

宗海锋. 2017. 两个典型 ENSO 季节演变模态及其与我国东部降水的联系 [J]. 大气科学, 41 (6): 1264–1283. Zong Haifeng. 2017. Two typical ENSO seasonal evolution modes and their relations with rainfall over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (6): 1264–1283, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16279.

两个典型 ENSO 季节演变模态及其与我国东部降水的联系

宗海锋

中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 本文根据 1950~2014 年月平均海温和大气环流资料以及中国 160 站降水等资料, 利用扩展经验正交函数 (EEOF) 分析、相关分析以及合成分析等方法, 分析了太平洋海温季节演变的主导模态, 并探讨了各模态与中国东部降水和东亚环流季节变异的关系及其联系的物理过程。结果表明, ENSO (El Niño/Southern Oscillation) 季节演变存在 2 个主导模态, 包含 4 种类型: El Niño 持续型、La Niña 持续型、La Niña 转 El Niño 型和 El Niño 转 La Niña 型。发现不同模态和类型的 ENSO 季节变化过程我国东部降水距平的分布和强度都有明显差异。El Niño 持续型和 El Niño 转 La Niña 型, 冬春季和初夏均处在 El Niño 背景下, 降水异常分布存在一定共性, 但盛夏和秋季分别受 El Niño 和 La Niña 影响, 降水异常分布差异十分明显, 前者雨带北跳慢、位置偏南而后者雨带北跳快、位置偏北。La Niña 持续型和 La Niña 转 El Niño 型也是如此, 冬春季和初夏降水异常分布大致相似, 但盛夏和秋季分别受 La Niña 和 El Niño 影响, 前者雨带北跳快、位置偏北而后者雨带北跳慢、位置偏南。因此, 利用 ENSO 做我国降水的气候预测时, 不能只着眼于前期冬季 El Niño 或 La Niña 事件, 还应考虑其未来演变所属的可能模态和类型。对他们之间联系的物理过程分析表明, 不同 ENSO 季节演变模态和类型主要通过影响西太平洋副热带高压以及西风带经向型/纬向型环流调整及伴随的低纬暖湿水汽输送以及中高纬冷空气活动变化来影响我国东部降水。其中, 西太平洋菲律宾群岛附近异常反气旋 (或气旋)、赤道 Walker 环流和北半球 Hadley 环流分别是联系 ENSO 与西太平洋副热带高压活动和东亚西风带经向型/纬向型环流的重要环节。

关键词 ENSO 季节演变 模态和类型 中国东部降水

文章编号 1006-9895(2017)06-1264-20

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16279

Two Typical ENSO Seasonal Evolution Modes and Their Relations with Rainfall over Eastern China

ZONG Haifeng

International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The author analyzed the main seasonal evolution modes of the Pacific sea surface temperature and their relations with the seasonal evolution of rainfall over eastern China and the atmospheric circulation over East Asia as well as the related physical processes by applying extended empirical orthogonal function (EEOF) analysis, correlation analysis, and composition analysis, etc, using the datasets of monthly sea surface temperature, atmospheric circulation,

收稿日期 2016-12-05; **网络预出版日期** 2017-04-18

作者简介 宗海锋, 男, 1975 年出生, 副研究员, 主要从事气候变化、海气相互作用、短期气候预测研究。E-mail: zhfh@mail.iap.ac.cn

项目资助 国家科技支撑计划项目 2015BAC03B03, 国家自然科学基金项目 41375055

Funded by National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant 2015BAC03B03), National Natural Science Foundation of China (Grant 41375055)

and monthly rainfall of 160 stations in China. The main results show that there are two dominant modes in the seasonal evolution of ENSO (El Niño/Southern Oscillation), including four types (El Niño persisting, La Niña persisting, La Niña switching to El Niño, and El Niño switching to La Niña). Obvious differences in the distribution and intensity of rainfall anomalies over eastern China are found between different modes and types of seasonal evolution of ENSO. For the types ENSO persisting and El Niño switching to La Niña, the distributions of rainfall anomalies are somewhat similar because both types occur under the background of El Niño in winter, spring, and early summer. But the distributions of rainfall anomalies are remarkably different in midsummer and autumn because they are under the influences of El Niño and La Niña, respectively. The rainbelt jumps northward slowly and is located further south for the former, whereas it jumps northward quickly and is located further north for the latter. The similar situation can be found for the types La Niña persisting and La Niña switching to El Niño, and the distributions of rainfall anomalies are somewhat similar in winter, spring, and early summer. But the rainbelt moves northward quickly and is located further north for the type La Niña persisting, while the opposite is true for the type La Niña switching to El Niño in midsummer and autumn. This is because rainfall is under the impacts of El Niño and La Niña respectively during that period. Therefore, not only the early signals of ENSO but also the possible evolution mode of ENSO should be considered in the prediction of rainfall over China under the influence of ENSO. The analysis of the physical processes that link different seasonal evolution modes and types of ENSO and rainfall over eastern China shows that different seasonal evolution modes and types of ENSO impact the distribution of rainfall over eastern China through influencing the western Pacific subtropical high and the zonal and meridional circulations in the westerly wind belt. The warm wet water vapor transport from low latitudes and cold air activities in the middle and high latitudes are also involved. The anti-cyclones (cyclones) over the Philippine islands and their adjacent regions, the equatorial Walker circulation, and the Northern Hemisphere Hadley circulation are important linkages between ENSO and the activity of the western Pacific subtropical high and the zonal, meridional circulations in the westerly wind belt.

Keywords ENSO, seasonal evolution, modes and types, rainfall over eastern China

1 引言

ENSO (El Niño/Southern Oscillation) 是预兆世界性气候异常最强的信号, 也是影响我国气候异常的一个主要物理因素 (刘永强和丁一汇, 1992; 邹力和倪允琪, 1997; 杨义文等, 1998; 朱乾根和徐建军, 1998; 金祖辉和陶诗言, 1999; Wu et al., 2003; 高辉和王永光, 2007; 宗海锋等, 2008)。自 20 世纪 70 年代以来, ENSO 对我国气候的影响及相关机制逐渐引起我国气象学者的关注。陈烈庭 (1977, 1982) 通过分析 El Niño 对我国夏季降水的影响以及他们之间联系, 揭示出 El Niño 是通过 Walker 环流、Hadley 环流以及西太平洋副热带高压对我国夏季降水产生滞后影响, 并指出海温变化超前约 3~5 个月。王绍武和朱宏 (1985) 指出东亚夏季低温与 El Niño 事件存在密切联系, 同时还指出他们之间的联系可能与西北太平洋的海温降低有关。Huang and Wu (1989) 研究发现在 ENSO 发展阶段夏季江淮流域多雨而衰减阶段夏季江淮流域少雨, 并指出了热带西太平洋海温异常导致菲律宾附近对流活动异常并造成夏季西太平洋副热带高压南北位置发生异常是 ENSO 影响我国夏季气候

变化的物理机制。刘永强和丁一汇 (1995) 发现 ENSO 发生的当年我国以少雨、低温为主, 而次年情况正好相反。陈文 (2002) 发现 El Niño 事件能显著影响东亚冬、夏季风循环并对其后的夏季降水造成影响, La Niña 事件的影响与 El Niño 事件的影响大致相反, 但不如 El Niño 显著。并指出这种影响时通过与 El Niño 或 La Niña 事件有关的海温异常来实现的。孙旭光和杨修群 (2005) 也发现 El Niño 不同发展阶段东亚冬、夏季风存在显著的异常特征。此外, 不同类型 (如中部型和东部型) 的 ENSO 其影响存在明显差异 (Peng et al., 2011; Xu et al., 2013)。

后来的研究进一步认识到 ENSO 现象不仅仅是 El Niño 事件, 而且是包括 El Niño 和 La Niña 事件的一种循环, 其平均周期约为 3~5 年, 并称之为 ENSO 循环。然而, 实际上不同的 ENSO 循环过程存在很大差别 (Capotondi et al., 2015), 具体表现在 El Niño (La Niña) 事件发展、演变的时间以及衰亡速度、增温 (降温) 开始区域很不一致。由美国气候预测中心制作的 1950 年以来历史 El Niño/La Niña 事件集 (Historical El Niño/La Niña episodes) 可以清楚地看到, 各 ENSO 事件的位相转换期存在很大差异。ENSO 循环周期短的年份, El Niño (La

Niña) 事件衰减非常迅速,基本上在春末夏初就已转成 La Niña (El Niño) 事件;周期长的年份变化比较缓慢,一般到盛夏仍处于正(负)海温距平;更有的 El Niño (La Niña) 一直维持,持续时间可达 1 年或以上;还有的 El Niño 与 La Niña 的转换期全年海温距平都很小,处于中性状态。这清楚地表明 El Niño (La Niña) 发展、维持和转变过程的多样性和复杂性。此外,不同 ENSO 循环所对应的海洋热状况以及大气环流异常分布特征也很不一样。Zhang et al. (1996) 通过对 1986/87 和 1991/92 两次 El Niño 事件期间东亚季风环流诊断分析发现,在 El Niño 事件成熟期东亚沿岸对流层低层有异常偏南风出现,由于前者成熟期在次年夏季故而导致东亚夏季风加强,而后者成熟期出现在冬季,故而东亚冬季风减弱。尽管他们关注的 El Niño 事件成熟期,实际上其研究结果也反映了 El Niño 事件持续时间对亚洲季风的影响。杨辉和李崇银(2005)揭示不同持续时间的 El Niño 事件发展演变期间,对流层低层风场和对流层高层的速度势场的距平有极显著差异。李琰等(2009)的数值实验结果则显示长江流域降水距平有随 El Niño 持续时间的缩短而减小的趋势。但总的来说,过去的研究多是从我国汛期降水对冬季 ENSO 盛期海温的时间遥响应特征及机理方面探讨 ENSO 对我国气候异常的影响,而针对不同 ENSO 季节演变类型与我国降水由冬至秋季季节演变的联系特征及物理过程的探讨的较少。显然,不同 ENSO 季节演变类型其海温及环流系统的异常分布和演变特征不同,其所造成的气候影响也必然存在一定的差异。因此,若能提取出 ENSO 季节演变的主要模态和类型,并找到各模态和类型背景下我国降水异常分布和季节演变特征以及他们之间联系的关键环节,无疑会有助于增进对我国雨带季节演变规律的了解,同时也有助于我国季节降水尤其是汛期夏季降水预测结果的改善和提高。

因此,本文的目的在于从 ENSO 循环复杂的 El Niño 与 La Niña 维持发展和相互转变的长期过程中提取一些重要模态,了解各模态时空变化的特征,及其与中国降水和东亚季风的关系,探讨他们之间联系的可能物理过程。

2 资料和方法

本文所用月平均海温和大气环流资料分别取

自 NOAA (美国国家海洋大气局) 提供的第 3b 版本的扩展重建海表温度资料 (Smith et al., 2008) 以及 NCEP/NCAR 再分析资料。此外,本文还使用了国家气候中心提供的中国 160 个台站月平均降水资料和 74 项大气环流指数,以及 NOAA 气候预测中心制作的 1950 年以来历史 El Niño/La Niña 事件集 (Historical El Niño/La Niña episodes)。

本文研究时段为 1951~2014 年,文中冬季为前 1 年 12 月至当年 2 月、春季为 3~5 月、夏季为 6~8 月、秋季为 9~11 月。

为找出 ENSO 季节演变的主要模态,本文使用了扩展经验正交函数 (EEOF) 分析方法分析了太平洋 ($106^{\circ}\text{E}\sim 98^{\circ}\text{W}$, $30^{\circ}\text{S}\sim 38^{\circ}\text{N}$, 网格距为 $4^{\circ}\times 4^{\circ}$, 共计 132 个格点) 冬季、春季、夏季和秋季海温标准化距平场,在进行 EEOF 分析之前对各季海温进行了线性趋势扣除处理 (原始数据减去其线性趋势,线性趋势的计算方法,详见魏凤英 (2007)), 以消弱太平洋海温线性趋势变化对 EEOF 结果带来的影响。此外,本文还使用了合成分析以及相关分析等方法进一步分析了与 ENSO 季节演变主要模态相关的海温、大气环流以及降水异常分布及演变。

3 ENSO 季节演变的主要模态和类型

图 1 为太平洋冬、春、夏和秋季海温标准化距平演变的前两个 EEOF 模态的空间分布及标准化时间系数。前两个模态的解释方差分别为 27.7% 和 18.7%, North 检验 (North et al., 1982) 表明这两个模态之间以及与其他模态均能有效分离。其他模态的解释方差与之相比要小很多 ($\leq 8.1\%$), 并且 North 检验表明他们之间无法有效分离。因此,本文主要针对前两个主模态展开分析和讨论。通过下面的分析,可以看到这两个模态实际就是 ENSO 季节演变的两个主要模态。

模态 1 各季的空间分布显示,无论是冬季 (图 1a), 春季 (图 1c), 还是夏季 (图 1e) 和秋季 (图 1g) 赤道中东太平洋地区始终为正的海温异常控制,而赤道西太平洋暖池区以及西风漂流区一直为负的海温异常控制。由冬季至秋季,太平洋海温异常分布始终表现为典型的 El Niño 盛期海温异常分布的特征。因此这一模态代表的是一类 El Niño 或 La Niña 由冬季持续至秋季的 ENSO 季节演变类型。我们称这一模态正、负位相对应的海温异常季节演变类型分别为 El Niño 持续型和 La Niña 持续型。模

态 1 (图 1i) 的时间系数表明, 该模态不仅具有明显的年际变化特征, 还表现出有明显的年代际变化特征, 1970 年代中期至 1990 年代末期, 正指数发生频繁且强度偏强, 而负指数发生少且强度较弱。正是在这一时期, ENSO 与中国东南部冬季降水相关进入偏弱期 (Li and Ma, 2012)。进入 21 世纪, 负指数发生频繁且强度偏强, 而正指数发生偏少且强度较弱。若以 1 个标准差为标准, 将时间系数大

于 1 个标准差的视为 El Niño 持续型的典型年份, 共有 10 年; 将时间系数小于负的 1 个标准差的视为 La Niña 持续型的典型年份, 共有 9 年 (见表 1)。

模态 2 各季的空间分布显示, 冬季 (图 1b) 赤道中东太平洋为负的海温异常控制, 而赤道西太平洋暖池区和西风漂流区为正的海温异常控制。太平洋海温异常分布呈现为典型的 La Niña 盛期的海温异常分布特征。春季 (图 1d) 太平洋海温正、负异

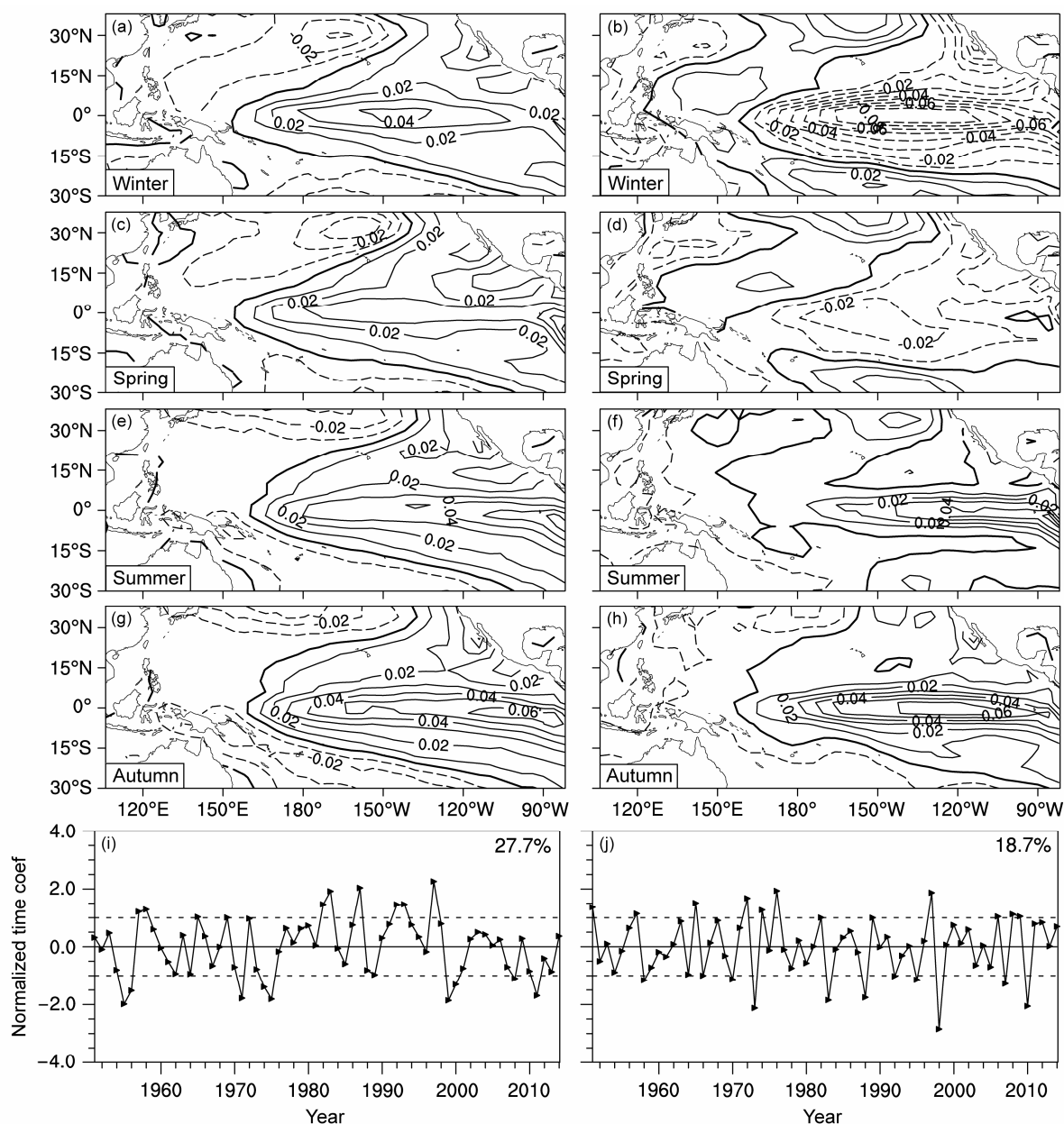


图 1 1951~2014 年 (a, b) 冬、(c, d) 春、(e, f) 夏、(g, h) 秋季的太平洋标准化海温距平 EEOF 分析第一模态 (EEOF1, 左列) 和第二模态 (EEOF2, 右列) 的空间分布及其 (i, j) 标准化时间系数。(a-h) 中的粗实线表示零线

Fig. 1 Spatial distributions and corresponding (i, j) normalized time coefficients of the first mode (EEOF1, left column) and second mode (EEOF2, right column) of the EEOF (extended empirical orthogonal function) analysis of standardized SST anomalies in (a, b) winter, (c, d) spring, (e, f) summer, and (g, h) autumn over the Pacific during 1951–2014. Thick solid lines represent the zero lines in (a–h)

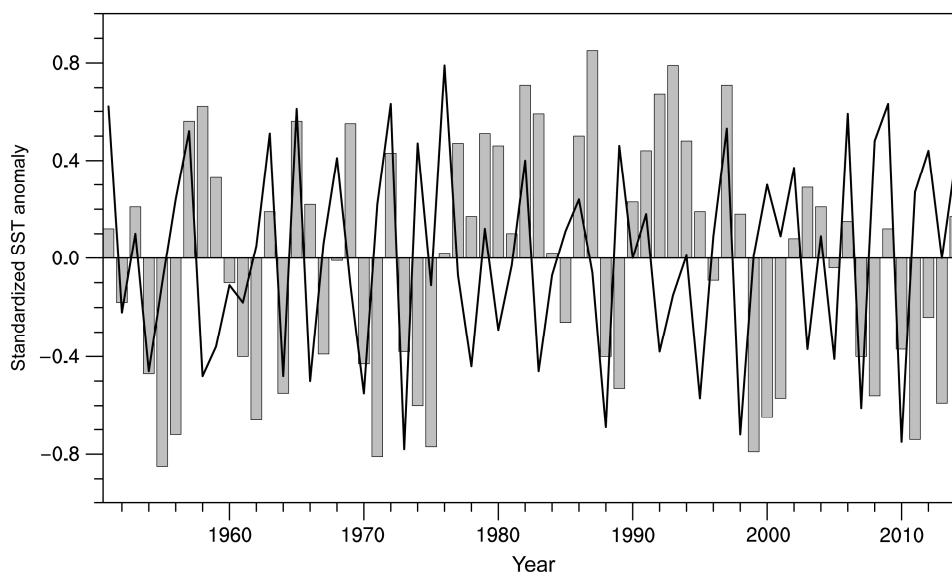


图2 1951~2014年冬、春、夏、秋季太平洋标准化海温距平场(已扣除线性趋势)与EEOF1(柱状)、EEOF2(曲线)空间场的相关系数

Fig. 2 Correlation coefficients between the standardized SST anomalies (linear trend removed) and the spatial fields of EEOF1 (bars) and EEOF2 (line) in winter, spring, summer, and autumn over the Pacific during 1951–2014

常强度明显减弱,意味着 La Niña 的衰减。夏季(图 1f)赤道中东太平洋海温距平符号发生翻转,转为正的海温距平控制,赤道西太平洋暖池区也由正海温距平转为负的海温距平,表明 El Niño 已经开始发展。而到了秋季(图 1h),赤道中东太平洋正的海温异常强度进一步加强,而赤道西太平洋暖池区和西风漂流区也完全转为负的海温距平控制,呈现为典型的 El Niño 盛期的海温距平分布特征。因此,该模态反映的是一类太平洋海温异常分布由冬季 La Niña 分布型到秋季转为 El Niño 分布型或由冬季 El Niño 分布型到秋季转为 La Niña 分布型的 ENSO 季节演变类型。我们称该模态的正、负位相对应的海温异常季节演变类型分别为 La Niña 转 El Niño 型和 El Niño 转 La Niña 型。模态 2(图 1j)的时间系数表明,该模态的年际变化特征尤为突出,但年代际变化特征不太显著。同样以 1 个标准差为标准,将时间系数大于 1 个标准差的视为 La Niña 转 El Niño 型的典型年份,共有 11 年;将时间系数小于负的 1 个标准差的视为 El Niño 转 La Niña 型的典型年份,共有 10 年(见表 1)。

以上太平洋海温季节演变模态是 EEOF 分析的结果,同美国气候预测中心基于 Niño3.4 区海温距平指数制作的 1950 年以来历史 El Niño/La Niña 事件集比较,可以看到他们之间有相当的一致性。一

般 El Niño 持续型, Niño3.4 区海温距平指数始终高于 0°C , 并且有 10 个月以上维持在 0.5°C 以上。La Niña 持续型, Niño3.4 区海温距平指数始终低于 0°C , 并且有 10 个月以上维持在 -0.5°C 以下。La Niña 转 El Niño 型和 El Niño 转 La Niña 型的转变期一般都出现在冬末至初夏期间。

为了确定每年 ENSO 季节演变所属类型,我们还逐年计算了冬、春、夏、秋季太平洋标准化海温距平扩展场与 EEOF1 和 EEOF2 空间场的相关系数(图 2)。假定相关系数绝对值大的模态即为该年的 ENSO 季节演变模态,而具体类型由相关系数符号确定。考虑到空间相关系数主要突出的是两个场的相似程度,但对关键区海温异常强度反映能力存在不足,我们根据美国气候预测中心制作的 1950 年以来的历史 El Niño/La Niña 事件集对前面 EEOF 模态的时间系数以及此处类型划分结果进行了修正。修正后得到的最终分型结果是: El Niño 持续型典型年份共 4 年,约占 6.3%; La Niña 持续型典型年份共 10 年,约占 15.6%; El Niño 转 La Niña 型典型年份共 10 年,约占总年数的 15.6%; La Niña 转 El Niño 型典型年份共 8 年,占 12.5%(见表 1)。其中, El Niño 持续型典型年出现次数明显少于 La Niña 持续型典型年,并且主要出现在 1980 年代及以前。La Niña 转 El Niño 型典型年和 El Niño 转 La Niña

型典型年的发生频次大致相当。

表 1 4 种 ENSO 季节演变类型的典型年份

Table 1 Typical years for the four seasonal evolution types of ENSO

类型	年份	总年数
El Niño 持续型	1957、1958、1965、1969、1982、1983、1987、1992、1993、1997	10
修正后的 El Niño 持续型	1953、1958、1969、1987	4
La Niña 持续型	1955、1956、1971、1974、1975、1999、2000、2008、2011	9
修正后的 La Niña 持续型	1955、1956、1971、1974、1975、1985、1999、2000、2008、2011	10
La Niña 转 El Niño 型	1951、1957、1965、1972、1974、1976、1982、1997、2006、2008、2009	11
修正后的 La Niña 转 El Niño 型	1951、1965、1968、1972、1976、1997、2006、2009	8
El Niño 转 La Niña 型	1958、1970、1973、1983、1988、1992、1995、1998、2007、2010	10
修正后的 El Niño 转 La Niña 型	1954、1964、1970、1973、1983、1988、1995、1998、2007、2010	10

图 3 是根据修正后的分型结果以及美国气候预测中心提供的 Niño3.4 海温距平指数，合成得到的前一年 9 月至当年 12 月 Niño3.4 区海温距平指数的时间演变曲线。由图 3a 可以看出，无论是 El Niño 持续型还是 La Niña 持续型，Niño3.4 区海温距平的演变均展示出其显著的持续性特征。而 La Niña 转 El Niño 型以及 El Niño 转 La Niña 型（图 3b）的演

变曲线也清楚地显示出 ENSO 两种不同位相在春季发生转变这一显著特征。

综上所述，无论是太平洋海温的季节演变模态，还是 Niño3.4 区海温距平指数的时间变化均表明 ENSO 存在两种主要季节演变模态，包含 4 种主要季节演变类型：El Niño 持续型、La Niña 持续型、El Niño 转 La Niña 型和 La Niña 转 El Niño 型。我们下面关于降水以及环流异常特征及演变的讨论主要基于以上 4 种 ENSO 季节演变类型，期望能够从中发现不同 ENSO 季节演模态和类型影响我国东部季节降水异常分布及演变特征以及他们之间联系的物理过程。

4 ENSO 不同模态下中国东部各季降水异常演变的特征

我们从复杂的 ENSO 季节演变过程中提取了 ENSO 季节演变的 2 个主要模态和 4 种类型。本节将进一步考察不同 ENSO 季节演变模态和类型对应的我国东部各季降水异常分布及演变的特征，并结合 1951~1990 年四季的中国气候灾害分布图集（中国科学院大气物理研究所等，1997）探讨其与我国东部旱涝分布的关系。

图 4 给出的是模态 1 中 El Niño 持续型和 La Niña 持续型对应的中国东部各季降水距平百分率及其时间系数与中国东部各季降水的相关系数分

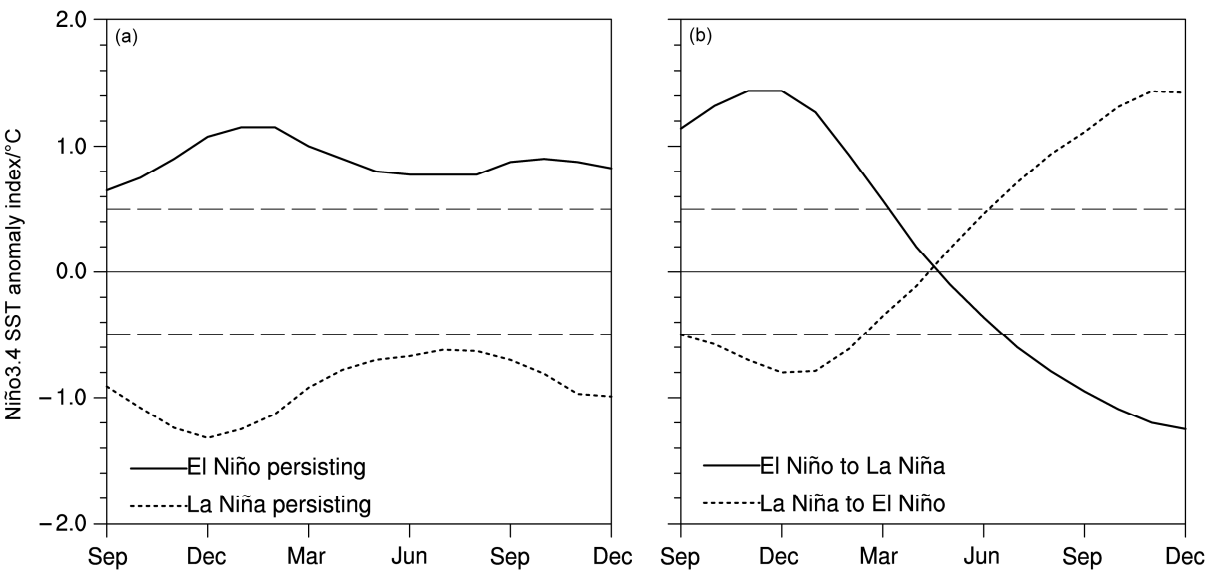


图 3 1951~2014 年不同 ENSO 季节演变类型前一年 9 月至当年 12 月 Niño3.4 区海温距平指数的时间演变：(a) El Niño 持续型和 La Niña 持续型；(b) La Niña 转 El Niño 型和 El Niño 转 La Niña 型

Fig. 3 Temporal evolutions of Niño 3.4 SST anomaly index from September of the previous year to December of the same year for different seasonal evolution types of ENSO during 1951–2014: (a) El Niño persisting and La Niña persisting; (b) La Niña switching to El Niño and El Niño switching to La Niña

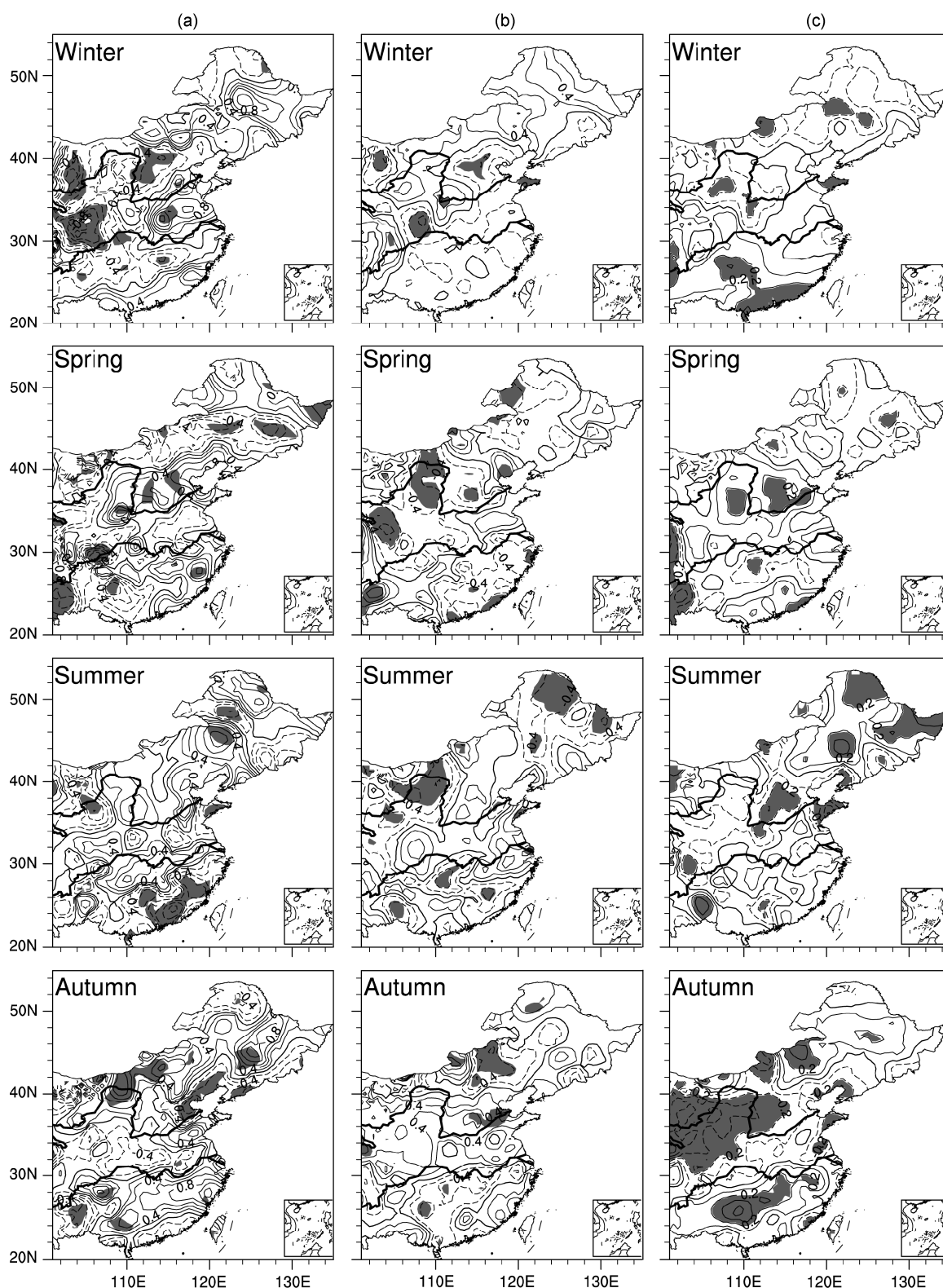


图4 1951~2014年EEOF1中(a) El Niño持续型和(b) La Niña持续型中国东部各季降水标准化距平合成及(c) EEOF1的时间系数与中国东部各季降水的相关系数分布。阴影区为降水标准化距平或相关系数超过90%信度水平的区域。粗实线表示零线

Fig. 4 Composites of standardized seasonal rainfall anomalies in eastern China corresponding to types (a) El Niño persisting and (b) La Niña persisting of EEOF1 and (c) correlation coefficients between time coefficients of EEOF1 and seasonal rainfall over eastern China. Shaded areas represent the standardized rainfall anomalies or correlation coefficients above 90% confidence level. Thick solid lines represent the zero lines

布。可以看出, El Niño 持续型(图 4a): 冬季我国东部华南地区、长江与黄河之间的东部和东北中部地区降水异常偏多。这些多雨区的西侧从北到南大部分地区降水偏少, 西北、西南地区往往出现干旱。呈现“东多西少”的降水异常分布特征。春季降水分布仍是“东多西少”, 江南地区除华南降水仍偏多外, 江南北部降水由偏少转为偏多, 往往提前入汛。夏季东亚季风雨带的位置持续比常年同期明显偏南, 长江流域梅雨期持续时间偏长, 降水异常偏多, 往往出现梅涝。华北和东北部分地区降水也明显偏多, 黄淮地区降水偏少, 如 1969 年夏季(中国科学院大气物理研究所等, 1997)。秋季, 雨带继续比常年同期偏南, 江南地区再次出现降水明显偏多。因此, 在 El Niño 持续型的气候背景下, 我国东部各季降水比常年同期明显偏多, 并呈现“东多西少”的分布特征。

La Niña 持续型(图 4b), 与图 4a 比较可以发现, 本型各季降水距平的分布与 El Niño 持续型的非常相似, 只是符号相反, 呈现“东少西多”的降水分布特征。并且大部雨区降水距平的强度比 El Niño 持续型的要弱得多。冬季除从四川经河套至内蒙古东部和东北部分地区降水偏多外, 我国东部从北到南大部地区降水都偏少, 尤其是河北、山东和华南一些地区, 往往出现旱情。春季除我国西南地区降水偏多外, 其余大部分地区降水继续偏少, 主要少雨区仍在东南沿海和内蒙古、东北等地区, 容易出现旱情。夏季东亚季风雨带位置持续比常年同期明显偏北。梅雨期主要雨带在长江以北, 长江以南各省尤其是两湖地区梅雨期偏短, 降水异常偏少。盛夏华北降水偏多, 往往出现“南旱北涝”, 如 1971 年夏季(中国科学院大气物理研究所等, 1997)。秋季雨带仍然比常年偏北, 在西北东部、黄淮和江淮一带降水明显偏多, 其南北两侧江南北部和内蒙古一些地区降水偏少。也就是说, 在 La Niña 持续性的气候背景下, 我国东部各季降水距平的分布和变化与 El Niño 持续型的影响之间是完全相反的表现。

图 5 为模态 2 中 La Niña 转 El Niño 型和 El Niño 转 La Niña 型对应的中国东部各季降水距平百分率及其时间系数与中国东部各季降水的相关分布。La Niña 转 El Niño 型(图 5a)的冬季, 在 La Niña 的影响下, 除河套、山西和东北南部一带降水明显偏多外, 我国东部其余大部分地区降水却异常偏少。主要少雨区在江南大部地区、内蒙古和黄淮流域。

春季江南少雨区北移至江淮流域, 黄河以北地区降水也明显偏少。初夏梅雨期仍受 La Niña 的滞后影响, 东亚夏季风雨带比常年同期偏北, 淮河流域和东南沿海降水偏多, 长江流域降水明显偏少, 往往出现干旱。后期盛夏转受 El Niño 的影响, 东亚夏季风雨带偏南, 造成黄淮地区多雨, 华北少雨, 如 1965 年和 1972 年夏季(中国科学院大气物理研究所等, 1997)。秋季在 El Niño 的影响下, 雨带比同期偏南, 江南和华南降水异常偏多, 而长江流域以北大部地区降水明显偏少。

El Niño 转 La Niña 型(图 5b)与图 5a 相比较, 同样可以看出, 本型各季降水距平的分布与 La Niña 转 El Niño 的情况也基本相反。冬季在 El Niño 的影响下, 江南大部地区和内蒙古一带降水异常偏多。长江与黄河之间西部和东北部分地区降水偏少。春季江南多雨区北移到长江中下游附近。初夏梅雨期受 El Niño 的滞后影响, 东亚夏季风雨带偏南, 江南北部尤其是两湖地区降水异常偏多, 往往出现洪涝。盛夏转受 La Niña 的影响, 东亚夏季风雨带迅速北跳到华北至东北南部一带, 降水异常偏多, 如 1954 年、1983 年和 1998 年夏季(中国科学院大气物理研究所等, 1997)。秋季在 La Niña 的影响下, 在华北中北部和环渤海地区降水偏多, 其南侧大部分地区降水偏少, 尤其是江淮和江南中部地区降水异常偏少, 往往出现秋旱。

另外, 我们还计算了图 1 中各模态的时间系数与我国东部各季降水的相关(图 4c 和图 5c)。其中他们的正时间系数分别对应于 El Niño 持续型和 El Niño 转 La Niña, 而负时间系数分别对应于 La Niña 持续型和 La Niña 转 El Niño。可以看出, 各模态下我国东部降水距平季节演变的主要特征与上述图 4a、4b 和图 5a、5b 的情况十分一致, 这也进一步证实了前面 ENSO 各模态降水异常分布的合成结果具有相当的代表性。合成和相关分析结果也清楚地表明, El Niño 持续型与 La Niña 持续型之间以及 La Niña 转 El Niño 型与 El Niño 转 La Niña 型之间我国东部各季降水异常分布和演变呈相反的趋势。

通过以上分析我们发现, 不仅 El Niño 事件与 La Niña 事件对我国旱涝的影响有显著不同, 而且他们之间相互转变的过程中, 不同的模态和类型与我国四季降水的关系也是有明显差异的, 尤其是在 El Niño 和 La Niña 盛期冬季及之后的夏、秋季。也就是说同是 El Niño 事件次年的夏季, El Niño 持续

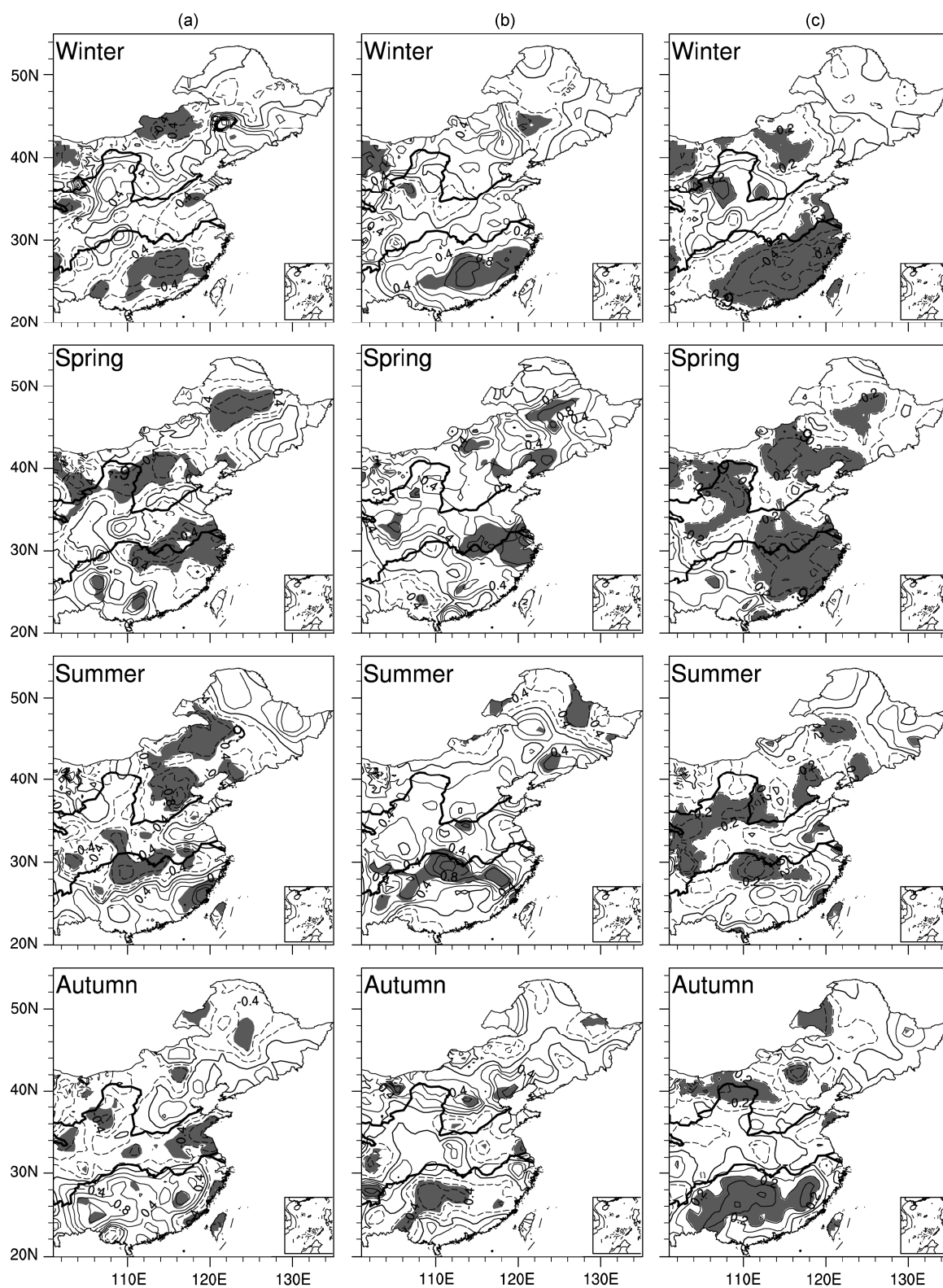


图5 同图4, 但为 EEOF2 中的 (a) La Niña 转 El Niño 型、(b) El Niño 转 La Niña 型中国东部各季降水标准化距平合成, (c) EEOF2 的时间系数与中国东部各季降水的相关系数分布

Fig. 5 As in Fig. 4, but for composites of standardized seasonal rainfall anomalies in eastern China corresponding to types (a) La Niña switching to El Niño, (b) El Niño switching to La Niña of EEOF2, (c) correlation coefficients between time coefficients of EEOF2 and seasonal rainfall over eastern China

型的气候背景有助于我国夏季风雨带位置始终比常年同期偏南, 长时间徘徊在长江流域附近, 致使该地区的降水异常偏多。秋季江南降水亦异常偏多。而 El Niño 转 La Niña 型前期受 El Niño 的滞后影响, 有助于夏季风雨带偏南, 而后期转受 La Niña 的影响雨带偏北, 形成南北两条雨带。致使梅雨期江南北部、盛夏华北到东北南部一带降水异常偏多。秋季江南降水异常偏少。同样, 同是 La Niña 事件次年的夏季, La Niña 持续型有助于夏季风雨带位置始终比常年同期偏北, 梅雨期长江以北地区降水偏多。盛夏华北地区降水异常偏多。江南地区始终降水异常偏少, 呈现“南旱北涝”的降水分布特征。秋季江南地区降水异常偏少。而 La Niña 转 El Niño 型前期受 La Niña 的滞后影响, 有助于夏季风雨带位置偏北, 后期转受 El Niño 的影响, 夏季风雨带偏南。造成淮河流域和东南沿海地区降水异常偏多, 长江中上游和华北地区降水异常偏少。秋季江南降水异常偏多。与 El Niño 转 La Niña 型呈完全相反的变化趋势。但在冬、春季同是 El Niño 事件或同是 La Niña 事件, 不同模态对我国东部降水的影响具有一定的共同特征。即 El Niño (La Niña) 事件的冬、春季我国江南、华南降水都是偏多 (偏少)。因此, 利用 ENSO 信号做我国东部季节降水尤其是夏、秋季降水的气候预测时, 不能只着眼于前期冬季 El Niño 或 La Niña 信号, 还要考虑其未来演变的可能模态和类型。

5 ENSO 不同模态亚—太地区大气环流演变特征

上一节探讨了不同 ENSO 季节演变模态和类型与我国东部各季降水异常分布的关系以及差异。现在我们来分析与 ENSO 各模态相关的一些环流系统的配置和演变的特征, 包括与 ENSO 各模态相关的北方涛动在菲律宾群岛附近和东北太平洋的两个大气活动中心 (Chen, 1984), 赤道太平洋的异常西风 and 东风以及对我国降水异常分布有直接影响的西太平洋副热带高压 (以下简称副高) 和东亚中高纬度的一些环流系统。为此, 我们合成得到了 ENSO 各模态和类型对应的冬、春、夏和秋季 850 hPa 风场距平和 500 hPa 位势高度及其距平分布 (图 6~9)。另外, 为了确切地了解不同模态与副高活动的联系, 我们还合成得到了副高强度指数、副高北界指数以及副高西伸脊点指数 (均作了 3 月滑动平均

处理) 的演变曲线 (图 10)。

图 6 是 EEOF1 中 El Niño 持续型对应的各季节 850 hPa 风场距平 (图 6a) 和 500 hPa 位势高度及其距平 (图 6b)。可以看出, 在低层 850 hPa 层上, 冬季菲律宾群岛附近和北太平洋地区东北部和分别处在异常反气旋和强异常气旋的控制。赤道地区, 中东太平洋盛行异常西风, 印度尼西亚和赤道印度洋盛行异常东风。这都是冬季 El Niño 盛期对流层低层典型的环流特征。其后春、夏和秋季这一环流形势始终维持, 只是中心位置和强度有所变化, 表明该年 El Niño 事件一直持续。在 El Niño 持续型的气候背景下, 冬季 500 hPa 的环流特征为东亚大槽偏弱偏东, 贝加尔湖高压脊也偏弱。北方冷空气势力不强, 活动路径偏北偏东。低层 850 hPa 层上, 我国东部沿岸地区为异常偏南风, 表明东亚冬季风偏弱。低纬地区, 副高强度偏强, 位置偏西、偏北 (图 10)。南方暖湿空气向北输送异常充分。这是造成 El Niño 持续年冬季我国中东部大部分地区降水比常年偏多, 并呈现“东多西少”分布的重要原因。春季欧亚中高纬度为明显的两槽一脊环流型。欧洲槽比常年明显偏强, 而东亚槽偏弱偏东, 贝加尔湖以西为弱高压脊控制。影响我国的冷空气多是从西路东移, 先影响我国北方, 后南下影响我国南方。低纬地区, 副高与冬季一样强度偏强, 位置偏西和偏北 (图 10)。El Niño 持续年春季我国江南和华南降水偏多, 同副高西北侧强盛的西南暖湿气流与北方南下的冷空气在该区交汇有密切关系。夏季的环流形势与典型的梅雨流型相似, 中高纬度在东北亚沿岸维持有一稳定的阻塞高压, 乌拉尔山附近有强高压脊维持, 西风带锋区偏南。低纬地区, 副高各月持续偏强, 但位置转变为偏西偏南 (图 10)。这是 El Niño 持续年夏季造成雨带始终徘徊在长江流域附近和往往出现梅涝的主要原因。秋季亚洲中纬度地区, 东亚槽北缩, 里海附近为深槽区, 西风带形成“东高一西低”的环流形势, 影响我国的冷空气势力不是很强。低纬地区, 副高与夏季的一样为强度偏强, 位置偏西、偏南 (图 10)。北方冷空气与南方暖湿空气在江南交汇。这是 El Niño 持续年秋季我国江南降水异常偏多的重要原因。

图 7 是 EEOF1 中 La Niña 持续型对应的各季 850 hPa 风场距平 (图 7a) 和 500 hPa 位势高度及其距平图 (图 7b)。在低层 850 hPa 层上各季东北太平洋都是异常反气旋而菲律宾群岛附近为异常

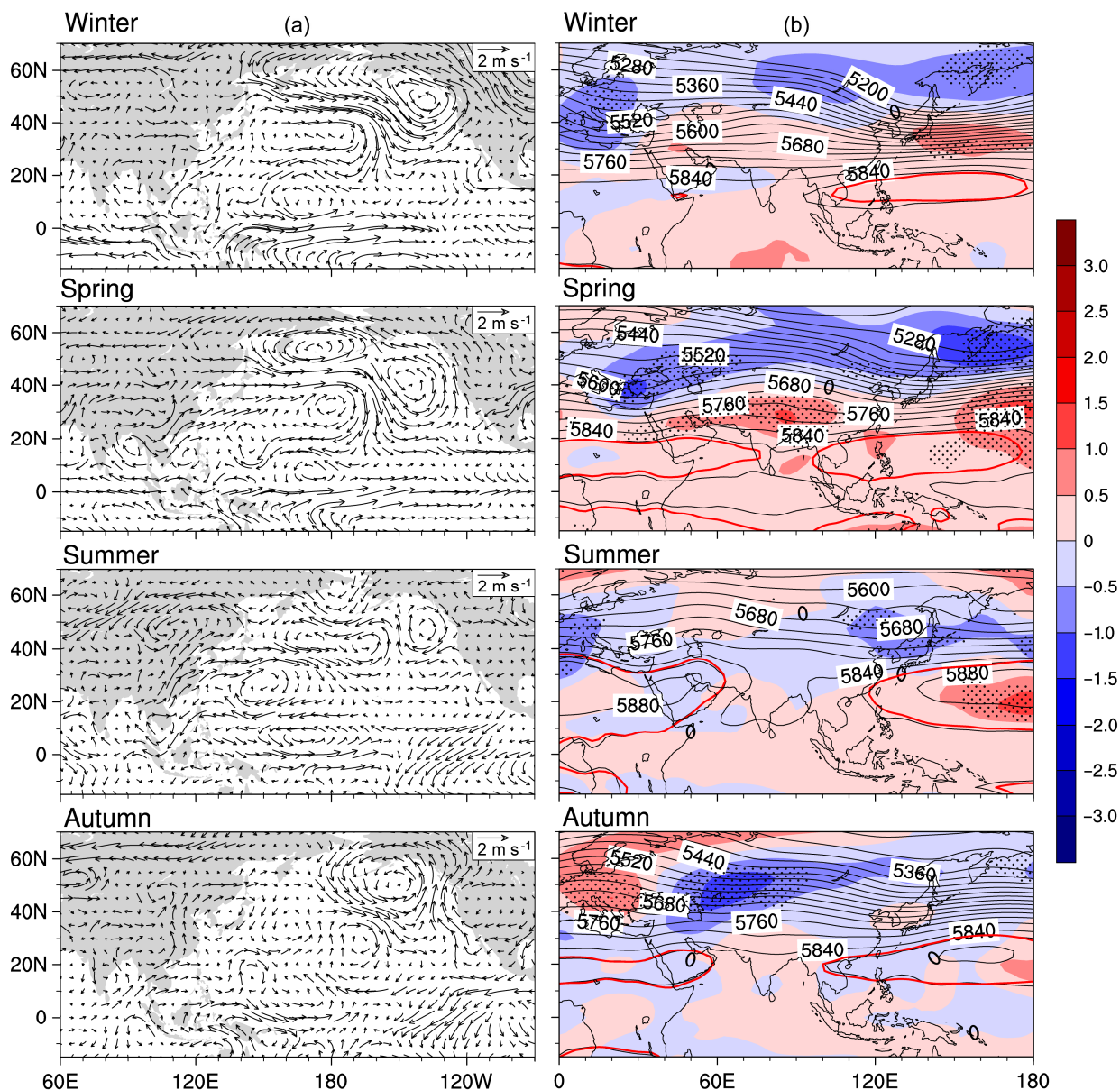


图6 EEOF1 中 El Niño 持续型对应的各季节 (a) 850 hPa 风场距平和 (b) 500 hPa 位势高度 (等值线, 单位: gpm) 及其标准化距平 (阴影)。图 b 中打点区域为位势高度标准化距平超过 90% 信度水平的区域, 红色线为气候平均的 5860 gpm 等值线

Fig. 6 Spatial distributions of seasonal (a) 850-hPa wind anomalies and (b) 500-hPa geopotential height (contours, units: gpm) and its standardized anomalies (shaded) for the El Niño persisting type of EEOF1. In Fig. b, dotted areas represent the standardized geopotential height anomalies above 90% confidence level, the red lines are the climatological 5860-gpm contours

气旋环流。赤道中东太平洋盛行异常东风, 印度尼西亚和赤道印度洋盛行异常西风。表明该年 La Niña 事件一直持续。在 La Niña 持续型的气候背景下, 在 500 hPa 层上, 冬季中高纬度东亚大槽和贝加尔湖高压脊明显偏强, 环流经向度较大。我国北方有较强冷空气沿东亚大槽槽后西北气流南侵。低层 850 hPa 层上, 我国东部沿海地区从华北到华南沿海为很强的异常北风控制, 表明东亚冬季风异常偏

强。低纬地区, 副高强度偏弱, 位置偏东、偏南 (图 10), 输向我国南方的暖湿空气异常偏弱。这是造成 La Niña 持续年冬季我国东部大部分地区降水偏少, 并呈“东南少—西北多”分布的主要原因。春季, 欧亚中高纬地区呈两槽一脊环流型, 欧洲槽偏强, 东亚槽位置略偏东, 两槽之间的高压脊也较明显。我国北方大部分地区处于脊前西北气流控制下, 冷空气活动比较活跃。低纬地区, 副高与冬季

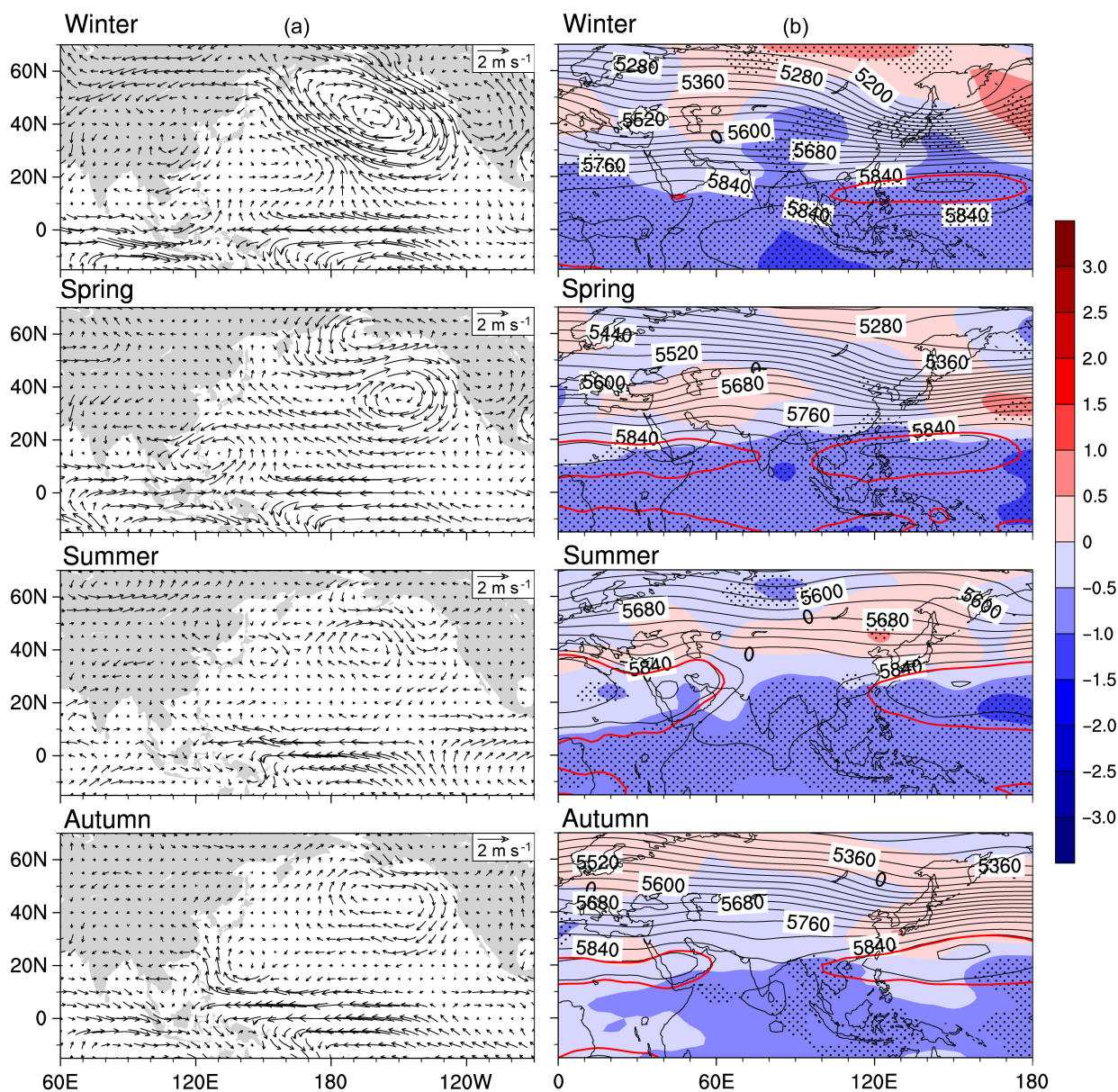


图 7 同图 6, 但为 EEOF1 中 La Niña 持续型

Fig. 7 As in Fig. 6, but for the La Niña persisting type of EEOF1

的一样, 强度偏弱, 位置偏东、偏南 (图 10)。不利于暖湿空气向我国输送, 从而导致我国东部大部分地区降水偏少。夏季欧亚中高纬地区, 欧洲和东亚分别有阻塞高压出现, 乌拉尔山附近为低压槽, 并且形势稳定。西风带较为平直, 冷空气活动势力不强。低纬地区, 副高强度仍然偏弱, 但位置转变为偏北、偏东 (图 10)。江南大部分地区受副高控制, 北方冷空气与西南暖湿气流在长江流域以北交汇。这是 La Niña 持续年造成主要雨带出现在长江流域以北和往往发生“南旱北涝”的主要原因。秋

季欧亚中高纬环流呈两槽一脊型。欧洲槽较弱, 东亚槽和贝加尔湖高压脊比较明显, 亚洲中高纬度锋区呈西北—东南走向, 冷空气活动势力略偏强。低纬地区, 副高与夏季的一样为强度偏弱, 位置偏北、偏东 (图 10)。我国南方部分地区为大陆高压控制。这是形成 La Niña 持续年秋季我国东部黄淮和江淮降水偏多, 其南、北两侧降水偏少的主要原因。

图 8 是 EEOF2 中 La Niña 转 El Niño 型对应的各季节 850 hPa 风场距平 (图 8a) 和 500 hPa 位势高度及其距平 (图 8b)。可以看出, 冬、春季北太

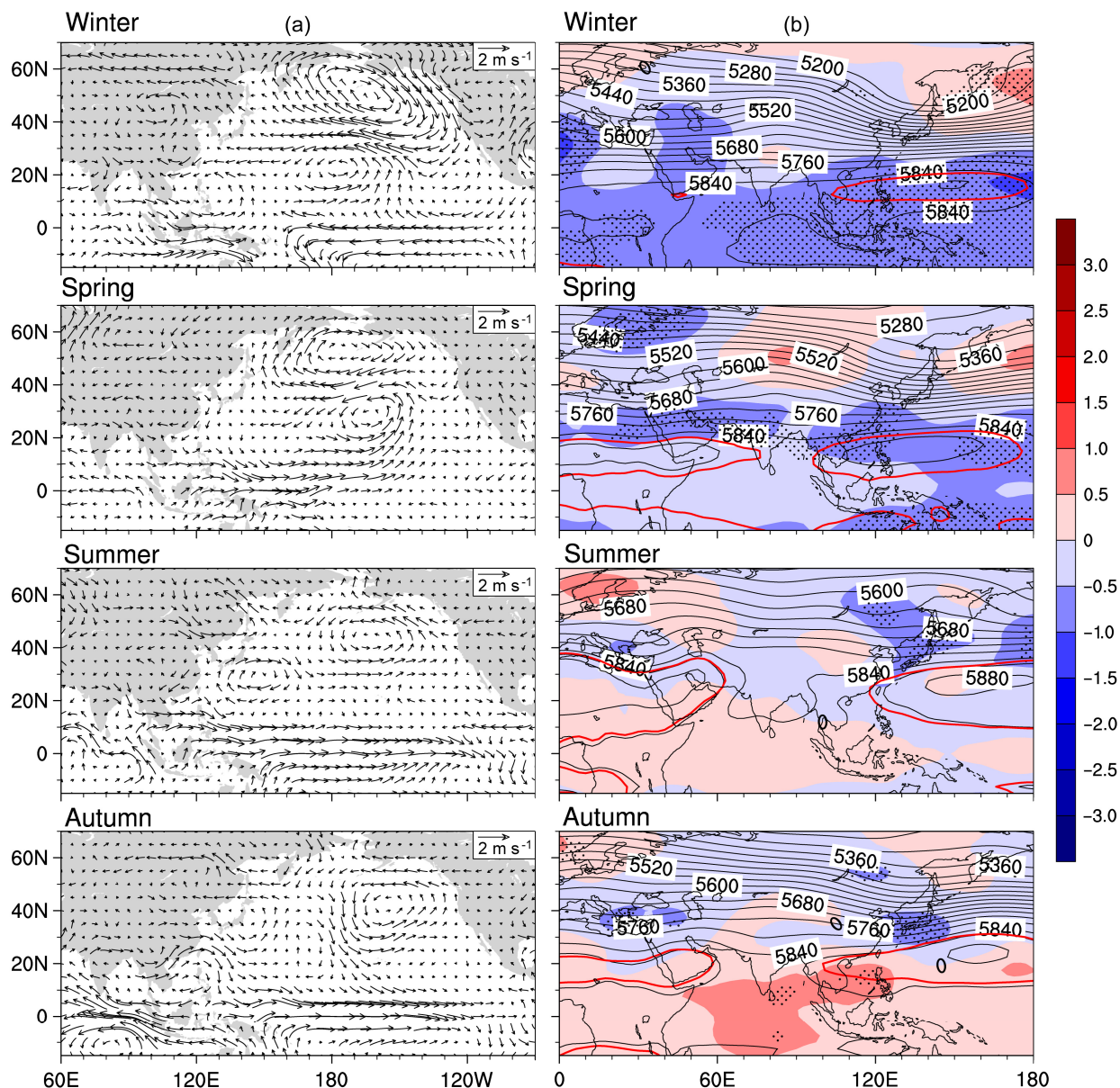


图8 同图6, 但为模式2中 La Niña 转 El Niño 型

Fig. 8 As in Fig. 6, but for the La Niña switching to El Niño type of EEOF2

平洋和赤道太平洋的环流均为典型的 La Niña 流型。夏季东北太平洋已由异常反气旋转变为异常气旋, 其南侧赤道中东太平洋地区由异常东风转为异常西风, 即已变成 El Niño 的环流特征, 使赤道东太平洋海温降低。但有意思的是西部菲律宾群岛附近的异常气旋及其南侧的异常西风并没有转变。这表明冬季的 La Niña 事件虽然一般在春季已经结束, 但其对西北太平洋环流的影响到夏季仍然存在。秋季整个北太平洋和赤道地区的环流都呈现出 El Niño 流型。在 La Niña 转 El Niño 型的气候背景

下, 500 hPa 层上冬季欧亚地区中高纬度的环流与 La Niña 持续型冬季的形势相近, 东亚大槽和贝加尔湖高压脊明显, 经向气流偏强, 亚冬季风偏强。低纬地区, 副高强度偏弱, 位置偏东、偏南(图10)。南方的暖湿气流异常偏弱。从而造成 La Niña 转 El Niño 型冬季我国东部大部分地区降水偏少。春季欧亚中高纬度地区呈两槽一脊环流型, 欧洲槽和东亚槽强度均偏强, 其间西西伯利亚地区高压脊也偏强, 环流经向度较大。亚洲西风带呈现“西高一东低”的环流分布形势, 我国北方受单一西北气流控

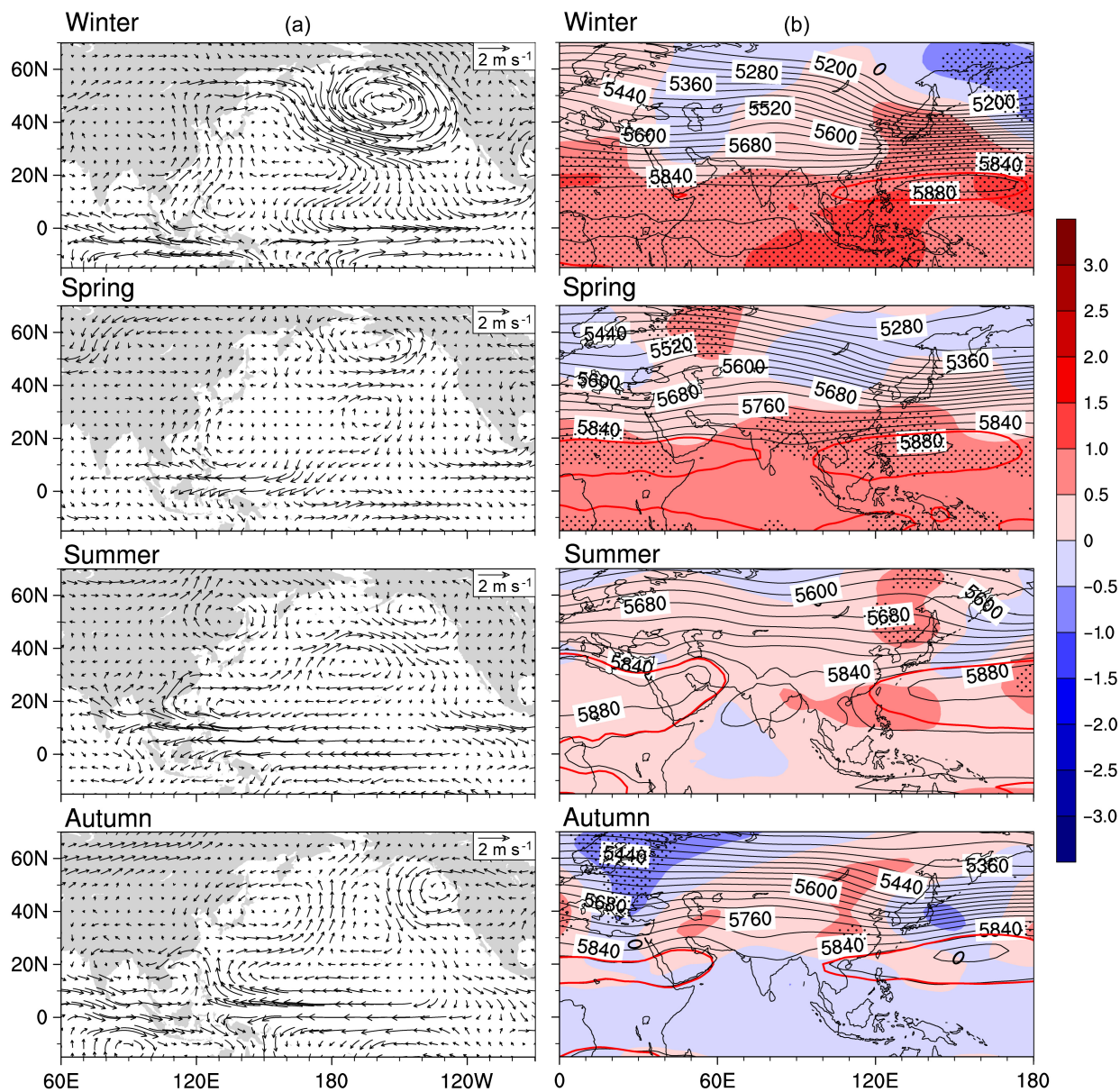


图9 同图6, 但为模态2中 El Niño 转 La Niña 型

Fig. 9 As in Fig. 6, but for the El Niño switching to La Niña type of EEOF2

制,这是造成 La Niña 转 El Niño 型春季我国北方大部分地区少雨的重要原因。低纬地区,副高强度仍偏弱,位置仍偏东偏南(图 10),这也是导致我国东部大部分地区降水偏少的重要原因。夏季中高纬地区欧洲和东亚分别有阻塞高压维持,形势稳定。贝加尔湖西侧为高压脊,我国东北为低压槽区,华北长时间处于槽后单一的冷气流中。低纬地区,受冬季 La Niña 的滞后影响,副高梅雨期强度偏弱,位置偏东、偏南(图 10)。低层 850 hPa 西太平洋热带辐合带(ITCZ)异常活跃,从我国南海经菲律

宾群岛向东一直伸展到 160°E 以东地区。亚洲沿岸从南向北呈异常“气旋—反气旋—气旋”的波列分布。长江流域降水偏少。盛夏,副高仍偏弱,位置转为偏西、偏南(图 10)。北方冷空气与南方暖湿气流在黄淮地区交绥致雨,而华北少雨。这是造成 La Niña 转 El Niño 型夏季我国东部往往长江流域和华北地区出现干旱而江淮、黄淮流域发生洪涝的主要原因。秋季,中高纬度 500 hPa 的环流形势与常年相近,但贝加尔湖西侧的高压脊和东亚槽明显偏强,我国北方受西北气流控制。低纬地区,由于转

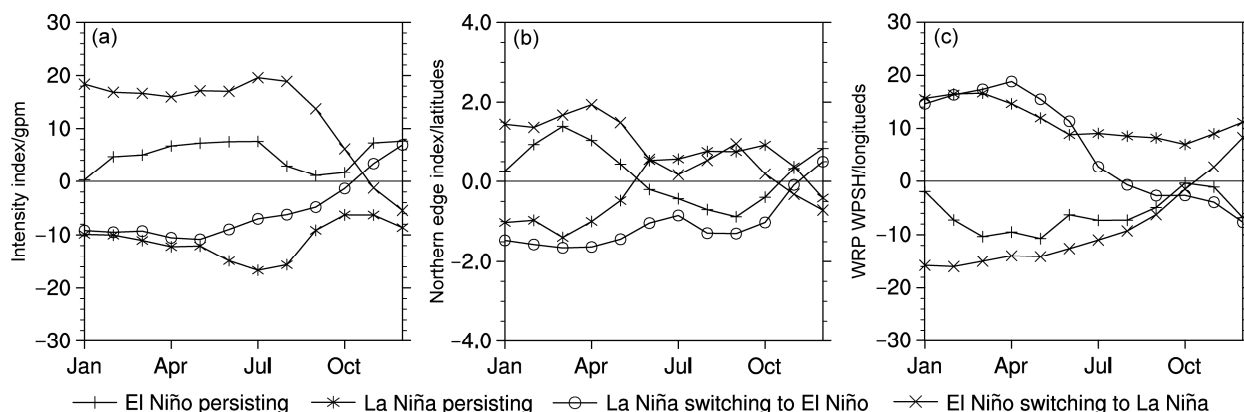


图 10 四种 ENSO 季节演变类型对应的副高 (a) 强度指数 (单位: gpm)、(b) 北界指数 (单位: latitudes) 和 (c) 西伸脊点 (单位: longitudes) 的时间演变

Fig. 10 Temporal evolutions of the (a) intensity indexes (units: gpm), (b) northern edge indexes (units: latitudes), and (c) westward ridge point (WRP, units: longitudes) of the western Pacific subtropical high (WPSH) for different seasonal evolution types of ENSO

受 El Niño 的影响, 副高位置变为偏西、偏南 (图 10)。南方暖湿空气向北输送偏弱, 主要降水出现在江南地区。这是造成 La Niña 转 El Niño 型秋季我国东部降水呈现“南多—北少”分布的重要原因。

图 9 是 EEOF2 中 El Niño 转 La Niña 型对应的各季节 850 hPa 风场距平 (图 9a) 和 500 hPa 位势高度及其距平 (图 9b)。低层 850 hPa 层上, 冬、春季北太平洋和赤道太平洋地区的环流均为典型的 El Niño 流型。夏季东北太平洋已由异常气旋转为异常反气旋, 其南侧赤道中东太平洋已由异常西风变为异常东风, 即已转成 La Niña 的环流特征, 使赤道东太平洋的海温下降。但西部菲律宾群岛附近的异常反气旋及其南侧的赤道异常东风不仅没有转变, 似乎还有所加强。这再次清楚地表明, 前期冬季的 El Niño 事件虽然在春季已经结束, 但对西北太平洋的环流到夏季仍然具有明显的影响。秋季整个北太平洋和赤道地区的环流呈现 La Niña 的流型特征。在 El Niño 转 La Niña 气候背景的影响下, 500 hPa 层上, 冬季中高纬环流与 El Niño 持续型冬季的形势相近, 东亚大槽明显偏北、偏东, 东亚冬季风偏弱。低纬地区, 副高强度偏强, 位置偏西、偏北 (图 10), 暖湿空气向北输送充分, 有利于我国东部尤其是江南地区降水异常偏多。春季欧亚中高纬地区呈一脊一槽的环流形势。乌拉尔山附近为强高压脊控制, 东亚为宽广低压槽控制。来自极地的冷空气沿脊前的西北气流南下, 引导冷空气影响我国东部地区。低纬地区, 副高异常偏强, 位置偏

西、偏北 (图 10), 西南暖湿气流活跃。这是造成我国黄淮、江淮东部降水异常偏多的主要原因。夏季欧亚中高纬度的环流与双阻型的梅雨环流形势相近。乌拉尔山和东亚沿岸地区各为一个稳定的阻塞高压, 两高压之间为低压槽区。从我国东北到长江流域有东北—西南向的低槽维持。低纬地区受 El Niño 的滞后影响, 副高梅雨期强度偏强, 位置偏西 (图 10)。低层 850 hPa 层上, 西太平洋 ITCZ 不活跃, 东亚沿岸从南向北呈现“反气旋—气旋—反气旋”的波列分布。这是造成 El Niño 转 La Niña 型梅雨期长江流域往往出现洪涝的重要原因。盛夏由于转受 La Niña 的影响副高强度虽然仍偏强, 但位置偏北、偏西 (图 10), 雨带北移到华北至东北南部一带。秋季欧亚中高纬度环流呈两槽—脊型, 东欧和东亚沿海为低槽区, 两槽之间为宽广的高压脊区。冷空气活动较为频繁, 但路径偏北, 主要影响我国北方地区, 给内蒙古、华北中北部以及东北地区带来明显降水。低纬地区副高仍是偏强, 位置偏北和偏西 (图 10)。并且南支槽位于印度北部, 向我国输送的水汽通道更为偏北, 从而造成我国南方大部分地区干旱少雨, 而北方降水明显偏多。

以上分析证实, 不同 ENSO 季节演变模态和类型对亚太地区环流的变异有很大影响, 尤其是与副高活动和中高纬度经向和纬向环流的变化有非常密切的联系。他们对我国雨带分布和演变有重要影响。并且 ENSO 的影响有很长时间的时滞效应, El Niño 和 La Niña 一般都在冬季达到鼎盛, 但它一直

到夏季不仅仍有影响, 而且影响还非常显著。

6 ENSO 循环影响我国降水的可能物理过程

由上分析可知, 不同 ENSO 季节演变模态 (也即 ENSO 循环) 通过影响副高活动以及中高纬度经向/纬向环流变化进而影响我国东部的雨带分布及演变。那么 ENSO 循环是通过怎样的过程与副高活动以及中高纬经向/纬向环流变化相联系进而影响我国雨带分布及演变的呢? 为了探讨这一问题, 我们对亚太地区 ($60^{\circ}\text{E}\sim 90^{\circ}\text{W}$, $50^{\circ}\text{S}\sim 50^{\circ}\text{N}$) 四季 (冬、春、夏、秋) 1000 hPa 与 500 hPa 等压面间厚度 (Z_{1000}^{500}) 的距平场进行 EOF 分析。同样, 为了削弱 Z_{1000}^{500} 线性趋势变化对 EOF 结果的影响, 各季节的 Z_{1000}^{500} 均先经过线性趋势扣除处理, 然后再进行 EOF 分析。

图 11 为 1951~2014 年亚太地区四季 (冬、春、

夏、秋) Z_{1000}^{500} 距平序列 (时间长度为 256 个季节) 的 EOF 第 1 模态 (EOF1) 的空间分布及其时间系数以及 Niño3.4 区海温距平指数, 其中 EOF1 的时间系数经过了标准化处理。该模态的解释方差占总解释方差的 21.9%, North 检验表明该模态可以和其他模态有效分离。模态正 (负) 位相时期, 亚太地区 Z_{1000}^{500} 在低纬度地区减少 (增加), 尤其是赤道中东太平洋和西印度洋两个地区。而在中纬度地区厚度增加 (减少)。南北向的温度梯度明显减弱 (加强), 有助于亚太地区出现以经向 (纬向) 环流为主导的类型。该模态的正、负位相的空间分布特征分别与 La Niña 和 El Niño 盛期冬季合成的 Z_{1000}^{500} 距平图极为相似 (Zong, 2014), 只是前者为 Z_{1000}^{500} 季节序列分析所得结果, 而后者为 ENSO 盛期 (冬季) 合成结果。模态 1 的时间系数与 Niño3.4 区海温距平指数演变非常一致, 二者同期相关系数高达 -0.80, 远远超过

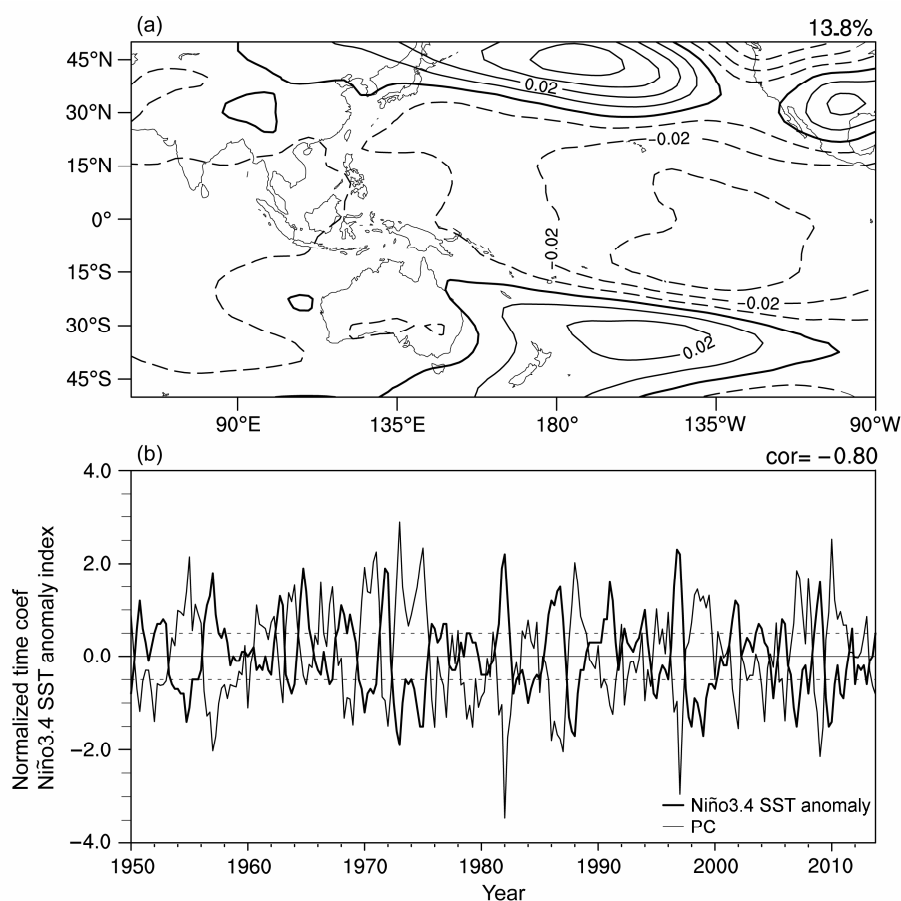


图 11 1951~2014 年亚太地区四季平均的 1000 hPa 至 500 hPa 等压面间的厚度距平场 (已扣除线性趋势) 的 EOF 第 1 模态的 (a) 空间分布及 (b) 标准化时间系数 (细实线) 以及 Niño3.4 区海温距平指数 (粗实线)。图 a 中的粗实线表示零线, 图 b 中的虚线分别表示 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 标准差刻度线

Fig. 11 (a) Spatial distribution of EOF1 of four seasons averaged Z_{1000}^{500} (thickness between 1000 hPa and 500 hPa) anomalies over Asia-Pacific region during 1951–2014 and (b) corresponding normalized time coefficients (thin solid line) and normalized Niño 3.4 SST anomalies index (thick solid line). Thick solid lines in Fig. a represent the zero lines, dash lines in Fig. b represent $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ standardized deviation

99.9%的信度水平。这种高相关性无疑表明, 亚太地区中高纬地区经向环流和纬向环流相互转换的模式, 其实就是 ENSO 循环中大气环流部分演变特征的具体表现, 是构成 ENSO 循环的重要组成部分, 是赤道中东太平洋海温异常驱动的结果。图 11 低峰期(高峰期)密集时期, 意味着 La Niña (El Niño) 持续, 而该时期模式 1 一直处于强的负(正)位相。这表明 La Niña (El Niño) 持续型年份, 不仅冬季盛期而且其他季节亚太地区都是盛行经向(纬向)为主导的环流。图 11 低峰期向高峰期(高峰期向低峰期)转换期, 意味着这一时期发生了 La Niña 向 El Niño (El Niño 向 La Niña) 的转换, 而模式 1 也发生了由正位相向负位相(负位相向正位相)的转换。这一现象表明 La Niña 转 El Niño (El Niño 转 La Niña) 型的年份, 亚太地区将出现大气环流从经向向纬向(从纬向向经向)环流的转换。Zong (2014) 的研究指出, Hadley 环流是联系 ENSO 循环和亚太地区经向/纬向环流的关键纽带。在 El Niño 背景下, Hadley 环流增强, 由赤道向中高纬地区的西风角动量输送增强, 从而有利于亚太地区纬向环流增强, 结果导致中高纬冷空气南侵活动减弱, 有利于我国东部降水增多, 而在 La Niña 背景下, Hadley 环流减弱, 由热带向中高纬地区的西风角动量输送减弱, 不利于中高纬地区纬向环流发展, 使得亚太地区经向环流增强, 进而造成中高纬冷空气南侵活动增强, 不利于我国东部尤其是北方地区降水发生。

由图 11 还可以看到, La Niña (El Niño) 背景下, 在东南太平洋和东北太平洋有一对相对于赤道对称的厚度正(负)距平区, 而在热带印度洋和西北太平洋为厚度负距平区。这里正距平对应异常反气旋, 负距平对应异常气旋。这种分布是南方涛动和北方涛动极端正(负)指数时期的典型环流型式。其中西北太平洋的异常气旋或反气旋是 ENSO 直接与副高和我国降水联系的一个重要环流系统。因此, La Niña (El Niño) 时期, 由于西太平洋这一异常气旋(反气旋)的存在, 一般是导致副高偏弱、偏东(偏强、偏西), 副高西北侧水汽输送减少(增加), 有利于我国东部降水偏少(偏多)。但另一方面, 副热带高压的活动除受 ENSO 影响外, 还受到副高本身季节性南北变动的制约, 尤其是其南北位置。平均而言, 副高的脊线位置, 冬春季在 15°N 以南, 初夏季节性北跳至 $15^{\circ}\text{N}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间, 盛夏

脊线移至 $25^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$ 。因此, 副高特征在 ENSO 不同的季节演变模态和类型中有很大的不同。La Niña (El Niño) 持续型, 由于菲律宾群岛附近低层为气旋(反气旋)性异常环流系统的存在(图 6、7), 各季副高都偏弱、偏东(偏强、偏西)。脊线位置冬春季偏南(偏北), 夏秋季转为偏北(偏南)(图 10)。而 La Niña 转 El Niño 型, 冬春季和夏季的梅雨期受 La Niña 影响, 热带和副热带地区对流层中层位势高度减小, 菲律宾群岛附近低层气旋性异常环流存在(图 8), 导致副高偏弱、偏东和偏南(图 10)。盛夏和秋季转受 El Niño 影响, 由于大气环流对海温的响应的滞后性, 副高逐渐西伸并加强, 但强度到 10 月才能偏强(图 10)。El Niño 转 La Niña 型, 冬春季受 El Niño 影响, 热带和副热带地区对流层中层位势高度增强, 菲律宾群岛附近低层反气旋性异常环流系统存在(图 9), 导致副高为偏强、偏西和偏北(图 10)。夏季的梅雨期受 El Niño 的滞后影响, 副高继续维持偏西和偏北。盛夏和秋季转受 La Niña 影响, 副高逐渐转为偏西、偏南, 但强度也到 10 月以后才转为偏弱。也就是说, 在 El Niño (La Niña) 期间一般副高是加强西伸(减弱东移)。另一方面是, 在 El Niño 背景下, 受赤道中东太平洋海温增暖的影响, 赤道中东太平洋对流活动加强, 同时赤道西太平洋和赤道东印度洋附近地区对流活动受到抑制, 下沉活动加强, 导致赤道地区的 Walker 环流减弱(陈烈庭, 1977)。赤道西太平洋和赤道东印度洋附近异常下沉活动加强, 也有利于菲律宾附近反气旋性环流中心建立和发展, 进而有利于副高加强西伸。相反, La Niña 背景下, 赤道地区 Walker 环流加强, 赤道西太平洋和赤道东印度洋附近异常上升活动加强, 有利于菲律宾附近气旋性环流中心建立和发展, 进而导致副高减弱位置偏东。另外, 也有研究指出, El Niño 发展(减弱)期, 西太平洋暖池区热状况偏冷(偏暖), 菲律宾周围的对流活动偏弱(偏强), 也有利于夏季副高偏南(偏北)(Huang and Wu, 1989)。ENSO 事件盛期, 菲律宾地区的异常反气旋是局地海气相互作用以及赤道中太平洋增暖遥强迫的影响下得以形成和维持(Wang et al., 2000)。

综上所述, 副高强度和位置变化以及中高纬经向环流和纬向环流的调整是决定我国东部降水异常分布的最直接因素。而菲律宾气旋(反气旋)和赤道 Walker 环流以及北半球 Hadley 环流分别是联

系 ENSO 与副高以及东亚地区西风带经向环流和纬向环流的重要纽带。不同 ENSO 季节循环模态, 由于其热力驱动过程不同, 造成北半球 Hadley 环流和赤道 Walker 环流响应和调整明显不同, 进而导致其对应的副高强度和位置变化、东亚地区西风带经向和纬向环流调整出现明显差异, 最终造成其所对应的中国东部降水分布及其季节演变特征明显不同。

7 结论与讨论

本文利用 NOAA 扩展重建海表温度资料、NCEP/NCAR 再分析资料、美国气候预测中心制作历史 El Niño/La Niña 事件集, 以及中国 160 站降水资料和 74 项大气环流指数等资料, 采用 EEOF 分析、相关分析和合成分析等方法, 分析了太平洋海温季节变化的主导模态及其时空变化的特征。并探讨了各模态对应的中国东部降水异常分布特征, 分析了与之相联系的亚太地区大气环流以及副高各指数的时间演变特征, 同时讨论了 ENSO 各模态与我国东部降水异常分布联系的可能物理过程。结果表明:

(1) ENSO 循环中 El Niño 和 La Niña 发生、发展和相互转变的过程是一种多态现象。ENSO 季节演变存在两个主要模态 4 种类型: El Niño 持续型和 La Niña 持续型, 以及 La Niña 转 El Niño 型和 El Niño 转 La Niña 型。

(2) 不同模态和类型的 ENSO 季节演变过程我国降水距平的分布和强度都有明显差异。El Niño 持续型, 冬、春季我国东部普遍多雨, 雨带冬季主要出现在华南, 春季北移至长江流域; 夏季东亚季风雨带比常年同期偏南, 长江流域附近降水异常偏多, 往往发生洪涝。而黄淮地区降水异常偏少, 易出现干旱; 秋季江南降水异常偏多。La Niña 持续型冬季降水距平的分布基本相反, 且降水强度也弱得多。El Niño 转 La Niña 型, 冬、春季我国东部降水距平的分布与 El Niño 持续型有一定的相似性, 其演变也是冬季华南降水偏多, 春季主要雨区北移到长江流域; 夏季的梅雨期受 El Niño 的滞后影响, 东亚夏季风雨带偏南, 两湖地区降水异常偏多; 盛夏和秋季转受 La Niña 影响, 华北中部和环渤海地区降水异常偏多, 江淮和江南地区降水偏少。La Niña 转 El Niño 型的情况基本相反。因此, 在利用 ENSO 信号做我国降水的气候预测时, 不能只着眼于前期冬季 El Niño 或 La Niña 事件, 还应考虑其未来演变所属的可能模态和类型。

(3) ENSO 循环与副高的活动和东亚西风带经向和纬向环流调整有非常密切的联系。不同 ENSO 季节演变模态和类型对应的副高以及东亚西风带经向环流和纬向环流特征存在明显差异。在 El Niño (La Niña) 持续型的气候背景下, 各季西太平洋副热带高压都偏强、偏西 (偏弱、偏东), 北界位置冬、春季偏北 (偏南), 夏秋季转为偏南 (偏北)。而在 La Niña 转 El Niño (El Niño 转 La Niña) 背景下, 冬春季和初夏梅雨期受 La Niña (El Niño) 影响, 一般副高偏弱、偏东和偏南 (偏强、偏西和偏北), 盛夏和秋季转受 El Niño (La Niña) 影响, 副高转为偏南和偏西, 但强度仍为偏弱 (偏北和偏西, 但强度仍为偏强)。另外, 与东亚西风带环流的关系, El Niño (La Niña) 时期, 为盛行纬向 (经向) 环流, 尤其是冬季东亚冬季风异常偏弱 (偏强)。

(4) 西太平洋菲律宾群岛附近的异常气旋或反气旋和赤道 Walker 环流以及北半球 Hadley 环流分别是联系 ENSO 与副高活动以及东亚西风带经向和纬向环流的重要环节。不同 ENSO 季节循环模态之间热力驱动过程差异, 导致赤道 Walker 环流和北半球 Hadley 环流响应不同, 进而造成副高强度和位置变化、东亚地区西风带经向和纬向环流调整出现明显差异, 并最终造成中国东部降水分布及其季节演变特征明显不同。

以上我们仅探讨了 ENSO 季节演变前两个主要模态 (4 种类型) 和我国东部降水的年际关系特征, 以及他们之间联系的物理过程。ENSO 季节演变其他模态和类型, 一方面由于他们的解释方差较小, 另一方面他们与我国降水年际异常之间的联系较为复杂, 将另文加以讨论。当然, 除了本文所强调的菲律宾附近的异常气旋或反气旋、Walker 环流和 Hadley 环流外, 副高活动以及东亚西风带经向和纬向环流调整还受到了上游异常环流调整等大气环流内部动力过程活动及其自身的季节演变进程的影响。此外, 除 ENSO 外, 其他外强迫因子 (如高原积雪、欧亚雪盖、北大西洋、印度洋和太平洋地区一些关键区的海温) 也会对副高以及东亚西风带经向和纬向环流产生影响。但对这些内容探讨超出了本文的研究范围。另外, 宗海锋和陈烈庭 (2013) 的研究结果显示, 梅涝型和南涝北旱型的夏季风雨带季内变化模态往往分别出现在 El Niño 和 La Niña 持续年, 而梅旱型和伏旱型的夏季风雨带季内变化模态往往分别出现在 La Niña 转 El Niño 年和 El

Niño 转 La Niña 年。这些结果也与本文的研究结果相一致。这些工作都表明在利用 ENSO 信号做我国降水的气候预测时,有必要考虑其未来演变所属的可能模态和类型。不同 ENSO 季节演变类型的成因如何?其前兆信号怎样?这些问题对于我国降水的气候预测而言具有重要意义。但本文目前尚不能回答这些问题,我们将在后续工作中对这些问题展开探讨。

参考文献 (References)

- Capotondi A, Wittenberg A T, Newman M, et al. 2015. Understanding ENSO diversity [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96 (6): 921–938, doi:10.1175/BAMS-D-13-00117.1.
- Chen Lieting. 1984. The northern oscillation and its associations with sea surface temperature and rainfalls over the equatorial Pacific [J]. *Chinese Science Bulletin*, 29 (10): 1366–1369.
- 陈烈庭. 1977. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响 [J]. *大气科学*, 1 (1): 1–12. Chen Lieting. 1977. The effects of the anomalous sea surface temperature of the equatorial eastern Pacific Ocean on the tropical circulation and rainfall during the rainy period in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1 (1): 1–12, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1977.01.01.
- 陈烈庭. 1982. 北太平洋副热带高压与赤道东部海温的相互作用 [J]. *大气科学*, 6 (2): 148–156. Chen Lieting. 1982. Interaction between the subtropical high over the North Pacific and the sea surface temperature of the eastern equatorial Pacific [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 6 (2): 148–156, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1982.02.05.
- 陈文. 2002. El Niño 和 La Niña 事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. *大气科学*, 26 (5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 26 (5): 595–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02.
- 高辉, 王永光. 2007. ENSO 对中国夏季降水可预测性变化的研究 [J]. *气象学报*, 65 (1): 131–137. Gao Hui, Wang Yongguang. 2007. On the weakening relationship between summer precipitation in China and ENSO [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 65 (1): 131–137, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2007.01.013.
- Huang Ronghui, Wu Yifang. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 6 (1): 21–32, doi:10.1007/BF02656915.
- 金祖辉, 陶诗言. 1999. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究 [J]. *大气科学*, 23 (6): 663–672. Jin Zuhui, Tao Shiyan. 1999. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 23 (6): 663–672, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.06.03.
- Li Chun, Ma Hao. 2012. Relationship between ENSO and winter rainfall over Southeast China and its decadal variability [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 29 (6): 1129–1141, doi:10.1007/s00376-012-1248-z.
- 李琰, 王亚非, 董敏. 2009. 赤道东太平洋海温异常对 6 月中国南方降水影响的数值模拟 [J]. *气象学报*, 67 (2): 250–259. Li Yan, Wang Yafei, Dong Min. 2009. Numerical simulations of the effects of the preceding equatorial eastern Pacific sea surface temperature anomaly on the southern China rainfall in June [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 67 (2): 250–259, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2009.02.008.
- 刘永强, 丁一汇. 1992. ENSO 事件对我国天气气候的影响 [J]. *应用气象学报*, 3 (4): 473–481. Liu Yongqiang, Ding Yihui. 1992. Influence of ENSO events on weather and climate of China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 3 (4): 473–481.
- 刘永强, 丁一汇. 1995. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响 [J]. *大气科学*, 19 (2): 200–208. Liu Yongqiang, Ding Yihui. 1995. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 19 (2): 200–208, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1995.02.09.
- North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 110 (7): 699–706, doi:10.1175/1520-0493(1982)110<0699:SEITEO>2.0.CO;2.
- Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Chen Lieting. 2011. Connections between different types of El Niño and southern/northern oscillation [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 25 (4): 506–516, doi:10.1007/s13351-011-0409-9.
- Smith T M, Reynolds R W, Peterson T C, et al. 2008. Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880–2006) [J]. *J. Climate*, 21 (10): 2283–2296, doi:10.1175/2007JCLI2100.1.
- 孙旭光, 杨修群. 2005. El Nino 演变不同阶段东亚大气环流年际异常型的数值模拟 [J]. *地球物理学报*, 48 (3): 501–510. Sun Xuguang, Yang Xiuqun. 2005. Numerical modeling of interannual anomalous atmospheric circulation patterns over East Asia during different stages of an El Niño event [J]. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 48 (3): 501–510, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.03.006.
- Wang Bin, Wu Renguang, Fu Xiouhua. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- 王绍武, 朱宏. 1985. 东亚的夏季低温与厄·尼诺 [J]. *科学通报*, 30 (17): 1323–1325. Wang Shaowu, Zhu Hong. 1986. El Niño and cool summer in East Asia [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 81 (7): 474–478.
- 魏凤英. 2007. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 2 版. 北京: 气象出版社, 296pp. Wei Fengying. 2007. *Modern Statistical Diagnosis and Prediction Technology on Climate* (in Chinese) [M]. 2nd ed. Beijing: China Meteorological Press, 296pp.
- Wu Renguang, Hu Zengzhen, Kirtman B P. 2003. Evolution of ENSO-related rainfall anomalies in East Asia [J]. *J. Climate*, 16 (22): 3742–3758, doi:10.1175/1520-0442(2003)016<3742:EOERA1>2.0.CO;2.
- Xu Kang, Zhu Congwen, He Jinhai. 2013. Two types of El Niño-related southern oscillation and their different impacts on global land precipitation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 30 (6): 1743–1757, doi:10.1007/s00376-013-2272-3.

- 杨辉, 李崇银. 2005. 厄尔尼诺持续时间与大气环流异常形势 [J]. 地球物理学报, 48 (4): 780–788. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Lasting time of El Niño and circulation anomaly [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (4): 780–788, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.008.
- 杨义文, 吴晓曦, 艾婉秀. 1998. El Niño 次年盛夏副高北进过程及中国雨型预测 [J]. 应用气象学报, 9 (S1): 90–99. Yang Yiwen, Wu Xiaoxi, Ai Wanxiu. 1998. Seasonal movement process of West Pacific subtropical high and prediction of summer precipitation pattern in China in next year of El Niño events [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (S1): 90–99.
- Zhang Renhe, Sumi A, Kimoto M. 1996. Impact of El Niño on the East Asian monsoon: A diagnostic study of the '86/87 and '91/92 events [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 74 (1): 49–62, doi:10.2151/jmsj1965.74.1_49.
- 中国科学院大气物理研究所, 中国科学院国家计划委员会地理研究所, 中国气象局国家气象中心. 1997. 中国气候灾害分布图集 [M]. 北京: 海洋出版社, 103pp. Institute of Atmospheric Physics, CAS, Institute of Geography, CAS, National Meteorological Center of CMA. 1997. Seasonal Charts of Climate Disasters in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Ocean Press, 103pp.
- 朱乾根, 徐建军. 1998. ENSO 及其年代际异常对中国东部气候异常影响的观测分析 [J]. 南京气象学院学报, 21 (4): 615–623. Zhu Qiangen, Xu Jianjun. 1998. Observational study on the effect of ENSO and its interdecadal variations on the climate anomaly in eastern China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 21 (4): 615–623.
- Zong Haifeng. 2014. A study on the physical processes of the formation of the ENSO cycle [J]. Adv. Atmos. Sci., 31 (6): 1395–1406, doi:10.1007/s00376-014-3224-2.
- 宗海锋, 陈烈庭. 2013. 中国东部夏季风雨带季内变化各模态的环流及海温特征 [J]. 大气科学, 37 (5): 1072–1082. Zong Haifeng, Chen Lieting. 2013. Characteristics of the atmospheric circulation and sea surface temperature for different modes of intraseasonal variation of summer monsoon rain belt in eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (5): 1072–1082, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12069.
- 宗海锋, 张庆云, 陈烈庭. 2008. 东亚—太平洋遥相关型形成过程与 ENSO 盛期海温关系的研究 [J]. 大气科学, 32 (2): 220–230. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Chen Lieting. 2008. A study of the processes of East Asia–Pacific teleconnection pattern formation and the relationship to ENSO [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 220–230.
- 邹力, 倪允琪. 1997. ENSO 对亚洲夏季风异常和我国夏季降水的影响 [J]. 热带气象学报, 13 (4): 306–314. Zou Li, Ni Yunqi. 1997. Impact of ENSO on the variability of the summer monsoon over Asia and the summer rainfall in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 13 (4): 306–314.