李天宇,朱伟军,马阳,等. 2017. 冬季北太平洋风暴轴和北大西洋风暴轴的协同变化及其与同期海气系统的空间耦合关系 [J]. 大气科学,41 (5): 1059–1075. Li Tianyu, Zhu Weijun, Ma Yang, et al. 2017. Concurrent variations of northern Atlantic and Pacific storm tracks and their relationship to the coupled pattern of atmosphere-ocean system during winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (5): 1059-1075, doi:10.3878/j.issn. 1006-9895 1701 16255

# 冬季北太平洋风暴轴和北大西洋风暴轴的协同变化 及其与同期海气系统的空间耦合关系

# 李天宇 朱伟军 马阳 王森 李欣

南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,南京210044

摘 要 基于 1960~2014 年 NCEP/NCAR(美国环境预报中心和国家大气研究中心)的逐日再分析资料以及 NCPC (美国气候预报中心)的海温资料和大气环流及海洋指数,通过风暴轴指数、经验证交分解(EOF)等方法,研 究了冬季北半球北太平洋风暴轴(PST)和北大西洋风暴轴(AST)之间不同时间尺度下的协同变化特征,并利 用回归和相关分析对风暴轴的年际和年代际协同变化特征与同期海气系统的空间耦合关系进行了探讨。主要结论 概括如下: (1) 从所定义的冬季北半球两大洋风暴轴的纬度、经度和强度指数来看: 三个指数均存在明显的年际 变化和年代际变化,其中年际分量的方差贡献远大于年代际分量;对于单个风暴轴来讲,无论是滤波方差场原始 序列还是其年际分量和年代际分量序列,每个风暴轴各自的纬度指数和经度指数均呈显著正相关,表明每个风暴 轴各自的南北位移和东西位移具有很好的协同性;虽然从原始序列来看,两个风暴轴之间各指数之间的相关关系 均并不显著,但是对于年际分量序列和年代际分量序列,两个风暴轴之间均具有显著的协同性变化,其中,在年 际尺度上,两者仅强度变化之间具有显著的正相关,而在年代际尺度上,AST的经度(纬度)变化与 PST 的强度 (纬度及强度)变化均具有显著的负相关。(2) EOF 结果表明,两个风暴轴之间协同变化的空间结构在年际尺度 上反映的主要是强度的变化,第一模态为两者强度在其气候平均位置附近同时减弱(增强)并伴随 AST 整体和 PST 东部均略有北抬(南压),第二模态为两者强度在其气候平均位置附近同时减弱(增强)并仅伴随 AST 整体 略有南压(北抬):而在年代际尺度上,第一模态为 AST 整体偏北(南)中东部偏强(弱)与 PST 整体偏南(北) 中东部偏弱(强)的反位相协同变化; 第二模态为两个风暴轴的强度在其气候平均位置附近同时增强(减弱)的 一致性协同变化。(3)进一步分析表明,两个风暴轴之间以不同模态协同变化时,与同期海温、遥相关型及环流 异常等海气系统之间均呈现出很好的空间耦合关系,但具有不同的特点。 风暴轴 协同变化 年际变化 年代际变化 海气系统 关键词 文章编号 1006-9895(2017)05-1059-17 中图分类号 P461 文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1701.16255

# **Concurrent Variations of Northern Atlantic and Pacific Storm Tracks and** Their Relationship to the Coupled Pattern of Atmosphere–Ocean System during Winter

LI Tianyu, ZHU Weijun, MA Yang, WANG Sen, and LI Xin

收稿日期 2016-11-01; 网络预出版日期 2017-02-11

作者简介 李天宇,女,1991年出生,硕士研究生,主要从事大气环流异常及短期气候预测研究。E-mail: litianyu nuist@163.com

通讯作者 朱伟军, E-mail: weijun@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目(41575070、41075070),公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306028),江苏高校优势学科建设工程(PAPD)

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41575070 and 41075070), Special Fund for Meteorological Research in the Public Interest (Grant GYHY201306028), Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD)

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education (KLME)/Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change (ILCEC)/Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters (CIC–FEMD), Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract Using daily analysis data of the NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research), monthly SST (sea surface temperature), and climate indices of atmosphere and ocean time series from the NCPC (National Climate Prediction Center) from 1960 to 2014, characteristics of concurrent variations of the northern Atlantic storm track (AST) and Pacific storm track (PST) at various time scales in boreal winter are analyzed based on calculations of the storm track indices and EOF (empirical orthogonal function) analysis. The simultaneous coupled patterns of the concurrent variations of the storm tracks and their relation to the atmosphere-ocean system are also studied on interannual and interdecadal scales using regression and correlation analysis methods. The results are summarized as follows. (1) In terms of the defined latitude, longitude, and intensity indices of the storm tracks, there exist significant interannual and interdecadal variations in the above three indices, and the variance contribution of the interannual component is much larger than that of the interdecadal component. As for each single storm track in its original or interannual and interdecadal series, there is a significant positive correlation between its latitude and longitude indices, which indicates that the variation of meridional and zonal position displacements is synchronous. Although none of the concurrent correlations between the AST and PST indices has past the significance test in the original series, there are significant concurrent variations between the storm tracks in the interannual and interdecadal series, e.g., on the interannual scale, the two storm tracks show a significant positive correlation only in their intensity indices. However, on the interdecadal scale, there is a significant negative correlation between the longitude (latitude) index of AST and the intensity (latitude and intensity) index of PST. (2) The EOF result shows that the spatial structure of the concurrent variations between the two storm tracks in boreal winter mainly reflects the intensity variation on the interannual scale. The first mode describes the two storm tracks weakening (intensifying) synchronously at their respective climatological positions with a slight northward (southward) shift of the whole AST and eastern PST. The second mode describes their synchronous weakening (intensifying) at their respective climatological positions with a slight southward (northward) shift of the whole AST. While on the interdecadal scale, the first mode reveals an out of phase variation between AST and PST, i.e., a northward (southward) shift of the whole AST as well as intensifying (weakening) in its middle-eastern part correspond to a southward (northward) shift of the whole PST as well as weakening (intensifying) in its middle-eastern part. The second mode reveals a synchronous enhanced (reduced) variation in intensity between AST and PST at their climatological positions. (3) Further analysis shows that the different concurrent variations of the storm tracks are closely related to different simultaneous coupled patterns in SST, teleconnection and atmospheric circulation fields, etc. within the atmosphere-ocean system.

Keywords Storm track, Concurrent variation, Interannual variation, Interdecadal variation, Atmosphere-ocean system

# 1 引言

20世纪70年代末Blackmon(1976)和Blackmon et al. (1977)发现,北半球中纬度的天气尺度(2.5~ 6 d)瞬变涡动活动在北半球太平洋和大西洋上空呈 现两个极大值区,分别定义为北太平洋风暴轴和北 大西洋风暴轴。风暴轴不仅与每日天气图上气旋和 反气旋的生消密切相关,对局地天气变化产生直接 影响,而且由于风暴轴能引起强烈地向极热量、动 量和水汽输送,因此对大尺度的大气环流维持以及 天气气候变化,也具有重要影响。最近 Shaw et al. (2016)回顾了风暴轴方面的有关研究工作,着重 强调了风暴轴对天气和气候都具有重要影响,并且 在全球变暖背景下,由于二氧化碳浓度增加导致的 一系列热力学变化使得风暴轴的强度和位置发生了 变化,并对北半球的温度和降水产生了显著的影响。因此,研究北半球风暴轴异常,特别是两大风暴轴的协同变化及其机理,对深入理解大尺度大气环流和天气气候的异常机理,提高对短期气候变化的认识和预测水平,具有重要的科学意义和应用价值。

近年来,对北太平洋风暴轴和北大西洋风暴轴 的研究取得了丰富的成果。国内外学者对两大洋风 暴轴的基本时空分布特征已有了深入的认识(Lau, 1978, 1988; Lau and Wallace, 1979; Chang and Orlanski, 1993;朱伟军和孙照渤, 1999, 2000; Chang and Fu, 2002, 2003;任雪娟和张耀存,2007;朱伟 军和李莹, 2010; Lee et al., 2012; Chang and Yau, 2016)。风暴轴与北半球大尺度平均气流之间的波 流相互作用也受到了广泛关注,研究表明北太平洋 风暴轴异常变化受到热带和北太平洋海温异常的

影响,这种影响与大气平均气流及各类遥相关型存 在密切联系。自 Lau (1988) 较早发现风暴轴月际 变化的主要空间模态与大气低频环流变化的遥相 关型存在密切联系以来,人们从季节、年和年代尺 度上,对风暴轴与急流、北大西洋涛动 (NAO) 和 太平洋北美型遥相关型 (PNA) 等环流异常之间的 联系进行了大量研究,认识得到了进一步加深。董 丽娜和张福颖(2013)在探讨瞬变波动力强迫作用 对初夏至盛夏急流北跳以及急流中心西移的影响 时发现,瞬变波的动力强迫作用有利于急流北跳的 发生,但不利于急流中心西移的发生。袁凯等 (2015) 通过对北太平洋东部地区的研究,指出北 太平洋东部地区的位置变化与同期 PNA 遥相关型、 太平洋西部型 (WP) 以及海表面温度异常存在显 著相关。任雪娟等(2007)通过经验正交函数分解 研究了冬季北太平洋风暴轴的异常特征,并且进一 步分析了与风暴轴空间异常型相关的冬季大气平 均气流异常和海表面温度异常的空间耦合型。研究 表明, 西风急流与风暴轴异常关系密切, 任雪娟和 张耀存(2007)发现海表加热异常可能引起大尺度 平均气流异常,从而改变中纬度大气斜压性,导致 瞬变扰动异常,后者则通过动力过程对冬季太平洋 上空西风急流起到维持作用。任雪娟等(2010)的 研究表明,对于冬季东亚副热带急流和东亚温带急 流,较弱的东亚温带急流伴随着活跃的北支天气尺 度瞬变扰动,这种异常信号东传入海后可通过瞬变 和大尺度环流的热力和动力反馈过程影响北太平 洋气候异常。对于北大西洋风暴轴,曾鼎文等

(2015a, 2015b)通过定义风暴轴的经度指数,分析了冬季北大西洋风暴轴东西变化特征及其能量平衡差异,并且指出风暴轴的经度指数与西伯利亚高压的纬度、强度及面积指数显著相关。此外,还有许多学者把两大洋风暴轴各自的年际分量或年代际分量分离出来进行了分别的研究(朱伟军和孙照渤, 2000;朱伟军和李莹, 2010;王娜和孙照渤, 2014;周星研等, 2015)。

虽然 Chang (2004)利用探空资料和再分析资 料对包括 700 hPa 向极热通量在内的涡动方差场进 行分析后指出,北半球两大洋风暴轴之间可能存在 一定的相关性。但是,以上分析表明,目前对于北 半球两大洋风暴轴的研究主要集中在北太平洋和 北大西洋风暴轴各自的时空特征及其与大气环流 的关系方面,而系统地阐述两大洋风暴轴之间可能 存在的协同变化特征及其机理,尤其是这种协同变 化性在年际尺度和年代际尺度上有何异同?以及 将两大洋风暴轴作为一个整体考虑其与海气系统 的空间耦合关系如何?这些问题目前还都不十分 清楚。因此,本文将重点对不同时间尺度下冬季北 半球两大洋风暴轴之间的协同变化特征及其与同 期海气系统的空间耦合关系进行探讨。

# 2 资料与方法

#### 2.1 资料

所用资料有:(1) NCEP/NCAR(美国环境预 报中心和国家大气研究中心)的再分析资料,包括 逐月的海平面气压场(*p*)和温度场(*T*),逐月和 逐日的高度场(*z*)和风场(*u*, *v*),垂直层数为17 层,水平分辨率为2.5°×2.5°,覆盖时间为1949年 1月至2015年12月;(2)海温资料取自NOAA(美 国海洋和大气管理局),水平分辨率为1°×1°,覆 盖时间为1854年1月至2015年12月。为统一起 见,文中各物理量场的分析时段均取为:1960年1 月至2015年2月;冬季则定义为:当年12月至下 一年2月三个月的时间平均。

#### 2.2 方法

为研究冬季北半球两大洋风暴轴的协同变化 特征且结果不受到无关地区的影响,本文选取 (30°N~70°N,100°W~0°)和(30°N~60°N, 120°E~120°W)两个区域的500 hPa 位势高度天气 尺度滤波方差场来分别表示北太平洋风暴轴和北 大西洋风暴轴,并将以上两个区域作为一个整体联 合起来进行 EOF 分析。

对每个格点来讲,其原始天气尺度滤波方差 (以下简称滤波方差)采用 31 点对称数字滤波器 (孙照渤,1992)滤得,即首先从逐日原始资料中 直接滤出 2.5~6d的瞬变涡动,然后,以每月为一 段对每一段各自计算其方差得到每月的月平均,最 后,取冬季三个月平均得到每年冬季的天气尺度滤 波方差(亦即风暴轴)。其年际分量和年代际分量, 则利用谐波分析方法(覃军和王盘兴,2005)对55 年冬季风暴轴样本(即原始位势高度滤波方差)进 行时间尺度分离,根据时间长度 55 年和傅立叶变 换原理,前6波的合成表示周期大于9年的慢变分 量,第7~27 波的合成表示周期小于9年的快变分 量,因此定义第1~6 波和第7~27 波的合成分别 表示风暴轴的年代际分量和年际分量。 此外,后文在分析海气耦合关系时还应用了合成分析、回归分析以及显著性检验等气象统计方法,原理详见 Storch and Zwiers (1999)。

# 3 时间序列所揭示的北半球两大洋风 暴轴的协同变化特征

为考察风暴轴整体强度和位置的时间变化,参 考李莹等(2010)的定义方法,选取固定区域内每 年冬季 500 hPa 位势高度滤波方差大于等于一定固 定阈值的所有格点,将这些格点所对应的滤波方差 的平均值定义为该年风暴轴的强度指数,并将这些 格点所对应的经度的平均和纬度的平均分别定义 为该年风暴轴的经度指数和纬度指数。其中,北大 西洋风暴轴和北太平洋风暴轴的固定阈值分别取 为 20 dagpm<sup>2</sup>和 16 dagpm<sup>2</sup>,区域分别为(30°N~ 70°N,100°W~0°)和(30°N~60°N,120°E~ 120°W)。同理,利用 2.2 节所述的时间尺度分离方 法,可以进一步得到两大风暴轴位置和强度各项指 数的年际分量和年代际分量。

图1为冬季北半球两大洋风暴轴的气候平均场 及其上述各项指数的标准化时间序列。对比两大洋 风暴轴的气候平均场(图1a和图1e)可以发现: 大西洋风暴轴(AST, Atlantic Storm Track)主体位 于(35°N~70°N, 90°W~0°),呈东北—西南走向, 瞬变扰动最大可以达到40 dagpm<sup>2</sup>以上;太平洋风 暴轴(PST, Pacific Storm Track)主体位于(35°N~ 60°N, 125°E~122.5°W),沿纬圈几乎横跨整个中 纬度太平洋地区,跨度大于AST,轴线大体呈东— 西走向,强度中心位于风暴轴西部,最强可以达到 24 dagpm<sup>2</sup>以上,强度明显小于AST,这与引言文 献中的相关研究结果(朱伟军和李莹, 2010)一致。

由图 1 还可以看出,两大洋风暴轴 AST 和 PST 的强度和位置均存在明显的年际和年代际变化特 征,并且各个指数的年际分量的方差贡献都明显大 于年代际分量。对于纬度指数(图 1b 和图 1f),AST 在 20 世纪 60 年代初期开始由北向南移动,20 世纪 60 年代末期开始转为向北移动,20 世纪 80~90 年 代 AST 始终处于偏北位相,21 世纪开始为偏南位 相;PST 在 20 世纪 70 年代中期以前年代际分量变 化平稳,20 世纪 70 年代中期至 80 年代中期风暴轴 位置偏南,近十年 PST 位于气候平均态偏北位相; 纬度指数年际分量的方差贡献是 AST 三个指数中 最大的,AST 纬度指数的年际与年代际分量之比约 为 3:1。对于经度指数(图 lc 和图 lg), AST 的经 度指数与纬度指数存在较为一致的变化趋势,但经 度指数存在更为显著的年代际变化,年际和年代际 分量比值约为 2:1; PST 从 20 世纪 70 年代中期开 始经纬度指数才表现出较为一致的变化趋势,这与 李莹等(2010)的研究一致,但 PST 经度指数的年 代际分量所占方差贡献在各指数年代际分量中最 小,只有 19%左右。强度变化(图 ld 和图 lh)方 面,AST 强度变化与纬度变化趋势相似; PST 强度 指数变化趋势与经度指数趋势相反,且年代际分量 的方差贡献在 PST 三种指数中最大,约为 36%。

为考察两大洋风暴轴的协同变化特征,表1给 出了冬季北大西洋风暴轴和北太平洋各风暴轴指 数之间的相关系数值。由表1可以看出,对于单个 风暴轴各自指数之间的相关关系: 在原始滤波方差 序列中,两大洋风暴轴各自的经向和纬向位置变化 的正相关性显著,即均存在一致的东北或西南走向 的移动趋势,此外,PST 的强度指数还与经度指数 呈一定的负相关关系, AST 的强度指数则与两个位 置指数均呈一定的正相关关系;而在年际尺度和年 代际尺度上,AST 和 PST 各自的经、纬度指数之间 也均为显著的正相关,此外,在年际尺度上, PST 的强度与经度指数表现为显著的负相关性,在年代 际尺度上,AST 三种指数间的正相关性均十分显 著, 而 PST 的强度指数与经度指数之间的相关系数 虽然达-0.25, 但未通过显著性检验, 这与原始序列 结果相似。

对于两大洋风暴轴各指数之间的相关关系:在 原始序列中,AST 与 PST 之间各风暴轴指数之间均 没有显著的相关关系;在年际尺度上,仅有两者的 强度指数为显著正相关,其他指数之间并未表现出 显著的相关关系;在年代际尺度上,AST 与 PST 之 间纬度指数呈显著负相关,PST 的强度指数分别与 AST 的两个位置指数之间均呈显著负相关。

以上分析表明,从所定义的冬季北半球两大洋 风暴轴的纬度、经度和强度指数来看:三个指数均 存在明显的年际变化和年代际变化,其中年际分量 的方差贡献远大于年代际分量;对于单个风暴轴来 讲,无论是滤波方差场原始序列还是其年际分量和 年代际分量序列,每个风暴轴各自的纬度指数和经 度指数均呈显著正相关,表明每个风暴轴各自的南 北位移和东西位移具有很好的协同性;虽然从原始 序列来看,两个风暴轴之间各指数之间的相关关系 均并不显著,但是对于年际分量序列和年代际分量 序列,两个风暴轴之间均具有显著的协同性变化, 其中,在年际尺度上,两者仅强度变化之间具有显

著的正相关,而在年代际尺度上,AST 的经度(纬 度)变化与 PST 的强度(纬度及强度)变化均具有 显著的负相关。



图1 冬季北大西洋风暴轴(左列)和北太平洋风暴轴(右列)的气候平均场(等值线,单位: dagpm<sup>2</sup>)及各指数标准化的原始(条柱)及其年际 分量(虚线)和年代际分量(实线)的时间序列:(a、e)气候平均场;(b、f)纬度指数;(c、g)经度指数;(d、h)强度指数。图中百分数为年际 分量和年代际分量所占方差贡献

Fig. 1 Spatial distributions of the climatological mean (contours, units: dagpm<sup>2</sup>) of northern AST (Atlantic storm track, left) and northern PST (Pacific storm track, right) and the standardized time series (original, bars; annual, dashed lines; decadal, solid lines) of indexes: (b, f) Latitude index; (c, g) longitude index; (d, h) intensity index. The percentages indicate the variance contributions of the interannual and interdecadal components

### 4 EOF 分解所揭示的冬季北半球两 大洋风暴轴的协同变化特征

从上节所定义的冬季北半球两大洋风暴轴的 纬度、经度和强度指数来看,两大洋风暴轴之间确 实在不同时间尺度上均存在显著的协同变化特征, 为了研究这种协同变化在空间上的分布特征,本节 利用谐波分析(覃军和王盘兴, 2005)方法对冬季 500 hPa 位势高度滤波方差场的年际分量和年代际 分量分别进行了经验正交函数(EOF)分解, EOF 分解区域为 (30°N~70°N, 100°W~0°) 和 (30°N~ 60°N, 120°E~120°W)两个区域的联合, 其年际 尺度和年代际尺度的EOF分解结果分别如图2和图 3的所示。在年际尺度上(图 2),两大洋风暴轴 EOF 联合分解后前两个模态的解释方差分别为 12.1%、 12.0%,两模态之间解释方差非常接近,表明冬季 两大洋风暴轴的协同变化特征存在多种表现形式, 这里主要讨论前两模态的异常特征。图2表明:在 第一模态空间特征向量场(EOF1)上,北大西洋存 在北正、南负两个异常中心,零线较 AST 气候平均 位置偏北,气候平均 AST 的中西部基本位于负异常 区,而东部则位于正负异常区中间;而北太平洋主 要表现为负异常, 气候平均 PST 主体基本位于负异 常区域,与AST类似,其东部也位于正负异常区中 间。在第二模态空间特征向量场(EOF2)上:北大 西洋存在北正、南负两个异常中心, 整体上气候平 均 AST 基本位于正异常区域,负异常区位于 AST 气候平均位置东南侧;而北太平洋气候平均 PST 的中西部位于正异常区域,但其东部在南北向存在正 负正异常中心。

为考察EOF分析结果与第3节时间序列所揭示 的北半球两大洋风暴轴协同变化特征的一致性,这 里计算了表 1 中两大洋风暴轴各项年际分量指数 (对应于表 2 和表 3 中的"整体"部分) 与 EOF 分解的时间系数(PC1和PC2)之间的相关系数(列 于表2和表3)。值得注意的是,已有研究表明,风 暴轴从西到东各区域的时空变化特征存在一定的 差异(朱伟军等, 2013; 王娜和孙照渤, 2014; 袁 凯等,2015;周星研等,2015),为了进一步分析 这种差异,这里还将每年冬季每个风暴轴区域在纬 向上等分为西部、中部和东部三个部分,采用与第 3 节类似的方法,分别定义了各区域相应的风暴轴 的强度指数和位置指数(分别对应于表2和表3中 的"西部"、"中部"和"东部"三个部分),并计 算了其与 EOF 分解的时间系数 (PC1 和 PC2) 之间 的相关系数 (列于表 2 和表 3)。由于东西位置变化 在 EOF 分解中表现并不明显,因此表 2 和表 3 仅列 出了风暴轴的强度指数和纬度指数与 EOF 分解的 时间系数 (PC1 和 PC2) 之间的相关系数。

由表 2 和表 3 可以看出,对整体风暴轴而言, PC1与AST和PST强度之间的相关系数分别为-0.21 和-0.64,负相关性基本显著,正好对应于 EOF1 中

			大西洋					太平洋									
			经度指数			强度指数		纬度指数			经度指数			强度指数			
			原始	年际	年代际	原始	年际	年代际	原始	年际	年代际	原始	年际	年代际	原始	年际	年代际
大西洋	纬度	原始	0.57**			0.25			-0.07			0.01			-0.09		
		年际		0.57**			0.16			0.08			0.03			-0.01	
		年代际			0.57**			0.55**			-0.56**			-0.06			-0.28*
	经度	原始	1			0.23						0.13			0.04		
		年际		1			0.08		0.11	0.14			0.1			0.26	
		年代际			1			0.58**			0.06			0.23			-0.38**
	强度	原始				1			-0.1			-0.1			0.19		
		年际					1			-0.06			-0.19			0.28*	
		年代际						1			-0.21			0.21			-0.03
太平洋	纬度	原始							1			0.54**			-0.03		
		年际								1			0.52**			-0.07	
		年代际									1			0.61**			0.08
	经度	原始										1			-0.45**		
		年际											1			-0.54**	
		年代际												1			-0.25

表 1 冬季北半球两大洋各风暴轴指数之间的相关关系 Table 1 Correlation coefficients between indices of AST and PST in winter

注:表中\*和\*\*分别表示通过 95%和 99%信度水平的检验,下同。



图 2 年际尺度的 500 hPa 位势高度滤波方差 EOF 分析的第一模态(左)、第二模态(右)的(a、d)北大西洋风暴轴和(b、e)北太平洋风暴轴特征向量场及其对应的(c、f)时间序列。图 a、b、d、e 中阴影为特征向量场,等值线(间隔: 4 dagpm<sup>2</sup>)为风暴轴气候平均位置(AST 和 PST 分别 绘制出大于 20 dagpm<sup>2</sup>和 16 dagpm<sup>2</sup>)

Fig. 2 Spatial patterns of northern (a, d) AST and (b, e) PST and (c, f) corresponding normalized coefficients for the first EOF mode (left column) and the second EOF mode (right column) of the interannual component of the 500-hPa filtered geopotential height variance during winter. Shaded areas indicate spatial patterns of eigenvector, contours (interval: 4 dagpm<sup>2</sup>) indicate the climatological mean winter storm tracks in the North Atlantic (North Pacific) with values greater than 20 dagpm<sup>2</sup> (16 dagpm<sup>2</sup>)

AST 和 PST 整体的强度一致减弱,而 PC2 与 AST 和 PST 强度之间(相关系数分别为 0.72 和 0.47)均 呈显著正相关,正好对应于 EOF2 中 AST 和 PST 整体的强度一致增强,这与第 3 节时间序列所揭示的 北半球两大洋风暴轴的强度指数之间为显著正相关的结果是一致的。值得注意的是,PC1 和 PC2 还与

# 表 2 大西洋各区域风暴轴指数年际分量与年际尺度 EOF 分析的时间系数 (PC1、PC2) 的相关系数

Table 2Correlation coefficients between the interannualcomponent of indices over different areas of AST and timecoefficients (PC1, PC2) of the EOF modes at interannual scale

	相关系数											
		纬度	指数		强度指数							
	西部	中部	东部	整体	西部	中部	东部	整体				
PC1	0.4**	0.48**	0.53**	0.59**	-0.42**	-0.36**	0.21	-0.21				
PC2	0.4**	$0.58^{**}$	0.36**	$0.58^{**}$	0.5**	0.53**	0.68**	$0.72^{**}$				

AST 纬度之间存在显著的正相关,正好对应于 EOF1 中 AST 整体偏北减弱和 EOF2 中 AST 整体偏北增强。对各分区风暴轴而言,"中部"和"西部"的结果与"整体"的结果基本一致,而"东部"的结果有所不同,PC1 还与 PST 纬度之间呈显著正相关(0.28),正好对应于 EOF1 中 PST 东部北正南负。

# 表 3 太平洋各区域风暴轴指数年际分量与年际尺度 EOF 分析的时间系数的相关系数

Table 3Correlation coefficients between the interannualcomponent of indices over different areas of PST and thetime coefficients of the EOF modes at interannual scale

	相关系数											
		纬度	指数		强度指数							
	西部	中部	东部	整体	西部	中部	东部	整体				
PC1	-0.11	-0.21	$0.28^*$	0.01	-0.53**	-0.61**	-0.32*	-0.64**				
PC2	-0.21	0.06	-0.13	-0.13	0.4**	$0.44^{**}$	0.16	$0.47^{**}$				

因此,在年际尺度上,与第3节时间序列所揭示的北半球两大洋风暴轴的协同变化特征一致的 是,EOF分析结果也反映的主要是强度的协同变 化,而且EOF分析结果还进一步给出了其空间变化 特征,即第一模态为两者强度在其气候平均位置附 近同时减弱(增强)并伴随AST整体和PST东部 均略有北抬(南压),第二模态为两者强度在其气 候平均位置附近同时减弱(增强)并仅伴随AST 整体略有南压(北抬)。

在年代际尺度上,两大洋风暴轴前两个模态的 解释方差分别为 23.6%、16.8%。

图 3 表明:第一模态下,北大西洋空间向量场 在气候平均位置北侧有一个正异常区,南侧基本为 负异常区,北太平洋空间向量场分布同样呈现经向 对称的形态,但表现为南正北负,零线较 PST 气候 平均位置轴线偏南;时间序列(图 3e)中,20世纪 60年代初期为正位相,20世纪 60年代中期至 20世 纪 70年代后期转为负位相,20世纪 70年代后期至 20世纪 80年代中期及整个 20世纪 90年代均表现为 正位相,21世纪开始基本处于负位相。第二模态下,两大洋风暴轴气候平均位置均位于正异常中心;时间系数为整个20世纪60年代为负位相,20世纪70年代为正位相,20世纪80年代初左右存在短暂负位相过渡,20世纪80年代中期至21世纪初为正位相,然后存在约10年的振荡期,近10年表现为负位相。

与年际分量的讨论类似,表4和表5给出了北 半球两大洋风暴轴各指数年代际分量与 EOF 时间 序列的相关系数。由表4和表5所示,PC1与两大 洋风暴轴纬度指数及中东部强度指数均显著相关, 但符号相反,其中AST 和 PST 整体纬度指数与 PC1 相关系数高达0.9和-0.76,说明在这一模态下主要 为风暴轴纬度变化之间的协同关系,其次是强度变 化,当时间序列为正系数对应 AST 整体北抬中东部 增强,PST 整体南压中东部减弱,反之,负时间系 数时 AST 整体南亚中东部减弱,PST 整体北抬中东 部增强。在第二模态中,PC2与两大洋风暴轴所有 的强度指数相关性均显著,与 PST 西部纬度指数为 负相关,说明这一模态主要体现两大洋风暴轴强度



图 3 同图 2, 但为冬季风暴轴的年代际尺度

Fig. 3 As in Fig. 2, but for the interdecadal components of wintertime storm tracks

之间的一致性变化,当时间系数为正时,AST 和 PST 两者的强度同时增强,负时间系数时则两者同 时减弱。其中,风暴轴整体部分的结果与第3节时 间序列所揭示的北半球两大洋风暴轴年代际分量 的位置和强度指数之间相关关系的结果是一致的。

# 表 4 大西洋各区域风暴轴指数年代际分量与年代际尺度 EOF 分析的时间系数的相关系数

Table 4Correlation coefficients between the interdecadalcomponent of indices over different areas of AST and timecoefficients of the EOF modes at interdecadal scale

	相关系数											
		纬度	皆数		强度指数							
	西部	中部	东部	整体	西部	中部	东部	整体				
PC1	0.92**	0.86**	0.39**	0.9**	0.23	$0.27^{*}$	0.6**	0.46**				
PC2	0.13	0.21	-0.16	0.12	0.53**	$0.7^{**}$	0.39**	0.64**				

表 5 太平洋各区域风暴轴指数年代际分量与年代际尺度 EOF 分析的时间系数的相关系数

Table 5Correlation coefficients between the interdecadalcomponent of indices over different areas of PST and timecoefficients of the EOF modes at interdecadal scale

	相关系数											
		纬度	指数		强度指数							
	西部	中部	东部	整体	西部	中部	东部	整体				
PC1	-0.31*	-0.74**	-0.55**	-0.76**	-0.24	-0.29*	-0.62**	-0.41**				
PC2	-0.31*	-0.09	0.02	-0.03	0.41**	$0.47^{**}$	$0.54^{**}$	0.51**				

以上分析表明,在年代际尺度上:第一模态为 AST 整体偏北(南)中东部偏强(弱)与 PST 整体 偏南(北)中东部偏弱(强)的反位相协同变化; 第二模态为两个风暴轴的强度在其气候平均位置 附近同时增强(减弱)的一致性协同变化。因此, 在年代际尺度上两大洋风暴轴之间协同变化的空 间结构同时反映了位置和强度的变化。

图 4 为原始位势高度滤波方差场 EOF 联合分解 的结果,前两个模态的方差贡献分别为 13.4%和 12.0%。图 4 表明,两大洋风暴轴在第一模态空间 特征向量场上均表现为正负异常中心位于气候平 均位置南北两侧,北大西洋表现为北正南负,北太 平洋恰恰相反,表现为北负南正,两大洋风暴轴气 候平均位置的中西部位于正负异常中心之间,东部 则分别位于正、负异常区域,这说明在这一模态下, 两大洋风暴轴为南北位置的反方向移动并伴随东 部强度的反向变化。当时间系数(图 4c)为正时, AST 北抬伴随东部增强,PST 则南压伴随东部减弱, 时间系数为负时则相反。在第二模态下,北大西洋 存在西、东两个正值中心,但整个异常区基本位于风暴轴气候平均位置,北太平洋存在一个正异常中心,中心位于 PST 气候平均强度中心附近,正异常区域与 PST 气候平均位置相对应,该模态体现了两大洋风暴轴强度的同步变化趋势,说明正时间系数(图 4f)时,两大洋风暴轴强度均有增强,反之两者强度同时减弱。

以上分析表明,风暴轴之间的协同变化主要体 现在两个模态上,虽然己有研究表明 AST 和 PST 各自的异常空间结构均存在两个主要模态,并且这 两个模态分别体现风暴轴的位置及在气候平均位 置附近的强度变化(Rogers, 1997;朱伟军和孙照 渤,2000;朱伟军和李莹,2010;张颖娴等,2012), 但这种异常结构明显区别于两者之间的协同性变 化特征。结合年际尺度和年代际尺度来看,这种协 同变化在年际尺度上主要反映强度的变化,而在年 代际尺度上则同时反映了位置和强度的异常变化。 因此,原始位势高度滤波方差场 EOF 分解的第一模 态表现型主要由年代际分量贡献,而第二模态表现 型则是年际分量和年代际分量综合贡献的结果。

# 5 风暴轴协同变化与同期冬季海气系 统的空间耦合关系及其可能影响

研究表明,冬季北太平洋风暴轴与 500 hPa上的 PNA 型和 WP 型关系密切(朱伟军和孙照渤,2000),与高空急流核相互配置(Carillo et al.,2000),与黑潮海温及 ENSO 紧密联系(任雪娟等,2007)。北大西洋风暴轴被指出与北极涛动(AO)及北大西洋涛动(NAO)等低频环流联系密切(周星妍等,2015)。冬季北半球两大洋风暴轴之间各时间尺度的协同变化关系是否与这些低频变化及海温异常有关呢?为研究这一问题,本节分别对年际、年代际尺度上进行回归分析,并讨论风暴轴的协同变化与冬季海气系统的空间耦合关系以及可能造成的影响。

### 5.1 年际尺度风暴轴协同变化与冬季海气系统的 耦合关系

图 5 为年际尺度 EOF 分解前两个模态时间序列 回归的 500 hPa 位势高度滤波方差、500 hPa 位势 高度、海平面气压、200 hPa 纬向风、850 hPa 气温、 1000 hPa 气温和海表面温度异常空间分布。图 5 表 明,第一模态下时间尺度回归的滤波方差异常场 (图 5a)与第一模态空间特征向量场分布相似,北 太平洋风暴轴区域为显著的负异常中心,北大西洋



图 4 同图 2, 但为风暴轴原始的位势高度滤波方差场 Fig. 4 As in Fig. 2, but for the original filtered geopotential height variances of wintertime storm tracks

风暴轴区有一对北正南负的异常中心,可以看出,在 年际尺度上,500 hPa 高度异常场(图 5b)上欧洲 大陆至北太平洋上空有一对以 50°N 为界北正南负 的纬向正负异常中心, 负异常区中心位于北太平洋 上空,表现为太平洋西部型(WP)的正位相,时 间序列回归的海平面气压异常场(图 5c)上,欧亚 大陆中高纬至北太平洋为纬向正异常区,太平洋北 部为负异常中心,异常中心位于 40°N 附近,在这 种深厚的环流异常影响下,气旋性和反气旋性异常 中心之间为异常东风, 气旋性异常南侧为与东亚急 流气候平均位置相对应的西风异常,这与冬季温带 急流的第一模态相对应,任雪娟等(2010)指出, 在这一模态下北半球大尺度环流异常主要集中在 欧亚中高纬地区,这与本文分析一致。时间序列回 归的 200 hPa 纬向风异常场(图 5d)上北太平洋存 在显著的三极子分布特征,这种分布型与图 5b 中 北太平洋上的位势高度异常中心相对应。研究表 明,急流与风暴轴之间相互影响,东亚急流增强时

对应 PST 减弱 (Nakamura et al., 2002), 同时在对 流层中高层,风暴轴的异常强迫作用也有助于 WP 遥相关型的形成和维持(杨国杰等, 2010)。因此当 PST 强度减弱东部北抬时,对应阿留申低压减弱,西 太平洋副热带高压减弱, 东亚大槽南部为负异常, 使 其南伸至低纬,欧亚大陆北部的西伯利亚高压南移, 配合经向环流的加强,有利于西伯利亚冷空气的南下 和欧亚大陆南部暖湿空气的向北输送,使整个欧亚大 陆以 55°N 为界形成了北暖南冷的分布型(图 5f)。 与此同时,图 5b 中在北大西洋上空 50°N 附近的中 高纬地区、30°N 附近的中低纬地区分别有一个正负 异常中心,分界线为东北—西南走向,这一对正负异 常区与欧洲上空40°N附近的负异常中心组成了大西 洋东部型(EA)的正位相,研究表明,当AST 位置 偏北时对应 EA 遥相关型(Lau, 1988; Athanasiadis et al., 2010), 这与本文结果一致。回归的海平面气压 异常场(图 5c)上,副热带大西洋上空的负异常中 心减弱,大西洋上空冰岛低压强度减弱。图 5d

1069

![](_page_10_Figure_1.jpeg)

图 5 年际尺度的 500 hPa 位势高度滤波方差 EOF 分析的第一模态(左列)和第二模态(右列)时间序列回归的(a、h)500 hPa 位势高度滤波方差 异常(单位: dagpm<sup>2</sup>)、(b、i)500 hPa 位势高度场异常(单位: gpm)、(c、j)海平面气压异常(单位: hPa)、(d、k)200 hPa 纬向风异常(单位: m s<sup>-1</sup>)、(e、l)850 hPa 气温异常(单位: °C)、(f、m)1000 hPa 气温异常(单位: °C)、(g、n)海表面温度异常(单位: °C)的空间分布型。打点 区域表示通过 95%信度水平的检验

Fig. 5 Regressions of PC1 (left column) and PC2 (right column) of EOF modes of the 500-hPa filtered geopotential height variance at interannual scale on (a, h) 500-hPa filtered geopotential height variance anomalies (units: dagpm<sup>2</sup>), (b, i) 500-hPa geopotential height anomalies (units: gpm), (c, j) sea level pressure anomalies (units: hPa), (d, k) 200-hPa zonal wind anomalies (units: m s<sup>-1</sup>), (e, l) 850-hPa temperature anomalies (units: °C), (f, m) 1000-hPa temperature anomalies (units: °C), and (g, n) sea surface temperature anomalies (units: °C). Dotted areas represent the values significant above the 95% confidence level

中所体现的大西洋附近呈三极子分布型的风场特征与高度场相对应。根据 Fan and Yang (2017)的分析,当 EA 遥相关型发生时,西伯利亚地区气旋异常减少或反气旋的异常增多,从而使得西伯利亚地区温度异常升高,而东亚地区温度异常降低。

另一方面,在回归的海表面温度异常场(图5g) 中可以明显看到热带太平洋中东部海温异常降低。施 能和朱乾根(1993)指出冬季强WP型(阿留申低压 和西太平洋副热带高压同时减弱)与赤道中东太平洋 海温异常降低有良好的对应关系。通过显著性检验的 海温异常区还有我国南海至中南半岛南部和靠近美 洲大陆的副热带大西洋的海温负异常中心,中纬度大 西洋海温为正异常但未通过显著性检验,徐海明等 (2000)指出,冬季副热带大西洋海温变化与EA遥 相关型对应,这一结论与本文结果一致。说明海温异 常对北半球温度异常分布的形成也有一定贡献。

第二模态回归的滤波方差异常场(图5h)与第 二模态特征向量的空间分布基本一致,两大洋风暴 轴主体均位于正异常中心, 且北大西洋异常中心明 显强于北太平洋。回归的 500 hPa 高度异常场(图 5i)和海平面气压异常场(图 5i)可以明显看出, 整个北半球高纬度地区为负异常,中纬度异常中心 则集中在大西洋上空,对应大西洋副热带高压减 弱,冰岛低压加强,为 NAO 的正位相,对流层中 高层大西洋东部中高纬与副热带位势高度之间反 相关,与欧洲上空的位势高度正相关,对应 EA 的 正位相。此时,纬向风异常场(图5k)与高度异常 场相对应,异常中心也表现在大西洋上空,由北至 南呈现正—负—正的三极子型,北美急流减弱。北 大西洋东南海区的海温异常降低, 根据 Czaja and Frankignoul (2002) 的研究,中纬度大西洋海温异 常与 NAO 遥相关型密切相关,当北大西洋海温表 现为纽芬兰岛以南的 40°N 附近异常偏暖,南北两 侧异常偏冷时,对应同期大气对流层中高层为 NAO 正位相。在这种海气耦合关系下,两大洋风暴轴的 异常主要影响区域主要集中在北美、大西洋及欧洲 附近,北美大陆西南部及北大西洋中纬度地区温度 异常升高,北美大陆东北部及欧洲南部的中纬度地 区温度异常降低,贝加尔湖附近及其以北的中高纬 地区有弱的正异常中心,但未通过显著性检验。

# **5.2** 年代际尺度风暴轴协同变化与冬季海气系统的耦合关系

图6为年代际尺度EOF时间序列回归的环流异

常场及海表面温度异常场,在第一模态时间序列回 归的滤波方差异常场(图 6a)中,两大洋异常中心 分布与 EOF 空间场相似,在北太平洋上为北负南 正,风暴轴主体偏向负异常中心,北大西洋为北正 南负,南侧的负异常中心偏西,此时风暴轴的协同 变化表现为 AST 整体偏北 (南) 中东部偏强 (弱), PST 整体偏南(北)中东部偏弱(强)。此时,回 归的 500 hPa 位势高度异常场(图 6b)上,中高纬 东西向贝加尔湖附近、北太平洋、阿拉斯加、北美 东岸、西欧沿岸及乌拉尔山以西分别存在正—负— 正一负一正一负的异常中心,这些异常中心分别对 应冬季西风带上的三槽三脊, 这有利于气候平均态 上平均槽脊的增强,也有利于中纬度地区经向环流 加强,高纬度的负异常区说明极涡增强收缩,使得 冷空气禁锢在高纬不易南下。此外,阿留申地区的 负异常中心与副热带太平洋的正异常中心、北美西 北部的正异常中心以及美国东部的负异常组成了 PNA 的正位相,太平洋西北部位势高度降低,西南 部位势高度增强,对应 WP 的正位相,大西洋西部 上空则对应西大西洋型(WA)的负位相。回归的 海平面气压异常场(图 6c)上,中纬度北大西洋和 北太平洋上分别有显著的海盆形状的海平面气压 正负异常区域,对应亚速尔高压和阿留申低压强度 的增强,其中亚速尔高压附近的海平面气压正异常 和高纬度冰岛低压的海平面气压负异常与 NAO 的 正位相对应。此时,两大洋上空纬向风异常场(图 6d)为三极子分布型,高纬地区西风异常增强,40°N 附近西风异常减弱,不利于极地冷空气南下,但却 有利于热带的温暖空气北上至西伯利亚地区, 使得 西伯利亚地区升温,亚洲南部温度则异常降低。同 时,东亚急流气候平均位置及其下游出口区位于正 异常中心,北美急流则位于大西洋上空正负异常之 间的零线附近偏向负异常一侧,这种分布有利于东 亚急流强度增强,北美急流减弱并向北移动,周星 妍等(2015)也指出冬季大西洋风暴轴偏向东北或 西南异常时对应北美急流的向北或向南移动。

图 6g 为回归的海表面温度异常场,图中北美西海岸及热带中东太平洋地区海温异常偏高,而太平洋中部海温异常偏低,与太平洋年代际振荡(PDO)暖位相对应,研究表明(朱益民和杨修群,2003),PDO暖位相时,对应阿留申低压和蒙古高压增强,我国西南、华南地区气温偏低。以往的研究表明PDO暖位相和 El Niño现象都有利于激发或加强 PNA 遥相关

型。北大西洋 30°N 附近的副热带海域海表面温度异常升高,其北侧格陵兰岛以南及其南侧的热带地区海表面温度异常降低,其中格陵兰岛以南地区表现为显著异常,徐海明等(2000)则指出中纬度西北太平洋海温异常与 WA 遥相关型对应。PC1 回归的温度异常场(图 6e、f)可以看出,新地岛及其以北的高纬度地区为负异常中心,欧亚大陆北部的大部分地区温度异常升高,我国华南、西南地区至里海南部以及鄂霍茨克海附近温度异常降低,北美大陆则为西暖冬冷的分布型。根据对环流异常和海温异常的分析,说明在这一模态下海温的异常强迫使得位势高度场异常,并引起风场调整,从而进一步对两大洋风暴轴产生影响,最终引起北半球温度异常变化。

由第二模态时间系数回归的环流异常场及海 表面温度异常场(图 6h-n)可以看出,当北半球两 大洋风暴轴强度同时增强时,时间序列回归的 500 hPa 高度异常场(图 6i)和海平面气压异常场(图 6j) 均表现为乌拉尔山向东至北太平洋地区以 50°N 为界呈北负南正的偶极子型分布,北美大陆东部至 北大西洋同样呈这种偶极子分布,此时蒙古高压和 阿留申低压加深北移, 30°N 附近的副热带高压增 强,对应 WP 的负位相,大西洋西部的冰岛低压与 副热带高压之间位势高度的反向相关组成了 WA 的 负位相,在海平面气压异常场中二者位势高度的这 种反相关形成了 NAO 遥相关型的正位相。回归的 纬向风异常场(图 6k)中可以看出,两大洋基本以 40°N 为界呈北正南负的偶极子型分布,说明当两大 洋风暴轴强度同时增强时,东亚急流和北美急流同 时北抬。海平面温度异常场(图 6n)中日本以南 30°N 附近的黑潮及其延伸区附近海温异常升高,北 太平洋中部异常降低,表明这一模态与黑潮及其延 伸区海温密切相关,北大西洋 40°N 以北和 20°N 以 南海区有强烈的负异常中心。温度异常场(图 61 和图 6m)表明当两大洋风暴轴强度同时增强时, 乌拉尔山以西的北欧和欧洲南部分别为正负异常 中心,欧亚大陆上自贝加尔湖向东南方向至日本以

南地区温度异常升高,而北太平洋其他地区温度异 常降低,大西洋方面,冰岛及美国东部地区温度显 著降低。以上分析说明,年代际尺度下风暴轴和急 流的异常特征同样受到不同地区海温异常作用影 响,从而导致温度的异常变化。

#### **5.3** 年际和年代际尺度 EOF 分解的时间序列与大 气环流指数和海温指数间的关系

为进一步证实 5.1 和 5.2 节的讨论结果,表 6 计算了部分大气环流指数以及海温指数与各 EOF 分解时间序列之间的相关系数。其中,北大西洋涛 动指数 (NAO) 和太平洋年代际振荡指数 (PDO) 取自美国气候预报中心 (CPC) 的计算结果,太平 洋西部型指数 (WP)、西大西洋型指数 (WA)、大 西洋东部型指数 (EA) 和太平洋北美型指数 (PNA) 根据 Wallace and Gutzler (1981) 定义的遥相关型指 数计算得到,厄尔尼诺 3 区指数(NINO3)为(5°N~ 5°S, 150°W~90°W) 区域内海表面温度的平均值, 阿留申低压指数 (AL) 的定义是取 (30°N~65°N, 160°E~140°W) 区域内海平面气压的区域平均

(Trenberth and Hurrell, 1994), 黑潮海温指数(HC) 的定义是取(15.5°N~32.5°N, 120.5°E~150.5°E) 区域内海表面温度的平均值代表,东亚急流(EAJ, East Asia Jet Stream)和北美急流(NAJ, North American Jet Stream)指数的定义为在规定范围内每 一经度上 500 hPa 纬向风最大值所在纬度的平均值 为纬度指数(EAJY、NAJY),最大纬向风的平均 值为强度指数(EAJY、NAJY),最大纬向风的平均 (25°N~65°N, 100°W~0°), EAJ 范围为(20°N~ 50°N, 100°E~140°W)。

需要说明的是,因为以上这些指数大多都同时 具有年际变化和年代际变化特征,并且对风暴轴的 年际变化和年代际变化都具有重要影响,因此,在 此处相关系数的计算中没有再对这些指数分别滤 出其年际分量和年代际分量。

由表 6 可以看出,两大洋风暴轴之间的协同变 化与北半球大气环流及海温的异常有密切的关系,

表 6 各大气、海温指数与各时间系数的相关系数

Table 6 Correlation coefficients between atmospheric/oceanic indices and time coefficients (PCs) of EOF

相关系数													
	WP	WA	EA	PNA	AL	NAO	PDO	NINO3	HC	EAJY	EAJI	NAJY	NAJI
PC1 (年际)	0.53**	0.17	0.45**	0.08	-0.23	0.03	-0.15	-0.29*	-0.24	-0.07	0.29*	-0.21	-0.24
PC2 (年际)	-0.09	-0.02	0.29*	0.15	-0.08	0.32*	0.04	0.19	0.09	0.04	0.02	0.15	-0.19
PC1 (年代际)	0.28*	-0.27*	-0.01	0.3*	-0.36**	0.29*	0.38**	0.18	-0.16	-0.17	0.33*	0.33*	-0.19
PC2 (年代际)	-0.27*	-0.44**	-0.06	-0.07	0.01	0.28*	0.01	0.03	0.23	0.09	-0.09	0.33*	-0.03

其中年际尺度上的时间序列与各指数间的相关系数说明:当风暴轴的协同变化表现为 AST 偏北偏弱、PST 偏弱东部偏北时,对流层中高层对应 WP和 EA 遥相关型正位相,东亚急流轴附近西风加剧,太平洋海温对应 La Niña 现象;当两大洋风暴轴同时增强伴随 AST 北抬时,海平面气压场对应 NAO

遥相关型正位相,对流层中高层对应 EA 遥相关型的正位相。年代际结果表明:第一模态时间系数与WP、WA、PNA、AL、NAO、PDO 显著相关,即当风暴轴呈现 AST 偏北中东部增强、PST 偏南中东部减弱这种配置时,阿留申低压增强,海平面气压场为 NAO 正位相,500 hPa 呈现 PNA、WP 正位相、

![](_page_13_Figure_5.jpeg)

Fig. 6 As in Fig. 5, but for anomalous distributions at the interdecadal scale

WA 负位相, 东亚急流增强, 北美急流向北移动, 海温方面对应 PDO 暖位相; 第二模态时间序列与 WP、WA、NAO 指数显著相关, 与 HC 虽然未通过 显著性检验, 但相关系数达到 0.23, 即当两大洋风 暴轴同时增强时,海平面气压场对应 NAO 正位相, 对流层中高层对应 WP、WA 负位相, 北美急流北 抬, 黑潮及其附近海域海温异常升高。

以上分析结果与 5.1 和 5.2 节所讨论的结果基 本一致,但与各环流指数相比,海温指数与时间序 列的相关性并不十分显著,其原因可能是海温异常 对北半球风暴轴气候异常的作用不是那么直接,而 是主要通过引起低频变化等环流异常而产生的间 接影响,因为大量的研究均表明,海温异常的外部 强迫作用对大尺度环流内部的风、压场和斜压性的 调整具有重要作用,因此也必然对北半球两大洋风 暴轴的协同变化产生重要影响。

### 6 结论

基于 1960~2014 年 NCEP/NCAR 提供的逐日 再分析资料、NCPC 提供的海温资料和大气环流及 海洋指数,通过风暴轴指数、经验证交分解(EOF) 等方法,研究了冬季北半球北太平洋风暴轴(PST) 和北大西洋风暴轴(AST)之间不同时间尺度下的 协同变化特征,并利用回归和相关分析对风暴轴的 年际和年代际协同变化特征与同期海气系统的空 间耦合之间的关系进行了探讨。主要结论如下:

(1)从所定义的冬季北半球两大洋风暴轴的纬 度、经度和强度指数来看:三个指数均存在明显的年 际变化和年代际变化,其中年际分量的方差贡献远大 于年代际分量;对于单个风暴轴来讲,无论是滤波方 差场原始序列还是其年际分量和年代际分量序列,每 个风暴轴各自的纬度指数和经度指数均呈显著正相 关,表明每个风暴轴各自的南北位移和东西位移具有 很好的协同性;虽然从原始序列来看,两个风暴轴之 间各指数之间的相关关系均并不显著,但是对于年际 分量序列和年代际分量序列,两个风暴轴之间均具有 显著的协同性变化,其中,在年际尺度上,两者仅强 度变化之间具有显著的正相关,而在年代际尺度上, AST 的经度(纬度)变化与 PST 的强度(纬度及强 度)变化均具有显著的负相关。

(2) EOF 结果表明:两个风暴轴之间协同变化 的空间结构在年际尺度上反映的主要是强度的变 化,第一模态为两者强度在其气候平均位置附近同 时减弱(增强)并伴随 AST 整体和 PST 东部均略 有北抬(南压),第二模态为两者强度在其气候平 均位置附近同时减弱(增强)并仅伴随 AST 整体略 有南压(北抬);而在年代际尺度上,第一模态为 AST 整体偏北(南)中东部偏强(弱)与 PST 整体 偏南(北)中东部偏弱(强)的反位相协同变化, 第二模态为两个风暴轴的强度在其气候平均位置 附近同时增强(减弱)的一致性协同变化。

(3) 在年际尺度上,当风暴轴的协同变化表现 为 AST 偏北偏弱 PST 偏弱东部偏北时,对流层中 高层对应 WP 和 EA 遥相关型正位相,东亚急流轴 附近西风加剧,北美急流减弱南压,东亚大槽南伸 至低纬,欧亚大陆北部的西伯利亚高压南移,配合 经向环流的加强,有利于西伯利亚冷空气的南下和 欧亚大陆南部暖湿空气的向北输送, 使整个欧亚大 陆形成了北暖南冷的分布型。海温异常场中的 La Niña 现象和副热带大西洋海温负异常分别与 WP 和 EA 遥相关型对应。而当两大洋风暴轴同时增强伴 随 AST 北抬时,环流异常主要体现在大西洋及北美 地区附近,海平面气压场冰岛低压增强,对应NAO 遥相关型正位相,对流层中高层对应 EA 遥相关型 的正位相,北美急流减弱,北大西洋东南部海区海 温异常降低,同期北美大陆西南部及北大西洋中纬 度地区温度异常升高,北美大陆东北部及欧洲南部 的中纬度地区温度异常降低,贝加尔湖附近及其以 北的中高纬地区温度略有升高。

(4) 在年代际尺度上,当风暴轴呈现 AST 偏北 中东部增强、PST 偏南中东部减弱时,北半球平均 槽脊增强, 经向环流增强, 极涡收缩, 呈现 NAO 正 位相,500 hPa 高度场上平均槽脊增强,呈现 PNA、 WP 正位相、WA 负位相,东亚急流增强,北美急流 减弱并向北移动,使得高纬冷空气禁锢在极地,热 带暖空气北上。海温异常表现为 PDO 暖位相,在这 种海气耦合关系作用下,欧亚大陆北部的大部分地 区温度异常升高,我国华南、西南地区至里海南部 以及鄂霍茨克海附近温度异常降低,新地岛及其以 北的高纬度地区为负异常中心,北美大陆则为西暖 冬冷的分布型。而当两大洋风暴轴同时增强时,蒙 古高压、阿留申低压增强,海平面气压场显示为NAO 正位相,对流层中高层对应 WP、WA 负位相,东亚 急流、北美急流同时北抬,黑潮及其附近海域海温 异常升高,此时乌拉尔山以西的北欧、欧亚大陆上 自贝加尔湖向东南方向至日本以南地区温度异常升

高,欧洲南部、冰岛及美国东部地区温度显著降低。

需要指出的是,对于北半球两大洋风暴轴的 协同变化特征,为了检验本文所使用的 NCEP/ NCAR 资料所得结果是否稳定,还利用欧洲中期 数值预报中心(ECMWF)的 ERA-Interim 资料进 行了同样的分析,对比后发现结果一致。此外, 对于冬季北半球两大洋风暴轴的协同变化与同期 海气系统之间的耦合关系,本文仅进行了初步的 诊断分析,具体的影响机制和机理分析还有待进 一步研究。

#### 参考文献(References)

- Athanasiadis P J, Wallace J M, Wettstein J J. 2010. Patterns of wintertime jet stream variability and their relation to the storm tracks [J]. J. Atmos. Sci., 67 (5): 1361–1381, doi:10.1175/2009JAS3270.1.
- Blackmon M L. 1976. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. J. Atmos. Sci., 33 (8): 1607–1623, doi:10.1175/1520-0469(1976)033<1607:ACSSOT>2.0.CO;2.
- Blackmon M L, Wallace J M, Lau N C, et al. 1977. An observational study of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. J. Atmos. Sci., 34 (7): 1040–1053, doi:10.1175/1520-0469(1977)034<1040:AOSOTN>2.0. CO;2.
- Carillo A, Ruti P M, Navarra A. 2000. Storm tracks and zonal mean flow variability: A comparison between observed and simulated data [J]. Climate Dyn., 16 (2–3): 219–228, doi:10.1007/s003820050015.
- Chang E K M, Orlanski I. 1993. On the dynamics of a storm track [J]. J. Atmos. Sci., 50 (7): 999–1015, doi:10.1175/1520-0469(1993)050<0999: OTDOAS>2.0.CO;2.
- Chang E K M. 2004. Are the Northern Hemisphere winter storm tracks significantly correlated? [J] J. Climate, 17 (21): 4230–4244, doi:10.1175/ JCLI3195.1.
- Chang E K M, Fu Y F. 2002. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity [J]. J. Climate, 15 (6): 642–658, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0642:IVINHW>2.0.CO;2.
- Chang E K M, Fu Y F. 2003. Using mean flow change as a proxy to infer interdecadal storm track variability [J]. J. Climate, 16 (13): 2178–2196, doi:10.1175/2773.1.
- Chang E K M, Yau A M W. 2016. Northern Hemisphere winter storm track trends since 1959 derived from multiple reanalysis datasets [J]. Climate Dyn., 47 (5–6): 1435–1454, doi:10.1007/s00382-015-2911-8.
- Czaja A, Frankignoul C. 2002. Observed impact of Atlantic SST anomalies on the North Atlantic oscillation [J]. J. Climate, 15 (6): 606–623, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<0606:OIOASA>2.0.CO;2.
- 董丽娜, 张福颖. 2013. 瞬变波动力强迫对初夏至盛夏东亚高空西风急 流变化的影响 [J]. 大气科学学报, 36 (5): 568–576. Dong Li'na, Zhang Fuying. 2013. Effects of transient waves' dynamic forcing on variations of East Asian subtropical westerly jet from early summer to midsummer [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (5): 568–576, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.05.007.
- Fan S M, Yang X S. 2017. Arctic and East Asia winter climate variations associated with the eastern Atlantic pattern [J]. J. Climate, 30 (2): 573–583, doi:10.1175/JCLI-D-15-0741.1.

- Lau N C. 1978. On the three-dimensional structure of the observed transient eddy statistics of the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. J. Atmos. Sci., 35 (10): 1900–1923, doi:10.1175/1520-0469(1978)035<1900:OTTDSO>2.0.CO;2.
- Lau N C. 1988. Variability of the observed midlatitude storm tracks in relation to low-frequency changes in the circulation pattern [J]. J. Atmos. Sci., 45 (19): 2718–2743, doi:10.1175/1520-0469(1988)045<2718: VOTOMS>2.0.CO;2.
- Lau N C, Wallace J M. 1979. On the distribution of horizontal transports by transient eddies in the Northern Hemisphere wintertime circulation [J]. J. Atmos. Sci., 36 (10): 1844–1861, doi:10.1175/1520-0469(1979)036<1844: OTDOHT>2.0.CO;2.
- Lee S S, Lee J Y, Wang B, et al. 2012. Interdecadal changes in the storm track activity over the North Pacific and North Atlantic [J]. Climate Dyn., 39 (1–2): 313–327, doi:10.1007/s00382-011-1188-9.
- 李莹,朱伟军,魏建苏. 2010. 冬季北太平洋风暴轴指数的评估及其改进 [J]. 大气科学, 34 (5): 1001–1010. Li Ying, Zhu Weijun, Wei Jiansu. 2010. Reappraisal and improvement of winter storm track indices in the North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 1001–1010, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.05.14.
- Nakamura H, Izumi T, Sampe T. 2002. Interannual and decadal modulations recently observed in the Pacific storm track activity and East Asian winter monsoon [J]. J. Climate, 15 (14): 1855–1874, doi:10.1175/1520-0442 (2002)015<1855:IADMRO>2.0.CO;2.
- 覃军,王盘兴. 2005. 中国东部夏季三个雨带降水的年代际变化及其与 中高纬环流和海温的关系 [J]. 热带气象学报, 21 (1): 63-71. Qin Jun, Wang Panxing. 2005. Interdecadal variations of monsoon rainbands over China and their relationships with ocean-atmospheric systems in mid-high latitudes [J]. J. Trop. Meteor. (in Chinese), 21 (1): 63-71, doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2005.01.007.
- 任雪娟,杨修群,韩博,等. 2007. 北太平洋风暴轴的变异特征及其与中 纬度海气耦合关系分析 [J]. 地球物理学报, 50 (1): 92–100. Ren X J, Yang X Q, Han B, et al. 2007. Storm track variations in the North Pacific in winter season and the coupled pattern with the midlatitude atmosphere–ocean system [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50 (1): 92–100, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2007.01.012.
- 任雪娟, 张耀存. 2007. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大 气瞬变扰动的关系探讨 [J]. 气象学报, 65 (4): 550–560. Ren Xuejuan, Zhang Yaocun. 2007. Association of winter western Pacific jet stream anomalies at 200 hPa with ocean surface heating and atmospheric transient eddies [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 65 (4): 550–560, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.04.008.
- 任雪娟, 杨修群, 周天军, 等. 2010. 冬季东亚副热带急流与温带急流的 比较分析: 大尺度特征和瞬变扰动活动 [J]. 气象学报, 68 (1): 1–11. Ren Xuejuan, Yang Xiuqun, Zhou Tianjun, et al. 2010. Diagnostic comparison of the East Asian subtropical jet and polar-front jet: Large-scale characteristics and transient eddy activities [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68 (1): 1–11, doi:10.11676/qxxb2010.0.
- Rogers J C. 1997. North Atlantic storm track variability and its association to the North Atlantic Oscillation and climate variability of northern Europe [J]. J. Climate, 10 (7): 1635–1647, doi:10.1175/1520-0442(1997) 010<1635:NASTVA>2.0.CO;2.
- Shaw T A, Baldwin M, Barnes E A, et al. 2016. Storm track processes and the opposing influences of climate change [J]. Nat. Geosci., 9 (9): 656–664, doi:10.1038/ngeo2783.
- 施能,朱乾根. 1993. 北半球冬半年遥相关型强度指数的年际变化特征

及其与厄尔尼诺的遥响应 [J]. 南京气象学院学报, 16 (2): 130–138. Shi Neng, Zhu Qiangen. 1993. Interannual variations in the telecorrelation intensity indices and their remote response to the El Niño events in the northern winter half year [J]. J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese), 16 (2): 130–138.

- Storch H V, Zwiers F W. 1999. Statistical Analysis in Climate Research [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 484pp.
- 孙照渤. 1992. 热带外地区大气中 40~60 天振荡的统计特征 [C]//章嘉 基. 长期天气预报论文集. 北京: 海洋出版社, 29-35. Sun Zhaobo. 1992. The statistical features of the 40-60 days fluctuations [C]//Zhang Jiaji. The Paper Reels of Long-term Weather Forecast (in Chinese). Beijing: China Ocean Press, 29-35.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific [J]. Climate Dyn., 9 (6): 303–319, doi:10.1007/BF00204745.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109 (4): 784–812, doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2.
- 王娜, 孙照渤. 2014. 冬季北太平洋风暴轴的年际型态及其与大气环流 的关系 [J]. 大气科学学报, 37 (2): 175–187. Wang Na, Sun Zhaobo. 2014. Interannual patterns of winter North Pacific storm track and its relationship with atmospheric circulation [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (2): 175–187, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2014.02.006.
- 徐海明,何金海,管兆勇,等. 2000. 北半球冬季 WA 遥相关型影响东亚 初夏季风的可能途径 [J]. 南京气象学院学报, 23 (3): 361–369. Xu Haiming, He Jinhai, Guan Zhaoyong, et al. 2000. Possible way of the effect of WA teleconnection pattern on the early summer monsoon over eastern Asia [J]. J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese), 23 (3): 361–369, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2000.03.008.
- 杨国杰,任雪娟,孙旭光,等. 2010. 大气瞬变强迫对冬季西太平洋遥相 关型影响 [J]. 气象科学, 30 (3): 285–291. Yang Guojie, Ren Xuejuan, Sun Xuguang, et al. 2010. Primary analysis of the effect of the transient eddy forcing on western Pacific teleconnection pattern in winter [J]. Sci. Meteor. Sinica (in Chinese), 30 (3): 285–291, doi:10.3969/j.issn. 1009-0827.2010.03.001.
- 袁凯,朱伟军,陈懿妮. 2015. 北太平洋东部风暴轴的变化特征及其与 大气环流和 SST 异常的关系 [J]. 大气科学学报, 38 (1): 66–75. Yuan Kai, Zhu Weijun, Chen Yini. 2015. Characteristics of eastern storm track variations over the North Pacific and its relationship with the atmospheric circulation and SST anomaly [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 38 (1): 66–75, doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20111210001.
- 曾鼎文,朱伟军,李耀辉,等. 2015a. 冬季北大西洋风暴轴的东西变化 及其能量诊断 [J]. 气象科学, 35 (6): 691–700. Zeng Dingwen, Zhu Weijun, Li Yaohui, et al. 2015a. Zonal variations and its energy budget analysis of North Atlantic storm track in winter [J]. J. Meteor. Sci. (in

Chinese), 35 (6): 691-700, doi:10.3969/2014jms.0075.

- 曾鼎文,朱伟军,马小娇,等. 2015b. 冬季北大西洋风暴轴的变化及其 对西伯利亚高压的影响 [J]. 大气科学学报, 38 (2): 232-240. Zeng Dingwen, Zhu Weijun, Ma Xiaojiao, et al. 2015b. North Atlantic storm track and its influence on Siberian high in winter [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 232-240, doi:10.13878/j.cnki. dqkxxb.20121003001.
- 张颖婉, 丁一汇, 李巧萍. 2012. 北半球温带气旋活动和风暴路径的年 代际变化 [J]. 大气科学, 36 (5): 912–928. Zhang Yingxian, Ding Yihui, Li Qiaoping. 2012. Interdecadal variations of extratropical cyclone activities and storm tracks in the Northern Hemisphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 912–928, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11158.
- 周星妍,朱伟军,顾聪. 2015. 冬季北大西洋风暴轴异常对我国寒潮活动的可能影响 [J]. 大气科学, 39 (5): 978–990. Zhou Xingyan, Zhu Weijun, Gu Cong. 2015. Possible influence of the variation of the northern Atlantic storm track on the activity of cold waves in China during winter [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 978–990, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1501.14259.
- 朱伟军, 孙照渤. 1999. 风暴轴的研究 [J]. 南京气象学院学报, 22 (1): 121–127. Zhu Weijun, Sun Zhaobo. 1999. A review on storm track research [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 22 (1): 121–127.
- 朱伟军,孙照渤. 2000. 冬季北太平洋风暴轴的年际变化及其与 500 hPa 高度以及热带和北太平洋海温的联系 [J]. 气象学报, 58 (3): 309–320. Zhu Weijun, Sun Zhaobo. 2000. Interannual variability of northern winter Pacific storm track and its association with 500 hPa height and tropical and northern Pacific sea surface temperature [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 58 (3): 309–320, doi:10.11676/qxxb2000.032.
- 朱伟军, 李莹. 2010. 冬季北太平洋风暴轴的年代际变化特征及其可能 影响机制 [J]. 气象学报, 68 (4): 477–486. Zhu Weijun, Li Ying. 2010. Inter-decadal variation characteristics of winter North Pacific storm tracks and its possible influencing mechanism [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 68(4): 477–486, doi:10.11676/qxxb2010.046.
- 朱伟军, 袁凯, 陈懿妮. 2013. 北太平洋东部风暴轴的时空演变特征 [J]. 大气科学, 37 (1): 65–80. Zhu Weijun, Yuan Kai, Chen Yini. 2013. Spatial and temporal variations in the eastern North Pacific storm track [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (1): 65–80, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11245.
- 朱益民,杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific Decadal Oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 61 (6): 641–654, doi:10.11676/qxxb2003.065.