异常对流经度差异对 El Niño 影响区域气候的分析

陈君杰[1]　孙即霖[1]

1 中国海洋大学，海洋与大气学院，青岛，266100

摘　要　利用 1979~2019 年 NOAA（美国国家海洋和大气局）月平均 OLR 资料，1960~2019 年 NCEP/NCAR（美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心）和 ECMWF（欧洲中期天气预报中心) ERA5 月平均再分析资料，以及 East Anglia 大学 CRU 地表气温观测资料，采用合成分析方法，探讨了热带太平洋异常对流纬向位置不同的 El Niño 事件对区域气候的影响。结果表明：基于热带太平洋异常对流活动纬向位置，研究 El Niño 事件对大气环流和区域气候异常的影响，可避免 SST 异常反映大气对流活动异常存在局限性的缺陷。超强 El Niño 事件中，热带太平洋异常对流位置偏东，位于 140°W 附近。热带东西太平洋异常下沉区偏东，导致澳大利亚东北部和巴西东北部从 9 月到次年 2 月严重高温干旱，而秘鲁和厄瓜多尔沿岸降水偏多。9~11 月 PNA（太平洋-北美）遥相关波列位置偏东，北美大槽显著减弱，使冬季北美大陆气温明显偏高。格陵兰岛到欧洲西北部位势高度偏低，亚欧北部显著偏暖。一般东部型 El Niño 事件中，异常对流位于赤道 160°W 附近。热带东西太平洋异常下沉区较超强事件偏西，导致澳大利亚西北部和南美西北部从 9 月到次年 5 月持续干旱，澳大利亚东部降水正常偏多。PNA 波较超强事件偏西，北美大槽加深，秋冬季北美东部出现严寒。而 El Niño Modoki 事件中，异常对流位于 180°附近，秘鲁和厄瓜多尔沿岸处于对流抑制区，降水偏少，受异常反气旋持续控制，澳大利亚大部分地区从 9 月到次年 5 月持续干旱。PNA 波列更加偏西，冬季北美东南部偏冷。一般东部型事件和 El Niño Modoki 事件冬季，大西洋表现为 NAO（北大西洋涛动）负位相，亚欧中纬度地区气温偏低。

关键词　热带异常对流　经度差异　区域气候异常　遥相关波列

文章编号: 2021085A

Doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2203.21085

收稿日期　2021-05-21；**网络预出版日期**

作者简介　陈君杰，女，1997 年生，硕士研究生，主要从事海气相互作用方面研究。E-mail: 2558221913@qq.com

通讯作者　孙即霖，男，1956 年生，教授，主要从事海气相互作用方面研究。E-mail: rainbetimes@vip.163.com

资助项目　国家自然科学基金项目 41430963、41276012

Funded by National Natural Science Foundation of China (NSFC) (Grants 41430963, 41276012)

Analysis on the Effect of Anomalous Convective Longitude Position Difference on Regional Climate Anomalies Caused by El Niño

CHEN Junjie[1], SUN Jilin[1]

1 College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao, 266100

Abstract Based on NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) monthly OLR data during 1979 to 2019, NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research Reanalysis), ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA5 monthly reanalysis datasets, and East Anglia CRU (Climatic Research Unit) surface temperature data during 1960 to 2019, the effects of El Niño events with anomalous convection at different zonal position on regional climate are discussed. The results show that: Studying the effects of El Niño events on atmospheric circulation and regional climate anomalies based on the zonal position of tropical Pacific anomalous convection can avoid the limitation that SST anomalies cannot reflect the atmospheric convection anomalies fully. The anomalous convection is located near 140°W in Super El Niño events. Anomalous subsidence over tropical western and eastern Pacific is eastward, resulting in higher temperature and drought in northeastern Australia, northeastern Brazil, and more rainfall along the coasts of Peru and Ecuador during boreal autumn and winter. The PNA (Pacific-North American) wave train is located eastward, which significantly weakens the North American trough and brings warmer winter in North American. The geopotential height from Greenland to northwest Europe is low, making northern Eurasian significantly warmer. In Eastern El Niño, the anomalous convection is located near 160°W. Accordingly, anomalous subsidence is westward, causing dry northwestern Australia, northwestern South America and wet eastern Australia from boreal autumn to spring. The PNA wave train originates in south of Aleutian Islands and deepens the North American trough, causing severe cold winter in eastern North America. The anomalous convection is located near 180 °in El Niño Modoki. Contrary to Super El Niño, the coasts of Peru and Ecuador is dry due to abnormal subsidence and most of Australia tends to experience drought from boreal autumn to spring under the controlled of anomalous anticyclone. The PNA wave train is located westward, resulting in severe cold winter in southeastern America. In the winter of Eastern and El Niño Modoki events, the Atlantic shows a negative NAO (North Atlantic Oscillation)

pattern, and the temperature in the middle latitudes of Eurasian is low.

Keywords Tropical anomalous convection, Longitude difference, Regional climate anomaly, Teleconnection wave train

1 引言

El Niño 是热带太平洋海-气相互作用导致的全球气候异常事件。近年来发现并不是所有 El Niño 事件都相同，根据盛期热带太平洋 SST 正异常所在位置，El Niño 被划分为东部型（传统型/冷舌型）El Niño 和 El Niño Modoki（暖池型/中部型）事件（Weng et al., 2007; Kao and Yu, 2009; Kug et al., 2009; 秦坚肇和王亚非, 2014）。

El Niño 导致的气候异常事件对全球农业生产活动造成显著影响，比如持续的旱灾导致澳大利亚小麦减产，而丰沛的降水使得巴西南部，阿根廷及美国大豆丰产等（Iizumi et al., 2014; 郑冬晓和杨晓光, 2014; Anderson et al., 2017）。不同类型 El Niño 事件导致的区域气候异常不同，尤其表现在对环太平洋国家的气候影响上（Weng et al., 2007, 2009)。东部型 El Niño 发生年冬季，美国东北部显著偏暖，西南部偏冷，而中部型 El Niño 往往导致美国冬季中南部地区显著偏冷，西北部地区偏暖（Yu et al., 2012），但两类事件都会引起冬春季美国西岸及东南部地区降水偏多（Johnna et al., 2016）。东部型事件会导致澳大利亚东部干旱，中部型事件更容易导致澳大利亚西北部和北部地区的干旱（Potgieter et al., 2005; Wang and Hendon, 2007; Taschetto and England, 2009），值得注意的是，中部型事件似乎会引起澳大利亚持续性的干旱，如在 2001 年~ 2009 年期间，发生了 2002/2003，2004/2005，2006/2007 三次中部型 El Niño 事件，澳大利亚经历了有史以来最严重持久的干旱，造成小麦连年减产，山火频发（Leblanc 2009; Van Dijk et al., 2013）。东亚地区降水和温度异常对不同类型 El Niño 事件不同阶段也有不同的响应（袁媛等, 2012; 袁良和何金海, 2013; 李海燕等, 2019）。

但是基于 SST 异常位置对 El Niño 进行分类存在一定的局限性。1982/1983、1997/1998 和 2015/2016 年三次超强 El Niño 事件热带太平洋的 SST 异常空间分布特征与其他东部型事件类似，因此基于 SST 异常分布特征对 El Niño 分类时，将其划分为东部型事件。但超强 El Niño SST 异常振幅大（Fu and Joseph, 1985; 钱代丽和管兆勇, 2018），其导致的气候异常也有区别于一般东部型事件的显著特点，如影响强度强，持续时间久等（王彰贵等, 1998; 袁媛等, 2016）。与一般东部型事件造成的北美冬季严寒的情况完

全不同，1997 年和 2015 年冬季亚欧大陆和北美大陆显著偏暖（翟盘茂等, 2016; Paek et al., 2017; Anyamba et al., 2019）。

热带太平洋异常深厚对流是 El Niño 引起大气环流和区域气候的本质原因。异常对流活动虽然与 SST 有关，但大气对流活动与 SST 两者间存在复杂的非线性关系，因此大气对流活动异常并不完全由 SST 决定（Lau et al., 1997）。热带地区 OLR 异常可以很好的衡量大气深厚对流特征（Lau et al., 1997; Garreaud and Wallace, 1997, 1998）。目前从热带对流活动角度开展的相关研究还比较少。Chiodi and Harrison（2010）以赤道中东太平洋的对流活动异常强度，定义 ECP_OLR（eastern-central Pacific OLR）指数，区分强弱 OLR-El Niño 事件。强 OLR-El Niño 事件可以识别出强度较强的 El Niño 事件，而弱 OLR-El Niño 事件则为中部型 El Niño 事件。且强 OLR-El Niño 事件对美国的气温和降水存在显著影响，而弱 OLR-El Niño 事件对美国的气候影响很弱（Chiodi and Harrison, 2013）。

本文从大气对流活动的角度，探究热带太平洋异常对流活动纬向位置不同的 El Niño 事件对大气环流和区域气候的影响。

2 数据和方法

2.1 数据

本文利用 1979 年~2019 年美国国家海洋和大气管理局 NOAA 提供的月平均向外长波辐射（Outgoing Long-wave Radiation, OLR）资料，水平分辨率为 2.5°×2.5°；美国气象环境预报中心和美国国家大气研究中心 NCEP/NCAR 和欧洲中期天气预报中心 ERA5 从 1960 年~2019 年的月平均 Omega 场、风场、位势高度场，水平分辨率分别为 2.5°×2.5°和 0.25°×0.2.5°，以及水平精度为 2°×2°的月平均最优插值海温 OISST；英国 East Anglia 大学提供的 CRU-TS 4.05 全球高分辨率（0.5°×0.5°）地表月平均温度数据；以及 NCEP 水平精度为 1°×1°的全球陆地月平均降水数据（PREC/L）。另外还使用了 NOAA 气候预测中心提供的海洋 Niño 指数 （Oceanic Niño Index, ONI），它是基于 Niño 3.4 区（5°N ~ 5°S, 120°W ~ 170°W）ERSST.v5 海温异常的 3 个月滑动平均值。

2.2 方法

在表示热带太平洋对流活动异常时，以 500 hPa Omega 代替 OLR，以延长可研究的

时间序列，将 500 hPa Omega 负异常区域定义异常对流活动区。利用合成分析研究热带太平洋异常对流纬向位置不同的 El Niño 事件造成的气候影响和原因。计算 Rossby 涡度源和波活动通量诊断准静止 Rossby 波的传播机制。并且采用 NCEP/NCAR 和 ERA5 两种再分析资料比较所得关键结果。文中气候态平均取 1981~2010 年共 30 年的平均值。春季指 3~5 月，夏季指 6~8 月，秋季指 9~11 月，冬季指 12 月到次年 2 月。采用两组样本平均值差异的显著性 t 检验进行检验。

Rossby 涡度源 (Sardeshmukh and Hoskins, 1988)计算公式:

$$S = -\xi D - \boldsymbol{V}_\chi \cdot \nabla\xi = -\nabla \cdot (\boldsymbol{V}_\chi \cdot \xi)$$

其中ξ为绝对涡度，D为水平散度，$\boldsymbol{V}_\chi$为速度场的散度分量。等号右边第一项$-\xi D$为涡旋拉伸项，第二项$-\boldsymbol{V}_\chi \cdot \nabla\xi$为绝对涡度平流项。

水平 T-N 波活动通量（Takaya and Nakamura, 2001）计算公式：

$$\mathrm{W} = \frac{P}{2\left|\vec{U}\right|}\begin{Bmatrix} U(v'^2 - \psi' v'_x) + V(-u'v' + \psi' u'_x) \\ U(-u'v' + \psi' u'_x) + V\left(u'^2 - \psi' u'_y\right) \end{Bmatrix}$$

其中P,$\vec{U} = (U, V)$, ψ', u', v'分别表示气压与 1000 hPa 的比值，基本气流风速大小，扰动流函数，纬向扰动速度和经向扰动速度。

3 El Niño 事件热带太平洋地区对流及低层风场异常特征

3.1 热带对流异常的定义

OLR 可以反映热带地区的对流状态（将尚城, 1994a, 1994b; Garreaud and Wallace 1997, 1998），但是现有 OLR 数据仅从 1979 年开始，为了研究早期 El Niño 事件热带太平洋地区的对流异常特征，需要更长时间序列的数据进行合理延伸。已知热带地区深对流与对流层中高层的垂直速度有很好的对应关系（范慧君和李修芳, 1985; Peng et al., 1987; 隋晓霞和王启, 2011）。选取 1979 年~2019 年的 OLR 数据和 ERA5 以及 NCEP/NCAR 提供的 500 hPa Omega 数据，分季节做同期相关分析。两种 Omega 和 OLR 数据在热带太平洋都具有高度相关性，相关系数在 0.7 以上（图 1），表明在热带太平洋用 500 hPa Omega 数据代替 OLR 数据反映对流活动是可行的，且用 NCEP/NCAR 和 ERA5 资料都是可靠的。因此，本文以 500 hPa Omega 异常为负时，表示对流活动偏强；

反之，表示对流活动偏弱。文中所用 Omega 数据都已乘以负 100。

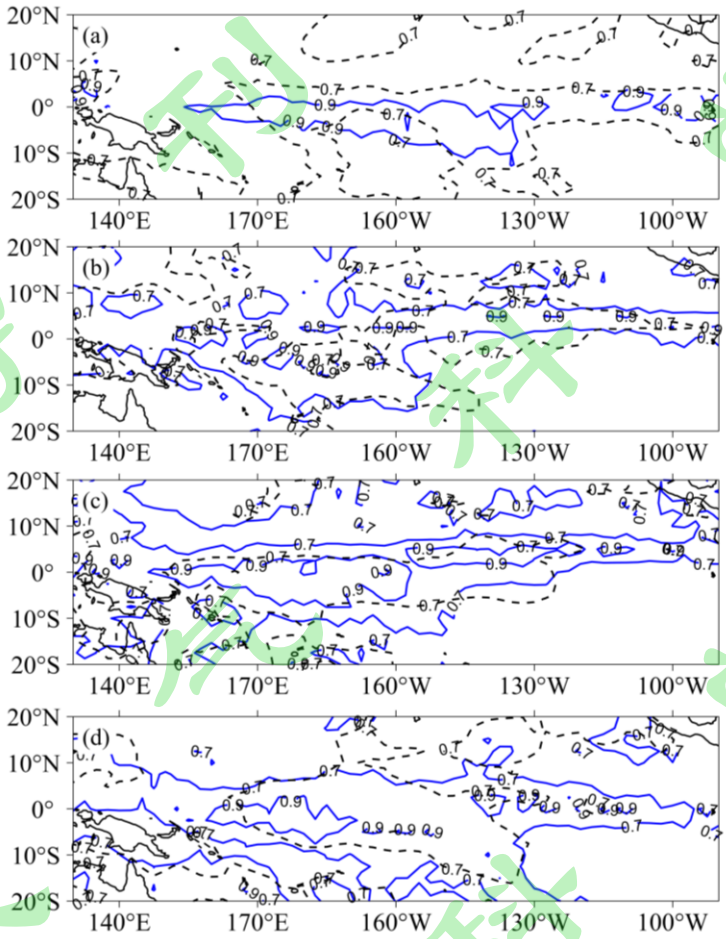


图 1 OLR 和 500 hPa Omega 相关系数空间分布（实线：ERA5 Omega 数据，虚线：NCEP/NCAR 数据，a: MAM, b: JJA, c: SON, d: DJF，通过 99%显著性检验）

Fig. 1 Spatial distribution of correlation coefficients of OLR and 500 hPa Omega data (blue solid line: ERA5 Omega data, black dotted line: NCEP / NCAR Omega data, a: MAM, b: JJA, c: SON, d: DJF, exceeds the 99% confidence level)

3.2 热带太平洋对流和低层西风异常特征

根据 NOAA 提供的海洋 Niño 指数（ONI）及其对 El Niño 事件的判断，将连续 5 个月 ONI > 0 的年份确定为 El Niño 年，挑选出 1960 年~ 2019 年间 14 次 El Niño 事件。基于 SST 正异常所在位置（Kug et al., 2009），有 8 次为东部型 El Niño 事件，6 次为 El Niño Modoki 事件（图 2，表 1）。已有研究证实大气对流活动和 SST 之间存在着复杂的非线性关系。当 SST 低于对流阈值，约为 27℃时，对流随 SST 升高而减弱，深厚对流

几乎不会发生，且对流对于 SST 的变化不敏感；当 SST 刚超过对流阈值，约 27℃～29℃时，对流随 SST 的升高迅速增加，且 SST 的微弱变化都会引起对流的迅速变化；而当 SST 高于 29℃后，深厚对流也发生，但是对流对 SST 的敏感性显著减弱，且在很大程度上依赖于其上空的大气环流状态（Gadgil et al., 1984; Graham and Barnett, 1987; Waliser and Graham, 1993; Lau et al., 1997; 李海燕等, 2016）。比较 14 次 El Niño 发展过程中热带太平洋 SST 和对流异常，异常对流峰值位于赤道中太平洋，较 SST 正异常峰值位置偏西，且异常对流峰值出现时间比异常 SST 峰值晚 1-2 个月（Xie et al., 2020）。在 1982/1983，1997/1998 和 2015/2016 年三次超强 El Niño 期间，SST 正异常发生在热带东太平洋，增温振幅最大（图 2），异常对流活动最强，位置偏东，介于 150°W~120°W 之间（图 3）。虽然 2015/2016 年 El Niño 事件在盛期异常对流位置有所西移，但是其在发展阶段异常对流位置是显著偏东的。而其他东部型 El Niño 事件，SST 正异常也发生在热带东太平洋，但增温振幅比超强 El Niño 事件小（图 2），因此异常对流位置也相对偏西，介于 170°W~140°W 之间（图 3）。对于 El Niño Modoki 事件，SST 正异常位于热带中太平洋（图 2），异常对流介于 160° W~170° E 之间，甚至更加偏西，比如 2009/2010 年和 2018/2019 年发生的 El Niño Modiki 事件异常对流中心在 170°E 以西（图 3）。

赤道中西太平洋对流层低层持续性的西风异常是 El Niño 发生的前提条件（傅云飞和黄荣辉, 1996; 陈幸荣和王彰贵, 2003），异常对流中心影响两侧的西风异常（Phliander, 1983），使对流活动中心上风侧西风异常增强，下风侧西风异常减弱。从纬向风异常的时间经度剖面发现，西风异常中心位于异常对流中心西侧，与异常对流中心特征差异相对应，三次超强 El Niño 事件热带太平洋西风异常最强，范围最大，东伸到 120°W 以东，持续时间最长（图 4）。从发生年夏季开始，热带东太平洋到南美沿岸就已经显著增暖（图 2）。对于其他东部型事件，西风异常强度明显比超强事件弱，且西风异常东界几乎不超过 120°W（图 3）。发展阶段热带东太平洋 150°W 以东 SST 也增暖，但是增暖振幅较小。1986/1987 年和 1991/1992 年事件在 11 月后随着热带中西太平洋西风异常增强，SST 最强增暖区东移，对流增强（图 3）。而 El Niño Modoki 事件中，热带中西太平洋西风异常更弱，范围偏西偏小，且持续时间短（图 4），SST 正距平弱，最强增暖区在 150°W 以西（图 2）。

上述分析进一步表明，大气对流异常和 SST 异常之间并非简单的线性关系，大气

对流异常并不仅仅取决于 SST 异常，其还受对流层低层风场异常的影响。与一般东部型 El Niño 事件相比，超强 El Niño 事件在热带太平洋异常对流活动位置更加偏东，而基于 SST 异常并不能反映出来，这表明直接从大气对流活动角度研究 El Niño 事件可避免 SST 异常反映大气对流异常信号存在局限性的弊端。 但是，对流-SST-低层风场之间存在复杂的非线性关系，难以定量表示出来。在之后的研究中需要进一步深入研究三者之间的关系。

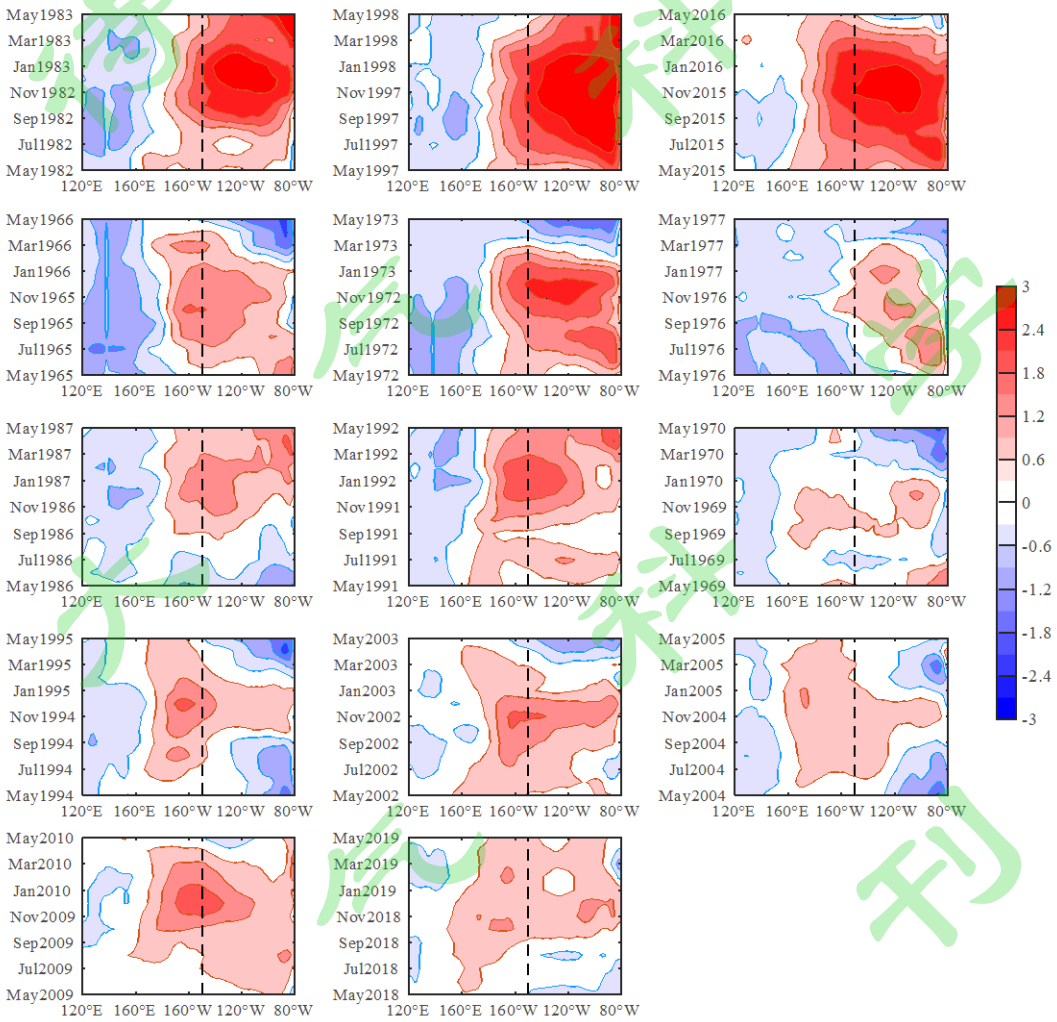


图 2 1960 ~ 2019 年 14 次 El Niño 事件发生当年 5 月到次年 5 月 2°S ~ 2°N 平均的 SST 距平时间-经度剖面（单位：℃）

Fig.2 The time-longitude profile of SST anomalies (units: ℃) at Equatorial Pacific (2°S ~ 2°N average) during 14 El Niño events during 1960 to 2019

表 1 1960 ~ 2019 年 14 次 El Niño 事件热带地区异常强对流中心经度位置

Table 1 Longitude position of anomalous convection center in tropical area of 14 El Niño events from 1960 to 2019

类型	年份	发展阶段异常对流区域
东部型 El Niño	1982/1983 年，1997/1998 年，2015/2016 年， 1965/1966 年，1972/1973 年，1976/1977 年， 1986/1987 年，1991/1992 年	150 °W ~ 120 °W 170 °W ~ 140 °W
El Niño Modoki	1969/1970 年，1994/1995 年，2002/2003 年 2004/2005 年，2009/2010 年，2018/2019 年	170 °E ~ 160 °W

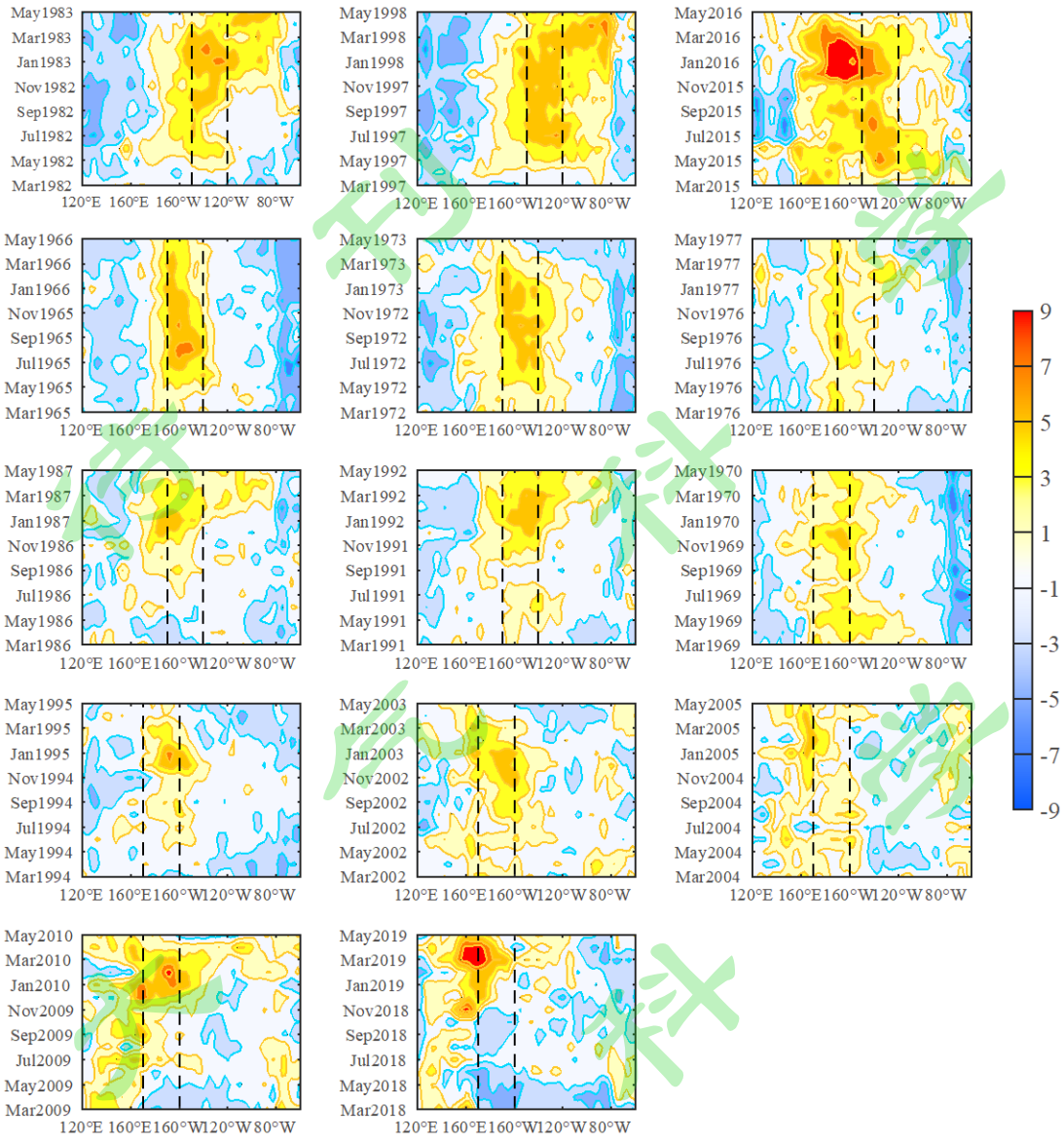


图 3 1960 ~ 2019 年 14 次 El Niño 事件发生当年 3 月到次年 5 月 2.5 °S ~ 2.5 °N 平均的 500 hPa Omega 距平时间-经度剖面（单位：-10^{-2} Pa s^{-1}）

Fig.3 The time-longitude profile of 500 hPa Omega anomalies (units: -10^{-2} Pa s^{-1}) at Equatorial Pacific (2.5 ℃S~2.5 ℃N average) during 14 El Niño events during 1960~2019

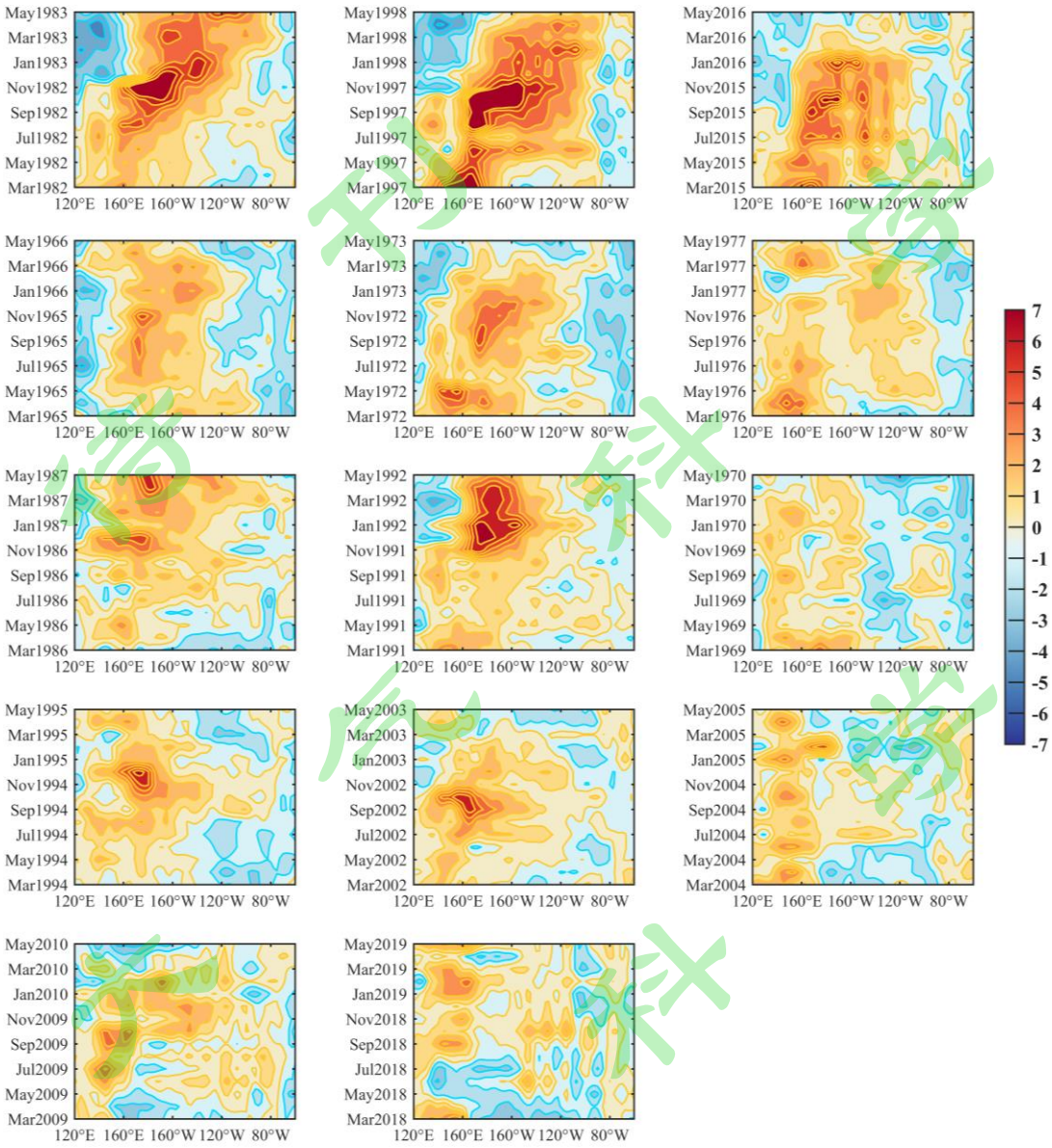


图 4 1960 ~ 2019 年 14 次 El Niño 事件发生当年 3 月到次年 5 月 2.5 ℃S ~ 2.5 ℃N 平均的 925 hPa 的纬向风距平时间-经度剖面（单位：m s^{-1}）

Fig.4 The time-longitude profile of 925 hPa zonal wind anomalies (units: m s^{-1}) at Equatorial Pacific (2.5 ℃S ~ 2.5 ℃N average) during 14 El Niño events during 1960 ~ 2019

3.3 区域气候影响特征差异分析

热带太平洋大气对流活动异常是 El Niño 影响区域气候的关键。由 3.2 节知，超强 El Niño 事件热带太平洋异常对流位置最为偏东，El Niño Modoki 事件的异常对流位置最为偏西。合成分析 El Niño 发生当年秋季到次年春季的气温和降水异常，发现热带太

平洋异常对流纬向位置不同的 El Niño 事件造成的区域气候影响不同，尤其表现在秋冬季北美大陆和亚欧大陆的气温异常，澳洲及南美洲的降水异常方面。

对于一般东部型 El Niño 事件，除阿拉斯加州和北美西部，北美大陆秋冬季气温显著偏低，亚欧大陆北部地区冬季也偏冷（图 5e）；秋季到次年春季美国西北部降水偏少，墨西哥降水偏多，中国华南地区秋季和次年春季降水偏多（图 5m-o）。而异常对流活动偏东的超强 El Niño 事件中，冬春季北美大陆和亚欧大陆大部分地区显著偏暖（图 5b-c）；美国西岸和东南部地区受偏南风影响降水偏多，受异常东南风影响，中国长江以南地区秋冬季降水显著偏多，春季整个东部沿海到东北地区降水偏多（图 5j-l），这与一般的东部型 El Niño 事件明显不同。在异常对流活动明显偏西的 El Niño Modoki 事件中，北美北部地区秋冬季偏暖，春季北美大部分地区偏冷，亚欧北部及中国东北地区气温也偏低（图 5g-i）；冬春季，美国西部和东南部降水正常偏多，中国江南地区降水偏多（图 5p, r）。

澳大利亚气候受澳大利亚高压和地形显著影响。夏秋季澳大利亚整体被高压控制，大部分地区干旱少雨，只有西南角和东南角由于强劲的西风带来水汽在山地迎风坡造成降水，冬季高压中心最偏南，强度最弱，大陆北部为低压中心，整个北部及东部地区多雨。澳大利亚是重要的小麦出口国，其西南部和东南部是主要的冬小麦种植区，一般在 4~5 月份种植，8~9 月份是生长期，11~12 月收获。超强 El Niño 事件将会导致澳大利亚东部和北部地区秋冬季节严重高温干旱，而次年春季，澳大利亚整体降水偏多，但是气温持续偏高（图 5a-c, j-l），造成小麦减产。一般东部型事件期间，澳大利亚东部秋季轻微干旱，而冬季降水正常偏多，气温正常偏低（图 5d-f, m-o），因此引起小麦减产的概率偏小。在 El Niño Modoki 事件中，澳大利亚东部从当年秋季到次年春季持续干旱，西北部地区高温持续，次年春季气温明显偏高（图 5h-i, p-r）。

巴西中南部和阿根廷东北部是南美主要大豆种植区，11 月上旬是大豆主要种植期，1~2 月大豆结荚鼓粒，3~5 月收获。正常年份，南美北部常年受赤道低压控制，炎热多雨，受南大西洋副热带高压西侧偏东风影响，巴西南部降水也相对较多。超强 El Niño 事件中，巴西东北部地区高温干旱严重（图 5a-c, j-l），一般东部型事件中，干旱位置偏西，位于巴西西北部以及哥伦比亚和委内瑞拉地区，温度接近常年（图 5d-f, m-o）。超强 El Niño 期间，由于秘鲁厄瓜多尔沿岸海水显著增暖，引起沿岸降水增多温度偏高，

但是在一般东部型事件中降水和温度接近正常，而在 El Niño Modoki 事件中秘鲁和厄瓜多尔沿岸降水反而偏少（图 5h-i, p-r）。巴西南部，巴拉圭，乌拉圭以及阿根廷东北部地区在超强 El Niño 发生当年夏季到次年春季，降水持续异常偏多（图 5j-l），容易引发洪涝灾害；一般东部型事件期间，从发生当年夏季到冬季，整体降水正常偏多，有利于作物生长（图 5m-o）；而 El Niño Modoki 事件仅发生当年秋冬季多雨（图 5p-r）。

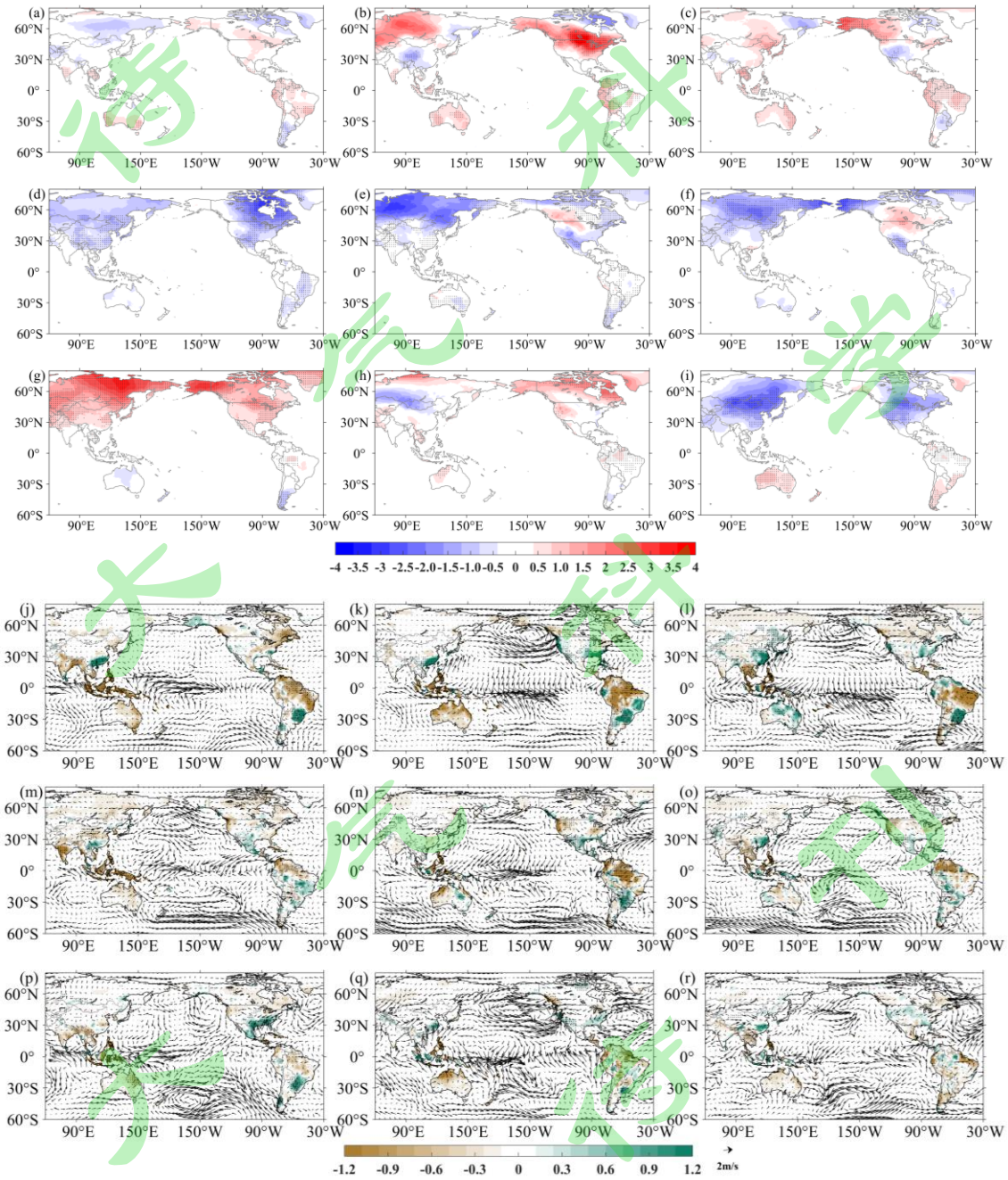


图 5 超强 El Niño（a-c, j-l），一般东部型 El Niño（d-f, m-o）和 El Niño Modoki 事件（g-i, p-r）当年秋季到次年春季表面温度（单位：℃，打点区域通过 95%显著性检验），降水（单位：mm d^{-1}，打点

区域通过 95%显著性检验）和 850 hPa 风场异常（单位：m s^{-1}）

Fig.5 The surface temperature (units: ℃, the dotted regions denote exceeds the 95% confidence level), precipitation (units: mm d^{-1}, the dotted regions denote exceeds the 95% confidence level) and 850 hPa wind anomalies (units: m s^{-1}) in SON, DJF and MAM of Super El Niño (a-c, j-l), general Eastern El Niño (d-f, m-o), and El Niño Modoki (g-i, p-r)

4. 物理机制分析

4.1 热带太平洋地区对流异常分析

El Niño 期间，热带太平洋沃克环流上升支东移，超强事件冬季沃克环流异常上升支东移到 150°W~130°W 之间，位置最为偏东；一般东部型事件沃克环流异常上升支位于 170°W~160°W 之间；而 El Niño Modoki 事件沃克环流异常上升支位于 170°E~170°W 之间，位置偏西（图 6）。

超强 El Niño 事件，从发生年夏季到次年春季热带异常对流中心位置变化不大，均在 150°W 以东，异常对流东伸到南美沿岸，冬季异常对流强度最强，且在墨西哥湾以东出现异常对流中心（图 7）。秘鲁和厄瓜多尔沿岸 SST 增暖，对流活动偏强，导致降水偏多，而澳大利亚和巴西东北部持续处在对流抑制区，高温干旱严重。次年春季，热带太平洋异常对流活动东移，澳大利亚位于异常对流上升区，异常反气旋在澳大利亚东侧（图 8），偏北风异常给澳大利亚带来丰沛水汽，因此降水显著偏多（图 5l）。

一般东部型事件，发生年夏季到次年春季，热带异常对流中心位于 170°W~150°W 之间，西侧对流抑制区位于印度尼西亚和澳大利亚北部和西部，东侧对流抑制位于南美西北部，墨西哥湾西侧存在异常对流中心，位置较超强事件偏西（图 7）。受异常下沉运动影响，澳大利亚西北部和哥伦比亚，委内瑞拉以及巴西北部干旱（图 5m-o）。

对于 El Niño Modoki 事件，发生年夏秋季热带中太平洋 170°W 附近存在较弱异常对流，而在 150°E 附近存在强度相当的异常对流中心，使得东太平洋对流抑制区偏西。冬季，热带中太平洋异常对流发展，异常对流活动中心在 180°附近，次年春季西移到日界线以西（图 7）。澳大利亚持续处在对流抑制区，澳大利亚高压持续性偏强，造成澳大利亚高温干旱持续。南美北部异常下沉区位置更加偏西，导致包括秘鲁和厄瓜多尔沿岸在内的南美北部地区轻微干旱（图 5p-r）。

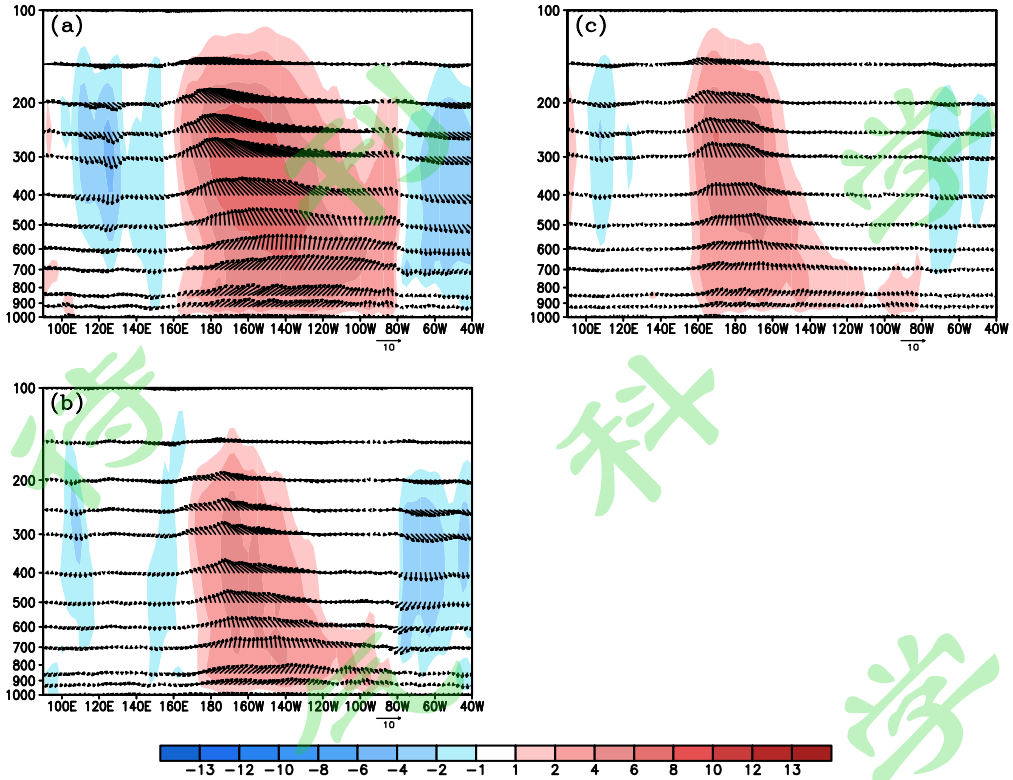
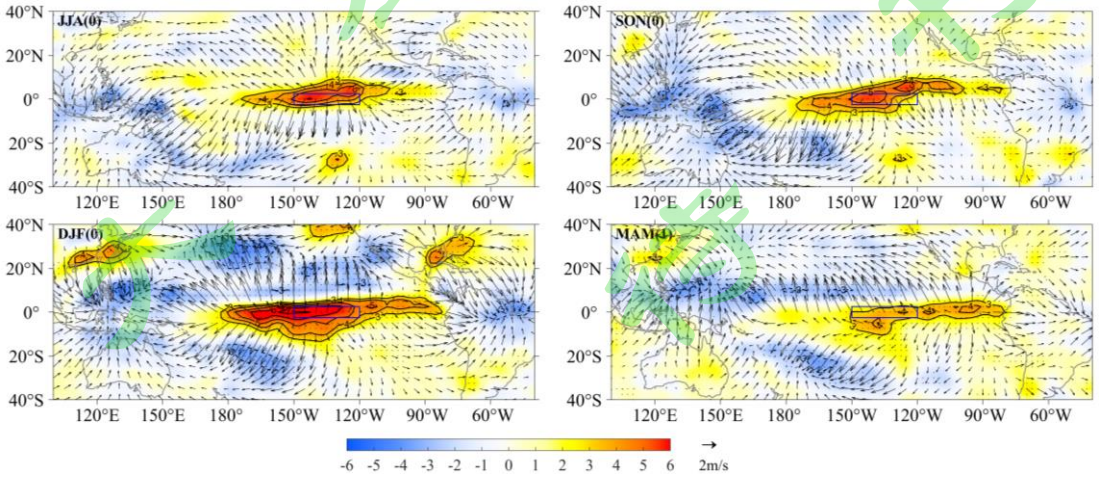


图 6 El Niño 事件发生年冬季（DJF）赤道地区（2.5 °S ~ 2.5 °N 平均）垂直纬向环流异常（（a）超强 El Niño，（b）一般东部型 El Niño 和（c）El Niño Modoki，填色表示 P 坐标下垂直速度异常，单位：-10^{-2} Pa s^{-1}）

Fig.6 The vertical zonal circulation anomalies (2.5 °S ~ 2.5 °N average) in the winter (DJF) of Super El Niño (a), general Eastern El Niño (b) and El Niño Modoki (c) (shaded areas indicate the vertical velocity anomaly in P coordinate, units: -10^{-2} Pa s^{-1})



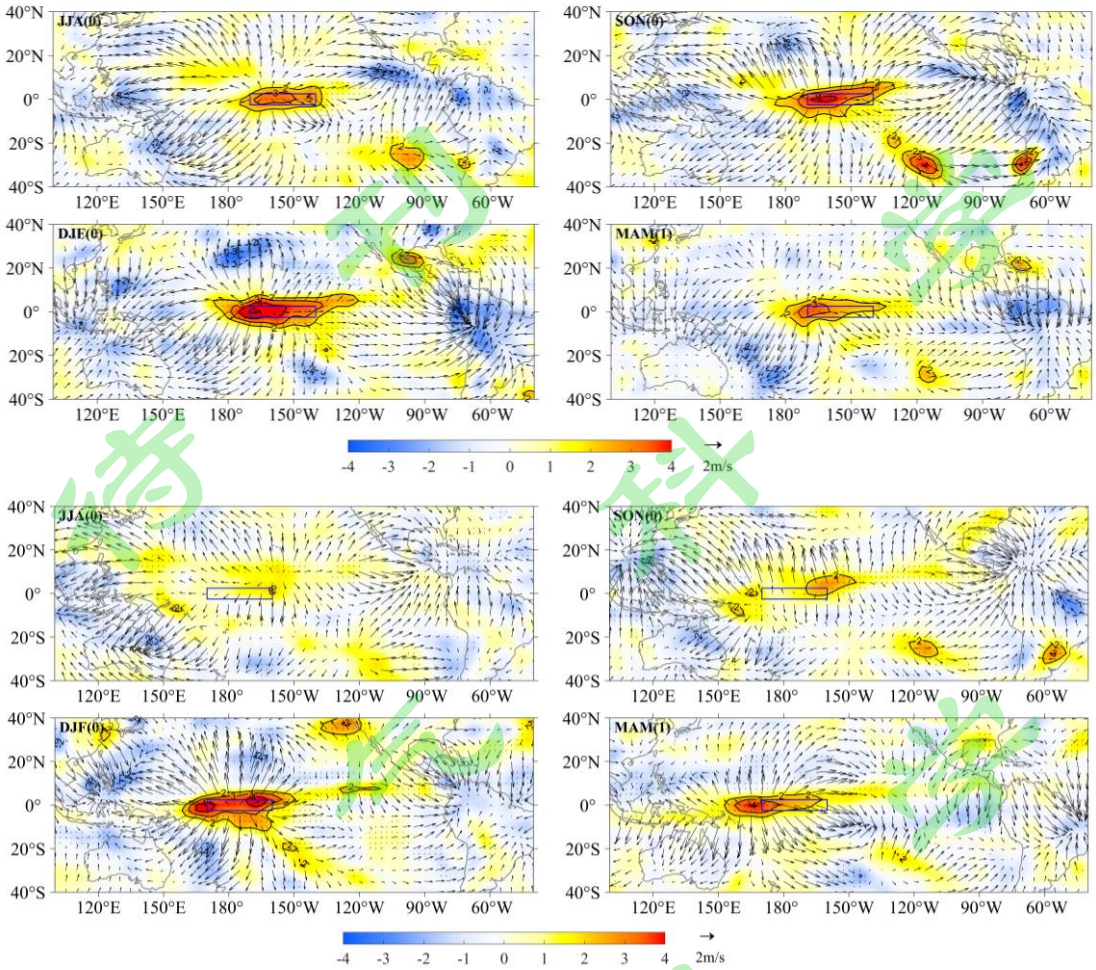


图 7 超强 El Niño（上），一般东部型 El Niño（中）和 El Niño Modoki（下）事件 500 hPa Omega（单位：-10^{-2} Pa s^{-1}）和 200 hPa 散度风（单位：m s^{-1}）异常（三类事件矩形区域分别为：150 °W ~ 120 °W，2.5 °S ~ 2.5 °N; 170 °W ~ 140 °W，2.5 °S ~ 2.5 °N；170 °E ~ 160 °W，2.5 °S ~ 2.5 °N，打点区域通过 95% 显著性检验）

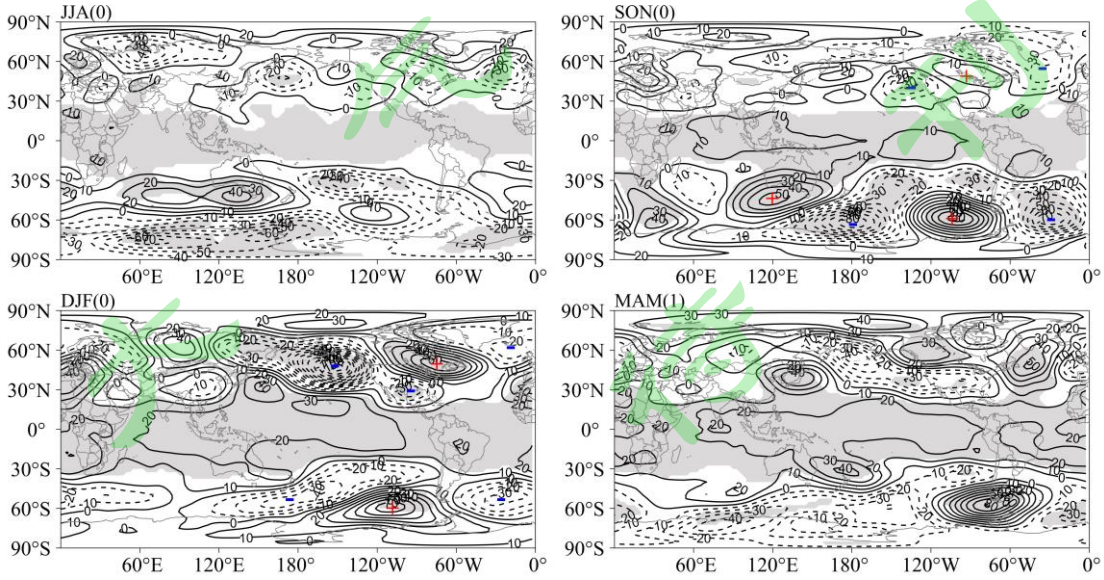
Fig.7 The 500 hPa Omega (units: -10^{-2} Pa s^{-1}) and 200 hPa divergence wind (units: m s^{-1}) anomalies in Super El Niño (top), general Eastern El Niño (middle) and El Niño Modoki (bottom) (rectangular regions in three types of events: 150 °W ~ 120 °W, 2.5 °S ~ 2.5 °N; 170 °W ~ 140 °W, 2.5 °S ~ 2.5 °N; 170 °E ~ 160 °W, 2.5 °S ~ 2.5 °N; the dotted regions denote exceeds the 95% confidence level)

4.2 中高纬度大气环流异常分析

赤道地区热源异常可以激发向中高纬度地区传播的遥相关波列，进而影响到当地的气候。El Niño 发生年夏季，北半球没有明显的遥相关波列，南半球太平洋-南美（Pacific-South American, PSA）遥相关波列也很弱（图 8）。

秋季，太平洋-北美（Pacific-North American, PNA）遥相关波列出现（图 8）。超强 El Niño 事件中，PNA 波列位置偏东，位势高度负异常中心位于阿拉斯加湾东南部，位势高度正异常中心位于北美东北部，导致北美大槽减弱，引起北美大陆秋季偏暖（图 5a）。南半球 PSA 遥相关波列强度增强，澳大利亚南部位势高度异常正中心导致澳大利亚高压偏强，造成高温干旱（图 5a）。一般东部型事件，PNA 波列位置较超强 El Niño 事件偏西，位势高度负异常中心位于阿拉斯加湾西侧，阿留申低压加强，其东侧偏南风将暖水带向阿拉斯加湾，使得阿拉斯加州上空高压脊加强，导致北美大槽加深，将北极冷空气带向北美大陆东部，造成秋季严寒（图 5d）。在 El Niño Modoki 事件中，PNA 波列最弱，位置更加偏西。

冬季，PNA 波列强度最强。超强 El Niño 事件中，美国南部出现次级位势高度负异常中心，五大湖以东是位势高度正异常中心，北美大槽显著偏弱（图 5），使得北美地区冬季温度持续偏高（图 5b）。一般东部型 El Niño 事件中，从阿拉斯加湾到美国东北部都是位势高度负异常，北美大槽显著加深，使北美冬季异常寒冷（图 5e）。在 El Niño Modoki 事件中，PNA 波列与一般东部型类似。且在一般东部型事件和 El Niño Modoki 事件中，北大西洋上空为明显的北大西洋涛动（North Atlantic Oscillation, NAO）负位相特征，容易导致亚欧大陆中纬度地区气温偏低（武炳义和黄荣辉, 1999; Buchan et al., 2014; Graf et al., 2012）。但在超强事件中，北大西洋上空并没有 NAO 特征，亚欧大陆北部冬季气温显著偏高。



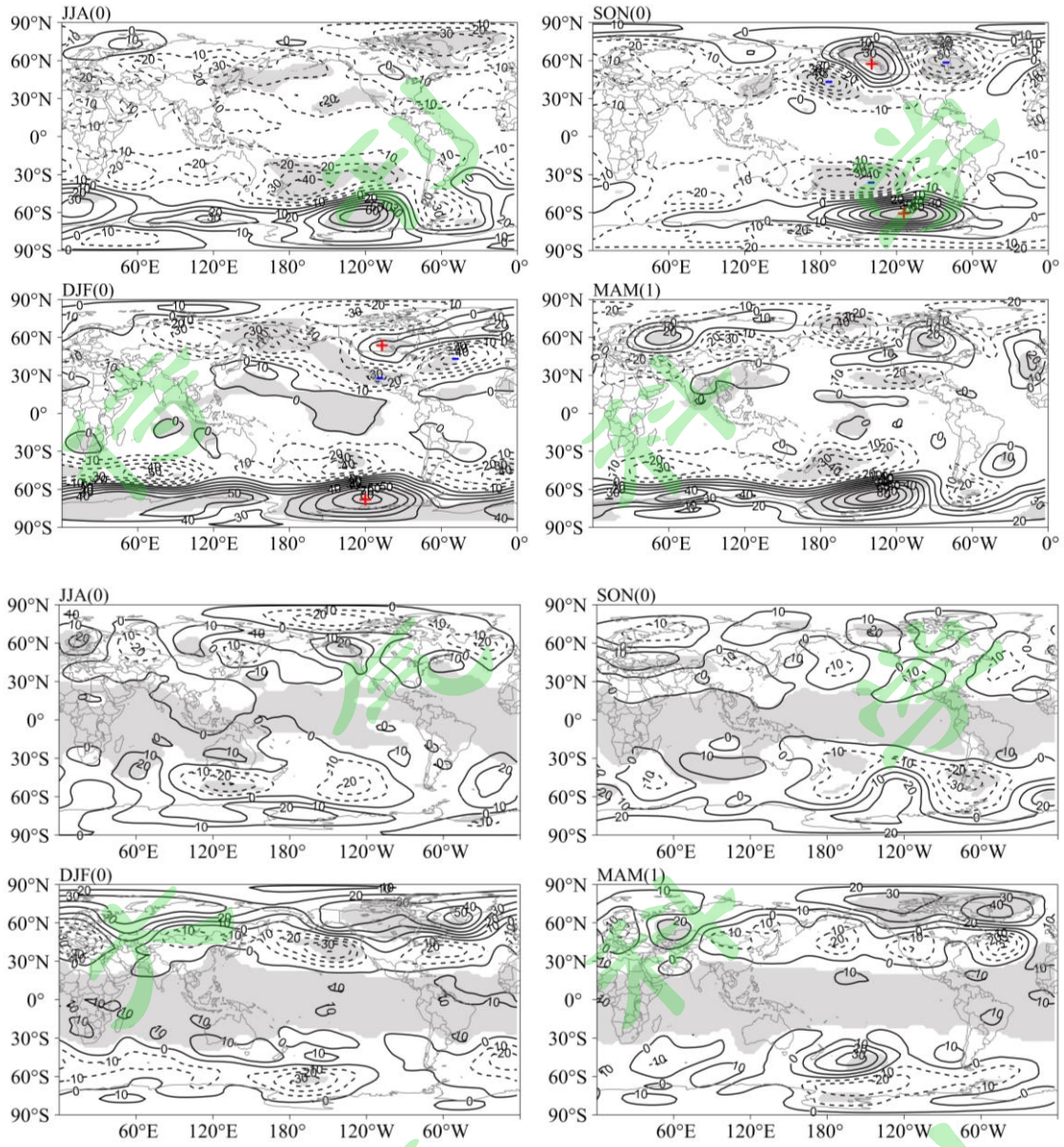


图 8 超强 El Niño（上），一般东部型 El Niño（中）和 El Niño Modoki（下）事件 500 hPa 位势高度异常（单位：gpm，灰色阴影区通过 90%显著性检验）

Fig. 8 The 500 hPa geopotential height anomalies of Super El Niño (top), general Eastern El Niño (middle) and El Niño Modoki (bottom) events (units: gpm, the gray shading denotes exceeds the 90% confidence level)

4.3 Rossby 涡度源和波活动通量分析

根据涡度源公式，当辐散，散度风，绝对涡度和绝对涡度梯度大时，涡度源强。计算秋冬季的 200 hPa Rossby 涡度源和波活动通量，发现在三种情况下，涡度源和波活

动通量异常存在明显差异，且涡度源异常主要由涡旋拉伸项贡献，涡度平流项作用可忽略（图略）。

秋季，超强 El Niño 事件在副热带西北太平洋的正涡度源异常明显，一般东部型事件正涡度源异常偏弱，纬度偏低。波活动通量从副热带太平洋向东北方向传播，传播路径与 PNA 波列形状吻合。El Niño Modoki 事件中涡度源和波活动通量不明显。冬季，随着太平洋异常对流发展，副热带辐散加强，超强事件在副热带北太平洋出现最强正涡度源异常，在墨西哥西南侧有另一较强负涡度源异常（图 7）。波能量从副热带北太平洋向北美传播，从墨西哥湾沿北美东海岸向高纬地区传播（图 9d）。一般东部型事件，北太平洋异常涡度源偏弱，波能量从副热带北太平洋向北美大陆传播，在北美东海岸转向赤道大西洋传播（图 9e）。而 El Niño Modoki 事件中，位于副热带太平洋的异常正涡度源明显偏西偏弱，波能量最弱，传播路径与一般东部型事件类似（图 9f）。正涡度源异常下游对应着位势高度负异常中心，负涡度源异常下游是位势高度正异常中心，超强 El Niño 事件秋冬季 PNA 波列偏东，北美大槽减弱，一般东部型事件 PNA 波列偏西，北美大槽加强。对于欧亚地区，超强事件冬季波能量从北美东海岸向高纬地区传播，导致格陵兰岛到西欧北部位势高度负异常，北欧高压脊减弱，欧亚大陆北部偏暖。而一般东部型和 El Niño Modoki 事件，波能量从北美东海岸向低纬地区传播，在北大西洋表现为 NAO 负位相，使得亚欧大陆中纬度地区偏冷（武炳义和黄荣辉, 1999; Buchan et al., 2014）。对于南半球，秋季波活动通量和遥相关波列最显著。超强 El Niño 事件中，澳大利亚东部到新西兰为负涡度源异常中心，热带中太平洋为正涡度源异常中心，波能量分别向东南方向传播。一般东部型事件，澳大利亚东部负涡度源异常明显偏弱，波能量从热带中太平洋向东南传播，El Niño Modoki 的波活动通量最弱。南半球负涡度源异常下游位势高度降低，因此造成的类 PSA 波列形状有所差异，但是对中高纬度澳大利亚和南美气候影响差异不大。

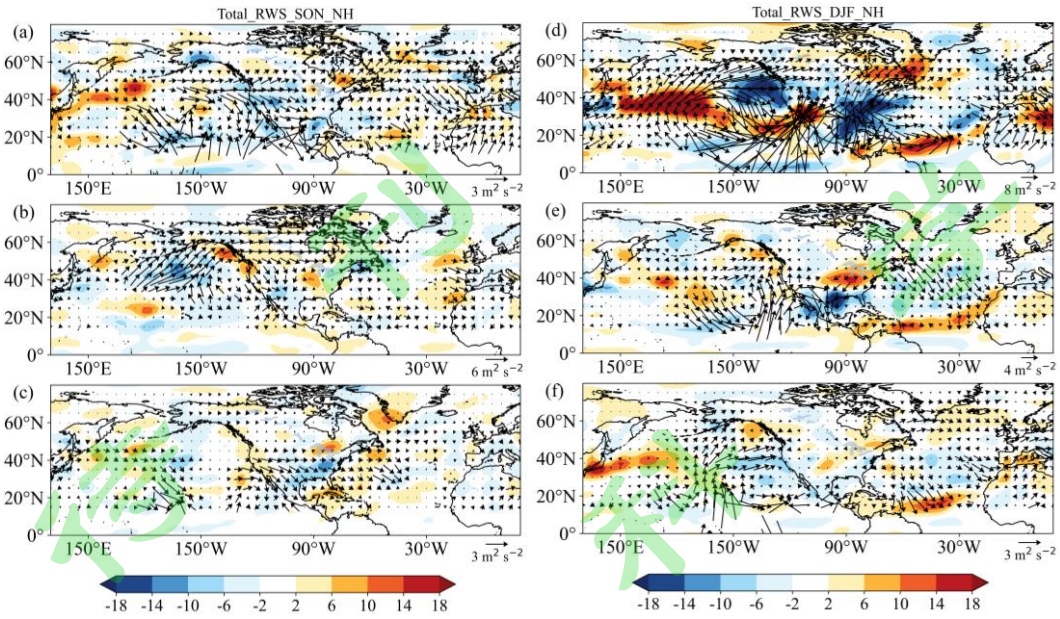


图 9 秋冬季北半球 200 hPa Rossby 涡度源（单位：10^{-11} s^{-2}）和波活动通量（单位：m^2 s^{-2}）异常（超强事件: a, d; 东部型事件: b, e; 和 El Niño Modoki: c, f）

Fig. 9 Rossby wave source and wave activity flux anomalies at 200 hPa in SON and DJF (a, d: Super El Niño, b, e: general Eastern El Niño, c, f: El Niño Modoki)

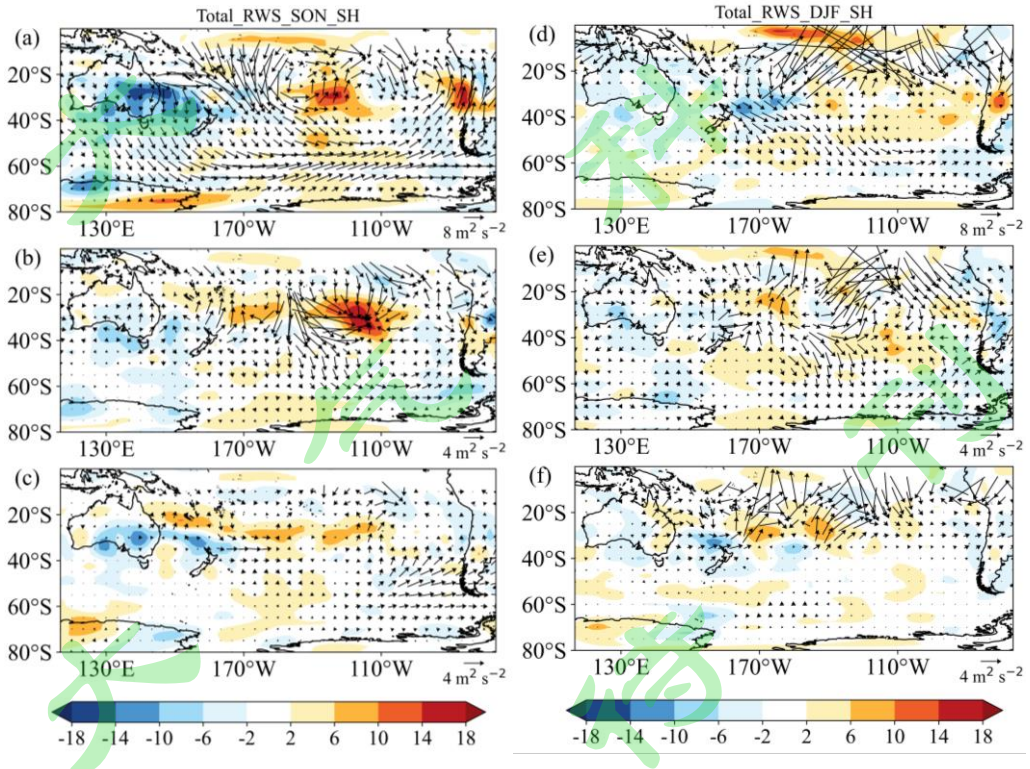


图 10 同 9，但为南半球

Fig. 10 As in Fig. 9, but for Southern Hemisphere

比较同类 El Niño 事件南北半球遥相关波列强度的季节变化，发现 PNA 波列强度在冬季最强，而 PSA 波列在秋季最强（图 8）。Lee et al.（2008）指出背景西风和强垂直风切变是遥相关波列向中高纬度地区传播的必要条件。在北半球中纬度纬向垂直风切变和西风急流在冬季最强，南半球在秋季最强（图 11）。因此冬季有利于北半球波能量向高纬度地区传播，而秋季有利于波能量向南半球高纬度地区传播。

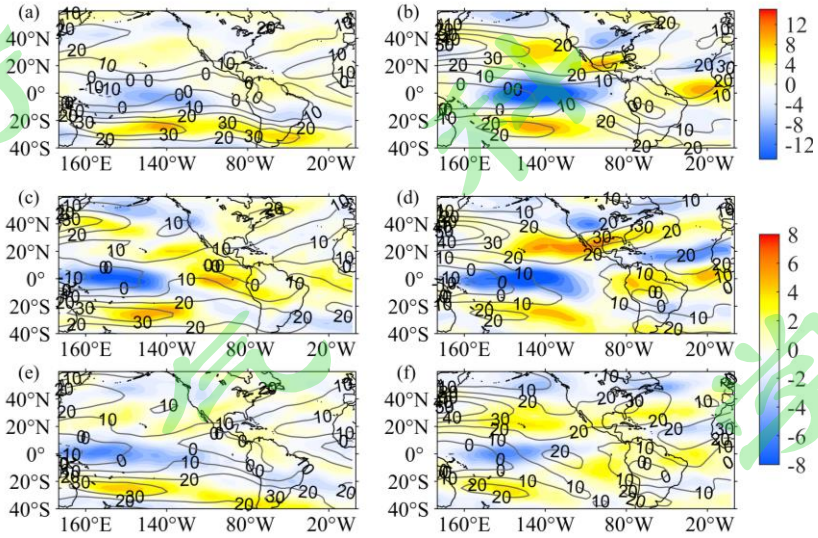


图 11 超强 El Niño（a, b），一般东部型 El Niño（c, d）和 El Niño Modoki（e, f）事件发展年秋季和冬季 300 hPa 纬向风（填色，单位：m s^{-1}）和 300 hPa ~ 850 hPa 垂直纬向风切变（等值线，单位：m s^{-1}）

Fig. 11 The 300 hPa zonal wind (shading, units: m s^{-1}) and vertical wind shear (contours, units: m s^{-1}) between 300 hPa ~ 850 hPa in SON and DJF of Super El Niño (a, b), general Eastern El Niño (c, d) and El Niño Modoki (e, f) events

5 结论

本文利用 1979~2019 年 NOAA 月平均 OLR 资料，1960~2019 年 NCEP/NCAR，ERA5 月平均再分析资料和 CRU 地表气温观测资料，选取 14 次 El Niño 事件，采用合成分析的方法，探究了热带太平洋异常对流活动纬向位置不同的 El Niño 事件对大气环流和区域气候的影响，得到以下结论：

（1）基于热带太平洋异常对流活动的纬向位置，研究 El Niño 事件对大气环流的

影响，可以发现 1982/1983，1997/1998，2015/2016 年三次超强 El Niño 事件、一般东部型 El Niño 事件和 El Niño Modoki 事件，赤道异常对流活动分别位于 150°W~120°W，170°W~140°W，170°E~160°W 之间。这解决了以往基于 SST 异常位置分类（Kao and Yu, 2009；Kug et al., 2009）时，超强事件与一般东部型事件为同一类事件，但两者造成的区域气候异常不同之间的矛盾。避免了利用 SST 异常反映大气对流异常存在的局限性（Chiodi and Harrison, 2010, 2013）。

（2）El Niño 事件对区域气候的影响取决于赤道异常对流活动的纬向位置。异常对流最为偏东的超强 El Niño 事件中，热带东西太平洋异常下沉区偏东，澳大利亚和巴西东北部秋冬季高温干旱严重，秘鲁和厄瓜多尔沿岸降水偏多。一般东部型事件中，热带东西太平洋异常下沉区较超强事件偏西，澳大利亚北部及西北部、南美西北部秋冬季干旱持续，澳大利亚东部降水正常偏多，这与以往研究发现东部型事件造成澳大利亚东部干旱的结果不同（Wang and Hendon, 2007; Taschetto and England, 2009）。异常对流偏西的 El Niño Modoki 事件中，热带东西太平洋对流下沉区更偏西，使得秘鲁和厄瓜多尔沿岸降水偏少。澳大利亚从秋季到次年春季被异常反气旋持续控制，导致长时间干旱。中高纬度地区，PNA 波列的位置由赤道异常对流纬向位置决定。超强 El Niño 事件中，PNA 波列位置偏东，使得北美大槽显著减弱，冬季北美大陆气温明显偏高（Paek et al., 2017; Anyamba et al., 2019）。一般东部型事件中，PNA 波列位置略偏西，使得北美大槽加深，北美东部出现严寒。El Niño Modoki 事件中，PNA 波列更偏西，使得冬季北美东南部气温偏低。有研究表明，ENSO 事件对欧洲-大西洋地区大气环流的影响是不确定和非平稳的，相关性不显著（Greatbatch et al., 2004; Bronnimann, 2007），Feng 等（2017）发现在中部型事件中出现类似北极涛动型遥相关，而在本研究中发现，一般东部型和 El Niño Modoki 事件冬季，大西洋呈现为 NAO 负位相，导致亚欧大陆中纬度地区气温偏低。

参考文献(References)

Anyamba A, Chretien J P, Britch S C, et al. 2019. Global disease outbreaks associated with the 2015-2016 El Niño event [J]. Sci. Rep-UK, 9(1): 1930.

Anderson W, Seager R, Baethgen W, et al. 2017. Crop production variability in North and South America forced by life-cycles of the El Niño Southern Oscillation [J]. Agr. Forest. Meteorol., 239:

151-165.

Bronnimann B. 2007. Impact of El Niño-Southern Oscillation on European climate [J]. *Rev. Geophys.*, 45(3), RG3003.

Buchan J, Hirschi J. Blaker J, et al. 2014. North Atlantic SST Anomalies and the Cold North European Weather Events of Winter 2009/10 and December 2010 [J]. Monthly Weather Review, 142(2), 922-932.

陈幸荣, 王彰贵. 2003. 西风爆发、次表层暖水东移与厄尔尼诺现象[J]. 海洋学报, 25(1): 19-27. Chen Xingrong, Wang Zhanggui. 2003. Westerly anomaly, eastward propagation of the subsurface temperature anomaly and El Niño event [J]. Acta. Oceanol. Sin. (in Chinese), 25(1): 19-27.

Chiodi A M, and Harrison D E. 2010. Characterizing warm-ENSO variability in the equatorial Pacific: An OLR perspective [J]. *J. Clim.*, 23(9), 2428-2439.

——, and ——. 2013. El Niño impacts on seasonal U.S. atmospheric circulation, temperature, and precipitation anomalies: The OLR-event perspective [J]. J. *Clim.*, 26(3), 822-837.

范蕙君, 李修芳. 1985. 西北太平洋热带辐合带三维结构分析[J]. 海洋预报服务, 2(2): 19-25. Fan Huijun, Li Xiufang. 1985. An analysis of the Three-Dimensional structure of ITCZ over NW Pacific [J]. Marine Forecast Servce (in Chinese), 2(2): 19-25.

Feng J, Chen W, and Li Y. 2017. Asymmetry of the winter extra-tropical teleconnections in the Northern Hemisphere associated with two types of ENSO [J]. *Clim. Dyn.*, 48(7-8), 2135-2151.

Fu Z, Joseph F. 1985. Two patterns of equatorial warming associated with El Nino[J]. Chinese Sci. Bull., 30(10): 1361-1364.

傅云飞, 黄荣辉. 1996. 热带太平洋西风异常对 ENSO 事件发生的作用[J]. 大气科学, 20(6): 641-654. Fu Yunfei, Huang Ronghui. 1996. The Effect of the Westerly Anomalies over the Tropical Pacific on the Occurrence of ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20(6): 641-654.

Garreaud R D, and Wallace J M. 1997. The diurnal march of convective cloudiness over the Americas [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 3157-3171.

____, and ____. 1998. Summertime incursions of midlatitude air into subtropical and tropical South

America [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 2713-2733.

Graf H F, Zanchettin D. 2012. Central Pacific El Niño, “the subtropical bridge”, and Eurasian climate [J]. J. Geophys. Res., 117(D1): D01102.

Greatbatch R J, Lu J, and Peterson K A. 2004. Nonstationary impact of ENSO on Euro-Atlantic winter climate [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31(2), L02208.

Iizumi T, Luo J J, Challinor A J, et al. 2014. Impacts of El Niño Southern Oscillation on the global yields of major crops [J]. Nat. Commun., 5(1): 3712.

蒋尚城. 1994a. 第五讲 OLR 反演热带散度风及垂直环流[J]. 气象, 20(3): 50-56. Jiang Shangcheng. 1994. Lecture 5 Retrieval of tropical divergence wind and vertical circulation by OLR [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 20(3): 50-56.

将尚城. 1994b. 我国 OLR 应用研究的进展[J]. 气象科技, 1: 1-9. Jiang Shangcheng. 1994. Progress of OLR application research in China [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 1: 1-9.

Johnna M, Infanti B P, Kirtman. 2016. North American rainfall and temperature prediction response to the diversity of ENSO [J]. Clim. Dyn., 46(9): 3007-3023.

Kao H Y, Yu J Y. 2009. Contrasting eastern-Pacific and central-Pacific types of ENSO [J]. J. Climate, 22(3): 615-632.

Kug J S, Jin F F, An S I. 2009. Two types of El Niño events: Cold tongue El Niño and warm pool El Niño [J]. J. Climate, 22(6): 1499-1515.

Lau K M, Wu H T and Bony S. 1997. The role of large-scale atmospheric circulation in the relationship between tropical convection and sea surface temperature[J]. *J. Clim.*, 10(3), 381-392.

Lee S K, Wang C Z, Mapes B E. 2008. A simple atmospheric model of the local and teleconnection responses to tropical heating anomalies [J]. J. Climate, 22: 272-284.

Leblanc M J, Tregoning P, Ramillien G, et al. 2009. Basin-scale, integrated observations of the early 21st century multiyear drought in southeast Australia [J]. Water Resour. Res., 45(4): W04408.

李海燕, 孙家仁, 谌志刚, 等. 2019. 两类 El Niño 事件对华南前汛期降水异常的影响[J]. 热带气象学报, 35(4): 491-503. Li Haiyang, Sun Jiaren, Chen Zhigang, et al. 2019. Influences of two

types of El Niño events on precipitation anomalies in the April-June rainy season over south China [J]. J. Tro. Meteorol. (in Chinese), 35(4): 491-503.

李海燕, 张文君, 何金海, 等. 2016. SST 年循环对 E1Nino 事件局地海气过程的影响[J]. 海洋学报, 38(1): 56-68. Li Haiyan, ZhangWenjun, He Jinhai, et a1. 2016. Influence of SST annual cycle on local air-sea processes during E1 Nino events [J]. Haiyang Xuebao (in Chinese), 38(1): 56-68.

Paek H, Yu J Y, Qian C. 2017. Why were the 2015/2016 and 1997/1998 extreme El Niños different? [J]. Geophys. Res. Lett., 44(4): 1848-1856.

Peng X, Miller R L. 2008. Abrupt Seasonal Migration of the ITCZ into the Summer Hemisphere [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 65(6), 1878-1895.

Philander S G H. 1983. Anomalous El Niño of 1982-83 [J]. Nature, 305(5929): 16.

Potgieter A B, Hammer G L, Meinke H, et al. 2005. Three putative types of El Niño revealed by spatial variability in impact on Australian wheat yield [J]. J. Climate, 18(10): 1566-1574.

钱代丽, 管兆勇. 2018. 超强与普通厄尔尼诺海-气特征差异及对西太平洋副热带高压的不同影响[J].气象学报, 76(03)394-407. Qian Daili, Guan Zhaoyong. 2018. Different features of super and regular El Niño events and their impacts on the variation of the West Pacific Subtropical High [J]. Acta. Meteorol. Sci. (in Chinese), 76(03)394-407.

秦坚肇, 王亚非. 2014. 构建描述两种 ENSO 类型的新指数[J]. 气象学报, 72(3): 526-541. Qin Jianzhao, Wang Yafei. 2014. Construction of new indices for two types of ENSO events [J]. Acta. Meteorol. Sci. (in Chinese), 72(3): 526-541.

Sardeshmukh P D, Hoskins B J. 1988. The Generation of Global Rotational Flow by Steady Idealized Tropical Divergence [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 45(7), 1228-1251.

隋晓霞, 王启. 2011. 北太平洋热带辐合带区上升运动的季节和年际变化特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 41(04): 19-27. Sui Xiaoxia, Wang Qi. 2011. The Seasonal and Interannual Features of Ascending Motion Intensity and Position in the Intertropical Convergence Zone in the North Pacific [J]. Periodical of Ocean University of China (in Chinese), 41(40): 19-27.

Takaya K, Nakamura H. 2001. A formulation of a phase-independent wave-activity flux for stationary

and migratory quasigeostrophic eddies on a zonally varying basic flow [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 58(6), 608-627.

Taschetto A S, England M H. 2009. El Niño Modoki impacts on Australian rainfall [J]. J. Clim., 22(11): 3167-3174.

van Dijk A I J M, Beck H E, Crosbie R S, et al. 2013. The Millennium Drought in southeast Australia (2001-2009): Natural and human causes and implications for water resources, ecosystems, economy, and society [J]. Water Resour. Res., 49(2): 1040-1057.

王彰贵，蔡怡，张丽. 1998. 1997/98年厄尔尼诺特征及97年气候异常[J].海洋预报, 15(3): 124-131. Wang Zhanggui, Cai Yi, Zhang Li. 1998. Characteristics of El Niño in 1997/98 and climatic anomalies in 1997 [J]. Marine Forecasts (in Chinese), 15(3): 124-131.

Wang G, Hendon H H. 2007. Sensitivity of Australian rainfall to inter-El Niño variations [J]. J. Clim., 20(16): 4211- 4226.

Weng H, Ashok K, Behera S K, et al. 2007. Impacts of recent El Niño Modoki on dry/wet conditions in the Pacific rim during boreal summer [J]. Clim. Dyn., 29(2-3): 113-129.

Weng H, Behera S K, Yamagata T. 2009. Anomalous winter climate conditions in the pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events [J]. Clim. Dyn., 32(5): 663-674.

武炳义,黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风[J].大气科学, 06: 641-651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon [J].Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), 06: 641-651.

袁良，何金海. 2013. 两类ENSO对我国华南地区冬季降水的不同影响[J].干旱气象, 31(1): 24-31. Yuan Liang, He Jinhai. 2013. Different Impacts of Two Types of ENSO on Winter Rainfall over South China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 31(1): 24-31.

袁媛，杨辉，李崇银. 2012. 不同分布型厄尔尼诺事件及对中国次年夏季降水的可能影响[J]. 气象学报, 70(3): 467-478. Yuan Yuan, Yang Hui, Li Chongyin. 2012. Study of El Niño events of different types and their potential impact on the following summer precipitation in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70(3): 467-478.

袁媛，高辉，贾小龙，等. 2016. 2014-2016年超强厄尔尼诺事件的气候影响[J].气象，42(5):

532-539. Yuan Yuan, Gao Hui, Jia Xiaolong, et al. 2016. Influences of the 2014-2016 Super El Niño Event on Climate [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 42(5): 532-539.

Yu J Y, Y Zou, S T Kim, T Lee. 2012. The changing impact of El Niño on US winter temperatures [J]. Geophys. Res. Lett., 39(15): L15702.

郑冬晓，杨晓光. 2014. ENSO 对全球及中国农业气象灾害和粮食产量影响研究进展[J].气象与环境科学, 37(4): 90-101. Zheng Dongxiao, Yang Xiaoguang. 2014. Advances on Effect of ENSO on Agro meteorological Disasters and Crop Yields of the World and China [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 37(4): 90-101.

翟盘茂，余荣，郭艳君，等. 2016. 2015/2016 年强厄尔尼诺过程及其对全球和中国气候的主要影响[J]. 气象学报, 74(3): 309-321. Zhai Panmao, Yu Rong, Guo Yanjun, et al. 2016. The strong El Niño in 2015/2016 and its dominant impacts on global and China's climate [J]. Aata. Meteorol. Sin. (in Chinese), 74(3): 309-321.