

# 北半球季节转换中的大气波动特征

宁方悦<sup>1</sup>, 孙即霖<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国海洋大学, 海洋与大气学院, 山东 青岛

<sup>2</sup>中国海洋大学, 物理海洋教育部重点实验室, 山东 青岛

Email: ningfangyue@163.com, rainbetimes@vip.163.com

收稿日期: 2021年4月10日; 录用日期: 2021年5月5日; 发布日期: 2021年5月12日

## 摘要

本文利用1948~2019年NCEP/NCAR再分析资料, 根据高原西风急流季节性移动的特征, 逐年确定了北半球季节转换的日期, 通过谐波分析、相关分析、合成分析方法研究了大气波动在季节转换中的特征, 并分析了季节转换日期的早晚与海温的关系。结果表明: (1) 冬夏与夏冬季节转换的平均日期分别为32候和59候, 冬夏与夏冬的季节转换日期都存在显著的年际与年代际周期; (2) 季节转换在西风带主要表现为行星波数的调整和位相的移动; (3) 中高纬2波与海陆热力差异有关且受全球变暖影响, 3波与4波分别对欧洲东部槽和欧洲西海岸槽的贡献显著, 而1波可反映极涡的偏转程度; (4) 3月SST呈现El Niño型和PDO暖位相分布时, 冬夏转换偏晚; 9月SST呈现La Niña型分布时, 夏冬季节转换偏晚, 因此前期SST对季节转换日期的异常有较好的指示意义, 可作为前期信号。

## 关键词

季节转换, 行星波, 谐波分析, ENSO

# Characteristics of Atmospheric Waves during Seasonal Transitions in the Northern Hemisphere

Fangyue Ning<sup>1</sup>, Jilin Sun<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao Shandong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Physical Oceanography, Ocean University of China, Qingdao Shandong

Email: ningfangyue@163.com, rainbetimes@vip.163.com

Received: Apr. 10<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 5<sup>th</sup>, 2021; published: May 12<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Based on the NCEP/NCAR reanalysis data from 1948 to 2019, the dates of seasonal transitions in the Northern Hemisphere were determined. The characteristics of atmospheric waves in seasonal transitions were analyzed by harmonic analysis, correlation analysis, and composite analysis methods. Thus the relationship between the dates of seasonal transitions and SST was also analyzed. The results show that: 1) For climatology, the date of winter-summer seasonal transition is the 32nd pentad, while date of summer-winter seasonal transition is the 59th pentad. Interannual and decadal periods of these two seasonal transitions are both significant; 2) Seasonal transitions in westerlies are shown as the changes of planetary wavenumbers and the moving of planetary waves phase; 3) Wave 2 at middle-high latitudes is related to the sea-land thermal difference and is influenced by the global warming. Wave 3 and wave 4 have no table impacts on the intensity of East European trough and West Coast European trough respectively. Wave1 reflects the deflection of polar vortex; 4) El Niño and warm PDO phase in March can delay the dates of winter-summer transitions. Otherwise La Niña in September can delay the dates of summer-winter transitions. SST has a good indication of the abnormal seasonal transition dates, it can be used as an early signal of the dates of seasonal transitions.

## Keywords

Seasonal Transition, Planetary Waves, Harmonic Analysis, ENSO

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

大气环流的季节转换是大气环流研究的重大课题之一, 中高纬地区冬夏两季的高空流场与气候差显著。季节转换过程影响着季风的进退[1] [2]以及雨带的推移[3] [4], 因此研究季节转换过程及其异常具有重要的科学价值和现实意义。

叶笃正等[5]指出大气环流的季节转换存在“六月突变”和“十月突变”现象, 东亚副热带西风急流轴的北跳和南撤可以作为季节突变的重要标志。况雪源等[6]对比了夏冬季节转换前后的环流形势和气象要素, 认为青藏高原西风急流南撤至 35°N 以南的时间可视为冬季环流建立的日期, 但目前尚无明确的逐年大气环流季节转换日期的时间序列。高空西风带的结构的变化是表示季节转换特征的良好标志[7], 在中高纬度对流层中层, 冬季西风带有三个平均槽脊, 到夏季则变为四个[8]。由傅立叶原理, 西风带槽脊是不同波数的 Rossby 波叠加的结果[9]。大气环流的季节转换在西风带应表现为大气波动的调整, 但前人很少从大气波动的角度去研究季节转换过程。另外, 朱志伟等[10]指出季节转换与下垫面热状况有密切关系, 因此 SST 强迫可能为季节转换的预报提供一定参考。

## 2. 资料与方法

### 2.1. 资料

本文所采用的资料为: NCEP/NCAR (National Centers for Environment Prediction/National Center of Atmospheric Research)提供的 1948~2019 年逐日、逐月再分析资料, 包括位势高度场、风场、涡度场资料,

水平分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ; 美国国家和大气管理局(NOAA)提供的 1948~2019 年全球扩展重建海温(ERSST V5)资料, 水平分辨率为  $2.0^{\circ} \times 2.0^{\circ}$ 。本文所用的候平均为 Julian 候。

## 2.2. 方法

### 2.2.1. 北半球中高纬度海陆温差指数的定义

为研究中高纬度 2 波与海陆热力差异的相关性, 本文定义了中高纬度海陆温差指数。

其中太平洋 - 北美大陆海陆温差为:

$$I_{PO-NA} = \bar{T}_{PO} - \bar{T}_{NA} \quad (1)$$

太平洋 - 亚欧大陆海陆温差为:

$$I_{PO-EA} = \bar{T}_{PO} - \bar{T}_{EA} \quad (2)$$

大西洋 - 北美大陆海陆温差为:

$$I_{AO-NA} = \bar{T}_{AO} - \bar{T}_{NA} \quad (3)$$

太平洋 - 亚欧大陆海陆温差为:

$$I_{AO-EA} = \bar{T}_{AO} - \bar{T}_{EA} \quad (4)$$

其中  $\bar{T}_{PO}$ 、 $\bar{T}_{NA}$ 、 $\bar{T}_{EA}$ 、 $\bar{T}_{AO}$  分别为  $45^{\circ}\text{N}$ ~ $55^{\circ}\text{N}$  纬度太平洋、北美大陆、亚欧大陆、大西洋上空 500 hPa 格点的平均气温, 并对其进行了标准化处理。

### 2.2.2. 欧洲东部槽及欧洲西海岸槽强度指数的定义

本文所用的欧洲东部槽与欧洲西海岸槽的强度指数参考潘敖大等[11]的定义, 对欧洲东部槽与欧洲西部脊区域 500 hPa 位势高度场进行 EOF 分解, 主模态对应槽脊都较弱的分布(32.2%), 将其时间系数的相反数定义为欧洲东部槽强度指数。对欧洲西海岸槽及北大西洋脊区域 500 hPa 位势高度场进行 EOF 分解, 主模态对应槽脊都较强的分布(32.8%), 将其时间系数定义为欧洲西海岸槽强度指数。

### 2.2.3. 主要分析方法

本文利用空间谐波分析方法提取 1~4 波、大气超长波与大气长波, 利用 Morlet 小波分析方法揭示了季节转换日期的多尺度周期变化特征, 利用合成分析研究了季节转换时间偏早/偏晚年所对应的大气波动特征, 利用相关分析研究了各分波对环流特征的反映, 给出了 SST 与季节转换时间早晚的关系。

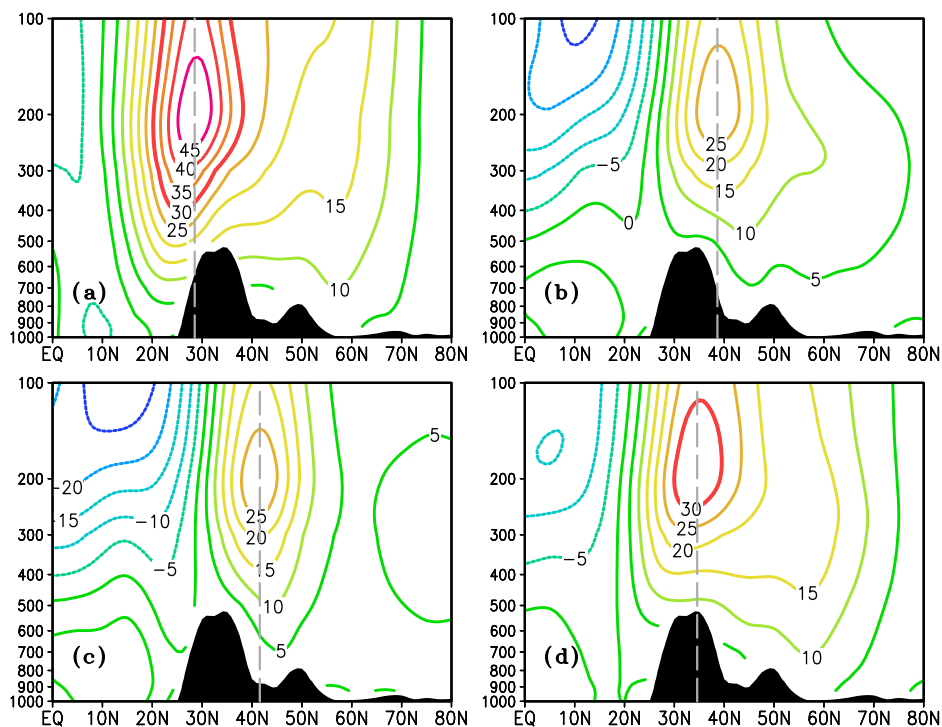
## 3. 北半球大气环流季节转换及其多年变化

### 3.1. 季节转换日期的定义

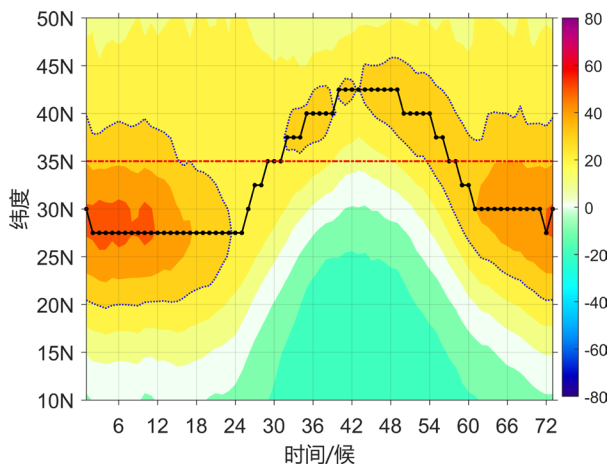
东亚副热带西风急流轴的季节性南北移动可以作为大气环流季节转换的重要标志[5]。图 1(a)~(d)分别给出了冬季代表月 1 月, 冬夏季节转换月 6 月, 夏季代表月 7 月, 以及夏冬季节转换月 10 月的纬向风速分布, 显示了高原西风带强度和位置的季节变化。1 月高原急流轴位于  $30^{\circ}\text{N}$  以南, 最大西风风速在 45 m/s 以上。6 月西风急流轴北跳到高原最高点的纬度位置  $35^{\circ}\text{N}$  以北, 最大西风风速降至 25 m/s 左右, 高原南侧被东风急流控制, 由冬季型转变成夏季型。7 月西风急流轴稳定在高原以北, 高原南侧被较强的东风急流控制。10 月高原西风急流南撤回  $35^{\circ}\text{N}$  以南, 最大西风风速增大到 30 m/s 以上, 由夏季型转变成冬季型。

根据高原西风急流轴的季节性移动特征, 本文确定了北半球大气环流季节转换的日期(图 2), 该日期需满足两个条件: 一是反映出急流轴季节性的南北移动, 即突变性特征; 二是反映出季节转换后急流位

置的稳定, 即双稳态特征。因此确定季节转换日期的标准为: 将高原西风急流轴最后一次北跳越过 35°N 以北并维持的时间点, 定义为冬夏季节转换的日期; 将高原西风急流轴南撤至 35°N 以南并维持的时间点定义为的夏冬季节转换的日期。根据以上定义, 气候平均的冬夏季节转换日期为 32 候, 夏冬季节转换日期为 59 候。



**Figure 1.** Latitude-height profiles of multi-year average (1948~2019) zonal winds (80°E~100°E); the dashed lines show the position of westerly jet axis; (a) Jan; (b) Jun; (c) Jul; (d) Oct; (Unit: m/s)  
**图 1.** 多年平均(1948~2019 年)纬向风速(80°E~100°E)的纬度 - 高度剖面, 虚线为急流轴的位置; (a) 1 月; (b) 6 月; (c) 7 月; (d) 10 月。(单位: m/s)

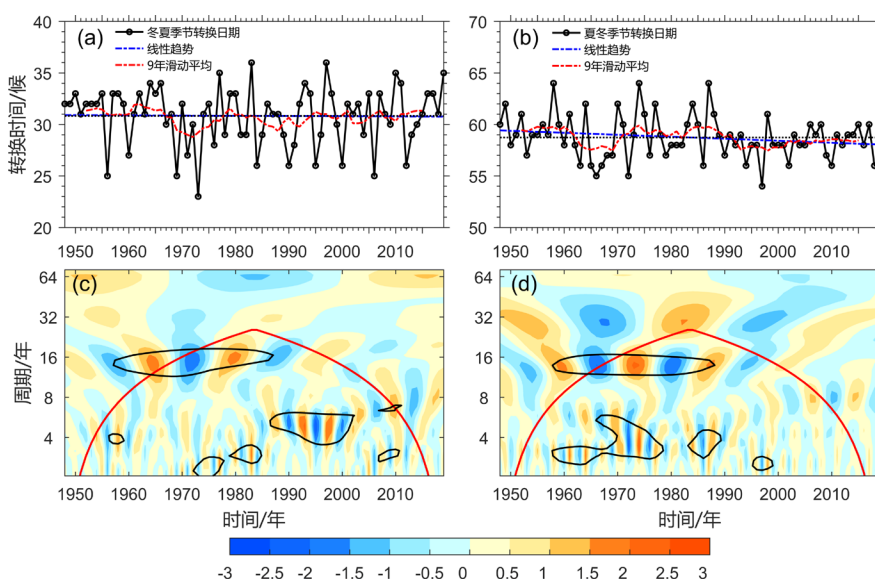


**Figure 2.** Seasonal variations of multi-year average (1948~2019) 200 hPa zonal wind (shadow; unit: m/s) on the Tibetan Plateau (80°E~100°E); the black line shows the variation of latitudinal position of the westerly jet axis on the plateau; U > 30 m/s in blue lines  
**图 2.** 多年平均(1948~2019 年) 200 hPa 青藏高原(80°E~100°E)纬向风速(填色场; 单位: m/s)的逐候变化; 黑色实线为高原西风急流轴纬度位置的逐候变化, 蓝色虚线内 U > 30 m/s

### 3.2. 季节转换日期的多年变化

根据 3.1 中定义, 得到 1948~2019 年冬夏与夏冬季节转换日期的多年时间序列。由图 3 看出, 冬夏与夏冬季节转换时间都存在明显的年际与年代际变化, 冬夏季节转换的最早日期为 23 候, 最晚转换日期为 36 候。夏冬季节转换的最早日期为 54 候, 最晚日期为 64 候。总体来说, 冬夏季节转换时间的变化幅度比夏冬季节转换大, 这与前人的相关研究结论相一致[12]。两个时间序列的相关系数为-0.0165, 说明冬夏与夏冬季节转换的日期互不影响。

Morlet 小波分析显示了季节转换日期的年际与年代际变化周期(图 3(c)~(d))。上世纪 60~90 年代, 冬夏与夏冬季节转换日期都存在显著的年代际变化周期。而从 80 年代后半到 21 世纪初, 冬夏季节转换日期存在较强的年际变化, 夏冬季节转换时间的年际变化信号则主要出现在上世纪 60~70 年代, 在 90 年代后周期信号不明显。



**Figure 3.** Time series of (a) winter-summer and (b) summer-winter seasonal transition dates in the Northern Hemisphere from 1948 to 2019; Wavelet analysis for time series of (c) winter-summer and (d) summer-winter seasonal transition dates; the red line is the influence cone; the black lines are the 0.05 significance level inspection line

**图 3.** 1948~2019 年北半球(a)冬夏与(b)夏冬季节转换日期的多年时间序列; (c)冬夏与(d)夏冬季节转换日期多年时间序列的小波分析;粗红实线为影响锥线;黑色粗实线为 0.05 显著性水平检验线

## 4. 大气波动在季节转换中的气候态及长期变化特征

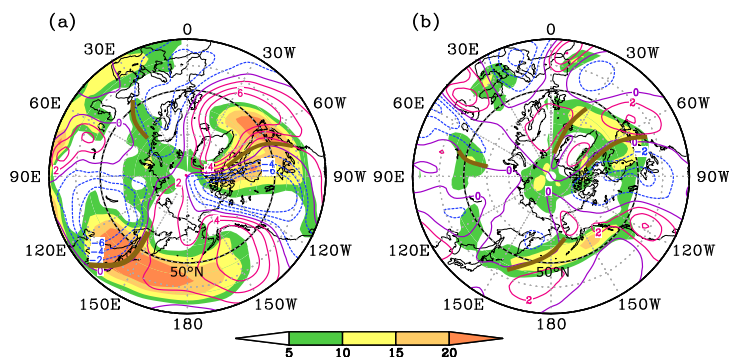
### 4.1. 季节转换过程中大气波动强度与位相的变化

季节转换过程与环流形势的变化密切相关, 高空西风带的结构是表征季节特征的良好标志[7], 在北半球中高纬度地区, 冬季 500 hPa 西风带平均槽脊呈“三槽三脊”, 夏季则呈“四槽四脊”的分布(图 4), 其中填色的正涡度区与东西风速零线可以显示出槽线的位置。冬夏平均槽脊的位置和强度基本上是稳定或渐变的, 而过渡阶段是短促的[5], 这种中高纬环流形势的季节转换也体现了突变性特征。

根据傅立叶原理, 西风带中的平均槽脊由不同波数的 Rossby 波(也称行星波)叠加而成[9], 曾庆存等[13]指出海陆热力差异和大地形强迫导致的大尺度 Rossby 波是季节转换的“第二推动”。北半球中高纬度 1~4 波的方差贡献可达 90%, 是大气波动最主要的组成部分, 因此本文在分析中主要选取 1~4 波来分



析大气波动在季节转换中的特征。



**Figure 4.** Vorticity field (shaded where  $\zeta > 5$ , unit:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ) in (a) January and (b) July at 500 hPa with meridional wind speed field (contours, red lines show  $u > 0$ , blue lines show  $u < 0$ , purple lines show  $u = 0$ , unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) of climatology in the Northern Hemisphere; brown lines are trough lines

**图4.** 气候态北半球(a) 1月与(b) 7月 500 hPa 涡度场(填色区为  $\zeta > 5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  的正涡度区, 单位:  $10^{-6} \text{ s}^{-1}$ )与经向风速场(等值线, 红色为正蓝色为负, 紫色为零线, 单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ); 棕色粗线为槽线

500 hPa 纬向 1~4 波的强度分布(图 5)及相位(图 6)存在显著的季节变化。与南半球相比, 北半球存在更强的海陆与地形强迫, 行星波活动整体比南半球强。在北半球, 1~4 波的大值区都位于中高纬行星锋区附近, 是大气波动最剧烈的纬度带, 且其大值区随西风带存在季节性的南北移动。冬季各波振幅明显强于夏季, 表明冬季大气波动的能量远远强于夏季, 而各波槽脊的走向与角动量输送有关[14]。

将图 5 与图 4 进行对照, 可以得到冬夏西风带平均槽脊的行星波构成。冬季中高纬西风带三个主槽的行星波构成为: 东亚大槽以 2、3 波为主要构成, 1 波为次要构成; 北美大槽以 2、3 波为主要构成, 4 波为次要构成; 欧洲东部浅槽是由 3、4 波组成。夏季中高纬西风带的四个主槽的行星波构成为: 东亚大槽、美洲东岸大槽以 2、3 波为主要构成, 4 波为次要构成; 贝加尔西部槽是由 3、4 波组成, 而欧洲西海岸槽则主要是 4 波的作用。

中高纬度是大气波动的最剧烈的纬度带, 为了更好地研究大气波动的季节转换特征, 图 6 展示了 1~4 波槽线位置的逐月变化。从冬到夏 1 波在  $45^{\circ}\text{N}$  西移, 在  $55^{\circ}\text{N}$  东移。2~4 波在中高纬的槽线季节移动呈现一致性, 从冬到夏 2 波、3 波槽线略有东移, 4 波槽线略有西移。1~4 波槽线位置的季节移动也与冬夏西风带平均槽线位置的季节移动相对应: 由冬到夏 2 波在  $130^{\circ}\text{E}\sim 140^{\circ}\text{E}$  附近的槽线东移到  $170^{\circ}\text{E}$  附近, 与东亚大槽的东移相一致,  $50^{\circ}\text{W}$  附近槽线的东移对北美大槽的东移有所贡献。冬季 3 波  $50^{\circ}\text{E}$  附近的槽线与欧洲东部浅槽的位置相对应, 夏季东移到  $80^{\circ}\text{E}$  附近, 与夏季贝加尔湖西部槽的位置相对应。冬季 4 波  $30^{\circ}\text{E}$  与  $120^{\circ}\text{E}$  附近的槽线, 夏季西移到  $10^{\circ}\text{E}$  与  $90^{\circ}\text{E}$  附近, 这与夏季欧洲西海岸槽和贝加尔湖西部槽的位置对应。

综上所述, 东亚大槽、北美大槽主要是 2~3、2~4 波合成的结果, 冬夏两季都存在; 而欧洲东部浅槽、贝加尔湖西部槽、欧洲西海岸槽属于季节性槽, 由 3 波、4 波起决定性作用。总体来说, 冬季中高纬度 3 波与夏季 4 波的槽脊位置基本上能反映出冬夏西风带平均槽脊的位置。

1 波、2 波的方差贡献在高纬度有明显的交替变化, 图 7(a)显示了高纬度 1 波、2 波方差贡献的逐月变化。在冬季高纬度 2 波明显占优, 1 波方差贡献很小, 而到夏季 2 波迅速减弱, 1 波明显增强, 在夏季环流 7~9 月 1 波强于 2 波。这种 1 波、2 波方差贡献的交替变化显示了极涡的季节变化, 体现了冬季的 2 个极涡在夏季合并为 1 个的过程。

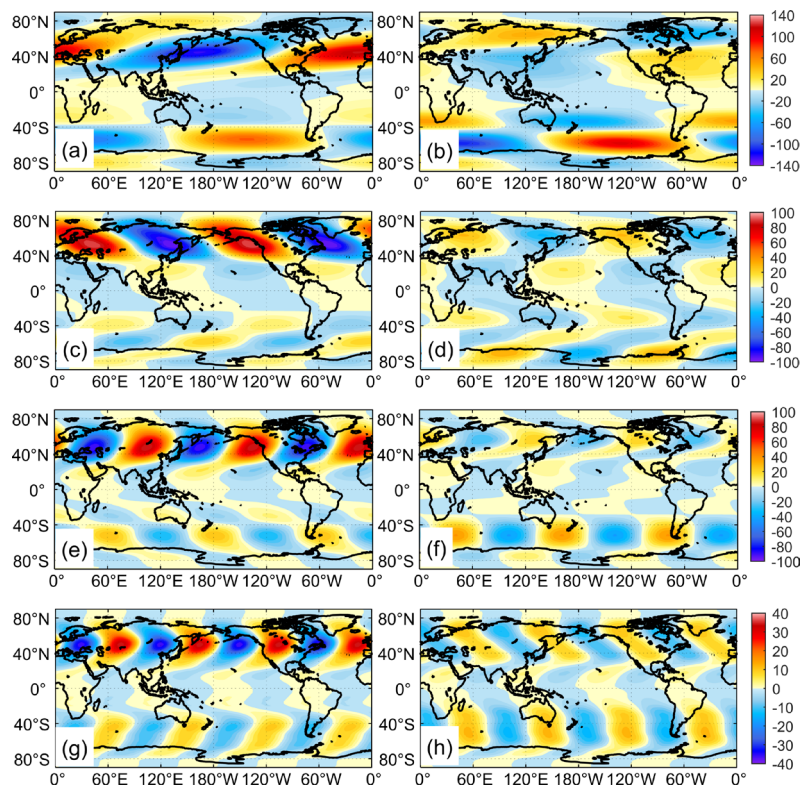


Figure 5. The distributions of 500 hPa zonal wave 1~4 (shaded, unit: gpm) in January (a/c/e/g) and July (b/d/f/h) for climatology

图 5. 气候态 1 月(a/c/e/g)、7 月(b/d/f/h) 500 hPa 纬向 1~4 波(填色场, 单位: gpm) 的分布

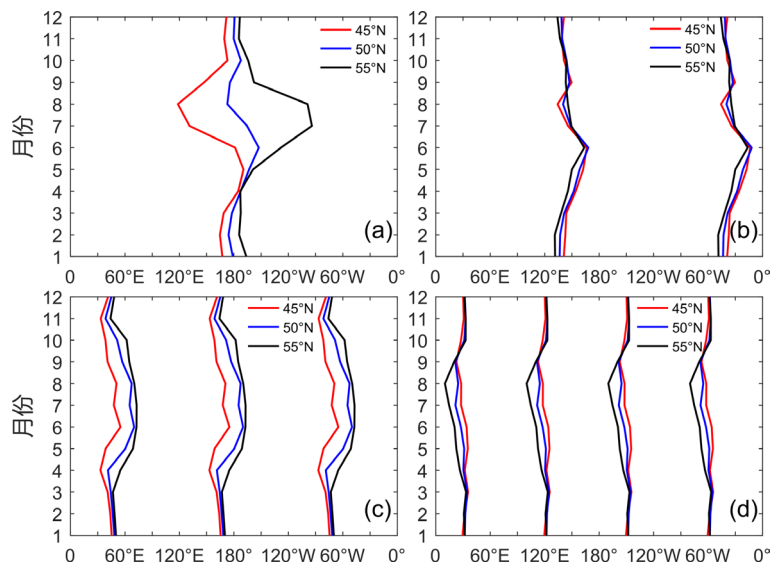


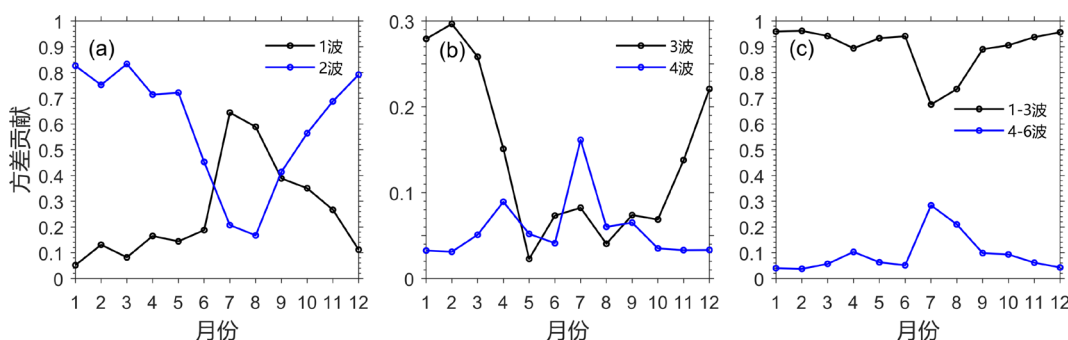
Figure 6. Monthly changes of trough longitudinal positions of (a) wave 1, (b) wave 2, (c) wave 3, (d) wave 4 at middle-high latitudes

图 6. 中高纬度(a) 1 波、(b) 2 波、(c) 3 波、(d) 4 波槽线经度位置的逐月变化

3 波、4 波主要在中纬度地区活动, 其方差贡献也有显著的季节变化特征(图 7(b))。冬夏季节转换时

3 波方差贡献减弱, 4 波方差贡献增强, 而夏冬季转换时则相反。在夏季环流 7~9 月 4 波强于 3 波, 这种 3 波、4 波方差贡献的交替变化与冬夏西风带槽脊数目的变化特征相一致。研究中常常将 1~3 波定义为大气超长波, 4~6 波定义为大气长波, 由图 7(c), 冬夏季节转换可以看作是大气长波增强超长波减弱的过程, 夏冬季转换可以看作是大气超长波增强长波减弱的过程。

综上所述, 中高纬度大气波动在冬夏季的区别, 一是体现在各波振幅的减弱以及优势波的改变, 二是体现在各波槽脊位置随季节转换的相应移动。在中高纬度 3 波、4 波对季节性槽脊有独特的贡献, 其方差贡献在冬夏两季存在相反的变化趋势, 其槽脊位置的季节移动与西风带槽脊的季节移动相一致, 可以作为大气波动在季节转换中的代表性特征。



**Figure 7.** Monthly variations of variance contribution of atmospheric waves; (a) wave 1 and wave 2 at high latitudes (65°N~75°N); (b) wave 3 and wave 4 at middle-high latitudes (45°N~55°N); (c) atmospheric ultra-long waves (wave 1~3) and atmospheric long wave (wave 4~6) at middle-high latitudes

**图 7.** 各分波方差贡献的逐月变化; (a) 高纬度(65°N~75°N) 1 波 2 波; (b) 中高纬度(45°N~55°N) 3 波 4 波; (c) 中高纬度大气超长波(1~3 波)与大气长波(4~6 波)

## 4.2. 大气波动在季节转换期间对环流特征的反映及其多年变化

1 波是冷空气南下的平均结果, 可以反映极涡的偏转程度和强弱变化[15]。如图 8(a), 以夏冬季转换月 10 月为例, 中高纬度 2 波方差贡献在 80 年代之后呈现显著的增长趋势, 计算 2 波方差贡献与 SST 的相关发现(图 8(b)), 中高纬度 2 波的增强与全球海温变暖密切相关。由于 2 波的准定常性, 2 波增强可以提供异常持续的环流条件, 在全球变暖的背景下容易导致异常持续的降水、高温、干旱天气。另外 2 波方差贡献与海陆热力差异指数存在较显著的相关(图 8(c)), 其中太平洋 - 北美大陆及大西洋 - 亚欧大陆的海陆温差与 2 波方差贡献的相关性很好, 相关系数分别为 0.484 和 -0.476, 通过 0.001 的显著性检验, 这说明中高纬度 2 波的形成确实与海陆热力差异有关。

根据 4.1 中的分析, 在中高纬度欧洲东部槽主要与 3 波有关, 而欧洲西海岸槽主要由 4 波构成, 如图 8(c)~(d), 通过计算, 3 波方差贡献与欧洲东部槽指数的相关系数为 0.531, 4 波方差贡献与欧洲西海岸槽指数的相关系数为 0.455, 都通过 0.001 的显著性水平检验, 这证实了欧洲东部槽以及欧洲西海岸槽的构成确实分别与中高纬度的 3 波、4 波关系密切。

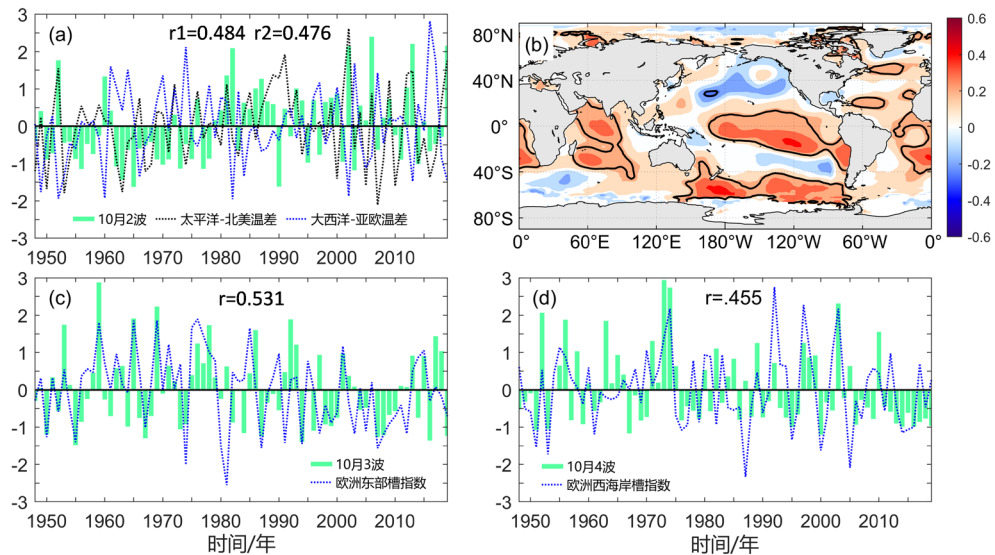
## 5. 大气波动在季节转换早晚年的差异

根据 3.2 给出的季节转换日期的多年时间序列, 分别挑选出冬夏和夏冬季转换的偏早年和偏晚年, 选取的具体年份如表 1 所示。

通过合成分析, 发现中高纬度 3 波以及超长波在季节转换早晚年存在较显著的差异。冬夏季节转换偏早年的 6 月 3 波的方差贡献较偏晚年低 1.9%, 偏早年超长波较偏晚年低 8.8%。夏冬季季节转换偏早年的



10月3波的方差贡献较偏晚年高5.4%, 偏早年超长波较偏晚年高1.1%, 都通过了0.001的显著性水平检验。这说明季节转换日期的早晚与中高纬度大气波动存在一定的联系, 与4.1中的大气波动季节转换特征联系起来, 可以认为3波与超长波是更能代表冬季环流的大气波动, 季节转换月3波和超长波的增强可能与冬夏季节转换的推迟或夏冬季节转换的提前有关。



**Figure 8.** (a) Standardized time series of variance contribution of wave 2 (histogram) and sea-land temperature difference index (dashed line) at middle-high latitudes in October; (b) Correlations between variance contribution of wave 2 at middle-high latitudes and global SST in October; (c) Standardized time series of variance contribution (histogram) of wave 3 at middle-high latitudes and Eastern European trough index (dashed line) in October; (d) Standardized time series of variance contribution of wave 4 (histogram) at middle-high latitudes and West Coast European trough index (dashed line) in October

**图 8.** (a) 中高纬度 10 月 2 波方差贡献(直方图)与海陆温差指数(虚线)的标准化时间序列; (b) 中高纬度 10 月 2 波方差贡献与 SST 的相关; (c) 中高纬度 10 月 3 波方差贡献(直方图)与欧洲东部槽指数(虚线)的标准化时间序列; (d) 中高纬度 10 月 4 波方差贡献(直方图)以及欧洲西海岸槽指数(虚线)的标准化时间序列

**Table 1.** The selection of early/late years of winter-summer and summer-winter seasonal transitions

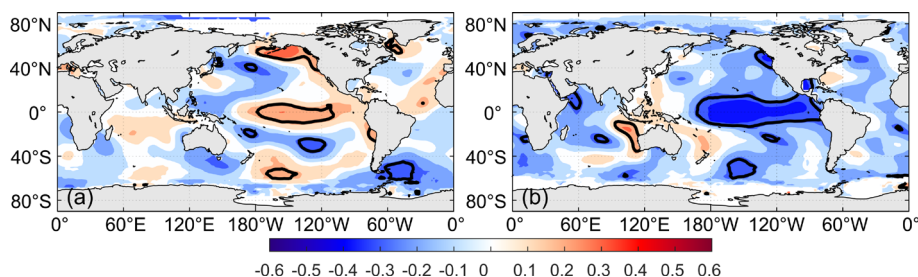
**表 1.** 冬夏与夏冬季节转换偏早/偏晚年的选取

	偏早年	偏晚年
冬→夏季节转换	≤26 候: 1956 1969 1973 1984 1990 1995 2000 2006 2012	≥34 候: 1964 1966 1977 1983 1993 1997 2010 2011 2019
夏→冬季节转换	≤56 候: 1963 1965 1966 1967 1972 1986 1994 1997 2002 2010 2018	≥61 候: 1949 1958 1961 1964 1970 1974 1975 1977 1984 1987 2018

## 6. SST 对季节转换早晚及大气波动的影响

季节转换与下垫面热状况有密切关系, 而 SST 异常也对东亚副热带西风急流存在显著的影响[16]。在选取的季节转换的偏早/偏晚年中, 前期 SST 显示出 ENSO 型分布的年份有 19 个, SST 可能为季节转换日期早晚的预报提供一定的前期信号。

图 9(a)揭示了冬夏季节转换的早晚与前期 3 月 SST 的关系, 当 3 月 SST 呈现 El Niño 型和 PDO 暖位相分布时, 该年冬夏季节转换偏晚。在 El Niño 年, 由于 Walker 环流减弱东移, 赤道太平洋西冷东暖的异常分布容易导致暖池上空的对流减弱, 从而导致局地 Hadley 环流减弱[17], 进而导致西太副高和东亚西风急流偏南, 冬夏季节转换偏晚。在 PDO 暖位相期冬夏季节转换有一定的推迟, 而 PDO 冷位相期冬夏季节转换有一定的提前, 这可能与 PDO 暖位相期东亚副热带西风急流位置的偏南有一定关系[18]。



**Figure 9.** (a) Correlations between winter-summer seasonal transition dates and SST in March; (b) Correlations between summer-winter seasonal transition dates and SST in September; the black lines are the 0.05 significance level inspection lines

**图 9.** (a) 冬夏季节转换日期与同年 3 月 SST 的相关系数分布; (b) 夏冬季节转换日期与同年 9 月 SST 的相关系数分布; 黑色粗实线 0.05 显著性水平检验线

夏冬季节转换日期的早晚也与前期 9 月 SST 有很好的相关性(图 9(b)), 当 9 月 SST 呈现 La Niña 型分布时, 该年夏冬季节转换偏晚。杨辉[19]的研究指出冬季 SST 异常大体呈现出 La Niña 型分布时, 东亚副热带西风急流位置多偏北, 因此夏冬季节转换偏晚。

另外通过计算 3 波与前期 SST 的相关(图略), 发现 6 月 3 波与 3 月 SST 的相关展现出一种类似于北大西洋三极子 NAT 负位相的模式。而 9 月 SST 呈现 El Niño 的模式时, 10 月 3 波偏强。

## 7. 结论

本文利用谐波分析、相关分析、合成分析的方法研究了大气波动在季节转换中的特征, 根据高原西风急流的季节性移动特征, 定义了冬夏与夏冬季节转换的日期, 并分析了季节转换的早晚与海温的相关性, 得到以下结论:

1) 冬夏与夏冬季节转换的平均日期分别为 32 候和 59 候, 冬夏与夏冬季节转换日期都存在显著的年际与年代际周期。

2) 季节转换在西风带主要表现为行星波数的调整和位相的移动。其具体表现一是各波振幅的减弱以及优势波数的改变, 二是各波的槽脊位置移动。冬夏季节转换以 3 波减弱东移, 4 波增强西移为代表性特征, 夏冬季节转换则相反。

3) 行星波的强度在一定程度上是冬夏环流型及天气系统的反映。中高纬度 2 波与海陆热力差异有关, 2 波在 80 年代后显著增强的趋势与全球变暖密不可分, 3 波与 4 波分别对欧洲东部槽和欧洲西海岸槽的贡献显著, 而 1 波可反映极涡的偏转程度。

4) 在季节转换早/晚年, 行星波强度在季节转换月存在较显著差异。3 波与超长波是更能代表冬季环流的大气波动, 季节转换月 3 波和超长波的增强与冬夏季节的推迟以及夏冬季节转换的提前有关。

5) SST 可作为季节转换时间早晚的前兆因子。3 月 SST 呈现 El Niño 型和 PDO 暖位相分布时, 冬夏季节转换偏晚; 9 月 SST 呈现 La Niña 型分布时, 夏冬季节转换偏晚。另外季节转换月 3 波与前期 SST 也存在一定相关。

## 基金项目

国家自然科学基金重点项目(41430963); 国家自然科学基金项目(41276012)。

## 参考文献

- [1] 李崇银, 王作台, 林士哲, 嵇汉如. 东亚夏季风活动与东亚高空西风急流位置北跳关系的研究[J]. 大气科学, 2004, 28(5): 641-658.
- [2] Li, C.Y. and Wu, J.B. (2000) On the Onset of the South China Sea Summer Monsoon in 1998. *Advances in Atmospheric Sciences*, **17**, 193-204. <https://doi.org/10.1007/s00376-997-0018-9>
- [3] 陶诗言, 赵煜佳, 陈小敏. 东亚的梅雨与亚洲上空大气环流季节变化的关系[J]. 气象学报, 1958, 29(2): 119-134.
- [4] 董丽娜, 郭品文. 初夏至盛夏东亚副热带西风急流变化与江淮出梅的关系[J]. 大气科学学报, 2010, 33(1): 74-81.
- [5] 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 在六月和十月大气环流的突变现象[J]. 气象学报, 1958, 29(4): 249-263.
- [6] 况雪源, 张耀存, 刘健. 秋冬季节转换期东亚大气环流变化特征及机制分析[J]. 高原气象, 2008, 27(1): 17-25.
- [7] 陈受钧. 从夏季到秋季亚洲上空大气环流的转变[J]. 北京大学学报(自然科学), 1960(1): 85-91.
- [8] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 唐东昇. 天气学原理与方法[M]. 第4版. 北京: 气象出版社, 2007: 146-152, 175-203.
- [9] Rossby, C.G. (1939) Relation between Variations in the Intensity of the Zonal Circulation of the Atmosphere and the Displacements of the Semi-Permanent Centers of Action. *Journal of Marine Research*, **2**, 38-55.
- [10] 朱志伟, 何金海. 东亚副热带季风的季节转变特征及其可能机理[J]. 热带气象学报, 2013, 29(2): 245-254.
- [11] 潘敖大, 李忠贤, 倪东鸿, 曾刚. 欧洲冬季 500 hPa 环流异常及与中国气候异常的关系[J]. 气象科学, 2011, 31(2): 129-134.
- [12] Schiemann, R., Lüthi, D. and Schär, C. (2009) Seasonality and Interannual Variability of the Westerly Jet in the Tibetan Plateau Region. *Journal of Climate*, **22**, 2940-2957. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2625.1>
- [13] 曾庆存, 梁信中, 张明华. 季风和大气环流季节突变的数值模拟[J]. 大气科学, 1988, 12(s1): 22-42.
- [14] 仇永炎. 500 毫巴角动量输送波谱的周期变化[J]. 气象学报, 1979(1):1-7.
- [15] 陈权亮, 熊光明, 朱克云, 魏凌骁, 刘艳霞. 行星波活动对平流层极涡形态变化影响的个例分析[C]//中国气象学会. 第 28 届中国气象学会年会论文集: 2011 年卷. 厦门: 中国气象学会, 2011: 133-148.
- [16] Cui, Y.F., Duan, A., Wu, G.X. and Liu, Y.M. (2015) Interannual Variability of the Spring Atmospheric Heat Source over the Tibetan Plateau Forced by the North Atlantic SSTA. *Climate Dynamics*, **45**, 1617-1634. <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2417-9>
- [17] 臧恒范, 王绍武. 赤道东太平洋水温对低纬大气环流的影响[J]. 海洋学报, 1984, 6(1): 16-24.
- [18] 张雯, 董啸, 薛峰. 不同 PDO 位相下 El Niño 发展年和 La Niña 年东亚夏季风的季节内变化[J]. 大气科学, 2020, 44(2): 390-406.
- [19] 杨辉. 冬季东亚西风急流强度和南北位置的比较分析[J]. 第四纪研究, 2015, 35(6): 1545-1548.