

# Interdecadal Shift of the Northern Hemisphere Storm Track under Global Warming Hiatus

Wang Gang<sup>1</sup>, Fei Huang<sup>1,2\*</sup>, Hong Wang<sup>1</sup>, Tingting Fan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Physical Oceanography Laboratory/CIMST, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Collabrative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo Zhejiang

Email: [huangf@ouc.edu.cn](mailto:huangf@ouc.edu.cn)

Received: Jul. 6<sup>th</sup>, 2017; accepted: Jul. 22<sup>nd</sup>, 2017; published: Jul. 25<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

Based on the ERA-Interim daily reanalysis data (1979-2014) from the European Center for Medium range Weather Forecasting (ECMWF), storm track is defined as monthly mean variance of geopotential height at 300 hPa with harmony filtering from 2 to 7 days. Temporal and spatial variations of the storm track over northern hemisphere are analyzed. Results indicate that the intensity and location of storm track have a remarkable interdecadal shift around 1998 and an opposite behavior for the Pacific storm track (PST) and the Atlantic storm track (AST). After 1998 when global warming hiatus period began, the “midwinter suppression” phenomenon of PST appears frequently and the PST shifts polar ward. Meanwhile, the AST maximum intensity occurs in October-November early than in February-March and the AST moves toward equator. These “seesaw” characteristics of PST and AST show clearly in the leading mode by a Season-reliant Empirical Orthogonal Function (S-EOF) analysis, especially in cold season. The storm track’s interdecadal shift may relate to the variability of mean flow-wave interaction, which is yet to be investigated.

## Keywords

Storm Track, Interdecadal Shift, Pacific, Atlantic, S-EOF

---

# 全球变暖停滞背景下北半球风暴路径的年代际变化特征

王刚<sup>1</sup>, 黄菲<sup>1,2\*</sup>, 王宏<sup>1</sup>, 樊婷婷<sup>1</sup>

\*通讯作者。

文章引用: 王刚, 黄菲, 王宏, 樊婷婷. 全球变暖停滞背景下北半球风暴路径的年代际变化特征[J]. 气候变化研究快报, 2017, 6(3): 186-194. <https://doi.org/10.12677/ccr.2017.63020>

<sup>1</sup>中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室和青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛

<sup>2</sup>宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波

Email: huangf@ouc.edu.cn

收稿日期: 2017年7月6日; 录用日期: 2017年7月22日; 发布日期: 2017年7月25日

## 摘要

本文基于1979-2014年欧洲中期天气预报中心ERA-Interim的逐日再分析资料,用300 hPa位势高度场天气尺度扰动方差代表风暴路径,分析了北半球风暴路径的时空变化特征。结果表明,北半球风暴路径的强度和位置变化在1998年前后存在显著的年代际差异,且北太平洋风暴路径(PST)和大西洋风暴路径(AST)表现不同。在1998年后全球变暖停滞阶段PST出现“深冬抑制”现象加强的特征,且风暴轴位置向极移动,AST则出现最大强度从晚冬(2~3月)向深秋(10~11月)提前的变化趋势,风暴轴位置向南移动。这些特征均在风暴路径S-EOF的第一主模态时空特征中得以体现,特别是秋冬季节PST和AST“跷跷板”式的反位相年代际变化,可能与波-流相互作用的年代际差异有关,仍需要更深入的物理机制分析。

## 关键词

风暴轴, 年代际变化, 太平洋, 大西洋, S-EOF

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

风暴路径是斜压性气旋盛行的带状区域,气旋活动高发区和强气旋活动区同风暴路径活动区域相对应[1]。风暴路径对大气环流的维持和天气气候变化起着重要的作用,风暴路径强度和位置的变化同中纬度天气和短期气候变率密切相关。所以,风暴路径一直是气候动力学和短期气候预测理论研究的重点之一。北半球天气尺度上瞬变扰动最活跃的区域主要集中在中纬度两个大洋区域,分别为北太平洋风暴路径(PST)和大西洋风暴路径(AST)。

北半球风暴路径活动具有显著的年代际变化,Chang 和 Fu [2]通过分析大气再分析数据和探空仪观测数据,指出早在 1970s 年代初期其就由强度较弱的风暴路径转变为较强的风暴路径。Nakamura 等[3]发现在 1980s 晚期和 1990s 初期,北太平洋冬季风暴路径也存在显著年代际变化。有分析认为风暴路径发生这种年代际变化可能与 AO 和 ENSO 等低频变化密切相关[2],也有研究指出可能还与背景环流和 SST 的低频变化有关[4]。但是近三十年来,在全球气候变暖的大背景下,北极海冰迅速融化,中纬度异常天气频繁发生,而风暴路径的强度和位置也发生了变化。南北半球的风暴路径都开始向极地和垂直向上的方向发生移动[5]。Zhang 等[6]认为风暴轴向极的移动可能是由于冰面融化,表面能量通量释放进入大气底层,海冰边缘向极地中心移动,导致气旋生成区向北移动。同时,由于北极海冰融化,北极温室增暖效应被放大[7],这导致极地向赤道的温度梯度进一步减小,从而通过大气环流的作用改变风暴路径的强度和位置变化。

早期的研究受限于资料的时间长度,且以往对风暴路径年代际变化的研究都集中在上个世纪 70 年代

的冬季[2] [8], 近三十年里全球不仅经历了快速变暖的过程, 同时在 1990s 年代末发生了全球变暖停滞的现象[9], 更是引起了科学家的关注。在这种全球变暖停滞的背景下, 北半球两大洋上的风暴路径会发生怎样的变化? 其在全球变暖和变暖停滞不同的年代际背景下时空特征如何? 这将是本文重点分析的内容。

## 2. 资料和方法

本文研究采用的大气资料来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的 ERA-Interim 全球逐日再分析资料, 包含风场、高度场、温度场以及热通量数据等, 垂直方向从 1000 hPa 到 10 hPa 共 17 层, 水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ , 资料起止时间为 1979 年 1 月 1 日到 2014 年 12 月 31 日。

考虑到本文研究侧重于风暴路径的统计特征, 我们采用天气尺度的瞬变扰动方差来表征风暴路径。对 300 hPa 位势高度场的逐日资料进行 2~7 天的谐波滤波, 然后用月平均均方差来表征风暴轴活动强度。以滤波方差最大的格点作为风暴轴中心, 其中心所在经纬度作为风暴轴的位置。通过 36 年(1979~2014 年)北半球 300 hPa 位势高度扰动方差的平均分布, 将大于等于  $30 \text{ dagpm}^2$  区域定为风暴路径主轴区(图 1)。

可以看出, 北半球主要存在两大风暴路径, 分别位于北太平洋和北大西洋上空: 北太平洋风暴路径(Pacific Storm track, PST)起始于  $120^{\circ}\text{E}$  跨过太平洋抵达北美西海岸  $120^{\circ}\text{W}$ ; 北大西洋风暴路径(Atlantic Storm track, AST)则位于  $90^{\circ}\text{W}$  向东跨越整个大西洋到  $0^{\circ}$  附近。因此, 分别取  $120^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{W}$ ,  $35^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$  作为 PST 的中心活动区域, 取  $90^{\circ}\text{W}\sim 0^{\circ}\text{E}$ ,  $35^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$  作为 AST 的中心活动区域(如图 1 红色扇形区域)。

## 3. 风暴路径的年代际变化特征

### 3.1. 两大洋上风暴路径强度的年代际变化

北半球风暴路径强度存在很强的季节变化, 冬季最强位置偏南, 夏季最弱位置偏北。这种季节变化与大气斜压性和急流的变化基本一致, 其强度和位置主要受到太阳辐射的影响。我们分别选取 PST 和

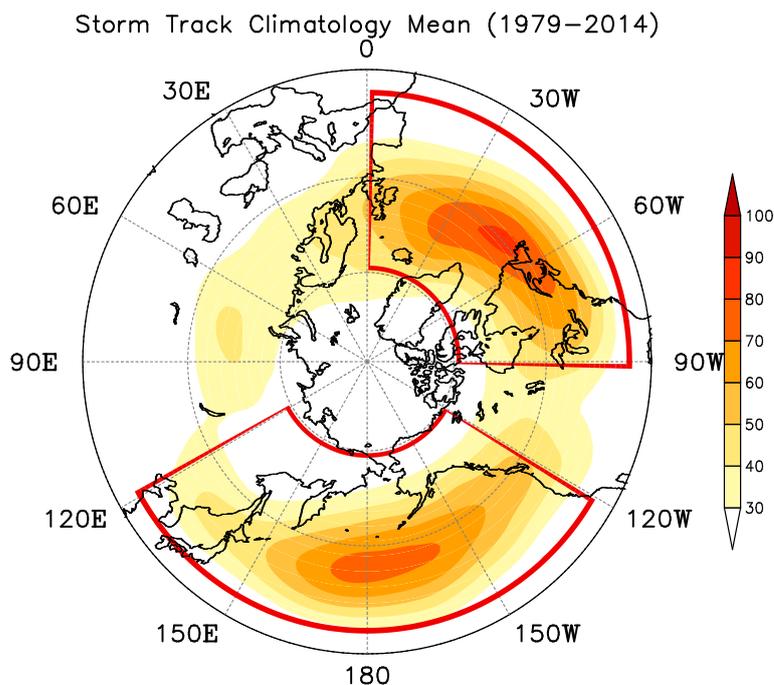


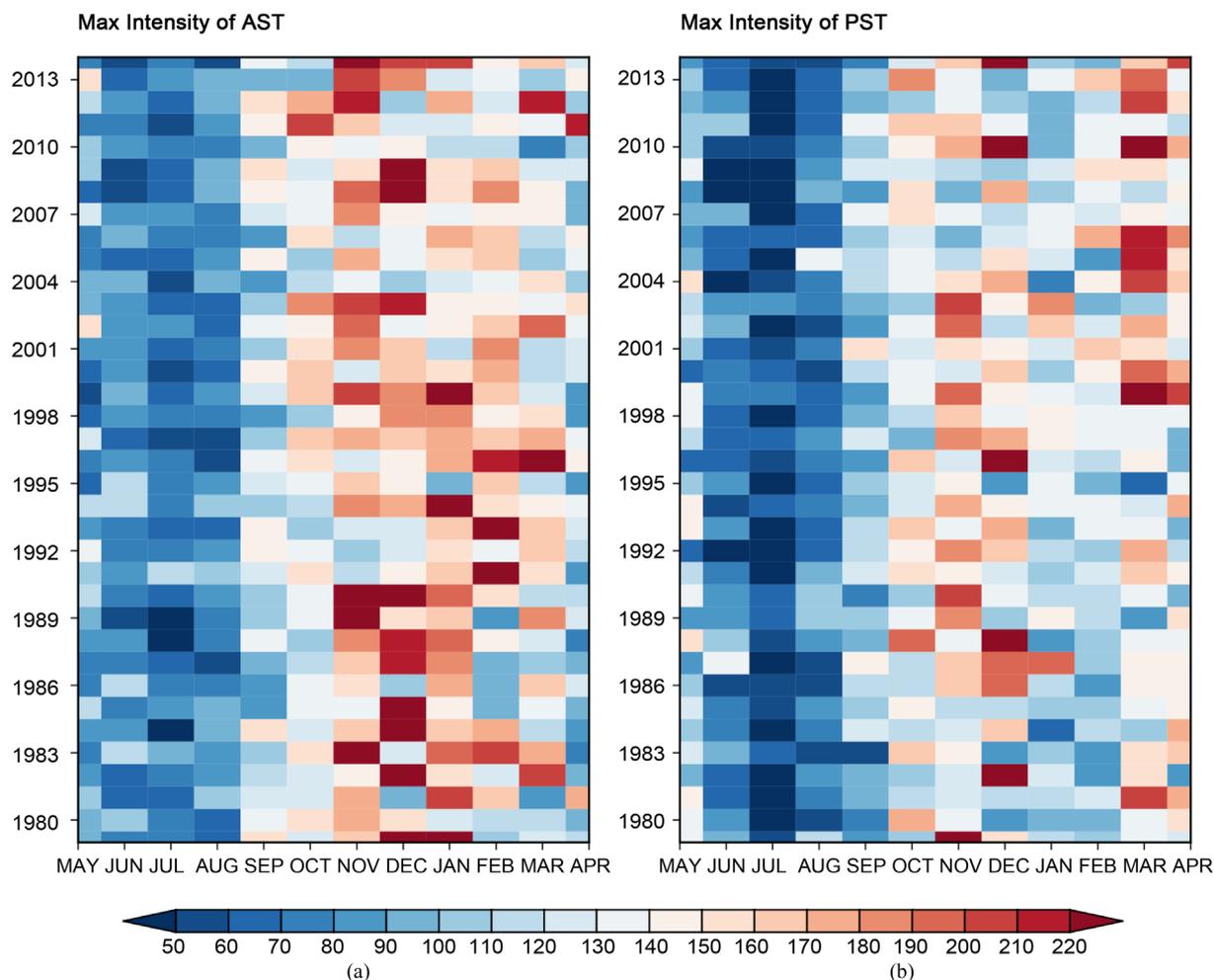
Figure 1. Spatial distributions of the climatological storm track (1979–2014), unit:  $\text{dagpm}^2$

图 1. 北半球风暴路径气候平均(1979~2014)的空间分布, 单位:  $\text{dagpm}^2$

AST 在 300 hPa 位势高度场 2~7 天滤波方差的中心最大强度表征风暴轴强度，分析其强度随着季节和年际变率的分布情况(图 2)。

可以发现，北半球两大洋上的风暴活动均表现为秋冬半年(10 月~次年 3 月)强，春夏半年(4~9 月)弱的特征，最小值发生在 7 月，但秋冬季节的最大值特征两大洋上表现不同。AST 在整个秋冬季节保持强盛，在 1998 年以前的全球变暖阶段，AST 最大强度的出现时间从深秋季节(11~12 月)逐渐向隆冬季节(1~3 月)推迟，随后在全球变暖停滞阶段 AST 最大强度又逐渐从晚冬(2~3 月)提前到深秋时节(10~11 月)。AST 的强度变化存在明显的年际振荡特征，大约每隔 3~5 年会有一个较强中心出现，这与胡增臻和黄荣辉[10]的结论相一致。

PST 在秋冬季节并不像 AST 一样一直处于较强的状态，而是在 11 月、12 月份强度较大，却在 1 月、2 月强度发生减弱，3 月、4 月继续增强，呈现出双峰结构的特征。Nakamura [11]把这种在晚秋和早春活动强盛，而在深冬季节显著减弱的现象称为 PST 的“深冬抑制”。有研究认为这可能与非绝热加热效应、地形[12]以及急流在对流层上层发生的卷吸效应有关[3]。值得注意的是，PST 的这种“深冬抑制”特征存在显著的年代际变化。特别是 1998 年之后的全球变暖停滞阶段，PST 的“深冬抑制”特征加强，PST 强度在晚冬时节显著加强。



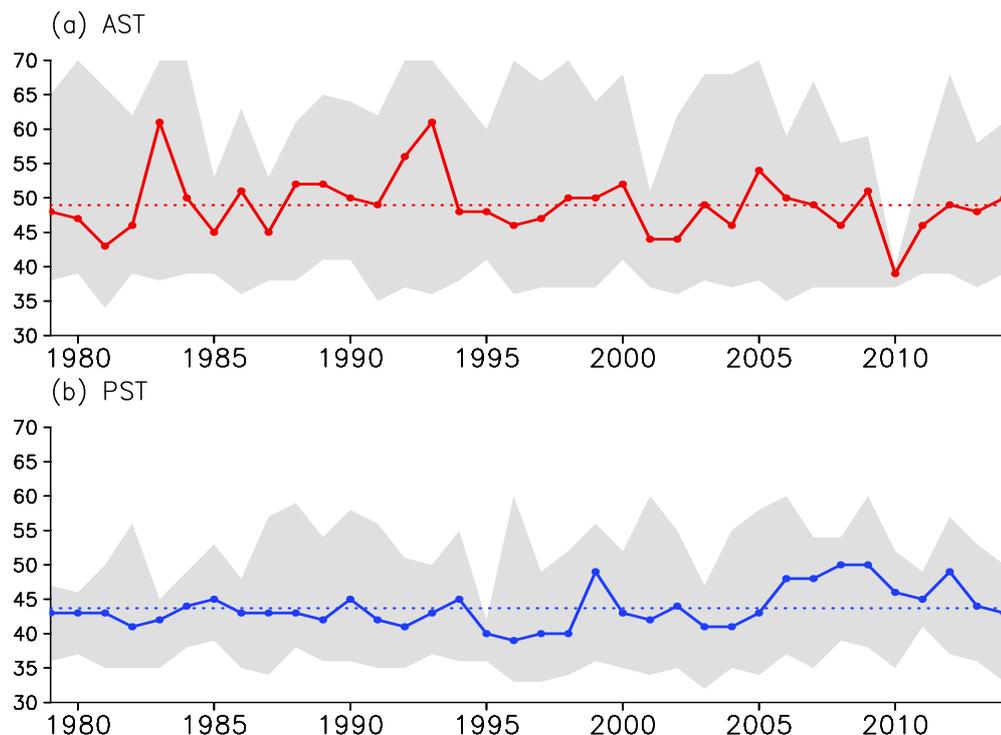
**Figure 2.** Cross-section of month-year for (a) AST and (b) PST center intensity during 1979~2014, unit:  $\text{dagpm}^2$   
**图 2.** 1979-2014 年(a)AST 和(b)PST 风暴路径强度随着季节 - 年的变化分布图，单位:  $\text{dagpm}^2$

### 3.2. 两大洋上风暴轴位置的年代际变化

从以上分析,我们发现,PST和AST的强度变化在二十世纪九十年代后期全球变暖停滞阶段均存在显著的年代际转型特征,这与朱伟军和李莹[13]曾指出的北太平洋冬季风暴路径强度增强或减弱的主体一致变化型模态的年代际变化不尽相同,同时他们还指出北太平洋风暴路径年代际变化的第二模态是风暴路径中东部位置南北移动的经向异常型。因此我们就冬季(1~3月)PST和AST中心纬度位置的变化进行分析(图3)。

从图3可以很清楚地看到,PST和AST的中心纬度变化存在显著的年代际变化特征,其转折点同强度类似,都发生在二十世纪九十年代后期的全球变暖停滞开始阶段,但二者呈现出相反的南北移动特征。冬季PST强度由弱变强(图2(b)),位置由南向北移动(图3(b));AST在强度和南北位置上都与PST呈现相反的年代际变化,即冬季AST强度由强变弱(图2(a)),位置由北向南移动(图3(a))。我们分别将大于 $70 \text{ dagpm}^2$ 的等值线所在最高和最低纬度值定义为风暴轴的南、北边界,值得注意的是,随着PST强度加强,其南北的边缘范围也有所扩张;而AST除了在2010年中心位置异常偏南导致其北部边缘出现了极度收缩以外,其南北边缘在整个全球变暖停滞期并没有明显的收窄。

风暴路径这种中心位置出现的年代际变化,可能主要由于急流核和风暴轴中心位置的相互配合,在年代际尺度上显示出一致性的南北摆动[14][15]。韩博等[16]在研究PST异常变化特征及其与纬向风场的关系时,指出高层纬向风场异常与PST发展存在着相互反馈的作用,是大气上游异常能量向下游地区频散的一种表现。在全球变暖停滞背景下,为什么北半球风暴路径出现PST位置向极加强,而AST位置向极减弱这种“跷跷板”式的反位相变化现象,值得我们进一步深入分析。



**Figure 3.** The time series of the (a) AST (red solid line) and (b) PST (blue solid line) center latitude. Grey shading is the north-south boundaries of storm track intensity (the threshold latitudes at which the contour is greater than  $70 \text{ dagpm}^2$ ) unit:  $^{\circ}\text{N}$

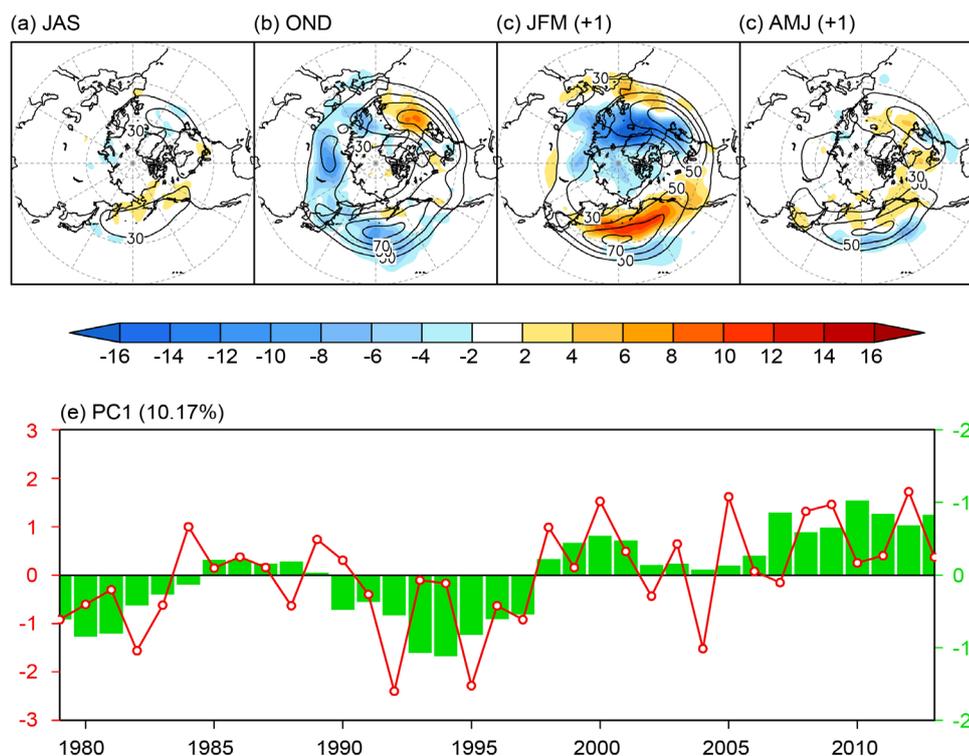
**图3.** 冬季(a)AST(红色实线)和(b)PST(蓝色实线)中心纬度的时间变化序列,灰色阴影区为风暴路径强度的南北边界(大于 $70 \text{ dagpm}^2$ 的等值线所在最高和最低纬度值)单位:  $^{\circ}\text{N}$

### 3.3. 北半球风暴路径的时空主模态特征

为了能系统地分析风暴路径活动在时间和空间上的主要模态特征,经验正交函数(EOF)方法可以提供很好的分析手段,但它只会提取风暴路径最强发生季节 - 冬季的时空分布信息。而我们知道风暴路径具有非常强的季节变化特征,为了真实地反映风暴路径的季节演变随年份变化的时空主模态特征,本文首次引入 Wang 和 An [17]提出的季节经验正交函数(Season-reliant Empirical Orthogonal Function; S-EOF)分析方法对北半球风暴路径进行了时空特征分析(图 4)。在 S-EOF 分解中,分别取 7~9 月(JAS)代表夏季,10~12 月(OND)代表秋季,次年的 1~3 月(JFM + 1)代表冬季,次年 4~6 月(AMJ + 1)代表春季,得到从夏季到次年春季随季节演变的北半球风暴路径时空分布的主模态,前 8 个模态的总方差贡献率为 47.75%,其中第一主模态(图 4)的方差贡献百分率为 10.17%。

可以发现,第一模态主要反映了北半球风暴路径的年代际变化特征,在 1998 年之前,风暴路径的主成分(PC1)主要以负值为主,而在 1998 年之后转为以正值为主,表明在 1998 年之后的全球变暖停滞阶段北半球风暴路径发生了显著的年代际转型。PC1 的极大值分别出现在 2000、2005、2008、2009、2012 和 1984 年,其中大部分出现在 2000 年以后;而极小值则分别出现在 1982、1992、1995、1997 和 2004 年,其中大部分都出现在上世纪,极大极小值出现的年份也从一个侧面体现了风暴路径第一主模态的这种年代际变化特征。另外,对照 ENSO(厄尔尼诺 - 南方涛动)指数(MEI,

<http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/#data>),可以发现 PC1 的极值年份所体现的年际振荡与 ENSO 有一



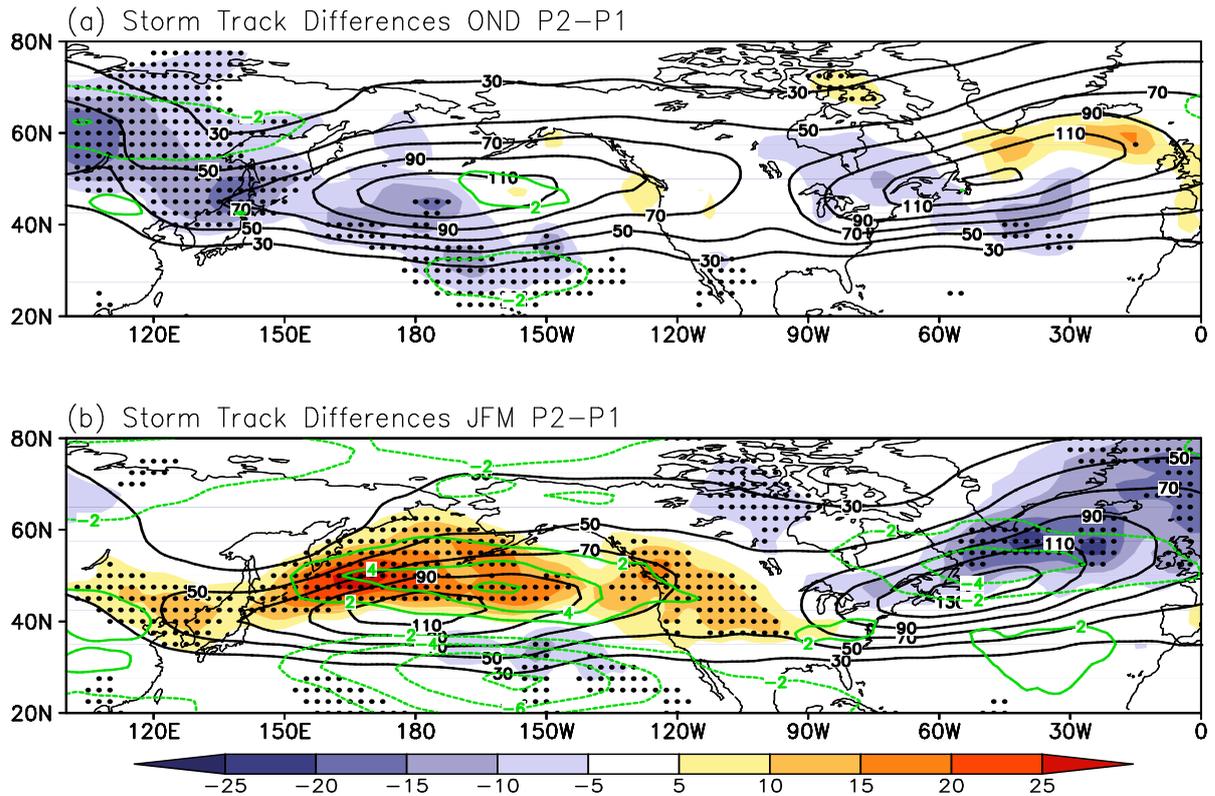
**Figure 4.** S-EOF spatial patterns of the first eigenvector (shading) of storm track ( $\text{dagpm}^2$ ) superimposed by its climatology (contour  $> 30 \text{ dagpm}^2$ ) in JAS (a) OND (b) JFM+1 (c) and AMJ+1 (d). The lower panel is the time series of first principal component (e, red solid line indicates normalized PC1 and the green bar indicates its 5-year running mean) of the S-EOF mode

**图 4.** 风暴路径 S-EOF 分解的第一模态不同季节的空间分布型(a)~(d)以及对应的标准化时间系数(e)。图(a)~(d)中黑色等值线为多年气候平均的风暴路径主轴区分布,图 e 中的红色线为时间系数(左轴),绿色柱为 5 年滑动平均序列(右轴)

定的相关性, PC1 极小值年多为厄尔尼诺年, 而极大值年多为拉尼娜年。

风暴路径第一主模态的空间上主要反映出风暴路径冬强夏弱的季节锁相特征, 且秋、冬季节 PST 和 AST 呈现出一种“跷跷板”式的反位相变化特征, 即当 PST 增强时, AST 异常减弱。结合 PC1 的时间变化可以发现, 在全球变暖停滞的秋季, PST 活动减弱, AST 活动加强。而在冬季, PST 异常加强区位于风暴轴心区的东侧和北侧, 表明 PST 向极异常加强; AST 则在风暴路径的北侧东侧异常减弱, 而在轴心区的东南侧异常加强, 并向下游的欧洲地区扩展, 表明 AST 有向极异常减弱的特征。这与前述分析中两大洋上冬季风暴路径强度和位置的年代际变化特征相一致, PC1 与 PST 中心位置变化曲线(图 3(b)) 相关系数达到-0.51, 超过了 99% 的显著性水平。这些结果与前人[18] [19] 分析的全球变暖未来情景下 AST 和 PST 一致加强或减弱的结果不一致, 可能与未来情景模拟中气候模式不能准确模拟大气内部变率的年代际变化有关。

为了证实 SEOF 的第一模态主要反映了北半球风暴路径的年代际变化特征, 根据 PC1 在 1998 年前后出现年代际突变, 将 1979-2014 年分为两个阶段, 即 P1 阶段(1979/80~1997/98)和 P2 阶段(1998/99~2013/2014), 分别对秋、冬季节两个阶段的风暴路径做差值场(图 5)。可以看到秋季(OND)时, PST 在 P2 期间比 P1 显著减弱, 负异常从风暴路径入口区向东南一直延伸至北太平洋中部, 而 AST 的西南部减弱, 东北部略有抬升并向下游伸展加强。在冬季(JFM)时, PST 和 AST 的反位相变化更为显著。PST 在 P2 阶段显著比 P1 阶段强, 整体有明显向极地方向移动并向下游扩展至北美大陆, 南部强度有所减弱。然而,



**Figure 5.** Difference distribution of storm track activity ( $\text{dagpm}^2$ ) anomalies (shaded), its climatology (black contour) and zonal wind at 300 hPa (green contour) between 1979~1997 and 1998~2013 epochs in OND (a) and JFM (b) seasons. green contour interval is 2 m/s. black asterisks indicate significance exceeding 95% confidence level

**图 5.** 风暴路径分别在秋季(OND)和冬季(JFM)P1 阶段(1979~1997 年)与 P2 阶段(1998~2013 年)的差值场, 单位:  $\text{dagpm}^2$ , 打点区域为过置信度 95% 的区域, 黑色实线为风暴路径气候平均态(1979~2013 年), 绿色等值线为 300 hPa 纬向风场, 等值线间隔为 2 m/s

AST 在气候平均位置的东北部强度则显著减弱。对比 S-EOF 的空间分布(图 4(b), 图 4(c))可以发现 P2-P1 的年代际差值场与 S-EOF 空间型分布基本一致, 表明第一模态主要反映了北半球风暴路径的年代际变化特征, 特别是冬季 PST 向极加强和 AST 向极减弱的反位相特征主要出现在全球变暖停滞阶段。

诸多研究表明[14] [15] [20], 风暴路径的变化同中纬度高空急流的异常变化具有相当高的相关性, 这体现了波 - 流之间的相互作用结果。从图 5 中可以发现异常纬向风的中心与风暴路径的正负异常中心位置基本上相配合, 表现出全球变暖停滞期 PST 的向极加强和 AST 的向极减弱均对应着西风急流的在太平洋上的向极加强和大西洋上的向极减弱。两大洋上这种低频纬向流 - 高频天气尺度波之间的反位相关系在年代际尺度上为什么会发生反转? 特别是在太平洋上秋风暴活动的年代际减弱主要出现在风暴路径的上游日本海一带和风暴轴的南侧, 而冬季风暴路径年代际加强区为上游日本海一带以及风暴轴的北侧太平洋海盆区, 这种季节上的年代际差异可能原因是什么? 都值得我们关注。限于篇幅原因, 有关机制探讨的工作将在后续文章中进行深入研究。

#### 4. 总结和讨论

本文使用 1979~2014 年欧洲中期天气预报中心 ERA-Interim 的逐日再分析资料, 用 300 hPa 位势高度场天气尺度扰动方差代表风暴路径, 分析了北半球风暴路径的时空变化特征。结果表明, 北半球风暴路径的强度和位置变化在 1998 年前后存在显著的年代际差异, 且北太平洋风暴路径(PST)和大西洋风暴路径(AST)表现不同。在 1998 年后全球变暖停滞阶段 PST 出现“深冬抑制”现象加强的特征, 且风暴轴位置向极移动, AST 则出现最大强度从晚冬(2~3 月)向深秋(10~11 月)提前的变化趋势, 风暴轴位置向南移动。

通过引入能够表征季节演变时空特征的 S-EOF 分析方法, 对北半球风暴路径进行 S-EOF 分析, 发现风暴路径的第一主模态时空特征很好地体现了上述不同季节 PST 和 ASP 的年代际变化特征, 第一模态方差贡献 10.47%, 时间上主要反映了 1998 年前后的年代际转变特征, 且在年际尺度上与 ENSO 有一定的关系。空间上反映出 PST 和 AST 呈“跷跷板”式的反相关变化, 表现为全球变暖停滞阶段的冬季 PST 向北加强、AST 向北减弱的年代际变化特征, 特别是 PST 在秋冬季节在风暴轴的上游和南北两侧存在相反的表现。这些结果显然与前人[18] [19]分析的全球变暖未来情景下 AST 和 PST 一致加强或减弱的结果非常不一致, 其原因可能是未来情景模拟中气候模式不能准确地模拟大气内部变率的年代际变化特征, 而观测中全球变暖和变暖停滞可能与北太平洋年代际涛动(PDO)等海洋 - 大气内部变率有关。

研究结果还表明, 两大洋上风暴路径的强度和位置的年代际反位相变化与高空纬向风异常密切相关。风暴路径实际是斜压不稳定波活动的一种表征[1], 平流对于斜压增长的贡献, 可以调节斜压波动的增长环境, 这同风暴路径生成发展机制相一致。Hoskins 和 Valdes [21]指出, 平均气流中的斜压不稳定和非绝热加热作用对风暴路径的维持起主要作用。在全球变暖停滞背景下, 北极海冰的快速消融, 热带海温的异常变化, 都有可能直接或间接地影响到中纬度的西风急流和风暴活动。因此北半球两大洋上风暴路径的这种反相的年代际变化特征, 可能与波 - 流相互作用的年代际差异有关, 但这其中的复杂物理过程, 仍需要更深入的机制分析。

#### 基金项目

国家重大科学研究计划项目(2015CB953904)和国家自然科学基金项目(41575067)资助。

#### 参考文献 (References)

- [1] Chang, E.K.M, Lee, S. and Swanson, K.L. (2002) Storm Track Dynamics. *Journal of Climate*, **15**, 2163-2183. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0216:STD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0216:STD>2.0.CO;2)
- [2] Chang, E.K.M. and Fu, Y. (2002) Interdecadal Variations in Northern Hemisphere Winter Storm Track Variability.

- Journal of Climate*, **15**, 642-658. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<0642:IVINHW>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<0642:IVINHW>2.0.CO;2)
- [3] Nakamura, H., Izumi, T., Sampe, T. (2002) Interannual and Decadal Modulations Recently Observed in the Pacific Storm Track Activity and East Asian Winter Monsoon. *Journal of Climate*, **15**, 1855-1874. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1855:IADMRO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1855:IADMRO>2.0.CO;2)
- [4] Trenberth, K.E. and Hurrell, J.W. (1994) Decadal Atmosphere-Ocean Variations in the Pacific. *Climate Dynamics*, **9**, 303-319. <https://doi.org/10.1007/BF00204745>
- [5] Yin, J.H. (2005) A Consistent Poleward Shift of the Storm Tracks in simulations of 21st Century Climate. *Geophysical Research Letters*, **11**, 322-325.
- [6] Zhang, X., Lu, C. and Guan, Z. (2012) Weakened Cyclones, Intensified Anticyclones and Recent Extreme Cold Winter Weather Events in Eurasia. *Environmental Research Letters*, **7**, Article ID: 044044. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/4/044044>
- [7] Screen, J.A. and Simmonds, I. (2010) The Central Role of Diminishing Séance in Recent Arctic Temperature Amplification. *Nature*, **464**, 1334-1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>
- [8] Lee, S.S., Lee, J.Y., Wang, B., Ha, K.J., Heo, K.Y., Jin, F.F., Straus, D.M. and Shukla, J. (2012) Interdecadal Change in the Storm Track Activity over the North Pacific and Atlantic. *Climate of Korea*, **39**, 313-327.
- [9] Kosaka, Y. and Xie, S. (2013) Recent Global-Warming Hiatus Tied to Equatorial Pacific Surface Cooling. *Nature*, **501**, 403-407. <https://doi.org/10.1038/nature12534>
- [10] 胡增臻, 黄荣辉. 冬季热带西太平洋对流活动异常的年际变化及其对 PST 的影响[J]. 大气科学, 1997, 21(5): 513-522.
- [11] Nakamura, H. (1992) Midwinter Suppression of Baroclinic Wave Activity in the Pacific. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **49**, 1629-1642. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1992\)049<1629:MSOBWA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1992)049<1629:MSOBWA>2.0.CO;2)
- [12] Penny, S., Roe, G.H. and Battisti, D.S. (2010) The Source of the Midwinter Suppression in Storminess over the North Pacific. *Journal of Climate*, **24**, 5187-5191. <https://doi.org/10.1175/2009jcli2904.1>
- [13] 朱伟军, 李莹. 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, 2010, 68(4): 477-486.
- [14] Chang, E.K.M. (2001) GCM and Observational Diagnoses of the Seasonal Andinterannual Variations of the Pacific Storm Track during the Cool Seasons. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 1784-1800. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(2001\)058<1784:GAODOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(2001)058<1784:GAODOT>2.0.CO;2)
- [15] Carillo, A., Ruti, P.M. and Navarra, A. (2000) Storm Tracks and Zonal Mean Flow Variability: A Comparison between Observed and Simulated Data. *Climate Dynamics*, **16**, 219-228. <https://doi.org/10.1007/s003820050015>
- [16] 韩博, 任雪娟, 杨修群. 北太平洋风暴轴异常变化特征及其与纬向风场的关系研究[J]. 气象科学, 2007, 27(3): 237-245.
- [17] Wang, B. and An, S.I. (2005) A Method for Detecting Season-Dependent Modes of Climate Variability: S-EOF Analysis. *Geophysical Research Letters*, **32**, L15710. <https://doi.org/10.1029/2005gl022709>
- [18] Lehmann, J., Coumou, D., Frieler, K., *et al.* (2014) Future Changes in Extratropical Storm Tracks and Baroclinicity under Climate Change. *Environmental Research Letters*, **9**, Article ID: 084002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/9/8/084002>
- [19] Wang, J., Kim, H.M. and Chang, E.K. (2017) Changes in Northern Hemisphere Winter Storm Tracks under the Background of Arctic Amplification. *Journal of Climate*, **30**, 3705-3724. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0650.1>
- [20] Choi, D.H., Kug, J.S., Kwon, W.T., Jin, F.F., Baek, H.J. and Min, S.K. (2010) Arctic Oscillation Responses to Greenhouse Warming and Role of Synoptic Eddy Feedback. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, **115**, 1383-1392. <https://doi.org/10.1029/2010JD014160>
- [21] Hoskins, B.J. and Valdes, P.J. (1990) On the Existence of Storm-Tracks. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 1854-1864. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1990\)047<1854:OTEOST>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1990)047<1854:OTEOST>2.0.CO;2)

**期刊投稿者将享受如下服务：**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[ccl@hanspub.org](mailto:ccl@hanspub.org)