

# 1979~2020年东亚季风的时空分布特征

郭政伟

成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

收稿日期: 2021年9月7日; 录用日期: 2021年9月23日; 发布日期: 2021年9月30日

## 摘要

为进一步分析东亚季风的时空分布特征, 本文利用1979~2020年美国国家环境预报中心(NCEP)和欧洲气象资料中心(ERA5)的再分析资料, 对比分析了东亚季风区的风场、水汽输送以及季风指数等特征, 结果表明: 1) 东亚季风的水平风场垂直结构是以经向风切变为主导的, 因此东亚季风为经向型季风。东亚季风的水平风场有着明显的季节性转变, 冬季盛行偏北气流, 夏季盛行偏南气流。2) 东亚地区水汽输送特征也存在显著的季节性差异。夏季的水汽输送是以经向为主的湿平流; 冬季风的水汽输送是以纬向为主的干冷平流。水汽输送的辐合辐散区随季节也有显著变化。3) 东亚夏季风和冬季风强度指数的年际变化都很大并且呈现减弱的趋势, 夏季风存在准两年周期, 冬季风存在准四年周期。4) NCEP和ERA5两类再分析资料所反映的东亚季风的特征基本一致。

## 关键词

东亚季风, 水汽通量, 水汽通量散度, 东亚季风指数

# Temporal and Spatial Distribution Characteristic of East Asian Monsoon from 1979 to 2020

Zhengwei Guo

School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology,  
Chengdu Sichuan

Received: Sep. 7<sup>th</sup>, 2021; accepted: Sep. 23<sup>rd</sup>, 2021; published: Sep. 30<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to further analyze the temporal and spatial distribution characteristics of the East Asian monsoon, using the reanalysis data of the National Center for environmental prediction (NCEP)

and the European Meteorological Data Center (ERA5) from 1979 to 2020, this paper compares and analyzes the characteristics of wind field, water vapor transport and monsoon index in the East Asian monsoon region. The results show that: 1) The vertical structure of the horizontal wind field of the East Asian monsoon is dominated by meridional wind shear, so the East Asian monsoon is a meridional monsoon. The horizontal wind field of the East Asian monsoon has obvious seasonal changes. The northerly air flow prevails in winter and the southerly air flow prevails in summer. 2) There are also significant seasonal differences in water vapor transport characteristics in East Asia. The water vapor transport in summer is mainly meridional wet advection, but dry and cold advection in zonal direction in winter. The convergence and divergence region of water vapor transport also changes significantly with seasons. 3) The interannual variation of East Asian summer monsoon and winter monsoon intensity index is large and shows a weakening trend. There is a quasi biennial cycle for summer monsoon and a quasi quadrennial cycle for winter monsoon. 4) The characteristics of East Asian monsoon reflected by NCEP and ERA5 reanalysis data are basically the same.

## Keywords

East Asian Monsoon, Water Vapor Flux, Water Vapor Flux Divergence, East Asian Monsoon Index

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

## 1. 引言

东亚季风是全球季风的重要组成部分,我国受东亚季风影响显著,夏季的大尺度旱涝以及冬季的冷害与冬、夏季风强度有很大关系[1]。从人口规模和经济发展水平的角度来衡量,在全球季风系统中,东亚夏季风的重要性不言而喻[2]。

关于东亚季风系统的气候特征、性质、季节进退与变率及其对东亚(中国、日本、朝鲜半岛等地区)大尺度环流和天气—气候的影响已有许多研究和总结[3]-[12]。长期的努力与研究结果表明,东亚季风系统是形成这个地区天气与气候条件的主要系统,对这个季风系统认识的不断改进和提高,增加了东亚地区天气和气候的可预报性,在此基础上不断改进预报方法,从而增强了这个地区各国应对由季风异常造成的多种灾害的防御能力,不同程度地减少了灾害的风险与破坏,但是对于东亚季风系统尤其是对夏季风系统在科学上的认识并不是完全一致,仍有许多问题尚待进一步地分析和回答[3]。利用再分析数据集对东亚季风特征进行分析是天气气候研究中最重要方法之一。新的再分析数据出现,也将进一步完善和丰富我们对东亚季风的了解和认知。

美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)的NCEP再分析资料,是气象领域使用较为广泛的再分析数据中之一,是较为经典的再分析数据,在对东亚季风研究方面被广泛使用。欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 简称ECMWF)最新推出的全球气候和天气的第五代ECMWF再分析数据集ERA5,一经推出也获得了研究者的广泛关注,但较少有利用该数据对东亚季风开展研究。本文计划利用ERA5数据集对东亚季风的时空分布特征进行分析,以期获得东亚季风各类变量及其变化的基本特征,并利用NCEP数据集进行对比分析,利用两种再分析数据对比东亚季风的时空分布特征,以检验ERA5再分析数据在东亚地区的适用性。

## 2. 数据和方法

### 2.1. 数据

1) 美国气象预报中心(NCEP)和美国国家大气研究中心(NCAR)联合制作的再分析资料 NCEP。空间分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ ，时间分辨率为月。本文选用 1979 年到 2020 年 100 hPa~1000 hPa 的风场、比湿场和气温等气象资料。

2) 欧洲气象资料中心(ERA5)的再分析资料，空间分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ，时间分辨率为月。本文选用了 1979 年到 2020 年 100 hPa~1000 hPa 的风场、海平面气压气象资料。

### 2.2. 方法

本文主要分析东亚季风的风场、水汽输送和季风指数特征。为了反映不同季节的特征，用 6~8 月的数据代表夏季，用 12~2 月的数据代表冬季。为了更好地表示季风指数的年际变化，对经向、纬向风和海平面气压的数据进行了标准化处理，并对计算得到的季风指数进行了滑动平均和一元回归。

#### 1) 东亚夏季风指数

本文夏季风指数的计算选择了李建平[12]定义的动态标准化季节变率指数，这个指数通过利用风场的归一化季节性强度，可以很好地表示夏季风的年际差异。东亚季风指数的基本思想是基于风场的归一化季节性强度。季风具有很强的季节变化，因此，用风场的季节性大小来衡量强、弱季风是合理的。

#### 2) 东亚冬季风指数

冬季风指数的计算选择了施能[9]定义的冬季风指数。这个指数利用海平面气压差来计算，能更好的表征冬季风的强度。该指数将东亚季风强度指数定义为  $50^\circ\text{N}$ ~ $20^\circ\text{N}$ ，7 个纬带(间隔  $5^\circ$ )的纬向标准化海平面气压的差( $110^\circ\text{E}$  减  $160^\circ\text{E}$ )的和，并将其进行一次标准化处理。

#### 3) 水汽通量和水汽通量散度

本文水汽通量和水汽通量散度的计算选用的是黄荣辉等[13]分析东亚季风水汽输送特征所使用的计算公式。

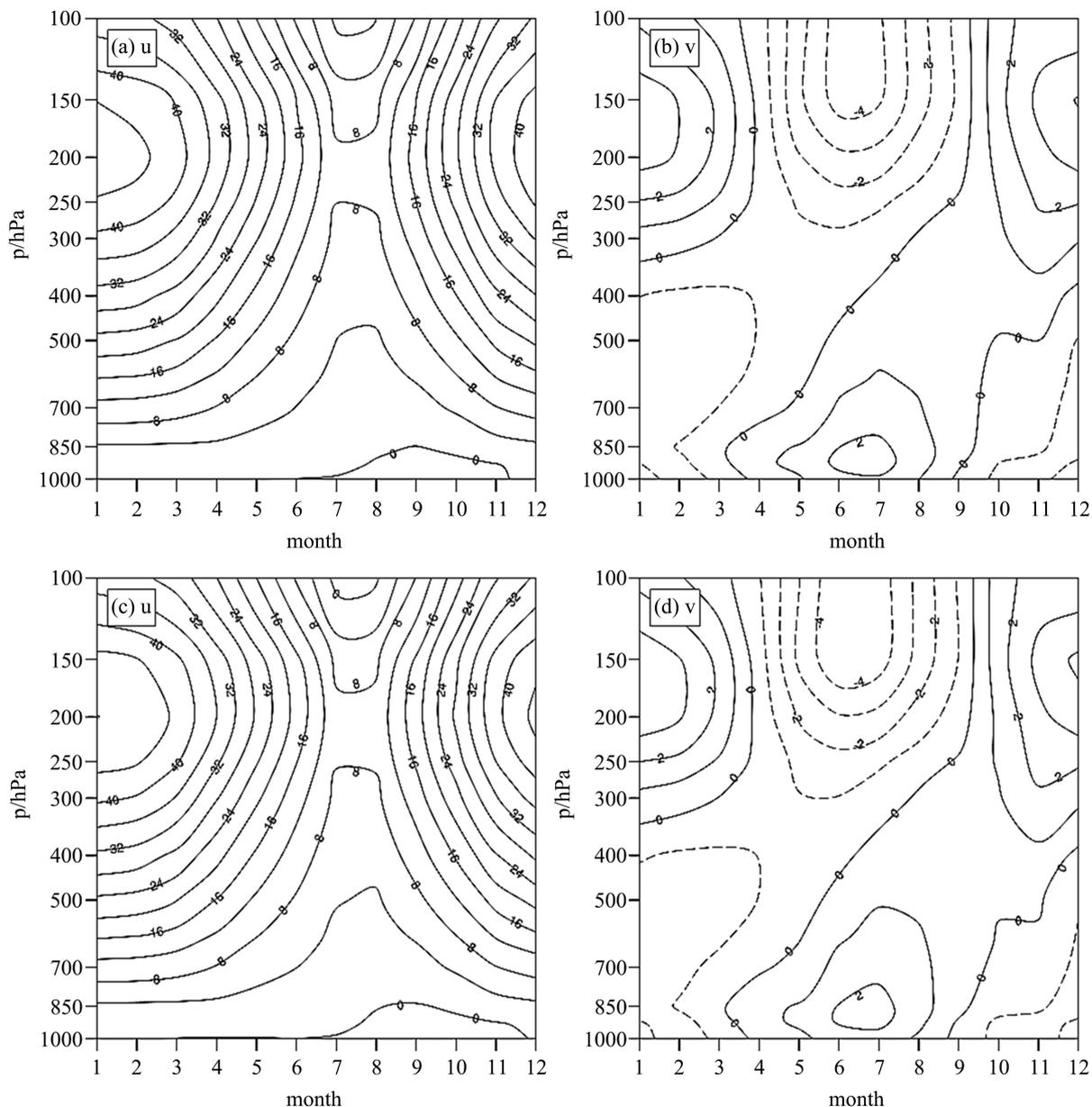
## 3. 东亚季风的风场的特征

东亚季风系统作为亚澳季风子系统之一，以往认为东亚季风是印度季风的一个分支，但经过研究发现它与其他季风子系统有着显著的区别，在亚澳季风系统是一个独立的存在[14]。由于受到独特的地形强迫以及独特的地理位置的影响，东亚季风在时间和空间上有着高度的复杂性和变化性[5]。传统上认为，季风是指风向随季节而改变的现象。许多学者在对季风进行研究时会以风场的改变作为研究重点，而有的地区由于降水的变化更明显，研究者就会以降水作为季风研究的重点[1][15]。

### 3.1. 东亚季风风场垂直结构特征

图 1 体现了东亚季风 1979~2020 年的平均经向、纬向风的垂直结构。首先可以看到两种再分析资料在风场垂直结构的描述上基本一致。图 1(a)和图 1(c)可以看出东亚季风系统平均纬向风全年从 1000 hPa 到 100 hPa 均为西风，夏季整层风速均较弱(小于 12 m/s)，而冬季平均纬向风随高度逐渐增强，在 200 hPa 左右达到极大值(大于 44 m/s)。冬季和夏季平均纬向风在垂直方向都呈西风切变。图 1(b)和图 1(d)显示东亚夏季经向风在 400 hPa 以上为偏北风，以下为偏南风，垂直方向呈北风切变；而东亚冬季则与夏季相反，经向风高层为南风，低层为北风，垂直方向呈南风切变。

这说明东亚季风的垂直结构是以经向为主导的，在夏季和冬季有着明显的反向配置(夏季呈北风切变，冬季呈南风切变)，纬向风的垂直切变按季节变化并不明显，因此可以认为东亚季风为经向型季风。



**Figure 1.** Time profiles of mean zonal and meridional winds in East Asia ( $4^{\circ}\text{N}\sim 53^{\circ}\text{N}$ ,  $73^{\circ}\text{E}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) from 1979 to 2020 ((a) and (c) are zonal winds, solid lines are westerly winds; (b) and (d) are meridional winds, solid lines are southerly winds, and dotted lines are northerly winds. (a) and (b) are based on NCEP data, (c) and (d) are based on ERA5 data. Unit: m/s)

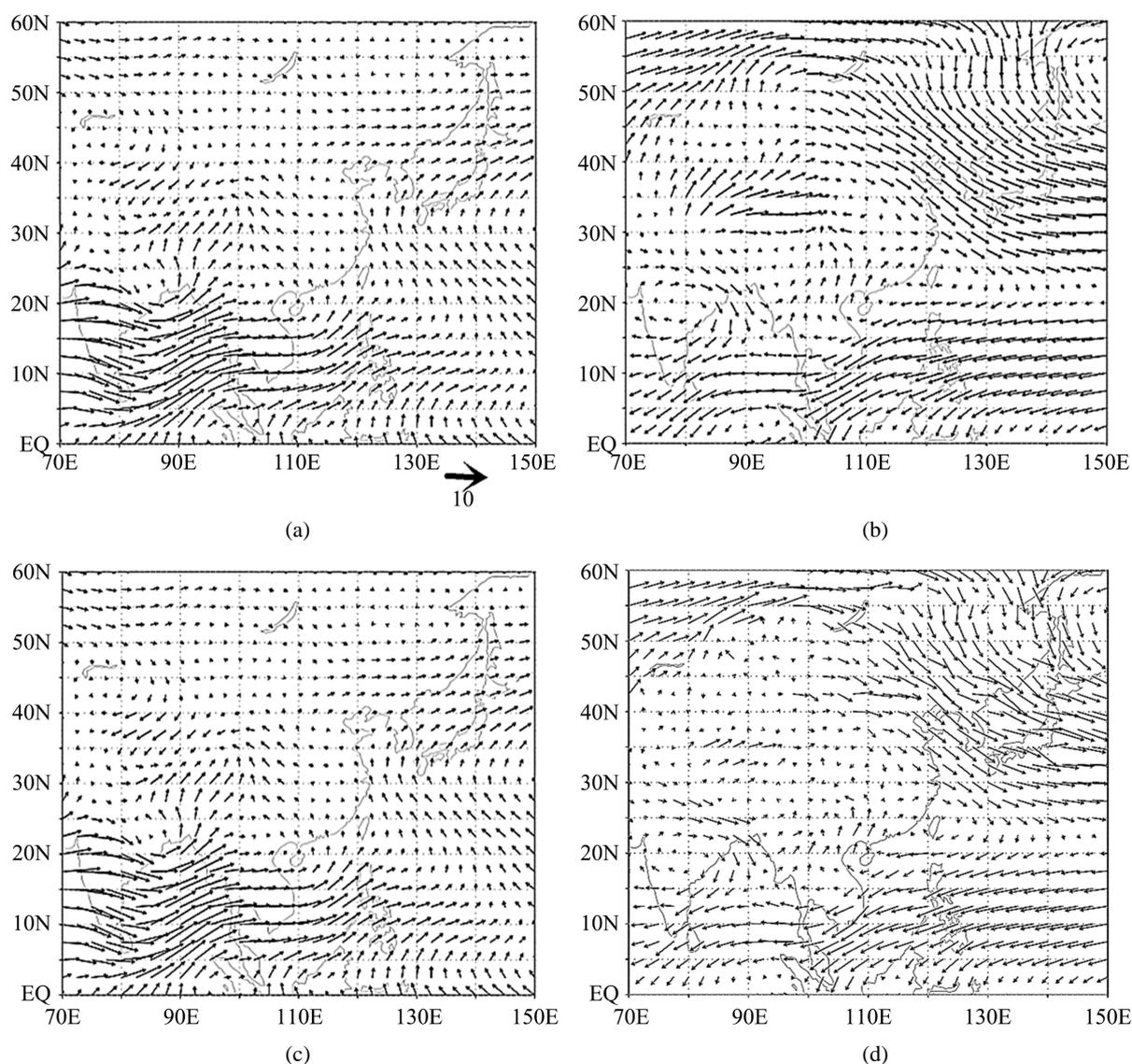
**图 1.** 东亚地区( $4^{\circ}\sim 53^{\circ}\text{N}$ ,  $73^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$ ) 1979~2020 年平均纬向风和经向风的时间剖面图((a)、(c)为纬向风, 实线为西风; (b)、(d)为经向风, 实线为南风, 虚线为北风。(a)、(b)为 NCEP 数据, (c)、(d)为 ERA5 数据。单位: m/s)

### 3.2. 东亚季风风场水平结构特征

低层的风场对天气气候的影响较为直接, 为了较好地反映东亚季风水平风场的特征, 选择了 850 hPa 夏季(6~8 月)和冬季(12~2 月)的平均水平风场进行分析。

图 2 表明在东亚地区夏季风和冬季风有着显著的季节性转变[16]。图 2(a)和图 2(c)表明, 夏季东亚地区低层盛行偏南风。来自南亚强大的偏西气流经过印度半岛、孟加拉湾和南海地区与来自澳大利亚高压北部的东南气流汇合, 随后这支气流受到太平洋西侧副热带高压的影响转为偏南气流沿着东亚沿岸一路

向北,最终汇入西太平洋副热带高压的偏南气流中。图 2(b)和图 2(d)表明冬季东亚地区低层盛行偏北风。它由两支气流组成,一支是来自西伯利亚和蒙古冷高压影响下的强冷空气一路向东南方向进发,沿途经过中国渤海、朝鲜和日本,在  $25^{\circ}\text{N}$  左右转为偏西气流汇入西太平洋。另外一支气流来自  $25^{\circ}\text{N}$  以南,西太平洋的偏东北气流,这支气流一路向西南,经过南海、孟加拉湾和印度半岛等地区最终汇入南半球副高北侧的偏东北气流中。由冬、夏季风低层的盛行风向可看出,东亚季风的水平流场有着明显的季节性转变,而且受到西伯利亚高压以及副热带高压等因素的影响具有一些独特的特点,夏季风在  $120^{\circ}\text{E}$  有轻微的东西向的分裂,这可能与东亚地区的风场辐合辐散有关;而在冬季则有以  $25^{\circ}\text{N}$  为分界明显的东西向的气流分支( $25^{\circ}\text{N}$  以北为偏西气流,  $25^{\circ}\text{N}$  以南为偏东气流)。此外 NCEP 和 ERA5 两类再分析资料所描述的低层水平风场特征基本一致。



**Figure 2.** 850 hPa horizontal wind field in East Asia from 1979 to 2020 ((a) and (c) are summer, (b) and (d) are winter, (a) and (b) are based on NCEP data, (c) and (d) are based on ERA5 data. Unit: m/s)

**图 2.** 东亚地区 1979~2020 年 850 hPa 水平风场((a)、(c)为夏季, (b)、(d)为冬季, (a)、(b)为 NCEP 数据, (c)、(d)为 ERA5 数据, 单位: m/s)

## 4. 东亚季风水汽输送特征

水汽输送是造成降水的主要因素之一。东亚地区的降水受季风影响，随季节也有显著的变化。通过水汽通量和水汽通量散度可以很好地反映造成东亚季风区降水的水汽输送特征。

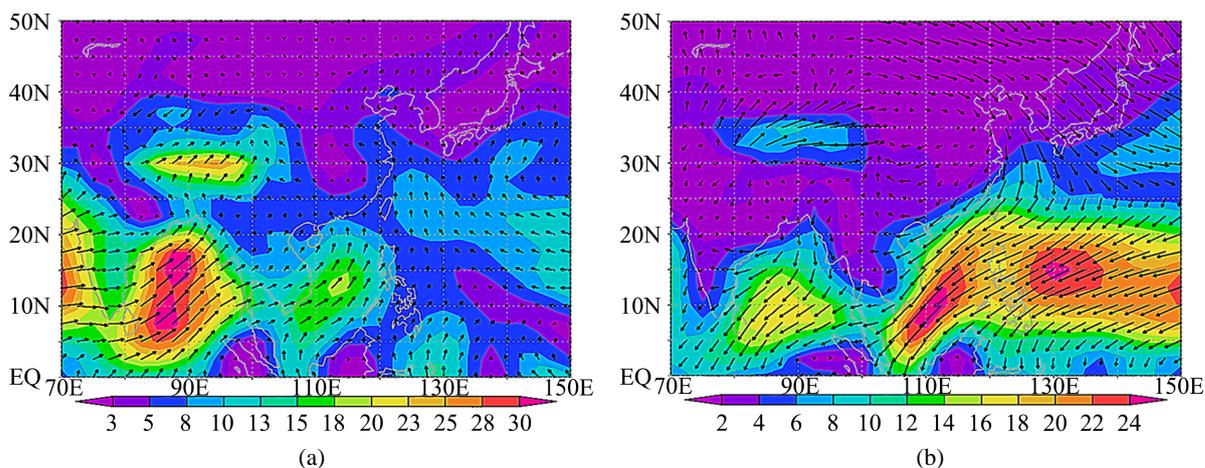
### 4.1. 东亚季风的水汽通量

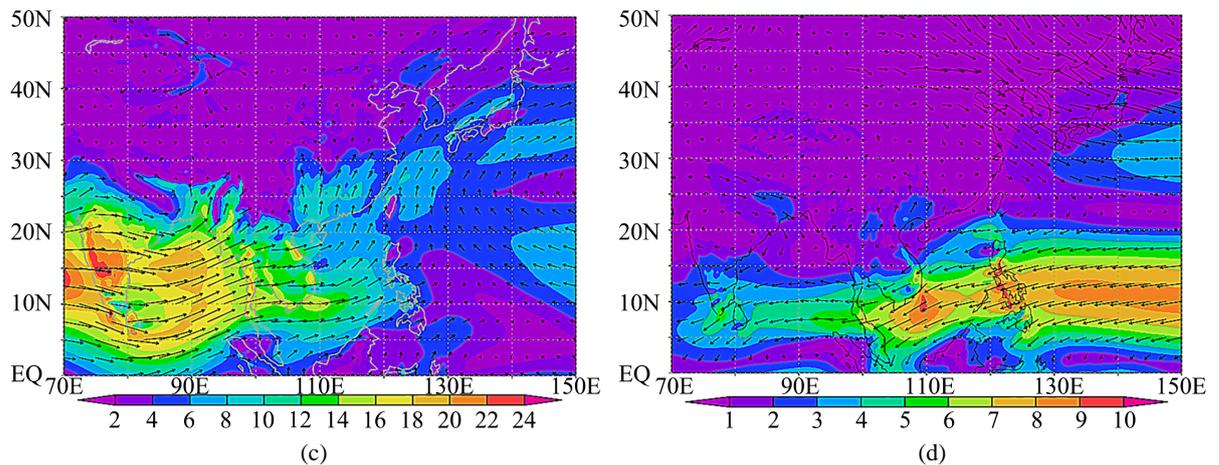
图 3 为东亚地区 850 hPa 的水汽通量图，其中高原地区数据为插值数据，不作为参考。图中可以看出 NCEP 和 ERA5 再分析资料所描述的水汽通量的分布特征基本一致，ERA5 数据的量级略小于 NCEP。图 3(a)和图 3(c)表明，东亚地区夏季的水汽输送主要受偏南气流的控制，大致可以分为三个部分。第一部分是来自阿拉伯海和孟加拉湾的水汽输送；第二部分为南海地区向北的水汽输送；第三部分为太平洋西南区域向南的水汽输送。其中来自孟加拉湾的水汽输送最为显著。总体可以看出东亚地区夏季水汽输送是以经向为主导的，主要是从南到北的输送；纬向的水汽输送主要在印度半岛地区，以从西到东的输送为主。夏季东亚地区的水汽输送是以经向为主的湿平流。

图 3(b)和图 3(d)可以看出，冬季，东亚地区的水汽输送特征总体上与夏季相反。水汽输送主要是受偏北气流的控制，其中 25°N 以北受到西北气流控制，这是来自西伯利亚和蒙古的干冷空气；25°N 以南受东北气流的控制，这是来自太平洋副热带高压的暖湿空气，这与上述东亚地区的水平风场特征相吻合。水汽输送的高值区仍然是在南部地区。总体的来看，冬季的水汽输送不同于夏季的输送是以纬向为主的干冷平流。以 25°N 为界，25°N 以南是由东向西的湿平流；25°N 以北是由西向东的干平流。

### 4.2. 东亚季风的水汽通量散度

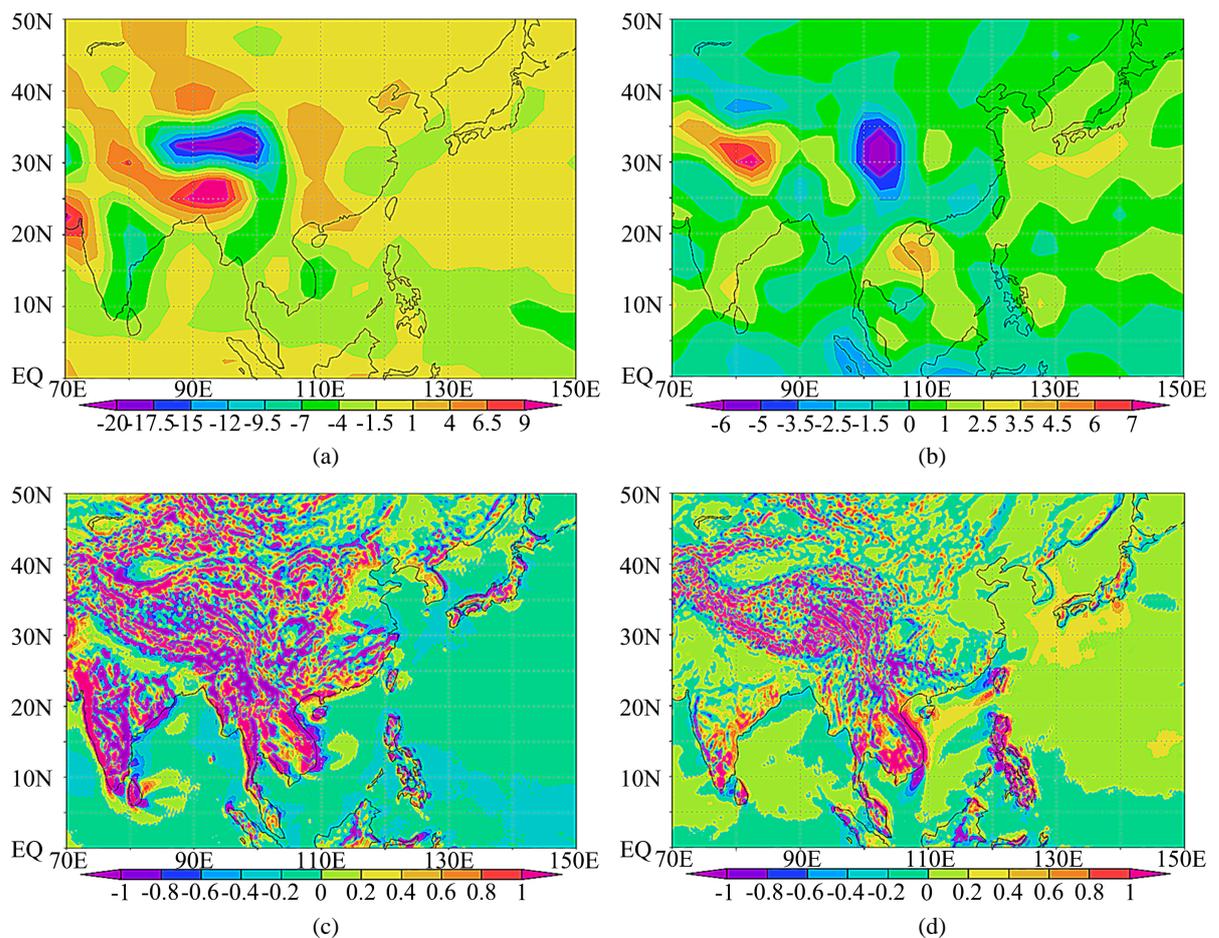
图 4 展示了 850 hPa 的水汽通量散度，青藏高原地区数据仍不作为参考。水汽通量散度为正的地区表示水汽向四周辐散；反之为负的地区表示四周有水汽向该地区汇集。从图 4 中可以看出 NCEP 和 ERA5 再分析资料所表达的水汽通量辐合辐散的基本特征一致，但是由于 ERA5 的高空间分辨率，给出了较为细致的特征，此外 ERA5 数据的量级也显著低于 NCEP 数据。由图 4(a)和图 4(c)可知，东亚地区夏季较明显的水汽辐合中心为印度半岛东部、青藏高原东麓以及中南半岛东部地区，此外我国长江中下游地区至朝鲜半岛一带也有较为明显的辐合带。水汽辐散中心主要集中在东亚地区陆地区域，包括我国中、西部地区 and 高原西南部以及印度半岛西部，此外阿拉伯海也是夏季水汽的源地之一。在东亚季风系统中结合风场图可以看出无论冬夏季风气流都由湿度高的地区吹向湿度低的地区，可以得出东亚季风的水汽输送很依赖于水汽平流[13]。





**Figure 3.** 850 hPa water vapor flux of East Asia ((a) and (c) are summer, (b) and (d) are winter, (a) and (b) are based on NCEP data, (c) and (d) are based on ERA5 data, Unit:  $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$ )

**图 3.** 东亚地区 850 hPa 水汽通量((a)、(c)为夏季, (b)、(d)为冬季, (a)、(b)为 NCEP1 数据, (c)、(d)为 ERA5 数据, 单位:  $\text{g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm})$ )



**Figure 4.** 850 hPa water vapor flux divergence in East Asia ((a) and (c) are summer, (b) and (d) are winter, (a) and (b) are based on NCEP data, (c) and (d) are based on ERA5 data, Unit:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

**图 4.** 东亚地区 850 hPa 水汽通量散度((a)、(c)为夏季, (b)、(d)为冬季, (a)、(b)为 NCEP 数据, (c)、(d)为 ERA5 数据, 单位:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{hPa}^{-1}\text{s}^{-1}$ )

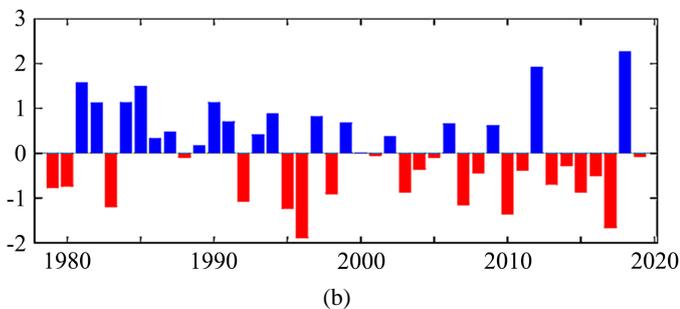
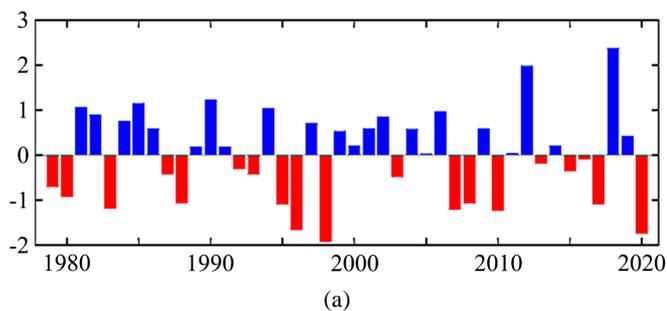
由图 4(b)和图 4(d)可知, 冬季, 东亚地区水汽输送通量的量级相对夏季有所减小。东亚地区水汽的源地中心转变为印度半岛及其东部、中南半岛东部以及西太平洋地区, 水汽汇转为我国东南、西南至孟加拉湾一带, 此外高原北部也有明显的水汽辐合。

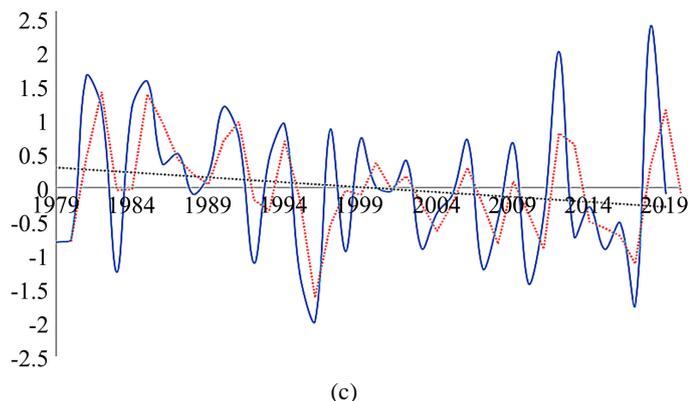
## 5. 东亚季风指数

季风指数是用来衡量一个区域季风强弱的值。关于季风强度, 许多科学家定义了不同的季风指数, 现有的指数可分为四类: 海陆差异类季风指数、环流类季风指数、温湿类季风指数、综合类季风指数[10]。这些季风指数都各有优缺点, 为了更好地表示东亚季风的季节和年际变化以及更好的表示东亚季风冬夏季风强度, 夏季风指数选用了李建平[12]定义的动态标准化季节变率指数, 这个指数通过利用风场的归一化季节性强度, 可以很好地表示夏季风的年际差异; 冬季风指数选用了施能[9]定义的冬季风指数。这个指数利用海平面气压差来计算, 能更好的表征冬季风的强度。

### 5.1. 东亚夏季风指数及年际变化特征

东亚地区夏季风的爆发一般被认为是从南海的 5 月份开始[17], 然后一路向北推进, 给我国东部地区、日本、朝鲜、韩国带来大量降水及盛行的偏南风。东亚夏季风动态标准化季节变率指数就是基于风场的归一化季节性强度, 因此用风场的季节性大小来衡量强、弱季风是合理的。图 5 展示了东亚夏季风强度指数的年际变化, 从图 5(a)和图 5(b)可以看出 NCEP 与 ERA5 两类再分析资料计算的指数特征及其变化趋势基本一致, 存在显著的强弱变化特征。从图 5(c)中可以看出东亚夏季风的年际变化非常显著, 从 1979 年至 2020 年整体呈现减弱的趋势。这一现象的原因可能与近一个世纪以来全球气候变暖有关, 全球的气温升高导致海陆热力差异进一步地加大, 导致了季风强度的变化。近些年研究发现, 东亚季风强度指数的年际异常与海温异常有关, 包括西太平洋暖池、印度洋以及南海等[1]。另一方面从图 5(a)可看出夏季风指数强度变化存在准两年周期, 大约每隔两年强度指数就有较大的变化, 例如 1979 年到 1982 年、1982 年到 1986 年、1987 年到 1991 年。这与黄荣辉研究发现的东亚季风系统降水的准两年周期变化以及东亚地区在经向上存在三极子分布特征相符合[1], 这一发现对于研究东亚季风对我国夏季洪涝灾害的发生有着重要的意义。





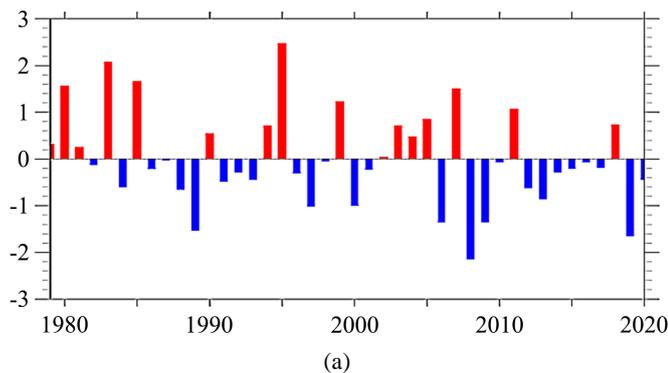
**Figure 5.** The East Asian summer monsoon index time series ((a) is NCEP data; (b) is ERA5 data; (c) is the summer monsoon index (ERA5), moving average (red dotted line) and unitary regression (black dotted line))

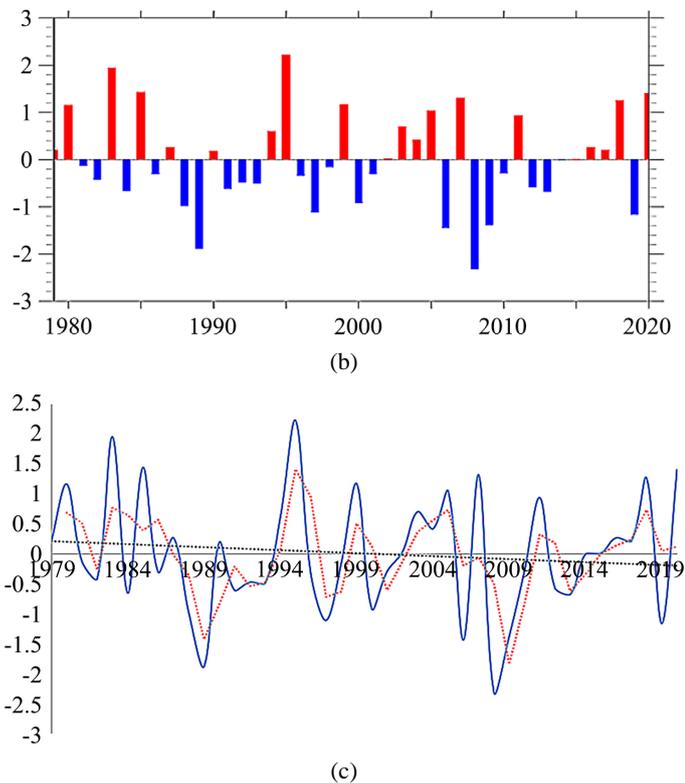
**图 5.** 东亚夏季风指数时间序列((a)为 NCEP 数据; (b)为 ERA5 数据; (c)为夏季风指数(ERA5)、滑动平均(红色虚线)和一元回归(黑色虚线))

## 5.2. 东亚冬季风指数及年际变化特征

关于东亚地区的冬季风的研究相比于夏季风研究也是同样的重要，因为东亚地区不同于其他季风区的是不仅受夏季风强烈影响，也受到冬季风的强烈影响。冬季风的爆发一般是从西伯利亚开始的，沿着东南方向一路进发，对蒙古、中国北部以及朝鲜半岛等地区造成影响。强烈的冬季风不仅会造成我国寒潮、雪灾等灾害爆发，也会造成春季的沙尘天气。

冬季风主要受到西伯利亚高压和阿留申低压的控制，经研究表明东亚冬季风的强度与西伯利亚高压有很大的联系[18] [19] [20]，因此利用海平面气压差来计算冬季风指数来是合适的。图 6 为利用 ERA5 和 NCEP 再分析资料的海平面气压场计算的冬季风指数及其年际变化，从图 6(a)和图 6(b)中可以看出 NCEP 和 ERA5 再分析资料相比所表达的特征基本一致。从图中可以看出东亚季风强度指数从 20 世纪 70~80 年代中期偏强，而从 80 年代中期到 90 年代中期偏弱；并且从 90 年代中后期到 20 世纪末，冬季风指数又偏强，到了 21 世纪以来几乎一直偏弱，这给东亚带来连续多年的暖冬。东亚强寒潮爆发频次在 1989 年到 2020 年比起以前有很大减少[18]。从图 6(c)可以看出冬季风指数在 1979~2020 年间同样具有很大的年际差异，总体呈现减弱的趋势。另一方面，东亚季风强度指数的年际变化呈现准四年周期，这可能与 ENSO 循环对东亚季风的影响有关。尤其是在 2002~2005 年与 2006~2009 年的冬季出现了很大差异，2002~2005 年冬季风偏强，且欧亚大陆中高纬地区冬季气温偏低冬季风偏强，甚至在我国东北、西北等地区出现了雪灾。而 2006~2009 年冬季风偏弱，亚欧大陆中高纬地区气温普遍偏高，我国冬季也出现暖冬现象[21]。





**Figure 6.** The East Asian winter monsoon index time series ((a) is NCEP data; (b) is ERA5 data; (c) is the winter monsoon index (ERA5), moving average (red dotted line) and unitary regression (black dotted line))

**图 6.** 东亚冬季风指数时间序列((a) NCEP 数据; (b) ERA5 数据; (c) 冬季风指数(ERA5)、滑动平均(红色虚线)和一元回归(黑色虚线))

## 6. 结论

1) 东亚季风的水平风场垂直结构是以经向风切变为主导的, 纬向风的垂直风切变随季节变化并不明显, 因此东亚季风为经向型季风。东亚季风的低层水平风场有着明显的季节性转变, 冬季盛行偏北气流, 夏季盛行偏南气流。

2) 东亚地区水汽输送特征也存在显著的季节性差异。夏季的水汽输送是以经向为主的湿平流; 冬季风的水汽输送是以纬向为主的干冷平流。夏季水汽辐合中心与冬季有显著差异。冬季水汽输送通量量级有所减小。

3) 1979~2020 年间, 东亚夏季风和冬季风强度指数均存在显著的年际变化, 均呈现出减弱的趋势。夏季风指数存在准两年周期, 冬季风指数存在准四年周期。

4) NCEP 和 ERA5 两类再分析资料所反映出的东亚季风的特征基本一致。

## 基金项目

成都信息工程大学 2021 年本科教育教学研究与改革项目暨本科教学工程项目: JYJG2021034。

## 参考文献

- [1] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 691-719.

- [2] 周天军, 吴波, 郭准, 等. 东亚夏季风变化机理的模拟和未来变化的预估: 成绩和问题、机遇和挑战[J]. 大气科学, 2018, 42(4): 902-934.
- [3] 丁一汇, 司东, 柳艳菊, 等. 论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J]. 大气科学, 2018, 42(3): 533-558.
- [4] Kitoh, A. (2017) The Asian Monsoon and Its Future Change in Climate Models: A Review. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **95**, 7-33. <https://doi.org/10.2151/jmsj.2017-002>
- [5] Wang, B., Wu, Z., Li, J., et al. (2008) How to Measure the Strength of the East Asian Summer Monsoon. *Journal of Climate*, **21**, 4449-4463. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2183.1>
- [6] Li, Y., Ding, Y.H. and Li, W.J. (2017) Interdecadal Variability of the Afro-Asian Summer Monsoon System. *Advances in Atmospheric Sciences*, **34**, 833-846. <https://doi.org/10.1007/s00376-017-6247-7>
- [7] Jiang, S., Zhu, C.W. and Jiang, N. (2020) Variations in the Annual Cycle of the East Asian Monsoon and Its Phase-Induced Interseasonal Rainfall Anomalies in China. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, **13**, 316-322. <https://doi.org/10.1080/16742834.2020.1754728>
- [8] 陈隆勋, 张博, 张瑛. 东亚季风研究的进展[J]. 应用气象学报, 2006(6): 67-80.
- [9] 施能, 鲁建军. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化[J]. 大气科学学报, 1996, 19(2): 168-177.
- [10] 江滢. 东亚季风指数分类初析[J]. 气象, 2005, 31(5): 3-7.
- [11] 竺可桢. 东南季风与中国之雨量[J]. 地理学报, 2011, 1(1): 1-27.
- [12] Li, J. and Zeng, Q. (2003) A New Monsoon Index and the Geographical Distribution of the Global Monsoons. *Advances in Atmospheric Sciences*, **20**, 299-302. <https://doi.org/10.1007/s00376-003-0016-5>
- [13] 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别[J]. 大气科学, 1998(4): 460-469.
- [14] 陈际龙, 黄荣辉. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 II. 夏季风水汽输送[J]. 大气科学, 2007, 31(5): 766-778.
- [15] Li, J.P. and Zeng, Q.C. (2002) A Unified Monsoon Index. *Geophysical Research Letters*, **29**, 1274. <https://doi.org/10.1029/2001GL013874>
- [16] 陈际龙, 黄荣辉. 亚澳季风各子系统气候学特征的异同研究 I. 夏季风流场结构[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1091-1102.
- [17] 黄荣辉, 顾雷, 徐予红, 等. 东亚夏季风爆发和北进的年际变化特征及其与热带西太平洋热状态的关系[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 20-36.
- [18] 王遵娅, 丁一汇. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因[J]. 大气科学, 2006, 30(6): 1068-1076.
- [19] Chen, W., Huang, R.H., et al. (2000) The Interannual Variability of East Asian Winter Monsoon and Its Relation to the Summer Monsoon. *Advances in Atmospheric Sciences*, **17**, 48-60. <https://doi.org/10.1007/s00376-000-0042-5>
- [20] Huang, R.H., Chen, J.L. and Huang, G. (2007) Characteristics and Variations of the East Asian Monsoon System and Its Impacts on Climate Disasters in China. *Advances in Atmospheric Sciences*, **24**, 993-1023. <https://doi.org/10.1007/s00376-007-0993-x>
- [21] 黄荣辉, 魏科, 陈际龙. 东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动关系的分析研究[J]. 大气科学, 2007, 31(6): 1033-1048.