

El Niño调控太平洋 - 南美型遥相关的动力机制研究

臧学珍¹, 陈 峥^{1,2,3*}

¹中国海洋大学海洋与大气学院, 山东 青岛

²中国海洋大学海洋海洋碳中和中心, 山东 青岛

³海洋动力 - 物理环境与智能感知全国重点实验室, 山东 青岛

收稿日期: 2026年4月18日; 录用日期: 2026年5月14日; 发布日期: 2026年5月27日

摘 要

本文基于1950~2024年NCEP-NCAR再分析资料,研究了El Niño背景下太平洋 - 南美型(PSA)正事件的时空特征与动力机制。PSA被定义为南太平洋(20°~70°S, 150°E~70°W) 500 hPa位势高度EOF第一模态,以季节内振荡为主导,年际尺度存在4.8年周期。信息流分析证实ENSO对PSA具有显著因果强迫作用。El Niño背景下PSA正事件呈准正压结构,最强中心位于250 hPa。动力机制分析表明,El Niño引起热带对流异常,使澳大利亚东北部至新西兰一带成为有效Rossby波源区。波射线通量诊断揭示,源自热带的Rossby波能量主要沿副热带急流传播,仅少部分抵达新西兰后发生折射转向高纬度PSA中心;抵达新西兰的波能可激发次级波源,其激发的Rossby波高效向PSA中心传播,形成“接力”效应。本研究揭示了El Niño调控PSA的波动力学机制,发现新西兰是关键波能中转站。

关键词

太平洋 - 南美型遥相关, ENSO, Rossby波, 波射线通量

Dynamical Mechanisms of El Niño Modulating the Pacific-South American Teleconnection

Xuezhen Zang¹, Zheng Chen^{1,2,3*}

¹College of Oceanic and Atmospheric Science, Ocean University of China, Qingdao Shandong

²Center for Ocean Carbon Neutrality, Ocean University of China, Qingdao Shandong

³National Key Laboratory of Ocean Dynamics-Physical Environment and Intelligent Perception, Qingdao Shandong

*通讯作者。

文章引用: 臧学珍, 陈峥. El Niño 调控太平洋-南美型遥相关的动力机制研究[J]. 气候变化研究快报, 2026, 15(3): 589-600. DOI: 10.12677/ccrl.2026.153065

Abstract

Based on NCEP-NCAR reanalysis data from 1950 to 2024, this study investigates the spatiotemporal characteristics and dynamical mechanisms of positive Pacific-South American (PSA) events under El Niño background. The PSA is defined as the first EOF mode of 500 hPa geopotential height anomalies over the South Pacific (20°~70°S, 150°E~70°W). It is dominated by intraseasonal oscillations and exhibits a significant 4.8-year period on interannual timescales. Information flow analysis confirms the causal forcing of ENSO on the PSA. Positive PSA events under El Niño background show a quasi-barotropic structure, with the strongest center near 250 hPa. Dynamical analysis reveals that anomalous tropical convection induced by El Niño makes the region from northeastern Australia to New Zealand an effective Rossby wave source. Wave ray flux diagnosis indicates that Rossby wave energy from the tropics propagates mainly along the subtropical jet stream. Only a small portion reaches New Zealand, where it refracts toward the high-latitude PSA center. More importantly, wave energy arriving near New Zealand can excite secondary wave sources, whose excited Rossby waves propagate efficiently to the PSA center, forming a “relay” effect. This study reveals the wave dynamics mechanism of El Niño modulating the PSA and identifies New Zealand as a key wave energy transfer station.

Keywords

Pacific-South American Teleconnection, ENSO, Rossby Wave, Wave Ray Flux

Copyright © 2026 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

太平洋 - 南美型(PSA)遥相关是南半球热带外大气环流的主导模态之一, 表现为从澳大利亚东南部延伸至南美洲南部的准定常罗斯贝波列[1] [2]。PSA 通常包含两个空间正交的模态(PSA1 和 PSA2), 其中 PSA1 与 ENSO 的联系最为密切, 被认为是 ENSO 影响南半球中高纬度地区的重要桥梁[3] [4]。通过调制阿蒙森海低压的强度和位置, PSA 能够显著影响南极半岛气温、海冰变化以及南美洲东南部的降水异常[5] [6]。

关于 ENSO 对 PSA 的强迫机制, Hoskins 和 Karoly [7]的大圆路径理论奠定了理论基础, 指出热带热源异常能够激发出向极地和下游传播的罗斯贝波列。Karoly [4]首次将该理论应用于南半球, 发现 ENSO 事件中热带太平洋的异常对流加热可以在南半球中高纬度激发出 PSA 波列。后续研究进一步证实, PSA1 与 ENSO 存在显著的超前滞后关系, 且其强度受 ENSO 位相和强度的共同调控[8]。然而, 现有研究多聚焦于 ENSO 对 PSA 的单向强迫, 对于不同 ENSO 背景下 PSA 事件的分类研究尚显不足, 且缺乏从波能量传播角度对 PSA 发展机制的深入探讨。

近年来, Li-Yang 波射线通量方法的提出为研究罗斯贝波在非均匀基流中的传播提供了新的诊断工具[9]。该方法能够以矢量形式刻画特定波源激发的波能量传播路径与强度变化, 为揭示遥相关波列的形成机制提供了有效手段。基于此, 本文利用 1950~2024 年 NCEP-NCAR 再分析资料, 聚焦于 El Niño 背景下 PSA 正事件, 综合运用功率谱分析、信息流、Li-Yang 波射线通量等方法, 系统研究其时空特征与

动力机制, 旨在揭示 El Niño 调控 PSA 的波动力学过程, 为理解热带 - 热带外相互作用提供新的视角。

2. 数据与方法

2.1. 数据

本研究采用的逐月和逐日环流资料来自 NCEP-NCAR (National Centers for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research)的再分析数据集(Reanalysis 1) [10], 包括位势高度、大气温度、水平风场、海表面气压、海表面风、降水, 水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 垂直方向分表层和多气压层数据(1000~10 hPa 共 17 层)时间为 1950 年 1 月 1 日至 2024 年 12 月 31 日。

2.2. 方法

2.2.1. EOF 分解

经验正交函数分解(EOF)是一种将时空数据分解为正交空间模态及其对应主成分(PC)的统计方法, 广泛应用于提取气候变量场的主导变率模式[11]。通过对协方差矩阵进行特征分解, 可获得按方差贡献排序的空间模态, 其对应的时间系数则反映了该模态随时间的演变特征。在计算中需对数据进行纬度加权(如乘以纬度余弦的平方根), 以保证各格点面积权重一致。

2.2.2. 回归分析、相关分析及显著性检验

回归分析与相关分析是研究气候变量间统计关系的基础工具[12]。相关分析通过相关系数衡量两个变量之间线性关联的强弱与方向, 其绝对值越接近 1 表示线性关系越强。回归分析则通过建立线性回归方程, 用一个或多个自变量对因变量进行估计或预测, 回归系数反映了自变量对因变量的贡献大小。由于气候时间序列通常存在自相关性, 直接进行显著性检验可能会高估结果的可靠性, 因此需采用有效自由度进行修正[13], 以更客观地评估统计关系的可信度, 通常以 90%、95%或 99%置信水平作为显著性判断标准。

2.2.3. 合成分析及其统计检验

合成分析是通过满足特定条件(如极端事件)的多个样本进行平均, 提取共性特征的方法[14]。对选定的 N 个个例, 合成场为各样本的算术平均。采用双尾 t 检验判断合成结果是否显著区别于气候态。

2.2.4. 数据重投影

数据重投影是将已知的空间模态投影到原始数据上, 以获得该模态对应的时间序列[15]。具体而言, 给定空间模态 e , 原始数据场 z 在该模态上的投影系数 y 可通过最小二乘估计得到: $y = ze(e^T e)^{-1}$ 。该方法常用于构建反映特定环流系统强度的时间指数。

2.2.5. 功率谱分析

功率谱分析将时间序列从时域转换到频域, 揭示序列中不同频率分量的方差贡献[16]。通过快速傅里叶变换估计功率谱密度, 并与红噪声或白噪声谱进行比较, 可识别序列中存在的显著周期。红噪声谱基于一阶自回归过程构建。

2.2.6. 梁氏 - 克里曼信息流

本研究采用梁氏 - 克里曼信息流(Liang-Kleeman information flow)进行因果关系分析。该方法由 Liang 和 Kleeman [17]基于信息论中的 Shannon 熵从第一性原理严格推导得出, 后经 Liang 不断完善, 能够定量衡量动力系统中变量间的因果关系。

对于两条时间序列的常见情形, Liang [18]给出了信息流的最大似然估计表达式。记两条时间序列为

X_1 和 X_2 , 则从 X_2 到 X_1 的信息流估计量为:

$$\hat{f}_{2 \rightarrow 1} = \frac{C_{11}C_{12}C_{2,d1} - C_{12}^2C_{1,d1}}{C_{11}^2C_{22} - C_{11}C_{12}^2} \quad (1)$$

其中, C_{ij} 为 X_i 与 X_j 的样本协方差, $C_{i,dj}$ 为 X_i 与 \dot{X}_j 的样本协方差, \dot{X}_j 采用欧拉前差近似计算 $\frac{dX_j}{dt}$ 。若 $\hat{f}_{2 \rightarrow 1} \neq 0$, 说明 X_2 是 X_1 的因, 其绝对值大小反映了因果关系的强弱; 若 $\hat{f}_{2 \rightarrow 1} = 0$, 则认为两者无因果关系。

2.2.7. 波射线通量(Li-Yang WRF)

在水平非均匀基流中 Rossby 波射线追踪理论的基础上[19]-[21], 引入了水平 Rossby 波射线通量(Li-Yang WRF)的概念来诊断 Rossby 波的局地活动和传播方向[9], 它表示单位时间内通过单位格点区域的波射线流量, 单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, 以矢量的形式提供了更清晰、更精确的波活动强度和传播方向的描述。

3. El Niño 背景下 PSA 正事件的时空特征与动力机制

前人研究指出, 太平洋-南美型遥相关(PSA)作为南半球热带外环流的重要低频模态, ENSO 对其有重要的调制作用, 但尚未有研究对不同 ENSO 位相背景下发生的 PSA 事件进行分类研究。本章将通过对比势高度场逐日数据的分析, 来探究 PSA 的时空特征, 并基于 ENSO 位相对 PSA 事件进行分类, 重点分析 El Niño 背景下 PSA 正事件(pPSA during El Niño)的水平结构、垂直特征和演变规律。在此基础上, 综合运用信息流、Rossby 波源诊断和 Li-Yang 波射线通量等方法, 揭示 El Niño 调控 PSA 发展的波动力学机制, 阐明热带异常对流如何通过激发 Rossby 波影响中高纬度环流, 并识别 PSA 发展过程中的关键动力敏感区。

3.1. PSA 的时空特征及其与 ENSO 的因果关系

图 1(a)显示了 ENSO 在南太平洋激发的遥相关波列, 该波列从澳大利亚南部向中高纬度延伸至阿根廷, 呈“正-负-正-负”分布, 其中最大正异常中心位于 60°S 、 120°W 。图 1(b)为南太平洋位势高度场第一模态(PSA), 解释总方差的 32.85%, 表现为澳大利亚和热带中太平洋的弱正异常, 以及从新西兰沿中纬度延伸至阿根廷的负异常带, 最强正异常中心位于阿蒙森海西北部。该模态与图 1(a)的 ENSO 波列高度相似, 因此本文将探讨 ENSO 对 PSA 的影响及动力机制。为研究 PSA 事件的逐日演变, 将 500 hPa 位势高度异常投影至图 1(b)模态, 得到逐日 PSA 指数(图 1(e))。该指数与逐月 PSA 指数(图 1(d))的年际变化较为一致, 验证了重投影方法的合理性。

对逐日 PSA 指数进行连续功率谱分析(图 1(f))显示, PSA 在频率域上呈现显著的宽谱特征, 覆盖从天气尺度到年代际尺度的多个频段。在 7~50 天周期内, 谱峰值均通过 95% 置信水平的红噪声检验, 表明季节内振荡具有统计显著性。60~180 天周期内, 69、77、105、126 天附近谱峰虽未通过显著性检验, 但均高于红噪声谱值, 提示其可能具有物理意义。年际尺度上, 约 4.9 年(1800 天)周期处谱峰高于红噪声谱, 且与 ENSO 典型周期(2~7 年)重叠, 暗示可能受 ENSO 远程调控。年代际尺度上, 4800 天(约 13.1 年)周期通过显著性检验, 表明 PSA 存在显著的年代际变率。综上, PSA 是一个以季节内振荡为主导的多尺度系统。

为挑选 PSA 事件, 首先定义 PSA 正(负)事件峰值日, 具体如下: (1) 正(负)事件峰值日的 PSA 指数是其前 15 天至后 15 天内 PSAI 序列的最大(小)值; (2) 峰值日的前 2 天及后 2 天的 PSA 指数绝对值均大于 PSAI 序列的一个标准差。包含 PSA 正(负)事件峰值日的一次过程就定义为一次 PSA 强正(负)事件。

根据上述定义可知, 在连续的 16 天内只可能挑出来一个 PSA 事件峰值日。

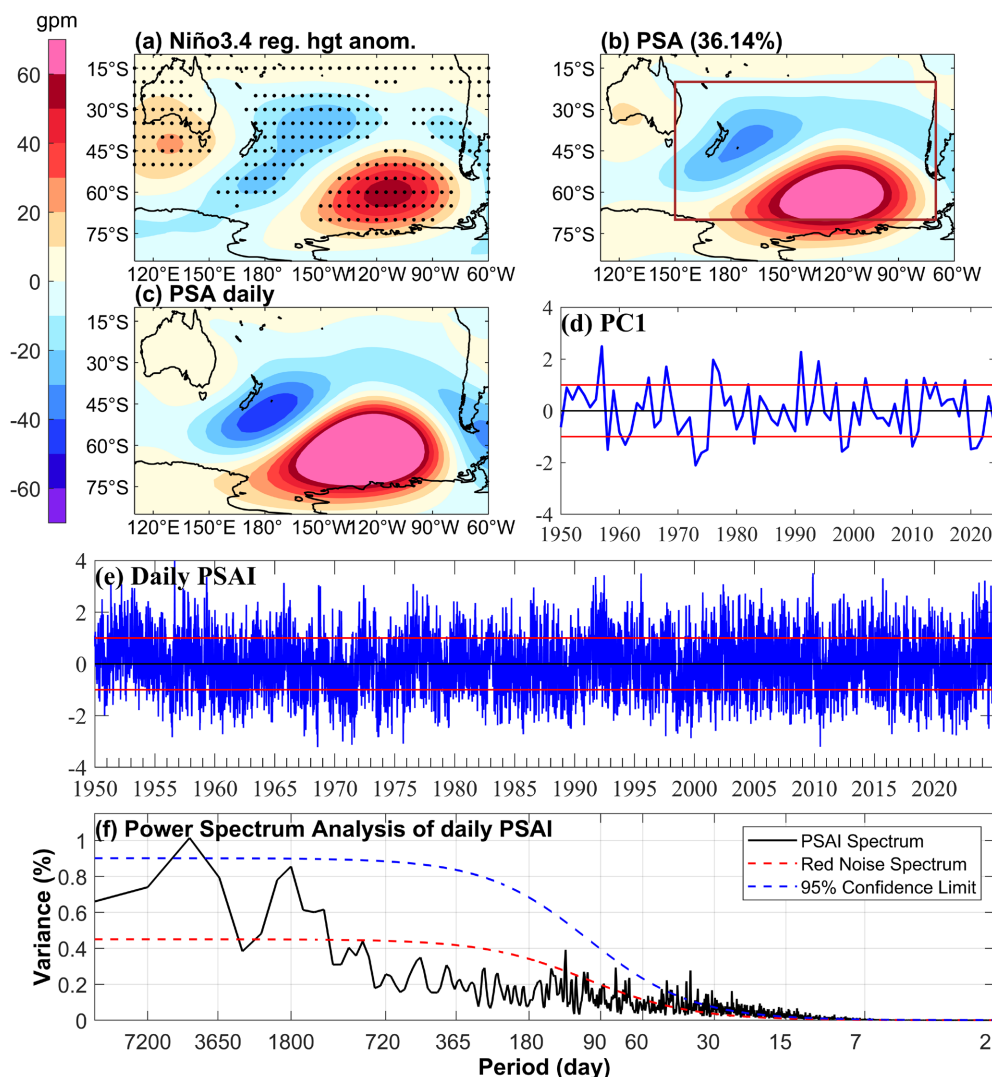


Figure 1. (a) 500 hPa geopotential height anomalies regressed onto the October Niño-3.4 index for 1950~2024. Dotted areas indicate significance at the 95% confidence level; (b) Regression coefficients of the first EOF mode of October 500 hPa geopotential height anomalies over the South Pacific (20°S~70°S, 150°E~70°W; red box) for 1950~2024; (c) Daily 500 hPa geopotential height anomalies regressed onto the daily PSA index for 1950~2024; (d) Standardized time series of the first EOF mode of monthly geopotential height anomalies, *i.e.*, the monthly PSA index, for 1950~2024. Red lines denote ± 1 standard deviation; (e) Same as (d), but for the daily PSA index; (f) Power spectrum of the daily PSA index (black solid line). The red and blue dashed lines represent the red noise spectrum and its 95% confidence threshold, respectively. The spectral peak exceeding the blue line indicates passing the 95% significance test

图 1. (a) 1950~2024 年 10 月 Niño3.4 指数回归的 500 hPa 位势高度异常。打点区域通过 95% 置信水平检验; (b) 1950~2024 年 10 月南太平洋(20°S~70°S, 150°E~70°W; 红框)位势高度异常 EOF 第一模态的回归系数; (c) 1950~2024 年逐日 500 hPa 位势高度异常对逐日 PSA 指数的回归场; (d) 1950~2024 年逐月位势高度 EOF 第一模态对应的标准化时间序列, 即逐月 PSA 指数。红线表示 ± 1 倍标准差; (e) 同(d), 但为逐日 PSA 指数; (f) 逐日 PSA 指数的功率谱(黑色实线)。红色虚线为红噪声谱, 蓝色虚线为 95% 置信水平阈值, 谱峰超过蓝线表示通过 95% 显著性检验

基于上述标准, 1950~2024 年共识别出 635 个 PSA 事件, 月均发生 0.7 次(表 1)。正、负事件频次总体相近, 其中 4 月与 9 月差异最大。PSA 发生频次最高在 8 月(0.9 次/月), 最低在 12 月(0.4 次/月)。季节分布上, 南半球冬季(6~8 月)频次最高, 夏季(12~2 月)最低, 春秋季节介于其间且显著高于夏季, 这一分布

主要由气候背景态决定。

Table 1. Monthly frequency of positive and negative PSA events from 1950 to 2024
表 1. 1950~2024 年每个月发生的正、负 PSA 事件频次

	pPSA	nPSA	Total	Mean
Dec.	15	16	31	
Jan.	18	18	36	33
Feb.	16	16	32	
Mar.	22	24	46	
Apr.	34	26	60	56
May	29	33	62	
Jun.	31	28	59	
Jul.	29	33	62	64.6
Aug.	36	37	73	
Sep.	29	35	64	
Oct.	33	33	66	59
Nov.	24	23	47	
Total	316	322	638	

为探究 PSA 正负事件的时间特征, 分别计算了 314 个 PSA 正事件和 321 个 PSA 负事件的时间序列演变(图 2)。可以看到正负 PSA 事件的发展过程是高度近似的, 在峰值日(第 0 天)的前 6 天, 有 75%的正(负) PSA 事件的指数变为正(负)值, 且 PSA 指数平均值约为 0.5 个标准差, 意味着 PSA 事件已经出现; 在峰值日后的第 6 天, 只有 25%的正(负) PSA 事件的指数变为负(正)值, 且 PSA 指数平均值均超过 0.5 个标准差, 意味着大多数 PSA 事件仍未完全消亡, 这说明 PSA 事件发展过程比消亡过程进展的更快, 其生命周期约为 15 天。

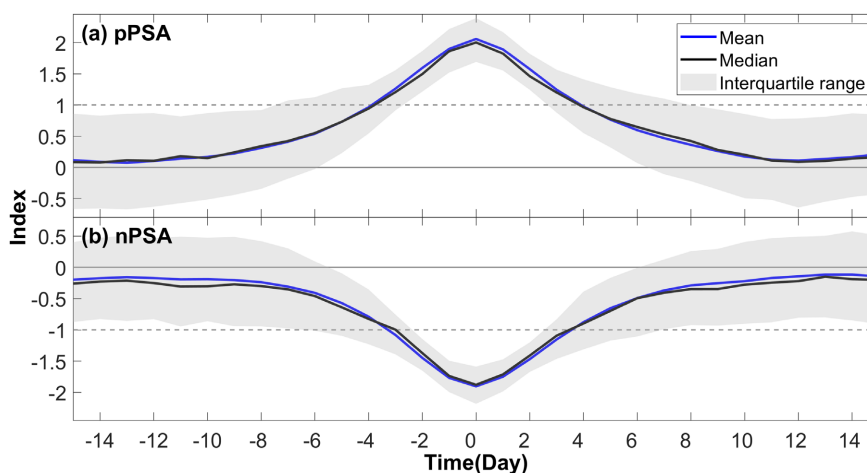


Figure 2. Composite evolution of normalized time series for (a) 314 positive PSA events and (b) 321 negative PSA events. Blue and black lines represent the mean and median, respectively. Shading indicates the interquartile range

图 2. (a) 314 个 PSA 正事件和(b) 321 个 PSA 负事件的标准化的时间序列演变, 其中蓝线和黑线分别表示平均值和中位数, 阴影填色表示四分位区间

前人研究指出, ENSO 是调控 PSA 的关键因子。为进一步量化二者间的因果关系, 本文采用基于第一性原理推导的梁氏 - 克里曼信息流方法[17][18], 该工具能够从时间序列中识别因果关系的存在性与方向, 已在气候动力学研究中得到广泛应用。以 Niño 3.4 指数表征 ENSO, 计算其向 500 hPa 位势高度异常的信息流, 结果如图 3(a)所示。信息流高值区主要分布在两个区域: 热带地区和南太平洋中高纬地区。热带地区的信息流高值反映了 ENSO 通过异常对流和潜热释放直接调制局地位势高度; 而南太平洋中高纬度的信息流分布与 PSA 空间模态高度一致, 进一步证实了 ENSO 对 PSA 存在显著的强迫作用。图 3(b)为逆向信息流, 即从各格点位势高度异常流向 Niño 3.4 指数, 其大值区表示该区域的位势高度异常对 ENSO 具有反馈作用。

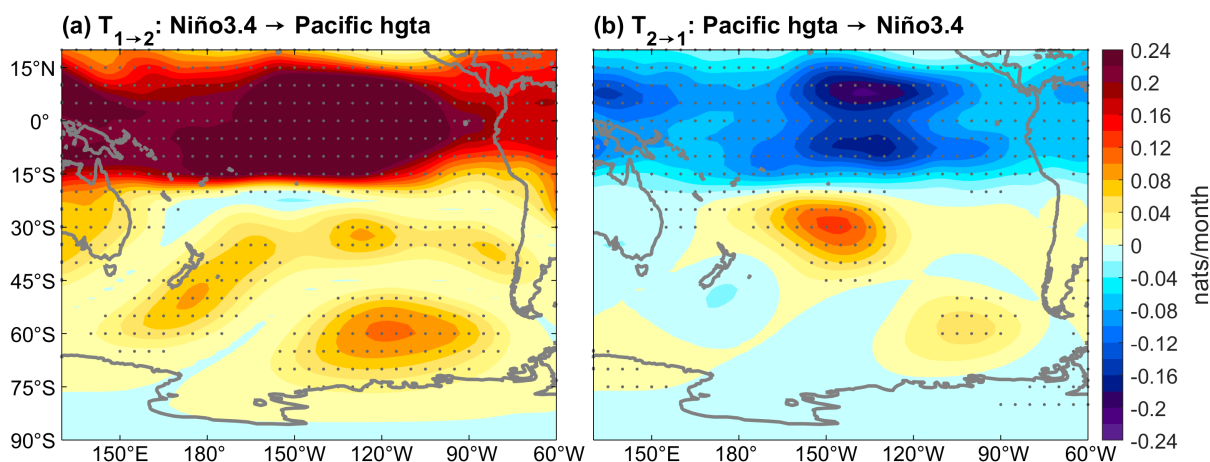


Figure 3. Information flow between the Niño-3.4 index (subscript 1) and 500 hPa geopotential height anomalies over the Pacific (subscript 2) for 1950~2024: (a) $T_{1 \rightarrow 2}$; (b) $T_{2 \rightarrow 1}$. Dotted areas indicate significance at the 95% confidence level

图 3. 1950~2024 年 Niño 3.4 指数(用下标 1 表示)和太平洋上空 500 hPa 位势高度异常(用下标 2 表示)之间的信息流: (a) $T_{1 \rightarrow 2}$; (b) $T_{2 \rightarrow 1}$, 打点区域代表通过 95% 置信水平的显著性检验

值得注意的是, 12 月虽是 ENSO 成熟期, 但南半球正值夏季, 大气内部变率较弱, PSA 最不活跃, 75 年间仅发生 32 次(月均 0.43 次)。相比之下, 10 月处于 ENSO 发展期, 且 ENSO 发展年的热带中东太平洋海温异常通常在 9 月已建立, ENSO 信号显著。同时, 10 月也是 PSA 较为活跃的月份, 75 年间共发生 63 次(月均 0.84 次), 约为 12 月的两倍。因此, 为确保样本量充足, 后续研究将以 10 月 El Niño 背景下发生的 PSA 正事件为例, 探讨 ENSO 对 PSA 的影响及其机理。为后续描述方便, 本文将 El Niño 背景下发生的 PSA 正事件记为 pPSA during El Niño, 其中 pPSA 是 positive PSA 的缩写, 1950~2024 年间共筛选出 17 次 pPSA during El Niño 事件, 其峰值日见表 2。

Table 2. Peak days of positive PSA events occurring under El Niño background in October during 1950~2024

表 2. 1950~2024 年 10 月份发生在 El Niño 背景下发生的 PSA 正事件峰值日

PSA 正事件峰值日	19511017, 19531006, 19571006, 19631030, 19651007, 19681020, 19691025, 19761014, 19771007, 19791028, 19911001, 19911017, 19941002, 19941018, 19971010, 19971027, 20021024, 20091024, 20141008, 20141030, 20231010
------------	--

3.2. pPSA during El Niño 事件的结构与动力机制

为了进一步揭示 El Niño 背景下 PSA 正事件(pPSA during El Niño)的水平结构与垂直结构特征, 合成了事件峰值日南半球 500 hPa 位势高度异常场(图 4(a))及 60°S 处位势高度与温度异常的经度 - 高度剖面

图(图 4(b))。如图 4(a)所示, 从全球尺度看, PSA 呈现 3~4 波结构, 主体部分位于南太平洋上空, 表现为自澳大利亚延伸至阿根廷的两波形态, 其中最强异常中心位于 45°S~75°S、150°W~90°W 之间, 中心位置约在 60°S、120°W, 为便于描述, 本文将这一最强异常中心称为“PSA 中心”。垂直结构分析显示(图 4(b)), pPSA during El Niño 事件的最强中心位于对流层顶 250 hPa 附近, 在 1000~50 hPa 范围内呈准正压结构。温度异常在对流层中低层(1000~300 hPa)和高层(300~10 hPa)呈现明显的偶极子分布, 低层为正异常, 中心位于 700 hPa 附近, 高层为负异常, 中心位于 30 hPa 附近。温压配置是典型的准正压深厚系统。

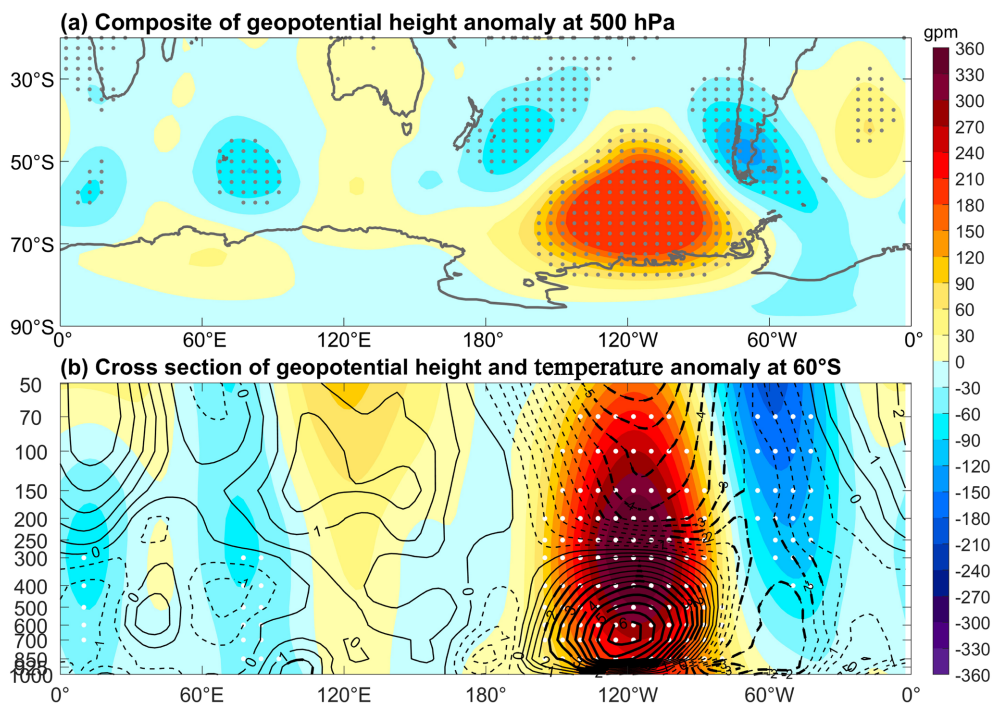


Figure 4. At the peak day of positive PSA events under El Niño background: (a) Composite of 500 hPa geopotential height anomalies; (b) Longitude-height cross-section at 60°S of geopotential height anomalies (shading, units: m) and temperature anomalies (contours; solid/dashed lines represent positive/negative anomalies, contour interval: 1°C). Dotted areas indicate geopotential height anomalies significant at the 95% confidence level. Bold contours indicate temperature anomalies significant at the 95% confidence level

图 4. El Niño 背景下 PSA 正事件峰值日(a) 500 hPa 位势高度异常合成; (b) 60°S 处位势高度异常(填色; 单位: m)和温度异常(等值线; 实线(虚线)代表正(负)温度异常, 等值线间隔为 1°C)的经度 - 高度剖面图。打点区域表示位势高度异常通过置信度为 95% 显著性检验水平, 加粗等值线表示温度异常通过 95% 置信水平的显著性检验

关于 ENSO 对 PSA 的作用机制, 前人从 Rossby 波角度进行了深入系统的研究, 形成了较为完整的理论框架。Hoskins 和 Karoly [7] 的大圆路径理论为理解热带 - 热带外相互作用奠定了理论基础, 该理论指出热带热源强迫可以激发出沿大圆路径向极地和下游传播的准定常 Rossby 波列。在此基础上, Karoly [4] 首次将这一理论应用于南半球, 发现 ENSO 事件中热带太平洋的异常对流加热能够在南半球中高纬度激发出明显的波列结构, 并将其命名为太平洋 - 南美遥相关型(PSA)。

本文将通过分析 pPSA during El Niño 事件峰值日的动力场, 识别可能的 Rossby 波源区, 并利用 Li-Yang WRF 方法, 诊断在峰值日环流背景下, 由特定波源激发的 Rossby 波能量传播路径, 以更清晰地揭示热带影响热带外大气的动力过程。Li-Yang WRF 方法是 Yang 和 Li (2025) [9] 在水平非均匀基流的 Rossby 波射线理论 [19]-[21] 基础上提出的一种新方法, 通过计算水平 Rossby 波射线通量(Rossby wave ray flux), 可以以矢量形式刻画特定波源所激发的 Rossby 波能量随时间的传播路径与强度变化。该方法旨在模拟准

定常 Rossby 波在包含经向风分量的复杂背景流中的传播过程, 是研究遥相关型形成机制及能量上下游传输的有效工具。

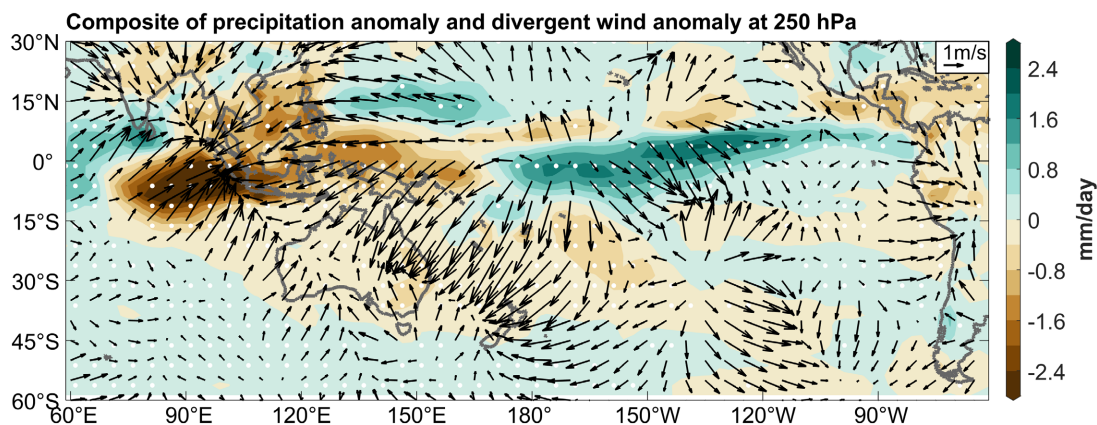


Figure 5. At the peak day of positive PSA events under El Niño background (pPSA during El Niño): Precipitation anomalies (shading, units: mm/day); 250 hPa divergent wind anomalies (vectors, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 5. El Niño 背景下 PSA 正事件(pPSA during El Niño)峰值日降水异常(填色; 单位 mm/day); 250 hPa 异常散度风(箭头; 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 5 给出了峰值日降水异常与 250 hPa 散度风异常的分布。可以看到, 在热带地区, El Niño 引起的对流异常与散度风场高度匹配: 海洋大陆区降水异常减少, 对应异常辐合区; 热带中东太平洋降水异常增加, 对应异常辐散区。热带地区的异常辐合与辐散进一步导致澳大利亚东北部至新西兰一带出现异常辐合, 值得注意的是, 该区域恰好位于副热带绝对涡度经向梯度的大值带上, 异常辐合引起的涡度平流使其成为有效的 Rossby 波源。这些异常辐合与辐散的大值区正是我们所寻找的关键波源区。

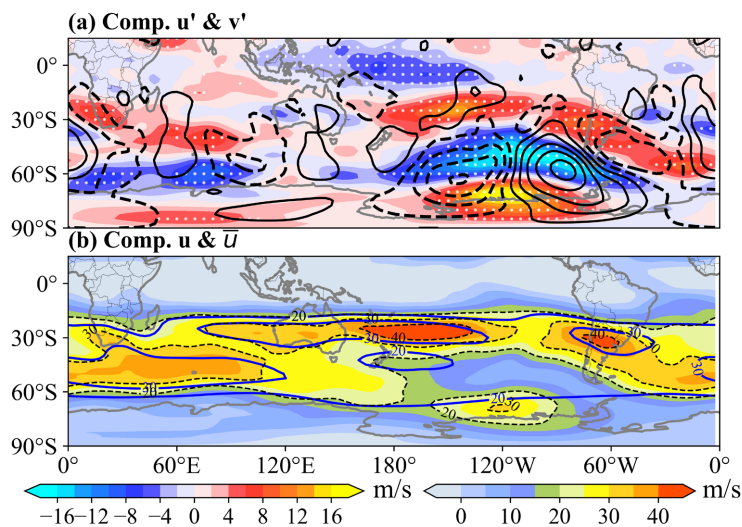


Figure 6. At the peak day of positive PSA events under El Niño background at 250 hPa: (a) Composite of zonal wind anomalies (shading, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and meridional wind anomalies (contours; solid/dashed lines represent positive/negative anomalies, contour interval: $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$); (b) Composite of total zonal wind (shading, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) and climatological zonal wind (blue contours, interval: $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 6. El Niño 背景下 PSA 正事件峰值日 250 hPa (a) 纬向风异常合成场(填色; 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和经向风异常合成场(等值线; 实线(虚线)代表正(负)经向风异常, 等值线间隔为 $4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$); (b) 纬向风合成场(填色; 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和气候态纬向风(蓝色等值线, 等值线间隔为 $10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

图 6 展示了 pPSA during El Niño 事件峰值日期间 250 hPa 高度上的风场结构。可以看到在 El Niño 背景下(图 6(a)), 南太平洋纬向风异常从热带至极地呈现明显的经向正负交替分布。图 6(b)进一步显示, 南太平洋副热带西风急流显著增强, 急流核分别位于澳大利亚东部及南美上空, 中心风速超过 $40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 且均位于 30°S 附近。同时极锋急流也得到加强, 最强风速超过 $30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。因此, 在南太平洋区域可以明显看到两条西风波导, 其中极锋急流位于 PSA 中心附近, 有利于 Rossby 波从中低纬度向高纬度传播。

基于以上分析, 我们分别将波源设置在热带中西部太平洋、孟加拉湾、澳大利亚东部和新西兰附近这四个区域, 图 7 展示了源自这四个波源区且经过 PSA 中心区域的波射线通量, 矢量表示 Rossby 波能量传播的大小和方向。从图 7(a)~(c)都可以明显看到副热带和中高纬两条 Rossby 波能量传播路径, 分别对应于图 6(b)中看到的两条西风波导。

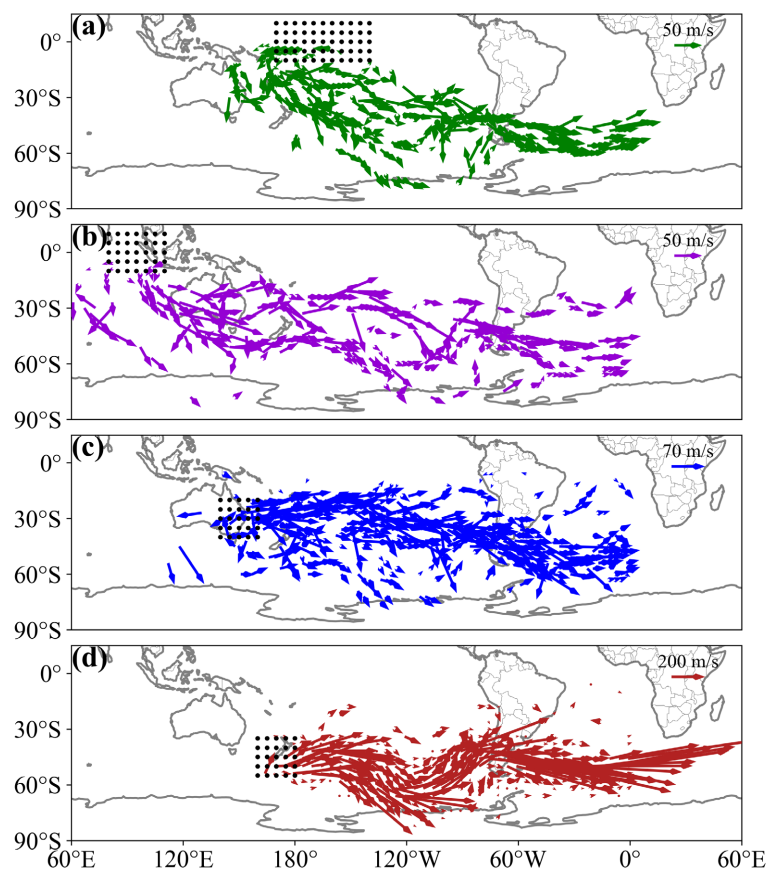


Figure 7. Wave ray flux (vectors, units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) originating from (a) the tropical central-western Pacific; (b) the Bay of Bengal; (c) eastern Australia; and (d) New Zealand, passing through the PSA center region. Black dotted areas indicate the wave source regions

图 7. 源自(a) 热带中西部太平洋; (b) 孟加拉湾; (c) 澳大利亚东部; (d) 新西兰附近的且经过 PSA 中心区域的波射线通量(矢量; 单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), 其中黑色打点区域表示波源区

对比图 7 中的四个子图可以发现, 新西兰附近的波源最为关键, 其激发的 Rossby 波能量最强, 且能够高效地向高纬度传播, 导致波能量在 PSA 中心区域辐合, 从而促使 PSA 中心迅速发展。新西兰上空位于经向绝对涡度梯度的大值区, 该区域具有较强的波导特性, 易于对 Rossby 波产生折射, 使其传播方向发生偏转[22]。因此, 当从上游传播而来的 Rossby 波抵达新西兰附近时, 同样会发生折射, 向高纬度方向转折, 进一步促进波能量在 PSA 中心区域汇聚, 加速 PSA 中心的增强。

对比图 7(a)~(c)可以发现, 由这三个波源激发的 Rossby 波能量大部分均沿副热带急流向东传播, 仅有一小部分能量能够抵达新西兰附近, 并在该区域发生折射, 转向高纬度的 PSA 中心区域传播。值得注意的是, 抵达新西兰上空的 Rossby 波能量, 同样可在此激发新的 Rossby 波源, 而这些源自新西兰附近的 Rossby 波则能高效地向 PSA 中心区域传播, 形成“接力”效应。这表明, 热带异常对流激发的 Rossby 波仅有一小部分能直接影响 PSA, 还可通过激发新西兰附近的次级波源, 间接实现对 PSA 的调控。

4. 结论与讨论

本文基于 1950~2024 年再分析资料, 研究了 El Niño 背景下 PSA 正事件的时空特征与动力机制。主要结论如下:

(1) PSA 是南太平洋(20°~70°S, 150°E~70°W) 500 hPa 位势高度 EOF 第一模态(解释方差 32.85%), 以季节内振荡(7~90 天)为主导, 年际尺度存在 4.8 年周期。共识别 638 次 PSA 事件, 正负事件频次相近, 生命周期约 15 天。

(2) 信息流分析证实 ENSO 对 PSA 存在显著的因果强迫作用。El Niño 背景下 PSA 正事件呈准正压结构, 最强中心位于 250 hPa。

(3) 新西兰附近海域是 PSA 发展的关键动力区。El Niño 引起热带对流异常, 使澳大利亚东北部至新西兰一带成为有效 Rossby 波源区。波射线通量诊断表明, 源自热带的 Rossby 波能量主要沿副热带急流传播, 仅少部分抵达新西兰后发生折射转向高纬度 PSA 中心; 更重要的是, 抵达新西兰的波能可激发次级波源, 其激发的 Rossby 波高效向 PSA 中心传播, 形成“接力”效应。

本文揭示了 El Niño 调控 PSA 的波动力学机制, 发现了新西兰作为关键波能中转运站的作用。La Niña 背景下的 PSA 负事件及非 ENSO 背景下的 PSA 事件有待进一步研究。

基金项目

国家自然科学基金项目(42006017), 山东省自然科学基金项目(ZR2019ZD12, ZR2019BD038)资助。

参考文献

- [1] Mo, K.C. and Ghil, M. (1987) Statistics and Dynamics of Persistent Anomalies. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **44**, 877-902. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1987\)044<0877:sadopa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1987)044<0877:sadopa>2.0.co;2)
- [2] Lau, K., Sheu, P. and Kang, I. (1994) Multiscale Low-Frequency Circulation Modes in the Global Atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **51**, 1169-1193. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1994\)051<1169:mlfcmi>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1994)051<1169:mlfcmi>2.0.co;2)
- [3] Mo, K.C. and Higgins, R.W. (1998) The Pacific-South American Modes and Tropical Convection during the Southern Hemisphere Winter. *Monthly Weather Review*, **126**, 1581-1596. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1998\)126<1581:tpsama>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1998)126<1581:tpsama>2.0.co;2)
- [4] Karoly, D.J. (1989) Southern Hemisphere Circulation Features Associated with El Niño-Southern Oscillation Events. *Journal of Climate*, **2**, 1239-1252. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(1989\)002<1239:shcfaw>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(1989)002<1239:shcfaw>2.0.co;2)
- [5] Ding, Q., Steig, E.J., Battisti, D.S. and Küttel, M. (2011) Winter Warming in West Antarctica Caused by Central Tropical Pacific Warming. *Nature Geoscience*, **4**, 398-403. <https://doi.org/10.1038/ngeo1129>
- [6] Raphael, M.N., Marshall, G.J., Turner, J., Fogt, R.L., Schneider, D., Dixon, D.A., *et al.* (2016) The Amundsen Sea Low: Variability, Change, and Impact on Antarctic Climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **97**, 111-121. <https://doi.org/10.1175/bams-d-14-00018.1>
- [7] Hoskins, B.J. and Karoly, D.J. (1981) The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **38**, 1179-1196. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<1179:tslroa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<1179:tslroa>2.0.co;2)
- [8] Mo, K.C. and Paegle, J.N. (2001) The Pacific-South American Modes and Their Downstream Effects. *International Journal of Climatology*, **21**, 1211-1229. <https://doi.org/10.1002/joc.685>
- [9] Yang, Y. and Li, J. (2025) Novel Monsoon Indices Based on Vector Projection and Directed Angle for Measuring the

- East Asian Summer Monsoon. *Climate Dynamics*, **63**, Article No. 210. <https://doi.org/10.1007/s00382-025-07696-7>
- [10] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., *et al.* (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:tnyrp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2)
- [11] Thompson, D.W.J. and Wallace, J.M. (2000) Annular Modes in the Extratropical Circulation. Part I: Month-to-Month Variability. *Journal of Climate*, **13**, 1000-1016. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013%3C1000:AMITEC%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013%3C1000:AMITEC%3E2.0.CO;2)
- [12] 黄嘉佑, 李庆祥. 气象数据统计分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [13] Pyper, B.J. and Peterman, R.M. (1998) Comparison of Methods to Account for Autocorrelation in Correlation Analyses of Fish Data. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, **55**, 2127-2140. <https://doi.org/10.1139/f98-104>
- [14] Frankignoul, C. and Kwon, Y. (2022) On the Statistical Estimation of Asymmetrical Relationship between Two Climate Variables. *Geophysical Research Letters*, **49**, e2022GL100777. <https://doi.org/10.1029/2022gl100777>
- [15] Baldwin, M.P., Stephenson, D.B. and Jolliffe, I.T. (2009) Spatial Weighting and Iterative Projection Methods for Eofs. *Journal of Climate*, **22**, 234-243. <https://doi.org/10.1175/2008jcli2147.1>
- [16] Rodwell, M.J., Clare, M.C.A., Lock, S., Lonitz, K. and Chevallier, M. (2025) Power Spectra of Physics-Based and Data-driven Ensembles. *Meteorological Applications*, **32**, e70071. <https://doi.org/10.1002/met.70071>
- [17] Liang, X.S. and Kleeman, R. (2005) Information Transfer between Dynamical System Components. *Physical Review Letters*, **95**, Article ID: 244101. <https://doi.org/10.1103/physrevlett.95.244101>
- [18] Liang, X.S. (2014) Unraveling the Cause-Effect Relation between Time Series. *Physical Review E*, **90**, Article ID: 052150. <https://doi.org/10.1103/physreve.90.052150>
- [19] 李艳杰, 李建平. 水平非均匀基流中行星波的传播[J]. 地球物理学报, 2012, 55(2): 361-371.
- [20] Zhao, S., Li, J. and Li, Y. (2015) Dynamics of an Interhemispheric Teleconnection across the Critical Latitude through a Southerly Duct during Boreal Winter. *Journal of Climate*, **28**, 7437-7456. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-14-00425.1>
- [21] Zhao, S., Li, J., Li, Y., Jin, F. and Zheng, J. (2018) Interhemispheric Influence of Indo-Pacific Convection Oscillation on Southern Hemisphere Rainfall through Southward Propagation of Rossby Waves. *Climate Dynamics*, **52**, 3203-3221. <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4324-y>
- [22] Hoskins, B.J. and Ambrizzi, T. (1993) Rossby Wave Propagation on a Realistic Longitudinally Varying Flow. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **50**, 1661-1671. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1993\)050<1661:rwpoar>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1993)050<1661:rwpoar>2.0.co;2)