原始相关系数还是年际尺度的高频相关系数，相关性最高的均为 I_9 ，原始和高频相关系数分别为 -0.69、-0.71；其次为 I_8 ，原始和高频相关系数分别为 -0.67、-0.62。其余 6 个 EAWM 指数与 P-PC1 的相关系数大致在 -0.45~ -0.55 左右。在年际变率尺度上， I_9 单个指数对冬季 P-PC1 的方差解释率达 50.4%，其余 7 个 EAWM 指数对 P-PC1 的方差解释率基本在 20%~38% 左右。与降水 P-PC2 具有较好相关性的是 I_3 和 I_{12} ，原始和高频相关系数达到或接近 5% 显著性水平。与降水 P-PC3 相关较高的是 I_7 和 I_{11} ，但均未通过 5% 显著性水平检验。MV-PC1 与 P-PC1 的原始相关和高频相关均达到 0.1% 显著性水平，但明显弱于与 T-PC1 的相关；与 P-PC2、P-PC3 的相关性均很弱。

综合来看，同时与 T-PC1 和 P-PC1 均达到或接近 0.1% 显著性水平的 EAWM 指数有

I_2 、 I_4 、 I_5 、 I_7 、 I_8 、 I_{10} 、 I_{11} 共 7 个, 而与 P-PC1 关系最密切的指数 I_9 与 T-PC1 相关性很弱, 与 T-PC1 年际变率相关最密切的指数 I_1 与 P-PC1 相关性也很弱。此外, MV-PC1 与 T-PC1 具有较高的相关性, 而与 P-PC1 虽然也达到显著相关, 但相对于其它指数来看不具有明显的优势。

4.3 El Niño/La Niña 状态时东亚冬季风指数与中国东部冬季气候

ENSO (El Niño/Southern Oscillation) 是全球性的年际气候变化的重要信号, 已有研究表明 ENSO 的发生与东亚冬季风异常间存在着相互影响关系, 强 (弱) 东亚冬季风对 El Niño (La Niña) 有激发作用, 而 El Niño (La Niña) 事件将减弱 (增强) 东亚冬季风^[12,40]。那么东亚冬季风与中国东部冬季气候的关系是否稳定? 各个 EAWM 指数与冬季温度、降水的相关性在 El Niño 状态和 La Niña 状态是否一致? 为了弄清这些问题, 以 Niño3.4 区海温为 ENSO 指标, 把 Niño3.4 区冬季 (12~2) 平均海温偏暖 (距平 $>0^{\circ}\text{C}$) 的年份定义为 El Niño 状态 (并不一定是一次 El Niño 事件, 这里是为了增加样本量), 偏冷 (距平 $<0^{\circ}\text{C}$) 的年份定义为 La Niña 状态, 并对应的把全部 EAWM 指数和温度降水序列均分成 El Niño 状态组和 La Niña 状态组进行相关性分析, El Niño 状态组和 La Niña 状态组的样本数分别为 28、30。

表 5 El Niño/La Niña 状态时 EAWM 指数与冬季温度相关系数

Tah 5 Correlation coefficients of the EAWM indices and the temperature during El Niño/La Niña status

	El Niño 状态			La Niña 状态		
	T-PC1	T-PC2	T-PC3	T-PC1	T-PC2	T-PC3
I_1	-0.73 [-0.78]	-0.24 [-0.07]	-0.01 [0.02]	-0.53 [-0.70]	-0.02 [0.16]	-0.10 [-0.17]
I_2	-0.32 [-0.51]	0.01 [-0.06]	0.29 [0.32]	-0.51 [-0.66]	0.27 [0.43]	0.25 [0.15]
I_3	-0.62 [-0.61]	-0.41 [-0.15]	-0.10 [-0.10]	-0.53 [-0.55]	-0.26 [-0.17]	-0.28 [-0.18]
I_4	-0.31 [-0.39]	0.05 [0.16]	0.22 [0.19]	-0.71 [-0.68]	0.45 [0.55]	0.14 [0.11]
I_5	-0.29 [-0.30]	0.00 [0.17]	0.28 [0.24]	-0.71 [-0.61]	0.47 [0.60]	0.13 [0.13]
I_6	-0.16 [0.15]	-0.38 [-0.16]	-0.38 [-0.49]	-0.17 [0.02]	0.03 [0.02]	0.18 [0.09]
I_7	-0.74 [-0.66]	-0.21 [0.13]	0.54 [0.50]	-0.73 [-0.59]	-0.04 [-0.03]	0.46 [0.52]
I_8	-0.49 [-0.47]	-0.28 [-0.21]	0.62 [0.59]	-0.49 [-0.41]	-0.01 [0.08]	0.66 [0.63]
I_9	-0.02 [-0.02]	0.20 [0.25]	0.74 [0.86]	-0.18 [-0.12]	0.05 [0.13]	0.74 [0.71]
I_{10}	-0.51 [-0.64]	-0.05 [0.07]	0.45 [0.38]	-0.51 [-0.66]	0.00 [0.04]	0.22 [0.15]
I_{11}	-0.36 [-0.33]	-0.30 [-0.18]	0.36 [0.29]	-0.36 [-0.51]	0.05 [0.04]	0.28 [0.24]
I_{12}	0.09 [-0.45]	0.46 [0.06]	0.21 [0.33]	-0.35 [-0.55]	0.22 [0.42]	0.18 [0.06]
MV-PC1	-0.71 [-0.70]	-0.30 [-0.14]	0.36 [0.34]	-0.73 [-0.67]	0.00 [0.15]	0.37 [0.38]

注: El Niño 状态组的自由度为 27, 其 5%、1%、0.1% 显著性水平的相关系数阈值分别是 0.37、0.47、0.58, La Niña 状态组的自由度为 29, 其 5%、1%、0.1% 显著性水平的相关系数阈值分别是 0.35、0.45、0.56。

表 5 是 El Niño、La Niña 状态时各 EAWM 指数与中国东部冬季温度前 3 模态时间系数的相关系数表, 表 6 是 El Niño、La Niña 状态时各 EAWM 指数与中国东部冬季降水前 3 模态时间系数的相关系数表。这里重点讨论经过高频滤波后的高频相关系数, 即年际尺度上 ($<10\text{a}$) 东亚冬季风与中国东部冬季温度、降水主要模态的对应关系。由表 5 可以看出, 多数 EAWM 指数在 El Niño 状态、La Niña 状态时与 T-PC1 相关系数没有明显的

改变, 但 I_4 、 I_5 、 I_{11} 、 I_{12} 与 T-PC1 的相关性在 La Niña 状态时要明显高于 El Niño 状态时, 这表明在 La Niña 状态时, I_4 、 I_5 、 I_{11} 、 I_{12} 等指数所描述的东亚冬季风与东部冬季温度的对应关系明显增强。EAWM 指数与 T-PC2 的相关性, La Niña 状态比 El Niño 状态明显增强的有 I_2 、 I_4 、 I_5 , 明显减弱的有 I_6 、 I_7 、 I_8 、 I_{11} ; 与 T-PC3 的相关性, I_5 、 I_6 、 I_{10} 等 3 个指数在 El Niño 状态时明显比 La Niña 状态偏强, I_3 则明显减弱。MV-PC1 同多数 EAWM 指数一样, 与 T-PC1 的相关性在 El Niño 状态或 La Niña 状态下没有明显的变化, 都是显著负相关, 表明 MV-PC1 与中国东部冬季温度对应关系整体上比较稳定。

同样, 考察 EAWM 指数与 P-PC1 的相关系数, El Niño 状态比 La Niña 状态相关性明显增强的 EAWM 指数有 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_{10} 、 I_{11} , 而 I_9 、 I_{12} 指数的相关性则明显减弱。值得注意的是, I_6 与 P-PC1 在 El Niño 状态时为显著正相关, 原始和低频相关系数为 0.35 (sig. 5%)、0.49 (sig. 1%); 而在 La Niña 状态时为明显的负相关, 原始和低频相关系数为 -0.35 (sig. 5%)、-0.28; 所以在全部时段的相关很弱 (-0.07 [0.02]), 说明在 ENSO 不同状态时, 该指数强弱与东部冬季降水变率的对应关系基本相反。MV-PC1 与 P-PC1 的相关性在 El Niño 状态、La Niña 状态下没有明显差异, 而 MV-PC1 与 P-PC2 在 La Niña 状态下相关性明显增强, 接近 1% 显著性水平。

表 6 El Niño/La Niña 状态时 EAWM 指数与冬季降水相关系数
Tab 6 Correlation coefficients of the EAWM indices and the precipitation during El Niño/La Niña status

El Niño 状态			La Niña 状态		
T-PC1	T-PC2	T-PC3	T-PC1	T-PC2	T-PC3
I_1 -0.16 [-0.18]	0.05 [0.13]	-0.05 [-0.12]	-0.16 [-0.11]	0.03 [0.40]	-0.11 [-0.41]
I_2 -0.41 [-0.49]	0.05 [0.03]	-0.07 [-0.05]	-0.43 [-0.37]	0.29 [0.45]	-0.17 [-0.38]
I_3 -0.25 [-0.26]	-0.28 [-0.24]	-0.20 [-0.30]	0.12 [0.16]	-0.05 [0.44]	0.11 [-0.01]
I_4 -0.46 [-0.50]	-0.12 [-0.14]	0.07 [-0.02]	-0.39 [-0.30]	0.38 [0.45]	-0.23 [-0.41]
I_5 -0.52 [-0.54]	-0.21 [-0.23]	0.11 [-0.01]	-0.36 [-0.29]	0.32 [0.31]	-0.21 [-0.46]
I_6 0.35 [0.49]	-0.06 [0.03]	-0.01 [-0.11]	-0.36 [-0.28]	-0.09 [-0.30]	0.20 [0.21]
I_7 -0.52 [-0.42]	0.28 [0.34]	0.11 [0.32]	-0.42 [-0.40]	0.40 [0.34]	0.25 [0.27]
I_8 -0.66 [-0.61]	0.14 [0.11]	-0.07 [0.16]	-0.61 [-0.59]	0.47 [0.42]	0.09 [0.05]
I_9 -0.54 [-0.63]	0.25 [0.23]	0.32 [0.38]	-0.76 [-0.77]	0.24 [0.11]	0.03 [-0.04]
I_{10} -0.58 [-0.51]	0.21 [0.23]	-0.05 [0.10]	-0.25 [-0.22]	0.38 [0.43]	-0.11 [-0.18]
I_{11} -0.66 [-0.65]	-0.01 [-0.04]	-0.30 [-0.15]	-0.29 [-0.27]	0.35 [0.37]	-0.13 [-0.18]
I_{12} 0.04 [-0.01]	0.24 [0.29]	0.14 [0.16]	-0.35 [-0.32]	0.14 [0.36]	0.10 [-0.06]
MV-PC1 -0.44 [-0.38]	0.08 [0.09]	-0.01 [0.15]	-0.41 [-0.40]	0.35 [0.44]	0.14 [0.05]

注: El Niño 状态组的自由度为 27, 其 5%、1%、0.1% 显著性水平的相关系数阈值分别是 0.37、0.47、0.58, La Niña 状态组的自由度为 29, 其 5%、1%、0.1% 显著性水平的相关系数阈值分别是 0.35、0.45、0.56。

综合表 4、表 5 和表 6, 分别给出全部时段 (A)、El Niño 状态 (E) 和 La Niña 状态 (L) 年际变率尺度上与温度和降水前 3 模态有显著相关 (sig. 0.1%) 的东亚冬季风指数, 如表 7 所示。有 10 个 EAWM 指数与 T-PC1 达到 0.1% 显著性相关, La Niña 状态时有 8 个 EAWM 指数, 而 El Niño 状态明显减少, 仅有 4 个 EAWM 指数达到 0.1% 显著性水

平。 I_1 、 I_3 、 I_7 和 I_{10} 与 T-PC1 在 El Niño 状态、La Niña 状态都达到显著相关,表明这 4 个指数与中国东部冬季温度的对应关系比较稳定。同时,不管是 El Niño 状态 (E) 还是 La Niña 状态 (L), 还是整个时段, 都是 I_1 与 T-PC1 的相关系数最高, 说明在所分析的 12 个 EAWM 指数中, 西伯利亚高压是影响我国东部冬季温度年际变率的最密切因子。与 T-PC2 显著相关的 EAWM 指数较少, 仅在 La Niña 状态有两个指数, 即 I_4 、 I_5 ; 整个时段与 T-PC3 显著相关的 EAWM 指数有 3 个, 即 I_7 、 I_8 、 I_9 , 同时 I_8 和 I_9 不管是 El Niño 状态还是 La Niña 状态均与 T-PC3 有显著相关, 其中相关性最高的是 I_9 。而 MV-PC1, 与 T-PC1 在整个时段、El Niño、La Niña 状态下均具有显著高负相关, 表明其同中国东部冬季温度对应关系的稳定性。

在整个时段, 与 P-PC1 达 0.1% 显著性相关的有 8 个 EAWM 指数, El Niño 状态、La Niña 状态分别有 3 个、2 个, 其中整个时段和 La Niña 状态下, 与 P-PC1 相关系数最高的是 I_9 (−0.71、−0.77), 在 El Niño 状态下与 P-PC1 相关系数最高的是 I_{11} (−0.65), 同时 I_9 在 El Niño 状态下与 P-PC1 也呈显著高负相关 (−0.63)。表明经过区域挑选的 500hPa 位势高度场构建的东亚对流层中高层经向风指数 (I_9) 与我国东部冬季降水年际变率具有较稳定的对应关系; 高空动力学特征的东亚冬季风指数 (I_{11}) 与东部冬季降水的对应关系在 El Niño 状态时最密切, 而在 La Niña 状态则不显著。整个时段和 El Niño、La Niña 状态下, 12 个 EAWM 指数均没有与 P-PC2、P-PC3 达到 0.1% 显著性水平相关。而 MV-PC1, 与 P-PC1 在整个时段、El Niño、La Niña 状态相关性没有明显改变; 而与 P-PC2 在 La Niña 状态时相关性有显著提高。

总体上来看, 所分析的 12 个 EAWM 指数与中国东部冬季温度和降水前 3 模态所对应的时间系数在 El Niño 状态、La Niña 状态时的差别, 可能反映了用于描述东亚冬季风的不同要素在 ENSO 冷、暖不同状态时, 其对中国东部冬季温度和降水的不同作用过程。因此, 利用单个 EAWM 指数在监测冬季气候时, 要考虑到 ENSO 不同状态下各个指数可能存在的不同指示意义。

表 7 年际尺度上与温度、降水达 0.1% 显著性相关的 EAWM 指数

Tah 7 List of the EAWM indices correlated with the temperature and precipitation at the 0.1% significance level

	PC1	PC2	PC3
温度	A I_1^* 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_7 、 I_8 、 I_{10} 、 I_{11} 、 I_{12}	—	I_7 、 I_8 、 I_9^*
	E I_1^* 、 I_3 、 I_7 、 I_{10}	—	I_8 、 I_9^*
	L I_1^* 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_7 、 I_{10} 、 I_{12}	I_4 、 I_5^*	I_8 、 I_9^*
降水	A I_2 、 I_4 、 I_5 、 I_7 、 I_8 、 I_9^* 、 I_{10} 、 I_{11}	—	—
	E I_8 、 I_9 、 I_{11}^*	—	—
	L I_8 、 I_9^*	—	—

注: A、E、L 分别为全时段、El Niño 状态、La Niño 状态; * 表示每组相关系数最高的; — 表示该组没达到 0.1% 显著性相关的指数。

5 结论与讨论

本文利用 NECP/NCAR 再分析资料对比分析了 12 种不同定义的东亚冬季风指数及其与中国东部冬季温度和降水的对应关系, 并进一步考察了赤道中东太平洋海温在偏暖 (El

Niño 状态)、偏冷 (La Niña 状态) 时东亚冬季风指数与东部温度和降水对应关系的稳定性。同时利用多变量经验正交函数方法 (MV-EOF) 对东亚冬季风主要构成要素进行分解, 以考察不同定义的指数对东亚冬季风整体性特征和局部性特征的刻画能力。

结果表明, 所分析的 12 个 EAWM 指数中大多数具有较好的一致性变率, 但也存在明显的差异, 与 MV-EOF 分解的前 4 模态时间系数对比, 反映出各种不同定义的指数所反映的东亚冬季风整体性、某一个或某几个要素的侧重点是不同的。12 个 EAWM 中有 10 个都反映出过去 60 年东亚冬季风的明显减弱趋势, 尤其是最近 30 年, 平均减弱速率为 $-0.25 \sigma/10a$; 同时, 也有部分指数显示出近 10 年东亚冬季风有明显增强趋势, 其中主要为基于近地面要素定义的指数。不同定义的东亚冬季风指数都具有强烈的年际变率和年代际波动, 其中较突出的年际变率周期主要集中在 $\sim 2 \sim 4a$ 、 $\sim 5 \sim 8a$, 而 $\sim 13.3a$ 、 $\sim 20a$ 为较突出的年代际周期。

12 个东亚冬季风指数中, 有 10 个 (8 个) 指数与我国东部冬季温度 (降水) 第 1 模态时间系数年际变率呈显著负相关, 达 0.1% 显著性水平。其中, 西伯利亚高压指数 (I_1) 和对流层中高层东亚经向风指数 (I_9) 分别与中国东部冬季温度、降水的关系最为密切, 单个西伯利亚高压指数能解释东部冬季温度年际变率方差的 53.3%, 而对流层中高层东亚经向风指数能解释冬季降水年际变率方差的 50.4%。不同定义的东亚冬季风指数与中国东部冬季温度和降水的对应关系在 El Niño 状态、La Niña 状态有所差异, 所以在利用东亚冬季风指数监测冬季气候时, 要考虑到各个指数在 El Niño 状态、La Niña 状态具有的不同指示意义。

本文分析的多数东亚冬季风指数都表现出近 60 年来的整体减弱趋势, 同时又有部分指数显示了近 10 年来有明显增强趋势, 这就提出: 过去 60 年东亚冬季风整体的减弱趋势是对全球增暖现象的响应, 还是其自身的长期演化规律? 部分指数所反映的近 10 年来东亚冬季风增强趋势, 是其自身强烈年际一年代际变率的反映, 还是全球增暖背景下东亚冬季风系统中部分要素发生变化的体现? 对这些问题, 还需要做更多的研究。

参考文献:

- [1] Chang C P, Lau K M. Short term planetary scale interaction over the tropics and the midlatitudes during northern winter Part I: Contrast between active and inactive periods. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(8): 933~946.
- [2] Lau K M, Li M T. The monsoon of East Asia and its global associations A survey. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1984, 65(2): 114~125.
- [3] Ding Y H, Krishnamurti T N. Heat budget of the Siberian High and the winter monsoon. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(10): 2428~2449.
- [4] 郭其蕴. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系. *应用气象学报*, 1994, 5(2): 218~224.
- [5] Zhang Y, Sperber K, Boyle J. Climatology and interannual variation of the East Asian winter monsoon: Results from the 1979—95 NCEP/NCAR reanalysis. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(10): 2605~2619.
- [6] 陶诗言, 张庆云. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. *大气科学*, 1998, 22(4): 399~704.
- [7] 刘实, 布和朝鲁, 陶诗言, 等. 东亚冬季风强度的统计预测方法研究. *大气科学*, 2010, 34(1): 35~44.
- [8] 王会军, 姜大膀. 一个新的东亚冬季风强度指数及其强弱变化之大气环流场差异. *第四纪研究*, 2004, 24(1): 19~27.
- [9] 王绍武. 中国冷冬的气候特征. *气候变化研究进展*, 2008, 4(2): 68~72.
- [10] 孙淑清, 孙柏民. 东亚冬季风环流异常与中国江淮流域夏季旱涝天气的关系. *气象学报*, 1995, 53(4): 440~450.
- [11] 施能, 鲁建军, 朱乾根, 等. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化. *南京气象学院学报*, 1996, 19(2): 168~177.
- [12] 李崇银, 穆明权. 异常东亚冬季风激发 ENSO 的数值模拟研究. *大气科学*, 1998, 22(4): 481~490.
- [13] 布和朝鲁, 纪立人. 东亚冬季风活动异常与热带太平洋海温异常. *科学通报*, 1999, 44(3): 252~259.

- [14] Huang R H, Chen W, Yan B L, *et al.* Recent advances in studies of the interaction between the East Asian winter and summer monsoon and ENSO cycle. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(3): 407~424.
- [15] 普业, 裴顺强, 李崇银, 等. 异常东亚冬季风对赤道西太平洋纬向风异常的影响. *大气科学*, 2006, 30(1): 69~79.
- [16] Webster P J, Magana V O, Palmer T N, *et al.* Monsoons: Processes, predictability, and the prospects for prediction. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103(14): 451~510.
- [17] 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. *应用气象学报*, 1999, 10(1): 1~8.
- [18] 崔晓鹏, 孙照渤. 东亚冬季风强度指数及其变化的分析. *南京气象学院学报*, 1999, 22(3): 321~325.
- [19] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, 18(3): 376~386.
- [20] 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析. *高原气象*, 2002, 21(1): 8~14.
- [21] 张自银, 龚道溢, 郭栋, 等. 我国南方冬季异常低温和异常降水事件分析. *地理学报*, 2008, 63(19): 899~912.
- [22] 王遵亲, 张强, 陈峪, 等. 2008年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征. *气候变化进展*, 2008, 4(2): 63~67.
- [23] 陶诗言, 卫捷. 2008年1月我国南方严重冰雪灾害过程分析. *气候与环境研究*, 2008, 13(4): 337~350.
- [24] Perlwitz J, Hoerling M, Eischeid J, *et al.* A strong bout of natural cooling in 2008. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L23706, doi:10.1029/2009GL041188.
- [25] Easterling D R, Wehner M F. Is the climate warming or cooling? *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L08706, doi:10.1029/2009GL037810.
- [26] 王宁. 东亚冬季风指数研究进展. *地理科学*, 2007, 27(增刊): 103~110.
- [27] Kistler R, Kalnay E, Collins W, *et al.* The NCEP-NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82(2): 247~267.
- [28] Gao H. Comparison of East Asian winter monsoon indices. *Advances in Geosciences*, 2007, 10: 31~37.
- [29] Wu B Y, Wang J. Possible impacts of winter Arctic Oscillation on Siberian High, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(2): 297~320.
- [30] 龚道溢, 王绍武. 西伯利亚高压的长期变化及全球变暖可能影响的研究. *地理学报*, 1999, 54(2): 125~133.
- [31] Chen W, Graf H F, Huang R H. The interannual variability of East Asian winter monsoon and its relation to the summer monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2000, 17(1): 48~60.
- [32] 梁红丽, 肖子牛, 晏红明. 孟加拉湾冬季风及其与亚洲夏季气候的关系. *热带气象学报*, 2004, 20(5): 537~547.
- [33] Jhun J, Lee E. A new East Asian winter monsoon index and associated characteristics of the winter monsoon. *Journal of Climate*, 2004, 17(4): 711~726.
- [34] Li Y Q, Yang S. A dynamical index for the East Asian winter monsoon. *Journal of Climate*, 2010, 23(15): 4225~4262.
- [35] 祝从文, 何金海, 吴国雄. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系. *气象学报*, 2000, 58(4): 391~402.
- [36] Ji L R, Sun S Q, Arpe K, *et al.* Model study on the interannual variability of Asian winter monsoon and its influence. *Advances in Atmospheric Sciences*, 1997, 14(1): 1~22.
- [37] 乔云亭, 陈烈庭, 张庆云. 东亚季风指数的定义及其与中国气候的关系. *大气科学*, 2002, 26(1): 69~82.
- [38] 晏红明, 段玮, 肖子牛. 东亚冬季风与中国夏季气候变化. *热带气象学报*, 2003, 19(4): 367~376.
- [39] 曾琮, 胡斯团, 梁建茵, 等. 东亚冬季风异常与广东前汛期旱涝关系的初步分析. *应用气象学报*, 2005, 16(5): 87~96.
- [40] 穆明权, 李崇银. 东亚冬季风年际变化的 ENSO 信息 I. 观测资料分析. *大气科学*, 1999, 23(3): 276~285.
- [41] Wang B. The vertical structure and development of the ENSO anomaly mode during 1979—1989. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1992, 49(8): 698~712.
- [42] Wang B, Wu Z W, Li J P, *et al.* How to measure the strength of the East Asian summer monsoon. *Journal of Climate*, 2008, 21(17): 4449~4463.
- [43] Yang S, Lau K M, Kim K M. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *Journal of Climate*, 2002, 15(3): 306~325.
- [44] 任国玉, 张爱英, 王颖, 等. 我国高空风速的气候学特征. *地理研究*, 2009, 28(6): 1583~1592.

Comparisons of the multiple East Asian winter monsoon indices and their relations to climate over eastern China

ZHANG Zi-yin^{1,2}, GONG Dao-yi¹, HU Miao¹, LEI Yang-na³

(1. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology,

Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Climate Center, Beijing 100089, China;

3. Shaanxi Provincial Climate Center, Xi'an 710014, China)

Abstract: The East Asian winter monsoon (EAWM) is one of the most active systems in northern hemisphere during boreal winter. The EAWM exerts an essential influence on controlling winter climate over most of China, and its interannual and interdecadal variabilities are of significant importance in predicting and inspecting winter climate over China. Based on the NCEP/NCAR reanalysis data and the 160-station observational data, a comparison for 12 EAWM indices and their relations to winter temperature and precipitation over eastern China have been performed in this paper. Furthermore, the stability of the relations between EAWM indices and temperature and precipitation in El Niño status or La Niña status has also been detected. The results indicate that most of the EAWM indices share the same variations year-to-year, but there are some differences between them at the same time, which suggest that the focuses of each index in capturing the integrity or partial features are different. It was found that the intensity of the EAWM system reduced obviously during the last 60 years, especially in the latest 30 years with a trend of $-0.25\sigma/10a$ averaging from the 10 EAWM indices. All of the 12 EAWM indices showed intense interannual variabilities and interdecadal variations during the last six decades. Although the exact periods of each index are not unified, the dominant interannual periods of ~ 2 to $\sim 4a$ and ~ 8 to $\sim 9a$, and the dominant interdecadal periods of ~ 13 , $3a$ and $\sim 20a$ of the EAWM indices can be identified from a power spectrum analysis. There are ten (eight) EAWM indices correlated significantly (0.1%) with the first mode time series (PC1) of winter temperature (precipitation) over eastern China. Among them, the Siberian High index can explain 53.3% variance in winter temperature PC1, and the East Asian meridional wind index derived from the middle-high troposphere can explain 50.4% variance in winter precipitation PC1. The relationships between each EAWM index and winter temperature and precipitation over eastern China during El Niño status and La Niña status are not consistent completely. So, the different reference significances of each EAWM index in El Niño status or La Niña status should be considered carefully when used in winter climate monitoring.

Key words: East Asian winter monsoon; interannual variability; eastern China; temperature