

杨雯婷,朱伟军,李欣.冬季北极涛动异常对北太平洋风暴轴的可能影响[J].海洋气象学报,2018,38(3):20-29.
Yang Wenting, Zhu Weijun, Li Xin. Possible influence of Arctic Oscillation anomalies on the North Pacific storm track during winter[J]. Journal of Marine Meteorology, 2018,38(3):20-29. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.003. (in Chinese)

冬季北极涛动异常对北太平洋风暴轴的可能影响

杨雯婷¹,朱伟军¹,李欣²

(1. 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,江苏 南京 210044; 2. 忻州市气象局,山西 忻州 034000)

摘要: 基于美国国家海洋和大气局气候预测中心公报的北极涛动(Arctic Oscillation, AO)指数逐月数据以及美国国家环境预报中心和大气研究中心的1986—2017年逐日再分析资料等,运用回归和合成分析等方法,分析了北极涛动与北太平洋地区风暴轴的时间演变特征、两者之间的联系及AO异常影响风暴轴的可能机制。结果表明:1) 风暴轴经度指数与纬度指数有显著正相关性,两者具有同步变化的特征,而这两者与风暴轴强度指数都呈负相关,但不显著。AO指数与北太平洋风暴轴强度呈显著正相关,且AO指数与风暴轴经度、纬度指数也呈正相关,但并不显著。2) 在北极涛动强正(负)位相年份,风暴轴区域天气尺度滤波方差强(弱)、500 hPa高度场上东亚大槽减弱(加深)、急流偏北偏强(偏南偏弱)、扰动动能增强(减弱)、斜压性增强(减弱)。可能影响机制是,异常变化的AO影响东亚大槽,改变急流强度,使斜压性发生变化,进而对风暴轴产生影响。

关键词: 北极涛动异常;北太平洋风暴轴;相关关系;影响机制

中图分类号: P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)03-0020-10

DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.03.003

Possible influence of Arctic Oscillation anomalies on the North Pacific storm track during winter

YANG Wenting¹, ZHU Weijun¹, LI Xin²

(1. 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, China; 2. Xinzhou Meteorological Bureau of Shanxi Province, Xinzhou 034000, China)

Abstract On the basis of monthly Arctic Oscillation (AO) data from NOAA (Climate Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration) and daily reanalysis data from NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) from 1986 to 2017, by using regression and synthetic analysis, the temporal evolution characteristics of AO and the North Pacific storm track, the relations between AO index and storm track index (including intensity, longitude, latitude index), and the possible physical mechanism of AO anomalies on the storm track are studied. The results are as follows. 1) The longitude index of the storm track has significant positive correlation with the latitude index of the storm track, and they both have the feature of synchronous

收稿日期:2018-05-17; 修订日期:2018-06-26

基金项目:国家自然科学基金项目(41575070,41075070);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306028)

作者简介:杨雯婷,女,硕士研究生,主要从事强对流及机理的相关研究,1045495028@qq.com。

通信作者:朱伟军,男,博士,教授,主要从事海气相互作用及短期气候预测研究,weijun@nuist.edu.cn。

change, but they both have non-significant negative correlation with the intensity index of the storm track. The correlation between AO index and the intensity of the North Pacific storm track is significantly positive. The correlation between AO index and the longitude/latitude of the storm track is positive, but not significant. 2) Further analysis indicates that, in the years when AO is in strong positive/negative phase, the synoptic-scale filtering variance becomes stronger/weaker, the East Asia major trough becomes weaker/stronger at the level of 500 hPa, the jet stream moves northward/southward and becomes stronger/weaker, the disturbance kinetic energy becomes stronger/weaker, and the baroclinicity becomes stronger/weaker in the areas of the North Pacific storm track. The possible influence mechanism is that the anomalous changes of AO affect the East Asia major trough, change the intensity of westerly jet stream and the baroclinicity, and then exert an effect on the storm track.

Key words Arctic Oscillation anomalies; the North Pacific storm track; correlation; influence mechanism

引言

Blackmon^[1]通过滤波资料发现,中纬度大气环流变化表现为显著的瞬变扰动,并将北半球两大洋上的瞬变方差极大值区域定义为风暴轴。按照流体力学中欧拉观点的方法,一般将天气尺度瞬变扰动(时间尺度为2.5~6 d)剧烈的区域称作风暴轴。对研究中纬度天气尺度瞬变扰动问题,欧拉方法与Hodges^[2]提出的拉格朗日方法(通过追踪气旋/反气旋移动来确定风暴轴位置及强度)相比,更简洁和实用^[2-3]。邓兴秀和孙照渤^[4]指出风暴轴对预测北半球天气气候变化、调配能量分布和维持大气环流方面具有重要意义。目前许多学者对风暴轴的时间演变规律、分布特征、垂直结构、能量转换以及维持机制等方面展开了细致的研究^[5-9],发现了风暴轴有很多特点。北半球地区存在两个瞬时扰动活跃、能量很大的区域,分别是北太平洋和北大西洋,有利于天气尺度系统活动。两个风暴轴存在明显的年变化,若取季节平均,具有冬强夏弱的特征,且夏季偏东北,冬季偏西南,春秋季是过渡季节。胡增臻和黄荣辉^[10]指出,风暴轴有明显的年际、年代际变化特征;在1985年前后,各高度层上,冬季北太平洋风暴轴都发生了跃变。孙照渤和朱伟军^[11-13]指出风暴轴东端为相当正压性结构,西端为强斜压性结构。风暴轴与大气低频环流相互作用方面的研究表明风暴轴的主要模态与PNA、WP遥相关型相联系^[14]。Chang and Fu^[15]指出冬季风暴轴的年代际变化和大气环流的低频变率(如北极涛动)之间存在着某种联系。

北极涛动(Arctic Oscillation, AO)作为中高纬大气环流最主要的模态,指北半球中高纬地区的气

压呈现跷跷板的现象,当AO处于正位相时,极地气压降低,中纬度气压升高,否则相反。Thompson and Wallace^[16]提出了北极涛动的概念,并将冬季北半球热带以外地区海平面气压距平的EOF分析第一模态的时间序列作为AO指数,指出其为重要的气候指数。此外,还发现其垂直结构具有相当正压性和明显的纬向对称性^[16]。这不仅可用以了解中纬度西风的位置状况,也可指示其强度^[17]。它对中纬度近地面气候(包括中高纬气温、降水等)、北极海冰、大气活动中心极端事件的环流形势等研究有重要意义^[18-22]。AO的变化会引起天气型的变化,影响大气环流,如果变化持续时间充分,会引起气候变化^[17]。Black^[22]指出AO对中高纬地面气候变化的影响日渐显著。AO主要是间接地通过改变平流层极涡强度来影响地面的气候变率,即极涡对大范围尺度平流层低层的纬向风扰动产生影响,并向下延伸到地表面,导致近地面气候发生变化^[19, 23]。冬季北太平洋风暴轴和北半球极涡有同步变化特征,在弱极涡年,风暴轴强度变小,而在强极涡年,风暴轴的强度变大。此外,极涡的异常变化会引起气压场(欧亚大陆以及下游北太平洋上空)的变化,进而影响西风急流的强度和风暴轴上游区域的斜压性^[9]。急流强度和风暴轴区域斜压性对风暴轴维持和加强有重要意义,因而它们的变化可以对风暴轴产生影响。

已有研究表明,冬季北极涛动和北太平洋风暴轴有同步的强弱变化特征,在能量输送以及水平和垂直结构方面对北太平洋风暴轴进行了初步分析,表明在AO处于强正(负)位相,对应着风暴轴地区斜压性明显增强(减弱),风暴轴位置偏北(南),强度偏强(弱)以及天气尺度涡动向极和向上的动量

和热量的输送显著增强(减弱)^[17]。

目前,针对海洋上对流活动、极涡等对风暴轴影响的研究较多,关于风暴轴和 AO 关系的研究(包括 AO 与风暴轴相关性、影响机理等)还很缺乏,尤其是 AO 指数变化剧烈年份对风暴轴影响的研究更是缺少,但这方面的工作对研究东亚极端天气事件等有极大的参考价值。此外,研究风暴轴和 AO 两者的联系对研究大气低频环流对风暴轴的影响、大气内部波流相互作用、近地面气候变化、风暴轴结构和变化特征、海气相互作用及能量转换等方面有重要意义^[13, 24]。因而本文利用相关分析、回归分析和合成分析等方法探究 AO 与风暴轴的关系、冬季 AO 异常对北太平洋风暴轴的可能影响,并进一步分析其演变机理。

1 资料与方法

1.1 资料

选用美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)和国家大气研究中心(The National Center for Atmospheric Research, NCAR)格点资料。资料包括逐日和逐月的高度场、逐月的温度场和风场(u, v)。水平分辨率是 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直层数为 17 层, 覆盖时间是 1986 年 1 月—2017 年 12 月。由于欧拉方法利用不同变量的天气尺度滤波方差来研究局地风暴轴的变化,不用考虑不同的空间分辨率造成的结果差异,选取的资料计算较简便^[3, 25]。AO 指数资料取自美国国家海洋和大气局(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)气候预测中心公报,定义为冬季北半球热带以外地区海平面气压距平的 EOF 分析第一模态的时间系数,覆盖时间为 1986 年 1 月—2017 年 11 月。

文中 1986—2016 年的冬季平均取 3 个月(当年 12 月—次年 2 月)的平均值。

1.2 方法

采用 500 hPa 天气尺度位势高度场的滤波方差来代表风暴轴强度与位置,利用 31 点数字滤波器的方法^[26]对气象要素场进行滤波,由逐日原始资料直接滤出天气尺度波动(2.5~6 d),然后把滤波资料按冬季月份分成每月一段,计算每段的方差,得到每月月平均带通滤波方差。这种方法具体的原理是,将任意输入的时间序列 $X(t)$ 带入公式,得到滤波结果 $Y(t)$, 计算公式为:

$$Y(t) = \sum_{k=-15}^{15} a_k X(t-k) \quad (1)$$

其中 t 代表时间, k 取值为 -15~15, a_k 为滤波系数, 取值如表 1 所示。

表 1 31 点带通滤波器滤波系数

Table 1 Filter coefficients of 31-point band pass filter

滤波系数	滤波系数
$a_0 = 0.444\ 007\ 81$	$a_{\pm 1} = -0.060\ 916\ 63$
$a_{\pm 2} = -0.285\ 023\ 51$	$a_{\pm 3} = 0.064\ 508\ 56$
$a_{\pm 4} = 0.041\ 743\ 31$	$a_{\pm 5} = 0.032\ 626\ 32$
$a_{\pm 6} = 0.033\ 275\ 88$	$a_{\pm 7} = -0.039\ 545\ 66$
$a_{\pm 8} = -0.020\ 866\ 56$	$a_{\pm 9} = -0.005\ 384\ 11$
$a_{\pm 10} = 0.103\ 245\ 6$	$a_{\pm 11} = 0.009\ 446\ 03$
$a_{\pm 12} = 0.006\ 387\ 32$	$a_{\pm 13} = -0.003\ 730\ 75$
$a_{\pm 14} = -0.007\ 222\ 80$	$a_{\pm 15} = 0.003\ 282\ 47$

先从逐日原始数据中滤出 2.5~6 d 的天气尺度波动,然后把滤波资料处理成每月的资料,并分别对每个月计算它的方差,便得到每个月的月平均天气尺度滤波方差。Black^[22]指出可用位势高度场(500 hPa)的天气尺度滤波方差来描述风暴轴的强度和位置,因此,后面对风暴轴强度、经度和纬度指数的分析主要根据位势高度场(500 hPa)的天气尺度滤波方差来进行描述,后文用滤波方差作简称。

北极涛动指数选取的是逐月数据,文中计算冬季平均 AO 指数(当年 12 月—次年 2 月 AO 指数的平均值),得到 31 a 冬季 AO 指数的时间序列。

根据 Hoskins and Valdes^[27]的理论,引入 Eddy 波最大增长率公式,此量在忽略气流低层的水平切变以及湿过程等复杂情况的影响下,能很好地度量中纬度斜压性强弱,称该量为斜压性强度指数。计算公式如下:

$$\sigma_{BI} = 0.31f \left| \frac{\partial V}{\partial Z} \right| N^{-1} \quad (2)$$

其中 f 为地转参数, V 为纬向风速, Z 为垂直高度, N 为布伦特-维萨拉频率。

此外,本文还运用了求相关、回归以及合成分析等常见的气象统计方法^[28]。

2 冬季北极涛动异常与北太平洋风暴轴的相关关系

2.1 北极涛动指数时间演变特征

计算 1986—2016 年冬季 AO 指数,并对其进行

标准化处理。定义标准化后 AO 指数大于 1 的年份为 AO 指数的高值年(即 AO 正异常年份),小于-1 的年份为 AO 指数的低值年(即 AO 负异常年份)。AO 指数高值年为 1988、1992、2006 和 2011 年;AO 指数低值年为 1995、1997、2000、2002、2009 和 2010 年。

由冬季 AO 指数逐年变化曲线(图 1)和 AO 指

数高、低值年可以看出,20 世纪 90 年代中期以前, AO 正位相,其中 1992 年达到最强;20 世纪 90 年代中期以后, AO 正位相相对减弱,除少数年份(2006 和 2011 年)达到正异常,其他年份几乎为负位相,且达到负异常等级,表明北极涛动 AO 有明显的年际和年代际变化特征。

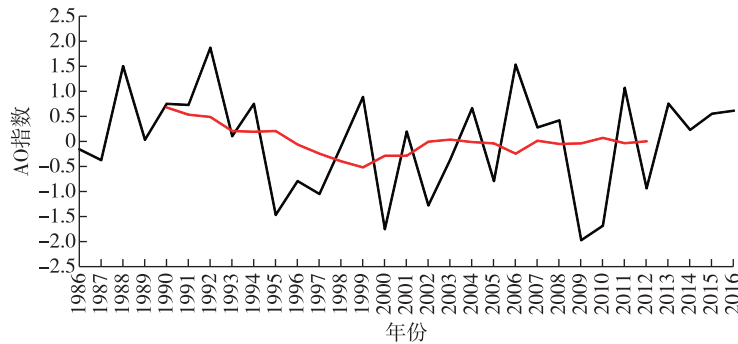


图 1 冬季 AO 指数标准化(黑线)和 9 点平滑后(红线)的指数逐年变化曲线

Fig.1 Annual variation of AO indexes after standardization (black line) and smoothing average 9 points (red line) in winter

2.2 冬季北太平洋风暴轴的气候平均及时间演变特征

图 2 为 31 a(1986—2016 年)冬季平均 500 hPa 位势高度天气尺度滤波方差场。由图可以看出,北半球滤波方差场的强度中心有两个,一个分布在中

纬度北大西洋上,略呈东北—西南向,另一个分布在北太平洋中西部,呈东—西向,北大西洋风暴轴中心强度比北太平洋风暴轴中心强度更高一些,表现了北半球冬季风暴轴的气候平均态。本文主要对北太平洋风暴轴作分析。

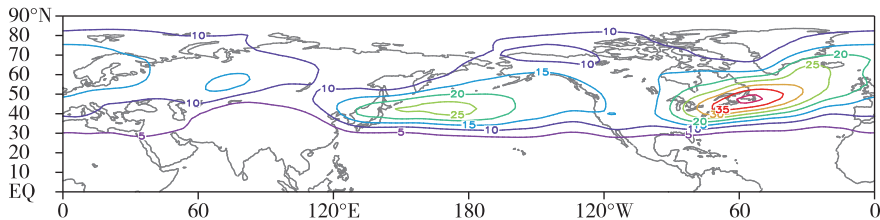


图 2 1986—2016 年冬季平均 500 hPa 天气尺度位势高度滤波方差分布(等值线间隔为 5.0 dagpm²)

Fig.2 Mean synoptic-scale filtering variance of geopotential height at 500 hPa over the North Pacific in winter from 1986 to 2016 (isoline interval: 5.0 dagpm²)

考虑风暴轴的平均强度和移动特征,参照李莹等^[3]的方法,在北太平洋及其周边区域(120°E~120°W,30°N~60°N)挑选出满足冬季滤波方差值大于 20 dagpm² 的所有格点,取上述挑选出的格点天气尺度滤波方差的平均值作为风暴轴强度指数(NII),并取满足上述条件格点的平均纬度和平均经度作为北太平洋风暴轴纬度指数(NYI)和经度指数(NXI)。参考顾沛澍等^[29]定义的风暴轴面积指数的方法,20 dagpm² 等值线所围成的区域即为北太平洋风暴轴区域。已有研究^[17]表明,20 世纪 50 年代末以前,北太平洋风暴轴中心强度变化较为平

缓;20 世纪 60 年代初有一次大的减弱,之后逐渐增强,到 70 年代初又开始减弱,一直持续到 80 年代中期。图 3d 给出的是冬季北太平洋风暴轴的中心强度指数、纬度指数、经度指数标准化的时间演变曲线。可以直观地看出,经度指数与纬度指数之间有同步变化,而两者与强度指数之间相关性不显著。图 3a、b、c 分别是三个指数的逐年变化曲线,虚直线是气候平均值,红线是经过 9 点平滑后的指数变化曲线。由图可以看出,在经度、纬度和平均强度变化上,冬季北太平洋风暴轴具有明显的年际变化和年代际变化特征,从 20 世纪 80 年代中期到 90 年代中

期,中心强度明显高于多年的平均水平;20世纪90年代中期以后中心强度进入一个明显减弱的时期,其平均值一直保持在较低的水平,总的来说,随时

间演变,北太平洋风暴轴的中心强度有变弱的倾向。风暴轴平均强度最低只有 20.2 dagpm^2 ,最高可达 29.8 dagpm^2 ,多年平均值为 24.5 dagpm^2 。

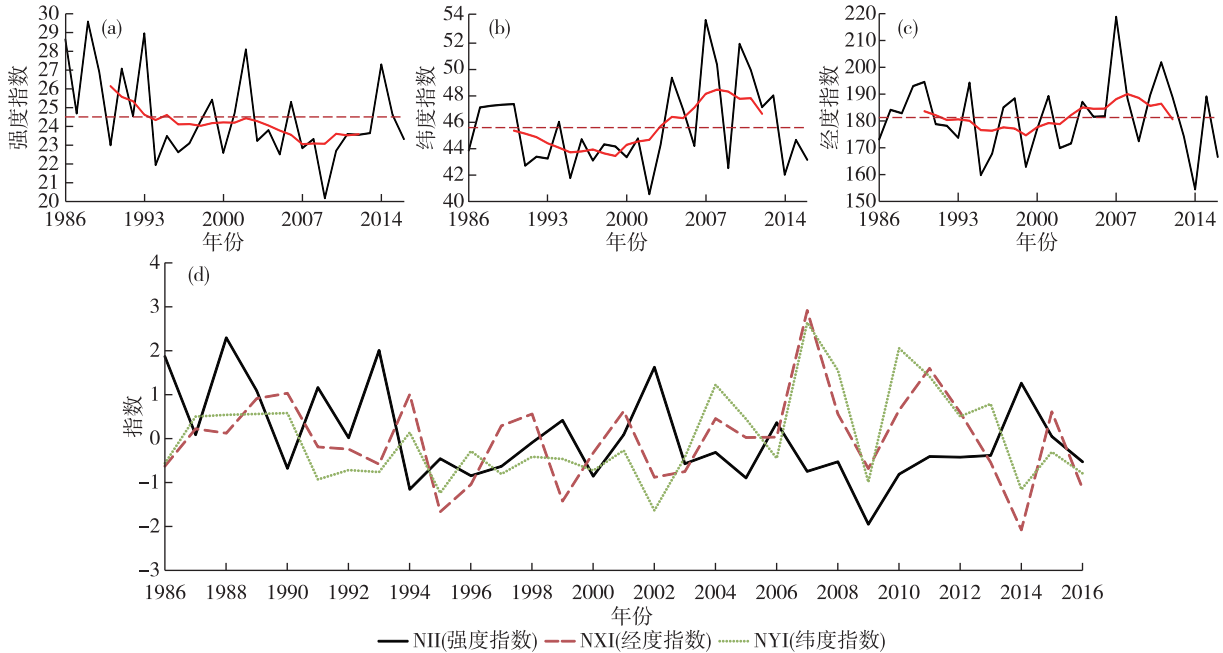


图3 冬季北太平洋风暴轴强度指数(a)、纬度指数(b)、经度指数(c)的时间演变曲线(水平虚线代表平均值,红线代表9点平滑后的指数变化曲线)与强度指数、纬度指数、经度指数标准化(d)的时间演变曲线

Fig.3 Time series of the intensity index (a), the latitude index (b), and the longitude index (c) of the North Pacific storm track in winter (the horizontal dotted lines in a-c are the average values, the red lines are the values after smoothing average 9 points) & time series (d) of the intensity index, the latitude index, and the longitude index of the North Pacific storm track after standardization

平均经度变化在 $153^\circ\text{E} \sim 140^\circ\text{W}$ 之间,平均纬度变化在 $40 \sim 55^\circ\text{N}$ 之间,多年平均位置大概在 $(45.5^\circ\text{N}, 179^\circ\text{W})$ 。在最近几年的时间里,风暴轴的经度位置偏西于多年平均位置,纬度位置偏北于多年平均位置。如表2所示,风暴轴强度指数(NII)与经度指数(NXI)、纬度指数(NYI)的相关系数分

别为 -0.241 、 -0.278 ,都没有达到 0.1 置信水平,表明冬季北太平洋风暴轴位置变化与强度变化呈负相关,但并不显著。而 NYI 与 NXI 之间的相关系数高达 0.752 ,通过了 99% 信度检验,说明冬季的北太平洋风暴轴纬向变化与经向变化几乎同步,呈显著正相关。

表2 AO指数与北太平洋风暴轴经度、纬度、强度指数之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between AO index and the longitude/latitude/intensity index of the North Pacific storm track

	NII(强度指数)	NXI(经度指数)	NYI(纬度指数)	AOI
NII	1	-0.241	-0.278	0.336^*
NXI		1	0.752^{**}	0.207
NYI			1	0.179
AOI				1

注: * 指通过 t 检验(90% 信度检验), ** 指通过 99% 信度检验。

2.3 北极涛动指数与北太平洋风暴轴各项指数相关性分析

为了直接反映北极涛动指数与风暴轴的相关

性,针对 AO 与风暴轴的年际变化时间尺度,在此利用相关系数、线性回归两种方法对冬季平均北极涛动指数时间序列与滤波方差进行相关性分析。表2

给出的是冬季平均北极涛动指数时间序列与风暴轴强度指数 (NII)、纬度指数 (NYI) 和经度指数 (NXI) 分别计算皮尔逊相关系数, 北极涛动指数与风暴轴强度指数相关系数为 0.336, 通过了 90% 信度检验, 表明冬季 AO 指数与北太平洋风暴轴主体强度变化有显著的正相关性; 北极涛动指数与风暴轴经度指数、纬度指数相关系数分别为 0.207、0.179, 都没达到 0.1 置信水平, 表明冬季 AO 指数与北太平洋风暴轴位置呈正相关, AO 强正 (负) 位相年份, 北太平洋风暴轴偏东偏北 (偏西偏南), 但相关性并不显著。

图 4 所示是北半球冬季 AO 指数与滤波方差相关分布。可以看出, 北太平洋地区大部分都是正相关区域 (40 ~ 55° N), 最强的正相关中心位于 (175° W, 48° N) 附近, 与气候平均风暴轴区域相近。

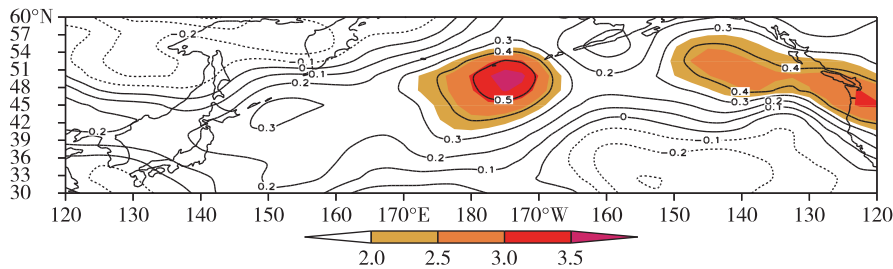


图 4 1986—2016 年冬季 AO 指数与北太平洋 500 hPa 天气尺度位势高度滤波方差相关系数分布 (阴影部分指通过 0.05 显著性检验)

Fig.4 Correlation coefficients between AO index and synoptic-scale filtering variance of geopotential height at 500 hPa over the North Pacific in winter from 1986 to 2016 (the shaded areas denote passing the significance test at 0.05 level)

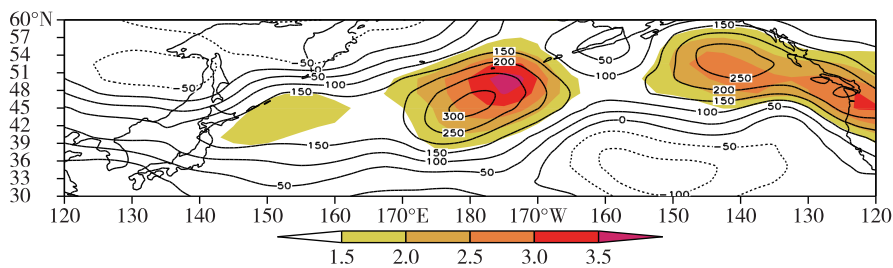


图 5 1986—2016 年冬季 AO 指数 (自变量) 与北太平洋 500 hPa 天气尺度位势高度滤波方差 (因变量) 回归系数值 (阴影部分指通过 0.05 显著性检验)

Fig.5 Regression coefficients between AO index (independent variable) and synoptic-scale filtering variance of geopotential height (dependent variable) at 500 hPa over the North Pacific in winter from 1986 to 2016 (the shaded areas denote passing the significance test at 0.05 level)

综上所述, 冬季 AO 与北太平洋风暴轴主体强度有显著的正相关性, 与北太平洋风暴轴纬度和经度指数也呈正相关, 但并不显著。即在 AO 的强正 (负) 位相年份, 北太平洋风暴轴强度显著增强, 位置偏东偏北 (偏西偏南)。冬季 AO 指数作为风暴轴的影响因子, 与风暴轴强度有明显的线性相关性,

即 AO 指数升高 (减小), 风暴轴强度会相应地加强 (减弱), 表明冬季 AO 与北太平洋风暴轴之间可能具有相互作用, 并存在紧密的联系。图 5 为利用线性回归 ($y = ax + b$) 对 31 a (1986—2016 年) 冬季 AO 指数与滤波方差回归分析的结果, 具体地, 滤波方差场时间长度为 31 a, 每个格点上的值都是一个时间序列 y , 将其作为预测对象, AO 指数 (也是一个时间序列 x) 作为预测因子, 两者在每个格点上可以建立回归方程, 由回归系数和是否通过 T 检验来判别是否有显著相关性。由图 5 可以看出, 北太平洋中部和东部滤波方差与 AO 建立的回归方程显著, 其中以滤波方差场极值表示的风暴轴强度中心区域大致通过显著性检验, 且越往中心方向, 信度越高, 甚至能达到 99% 信度水平。表明冬季 AO 指数与风暴轴区域滤波方差建立的回归方程是显著的。

对风暴轴强度预测有一定的意义。

3 冬季北极涛动异常影响北太平洋风暴轴的可能机制

根据上节分析可知, 冬季北极涛动异常变化与北太平洋地区天气尺度位势高度 (500 hPa) 滤波方

差之间密切联系,有显著的相关性。为了反映 AO 异常对风暴轴的可能影响,将对 AO 异常年份对应的冬季北太平洋风暴轴的风速场、水平结构、动能场变化以及斜压性作进一步分析。下面将运用合成分析等方法,根据北太平洋风暴轴天气尺度滤波方差场在 AO 异常年份的变化特征,分析 AO 异常对风暴轴强度的影响,并从要素场(高度场、风场)中讨论 AO 带来的相应变化,进一步分析扰动动能场和斜压性,找出可能的影响机制。由上一章筛选出的 AO 指数异常年份,针对高、低值年的北太平洋地区滤波方差场、风场等做合成,并计算高、低值年差值场。

3.1 风暴轴强度(500 hPa 天气尺度滤波方差场)合成分析

图 6a、b、c 分别为在 AO 指数高值年、低值年北太平洋风暴轴 500 hPa 位势高度场天气尺度滤波方差和高、低值年差值场的合成分布图。由图 6a 可以看出,在 AO 指数高值年,北太平洋风暴轴区域存在

两个中心,其中较强的一个中心强度达到 30 dagpm^2 ,位于 $(170^\circ\text{E}, 43^\circ\text{N})$ 附近,另一个强度较弱的中心强度为 25 dagpm^2 左右,位于 $(145^\circ\text{E}, 43^\circ\text{N})$ 附近,两个中心的位置比 20 世纪 50—90 年代两个中心的位置在纬度上无明显变化,经度上相对靠近;如图 6b 所示,在 AO 指数低值年,北太平洋风暴轴有个强度较弱的中心,其最大强度为 20 dagpm^2 左右,相对 AO 指数高值年有明显减弱,位于 $(165^\circ\text{E}, 43^\circ\text{N})$ 附近,而在 20 世纪 50—90 年代,北太平洋风暴轴有明显的双中心结构且纬向对称,分别位于 $(165^\circ\text{E}, 42.5^\circ\text{N})$ 附近和 $(165^\circ\text{W}, 42.5^\circ\text{N})$ 附近,两者分布有所不同^[17];如图 6c 所示,在高、低值年的差值场上,差值中心位于北太平洋中部, $(178^\circ\text{W}, 44^\circ\text{N})$ 附近,区域略呈东北—西南走向,可以看出, AO 的异常变化带来了风暴轴区域天气尺度波动的明显变化,并且在 AO 指数高值年,波动更为强烈,表明在 AO 的强正(负)位相年份,风暴轴强度增强(减弱),强度的差异主要体现在风暴轴的中部。

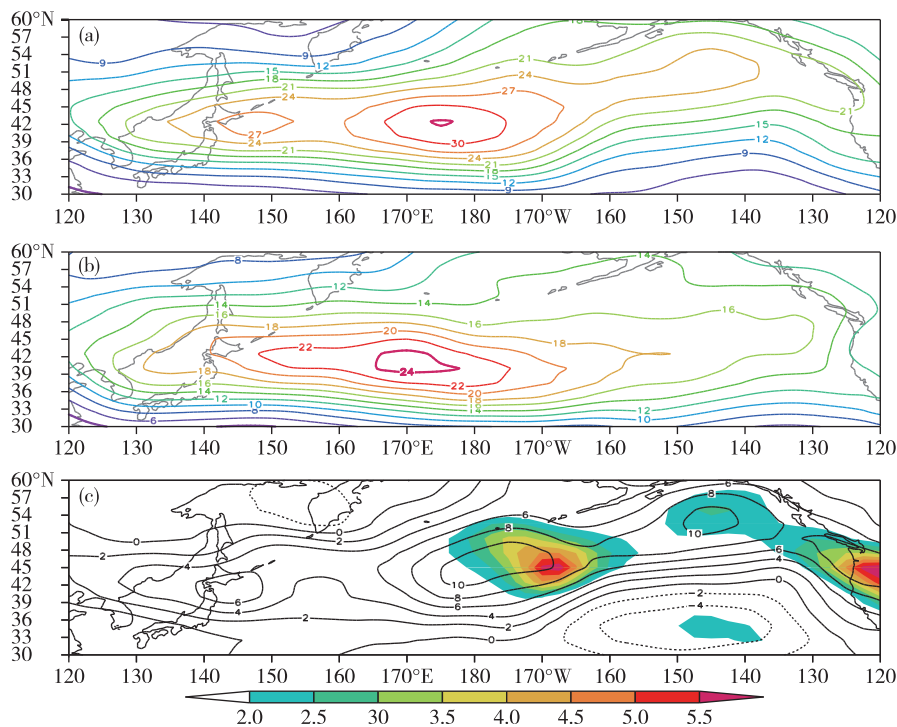


图 6 500 hPa 位势高度天气尺度滤波方差场合成分布(a. AO 指数高值年, b. AO 指数低值年, c. AO 指数高、低值年的差值合成;单位: dagpm^2 ; 填色部分指通过 0.05 显著性检验)

Fig.6 Synthetic distribution of synoptic-scale filtering variance of geopotential height at 500 hPa (a. years of high AO index, b. years of low AO index, c. difference between years of high AO index and low AO index; units: dagpm^2 ; the shaded areas denote passing the significance test at 0.05 level)

3.2 500 hPa 高度场与纬向风场合成分析

图 7 为 AO 指数高、低值年高度场差值场的合成分布图,可以看出,北半球太平洋上有一个差值

中心,位于北太平洋东部, $(150^\circ\text{W}, 42^\circ\text{N})$ 附近,但值非常小。此外,还可以看出 60°N 以南是正变高区域, 60°N 以北为负变高区域,类似于冬季典型的

西太平洋遥相关型(WP),表明在 AO 的强正(负)位相年份,高度场上东亚大槽减弱(加深)。

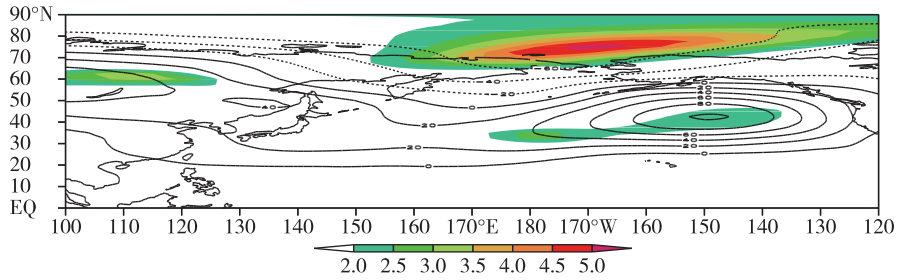


图7 AO 指数高、低值年的高度场差值合成分布(单位:gpm;填色部分指通过 0.05 显著性检验)

Fig.7 Synthetic distribution of geopotential height difference between years of high AO index and low AO index (units: gpm; the shaded areas denote passing the significance test at 0.05 level)

图8为 AO 指数高、低值年西风风速差值场的合成分布图,可以看出,在差值场上,北太平洋地区东部关于 45°N 有一个经向对称的双中心结构,两个中心分别位于(150°W, 55°N)附近和(150°W,

35°N)附近,表明在 AO 的强正(负)位相年份,纬向风速有明显变化,急流偏北偏强(偏南偏弱),且在气候平均位置处,北部高值年比低值年西风强度加强,南部高值年比低值年减弱。

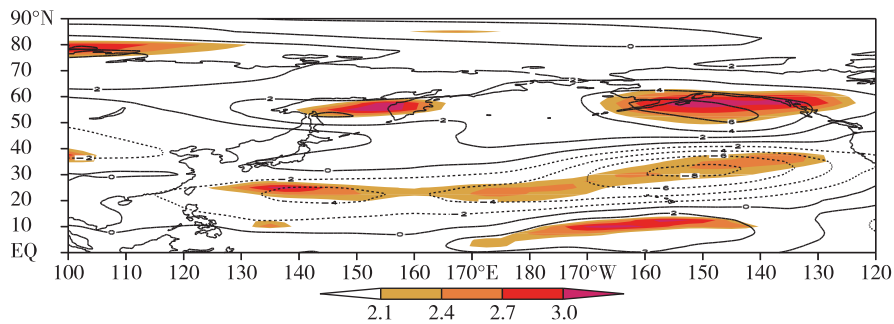


图8 AO 指数高、低值年的 U 风速场差值合成分布(单位:m·s⁻¹;填色部分指通过 0.05 显著性检验)

Fig.8 Synthetic distribution of speed difference of U wind between years of high AO index and low AO index (units: m·s⁻¹; the shaded areas denote passing the significance test at 0.05 level)

结合高度场和纬向风场差值图来分析,在 AO 指数高值年,北极涛动正位相,中纬度气压上升,60°N以北(极地区域)气压下降,南北气压梯度增大,另外,东亚大槽属于经向环流型,位于正变高区域中,槽强度减弱,有利于纬向环流的加强,北太平洋地区 500 hPa 上的急流可能因此加强;而在 AO 指数的低值年,情况相反。急流的强度状况与风暴轴有密切关系,一般地,冬季急流强,风暴轴强度也强,夏季急流弱,风暴轴强度也弱,此外,急流的强垂直风切变所具有的能量有利于风暴轴的维持。因此,AO 异常可能是通过改变极地地区与中纬度地区气压场,影响大气环流型,使急流加强或减弱,进一步影响风暴轴。

3.3 扰动动能场与斜压性合成分析

斜压不稳定对天气尺度扰动发生发展有重要作用,为进一步讨论 AO 异常引起风暴轴变化的机

制,从能量方面入手,分析 AO 异常时风暴轴区域的扰动动能场和斜压性。根据 Hoskins and Valdes^[27]的理论,这里引入 Eddy 波最大增长率来代表斜压性,计算 700 hPa 与 850 hPa 之间的斜压性,称为斜压性强度指数。图9为 AO 指数高、低值年 500 hPa 扰动动能差值场的合成分布图。由图可知,在差值场上,北太平洋地区极大值中心(130°W, 48°N)附近,达到 10 m²·s⁻²,且通过了 95%信度检验,较弱的中心(175°E, 42°N)附近,达到 8 m²·s⁻²。扰动动能带呈纬向分布,低值年相对于高值年位置略向南移,且纬向上覆盖范围相对扩大,强度小于高值年份的扰动动能值,表明在 AO 的强正(负)位相年份,北太平洋风暴轴区域都存在一个纬向的较大扰动动能带,扰动动能明显偏强(偏弱),且扰动动能带位置偏北(偏南)。

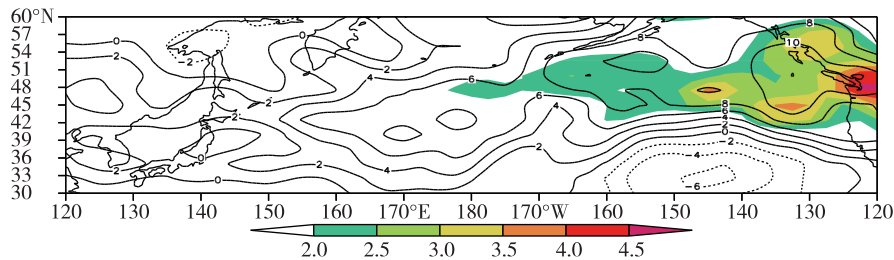


图9 AO指数高、低值年的500 hPa扰动动能差值场成分布(单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$;填色部分指通过0.05显著性检验)

Fig.9 Synthetic distribution of disturbance kinetic energy difference between years of high AO index and low AO index at 500 hPa (units: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$; the shaded areas denote passing the significance test at 0.05 level)

图10为AO指数高、低值年的775 hPa斜压性强度指数差值合成分布图,填色部分为达到0.05置信水平。可以看到,风暴轴区域斜压性AO指数高值年比低值年要强,太平洋北部更为增强,且北太平洋中部地区更为显著,部分地区通过99%信度检验。任雪娟等^[30]指出斜压性指数除了可以反映大气环流的斜压性,还可以反映平均有效位能与扰动能量之间的转化,即斜压性增强或减弱对风暴轴发

展和维持有重要意义。图中差值极值中心多分布在北太平洋风暴轴地区,与急流也有很好的对应关系。图11为总结的AO异常影响北太平洋风暴轴的可能机制示意图,如图所示,东亚大槽和急流强度变化对斜压性的变化有重要作用,并可能通过斜压性影响天气尺度波动,进而影响风暴轴,这与上一节讨论内容相一致。

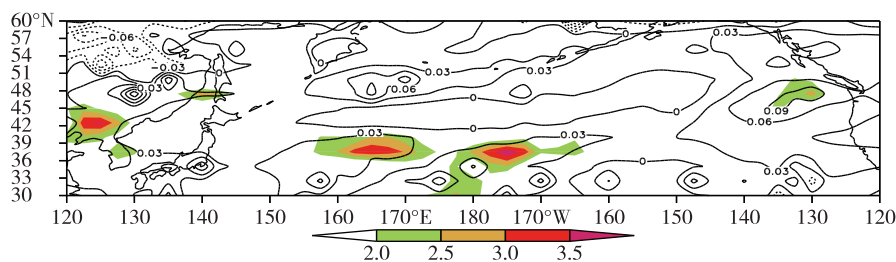


图10 AO指数高、低值年的775 hPa斜压性强度指数差值合成分布(填色部分指通过0.05显著性检验,单位: d^{-1})

Fig.10 Synthetic distribution of baroclinicity index difference between years of high AO index and low AO index at 775 hPa (units: d^{-1} ; the shaded areas denote passing the significance test at 0.05 level)

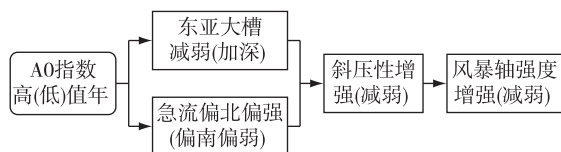


图11 AO异常影响北太平洋风暴轴的可能机制示意图
Fig.11 Sketch map for the possible influence mechanism of AO anomalies on the North Pacific storm track during winter

4 结论与讨论

基于NOAA气候预测中心公报的北极涛动指数逐月资料以及1986—2017年美国环境预报中心和气象中心提供的逐日再分析资料等,采用回归、合成分析等方法,研究了冬季AO与北太平洋风暴轴的相关性及冬季AO异常对风暴轴产生的影响,并进一步探讨了可能机制。主要结论概括如下:

1) AO指数具有年际和年代际变化特点,且在

经度、纬度以及平均强度变化上,冬季北太平洋风暴轴也具有明显的年际和年代际变化特点。风暴轴强度指数分别与经度、纬度指数呈负相关,但不显著,而经度指数与纬度指数两者具有同步变化的特征。冬季AO指数与北太平洋风暴轴强度指数有显著的正相关性,也与北太平洋风暴轴位置呈正相关,AO强正(负)位相年份,北太平洋风暴轴偏东偏北(偏西偏南),但相关性并不显著。

2)在AO强正(负)位相年份,风暴轴区域天气尺度滤波方差强(弱);东亚大槽减弱(加深),急流偏北偏强(偏南偏弱);扰动动能偏强(偏弱),风暴轴区域斜压性也明显增强(减弱)。这种对高度场、风场和动能场的改变可能通过影响急流,改变斜压性,最终导致风暴轴发生变化。在AO强正(负)位相年,中纬度地区气压上升(降低),高纬度地区气压减小(升高),南北的气压梯度增大(减小),急流

强度增大(减弱),东亚大槽减弱(加深),斜压性增强(减弱),有(不)利于风暴轴的维持,且风暴轴强度加强(减弱)。

北极涛动代表了北半球中高纬的大气环流形势,它的异常可能影响瞬变扰动。本文虽然表明AO与风暴轴之间的相关性较好,且初步提出了AO异常变化产生的对风暴轴的可能影响机制,但因为对风暴轴的影响因子有很多,具体的影响机制还需要进一步研究,另外,两者的相互作用过程也需要证实和研究。

参考文献:

- [1] Blackmon M L. A climatological spectral study of the 500 mb geopotential height of the Northern Hemisphere [J]. *J Atmos Sci*, 1976, 33(8): 1607-1623.
- [2] Hodges K I. A general method for tracking analysis and its application to meteorological data [J]. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(11): 2573-2586.
- [3] 李莹,朱伟军,魏建苏. 冬季北太平洋风暴轴指数的评估及其改进 [J]. *大气科学学报*, 2010, 34(5): 1001-1010.
- [4] 邓兴秀,孙照渤. 北半球风暴轴的时间演变特征 [J]. *南京气象学院学报*, 1994, 17(2): 165-170.
- [5] 高琦,孙照渤,邓伟涛. 冬季太平洋风暴轴的年代际变化 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(2): 272-276.
- [6] 周星妍,朱伟军,顾聪. 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*, 2015, 39(5): 978-990.
- [7] 马阳,朱伟军,李天宇,等. 西伯利亚风暴轴的气候特征及其可能维持机制 [J]. *气象科学*, 2017, 37(5): 587-597.
- [8] 傅刚,毕玮,郭敬天. 北太平洋风暴轴的三维空间结构 [J]. *气象学报*, 2009, 67(2): 189-200.
- [9] 刘鸣彦,朱伟军,高洁,等. 冬季北半球极涡强度对北太平洋风暴轴的影响 [J]. *大气科学学报*, 2013, 36(3): 297-298.
- [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北太平洋风暴轴的影响 [J]. *大气科学学报*, 1997, 21(5): 513-522.
- [11] 孙照渤,朱伟军. 北半球冬季风暴轴维持的一种可能机制 [J]. *南京气象学院学报*, 1998, 21(3): 299-306.
- [12] 朱伟军,孙照渤. 风暴轴的研究 [J]. *南京气象学院学报*, 1999, 22(1): 121-127.
- [13] 孙照渤,朱伟军. 冬季北半球风暴轴能量演变的个例分析 [J]. *南京气象学院学报*, 2000, 23(2): 147-155.
- [14] Zhu W, Sun Z, Zhou B. The impact of Pacific SSTA on the interannual variability of northern Pacific storm track during winter [J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(5): 1029-1042.
- [15] Chang E K M, Fu Y. Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity [J]. *J Climate*, 2002, 15(6): 642-658.
- [16] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields [J]. *Geophys Res Lett*, 1998, 25(9): 1297-1300.
- [17] 高琦. 冬季北太平洋风暴轴的时空演变及其与AO关系的初步研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2006: 28.
- [18] Thompson D W J, Wallace J M, Hegerl G C. Annular modes in the extratropical circulation. Part II: Trends [J]. *J Climate*, 2000, 13(5): 1018-1036.
- [19] Thompson D W J, Wallace J M. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode [J]. *Science*, 2001, 293(5527): 85-89.
- [20] Wang J, Ikeda M. Arctic oscillation and Arctic sea-ice oscillation [J]. *Geophys Res Lett*, 2000, 27(9): 1287-1290.
- [21] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic oscillation [J]. *Geophys Res Lett*, 2001, 28(10): 2073-2076.
- [22] Black R X. Stratospheric forcing of surface climate in the Arctic oscillation [J]. *J Climate*, 2002, 15(3): 268-277.
- [23] Thompson D W J, Wallace J M. Annular modes in the extratropical circulation. Part I: Month-to-month variability [J]. *J Climate*, 2000, 13(5): 1000-1016.
- [24] 周雅娟,钟霖浩,华丽娟. 北大西洋海表面温度锋与大西洋风暴路径及大气大尺度异常的关系研究 [J]. *气候与环境研究*, 2016, 21(4): 449-466.
- [25] Blender R, Schubert M. Cyclone tracking in different spatial and temporal resolutions [J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(2): 377-384.
- [26] 孙照渤. 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, 1992: 29-35.
- [27] Hoskins B J, Valdes P J. On the existence of storm tracks [J]. *J Atmos Sci*, 1990, 47(15): 1854-1864.
- [28] 黄嘉佑. 气象统计分析与预报方法 [M]. 2版. 北京: 气象出版社, 1999.
- [29] 顾沛澍,朱伟军,刘鸣彦,等. 冬季北太平洋风暴轴异常及其与东亚大气环流的关系 [J]. *气象科学*, 2013, 33(6): 610-618.
- [30] 任雪娟,杨修群,韩博,等. 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*, 2007, 50(1): 92-100.