

东亚夏季风与ENSO、IOD间联系的特征分析

李素梅^{1,2}, 王 伟¹, 郭红杉¹

¹成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都

²莒南县气象局, 山东 临沂

Email: 2713671275@qq.com, wei2009@cuit.edu.cn, 2270671391@qq.com

收稿日期: 2021年8月25日; 录用日期: 2021年9月19日; 发布日期: 2021年9月26日

摘 要

采用印度洋偶极子指数(DMI、TIOD)、Nino3指数和3类东亚夏季风指数,比较和分析印度洋偶极子、ENSO (El-Niño-Southern Oscillation)与东亚夏季风间联系的特征。结果显示: 1) 不同的类型东亚夏季风指数与不同的海温模态指数相关性不同,如:用风场定义的 I_{ip} 指数反映印度洋IOD (Indian Ocean Dipole)影响的能力就比用海陆海平面气压定义的 I_{sn} 要强。2) 同一东亚夏季风指数分别与DMI、Nino3指数的联系都呈明显的年代际变化特征,IOD和ENSO对夏季风的影响是相反的。东亚夏季风指数在20世纪90年代之前与DMI都呈现着明显的正相关关系。而从20世纪90年代后期开始当季风指数与IOD指数开始表现为负相关。其与Nino3指数则呈现相反的相关状态。同时东亚夏季风与IOD、ENSO年际变化之间的联系都具有此弱彼强的特点。3) 从空间上来看,不同的东亚夏季风指数受到印度洋、太平洋海温影响的程度不同,其季风在偏强、偏弱年对应的海温模态也不完全一致。在季风偏强年对应太平洋上都出现ENSO正相位,赤道印度洋上海温整体偏冷。在季风偏弱年三个指数对应的太平洋海温模态各不相同,赤道印度洋整体偏暖。

关键词

东亚夏季风, ENSO, 印度洋偶极子(IOD), 特征分析

Analysis of the Relationship between East Asian Summer Monsoon and ENSO, IOD

Sumei Li^{1,2}, Wei Wang¹, Hongshan Guo¹

¹School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu Sichuan

²Junan County Meteorological Bureau, Linyi Shandong

Email: 2713671275@qq.com, wei2009@cuit.edu.cn, 2270671391@qq.com

Received: Aug. 25th, 2021; accepted: Sep. 19th, 2021; published: Sep. 26th, 2021

Abstract

This paper uses the Indian Ocean Dipole Index (DMI, TIOD), the Nino3 index and the three East Asian summer monsoon indexes to compare and analyze the characteristics of the relationships of Indian Ocean Dipole (IOD), ENSO (El-Niño-Southern Oscillation) with East Asian summer monsoon. The results show: 1) Different East Asian summer monsoon index is different from different sea surface temperature index. For example, the I_{jip} index defined by the wind field reflects the ability of the Indian Ocean IOD to be stronger than I_{sn} . 2) The same East Asian summer monsoon index and DMI, Nino3 index were associated with significant variation characteristics, IOD and ENSO have opposite effects on summer monsoon. The East Asian summer monsoon index had a good positive correlation with DMI before the 1990s, and since the late 1990s, the monsoon index was negatively correlated with the index of IOD, which was inversely related to the Nino3 index. The relationship between the East Asian summer monsoon with IOD, ENSO inter annual variation is characterized that one stronger and the other will become weaker. 3) From the view of spatial point, the different East Asian summer monsoon indexes are affected by the Indian Ocean and the Pacific Ocean temperature is different, and the sea surface temperature of the monsoon is not exactly the same. In the monsoon strong years, ENSO appears its positive phase over the Pacific Ocean, and the SST over the equatorial Indian Ocean is too cold. In the monsoon weak years, three East Asian summer monsoon indexes to the corresponding index of the sea temperature mode are different, Equatorial Indian Ocean as a whole warmer.

Keywords

East Asian Summer Monsoon, ENSO, IOD, Characteristics Analysis

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

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

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



Open Access

1. 引言

中国处在世界上最典型季风活动区, 其温度、降水等要素的时空分布受亚洲季风系统的影响较大。研究证明, 夏季风强度强时, 长江中下游经常降水偏少; 季风强度弱时, 夏季长江中下游为降水偏多[1]。因此对东亚夏季风强弱变化的研究具有深远的意义。

ENSO (El-Niño-Southern Oscillation)作为热带海洋 - 大气耦合系统里表现最强的年际变化信号, 对东亚夏季风的变化有极重要的影响。在 El Niño 减弱年份的夏季, 副高位置偏向西南, 高压强度明显偏强。这种副高异常特征会随夏季的季节进程发生明显变化, 在初夏时异常较弱, 在盛夏期间异常往往会达到最强状态[2]。

目前, 有的人认为 ENSO 当年长江中下游地区夏季风时期降水偏少[3], 有的人则认为长江中下游至江淮地区夏季是多雨中心区[4]。还有些学者认为 ENSO 当年我国长江中下游地区降水主要表现为偏少, 次年则相反[5]。印度洋偶极子(Indian Ocean Dipole, 简称 IOD)是印度洋上的耦合海洋大气现象。通常的特点是, 赤道印度洋西海域的表面温度异常寒冷和赤道东南部海域的表面温度较暖。Saji 等分析了印度洋海温距平场, 发现其第二模态空间场反映出赤道印度洋东、西部海温会出现反相变化, 由此定义了赤道印度洋偶极子指数(Dipole Mode Index, 简称 DMI) [6]。Webster 等指出赤道印度洋偶极子可能是印度洋

系统内部独立的特征模态，是印度洋系统内可以自己维持的强海-气-陆相互作用系统[7]。闫晓勇等认为印度洋 SST 会通过影响西南季风来影响东亚夏季风系统[8]。肖子牛等学者通过进一步分析得出，IOD 正位相可能会导致中国南方降水偏多而北方降水少于正常水平，而且 IOD 负位相模态不如正位相模态对中国气候的影响大；正位相时可能是通过影响西南季风系统来比较直接地影响中国的降水，而负位相则可能通过 PJ 波列来影响中国的降水[9]。目前，李崇银等[10]、谭言等[11]、巢纪平等[12]通过研究发现，IOD 尽管在个别年份与 ENSO 相互独立，事实上从长期来看，两者仍然存在较好的相关性。可见研究 IOD 对研究亚洲夏季风系统有着重要的意义和价值。

杨霞等研究表明消除了 IOD 事件影响的纯 ENSO 事件、消除了 ENSO 事件影响的纯 IOD 事件以及 IOD 事件和 ENSO 事件同时发生对中国夏季降水和气温等都有重要影响[13]。本文将采用多种东亚夏季风指数、DMI 指数、TIOD (Tropical Indian Ocean Dipole 简称 TIOD)指数、Nino3 指数、通过线性回归分析、滑动相关分析及合成分析等方法来研究东亚夏季风系统与 ENSO、IOD 间联系的特征，并讨论其可能原因。

2. 资料与方法

2.1. 资料

本文研究分析使用的资料有：

- 1) 1950~2016 年全球月平均的 NCEP/NCAR 再分析资料常规资料集，其水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ ，垂直方向为 17 层；
- 2) 1950~2016 年月平均的 NCEP/NCAR 月度海洋表面温度资料，其水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ；
- 3) 1950 年至今的 NCEP/NCAR 月度大气和海洋时间序列：Nino3 指数序列、Nino3.4 指数序列；
- 4) JAMSTEC (<http://www.jamstec.go.jp/frsgc/research/d1/iod/e/index.html>)提供的 1950~2016 年的月度 EMI、DMI 指数序列；
- 5) 李建平教授个人网页(<http://ljp.gcess.cn/dct/page/1>)提供的 1950~2016 年东亚夏季风指数。

2.2. 研究方法

本文研究时，使用了指数定义[14] [15]、数据标准化、线性回归分析、滑动相关分析、合成分析、显著性检验等方法[16]。

3. 各类指数的分析

图 1 是 1950~2016 年三种东亚夏季风指数的时间序列图。图 1(a)不同东亚夏季风指数随时间的变化主要体现在季风指数大小以及变化趋势上，三种指数在 1960s 年代之前离散程度较大，而 1960s 以后三种指数的趋势相对比较接近，数值离散程度也减小，总体来看近些年来东亚夏季风强度较 20 世纪 50~60 年代减弱了许多。同时通过比较观察出，由于定义指数的角度、范围不同，指数反映的相关物理场的特征不同等因素，导致了在某些年份这几种指数的数值和变化趋势并不一致甚至在有些年份处于相反的状态。为此需要将三个指数拆开来分析。

图 1(b)显示 I_{jp} 指数在过去 67 年里有明显的减弱趋势，在 20 世纪 70 年代以后以负值为主；图 1(c)显示， I_{sn} 指数在 20 世纪 60 年代开始减弱，之后变得平稳且数值波动小以负值为主；图 1(d)显示， I_{zcw} 在 20 世纪 60~80 年代长期处于一个下滑状态，之后指数总趋势变得平稳。三个指数显示的总体趋势变化比较接近。根据 $I_{jp} > 1.0$ 选出 10 个夏季风强年，根据 $I_{jp} < -1.0$ 选出了 7 个季风偏弱年；根据 $I_{sn} > 1$ 选出 7 个夏季风强年，选出 $I_{sn} < -0.75$ 选出 7 个季风偏弱年， I_{zcw} 按照 ± 2 选则的典型年份。

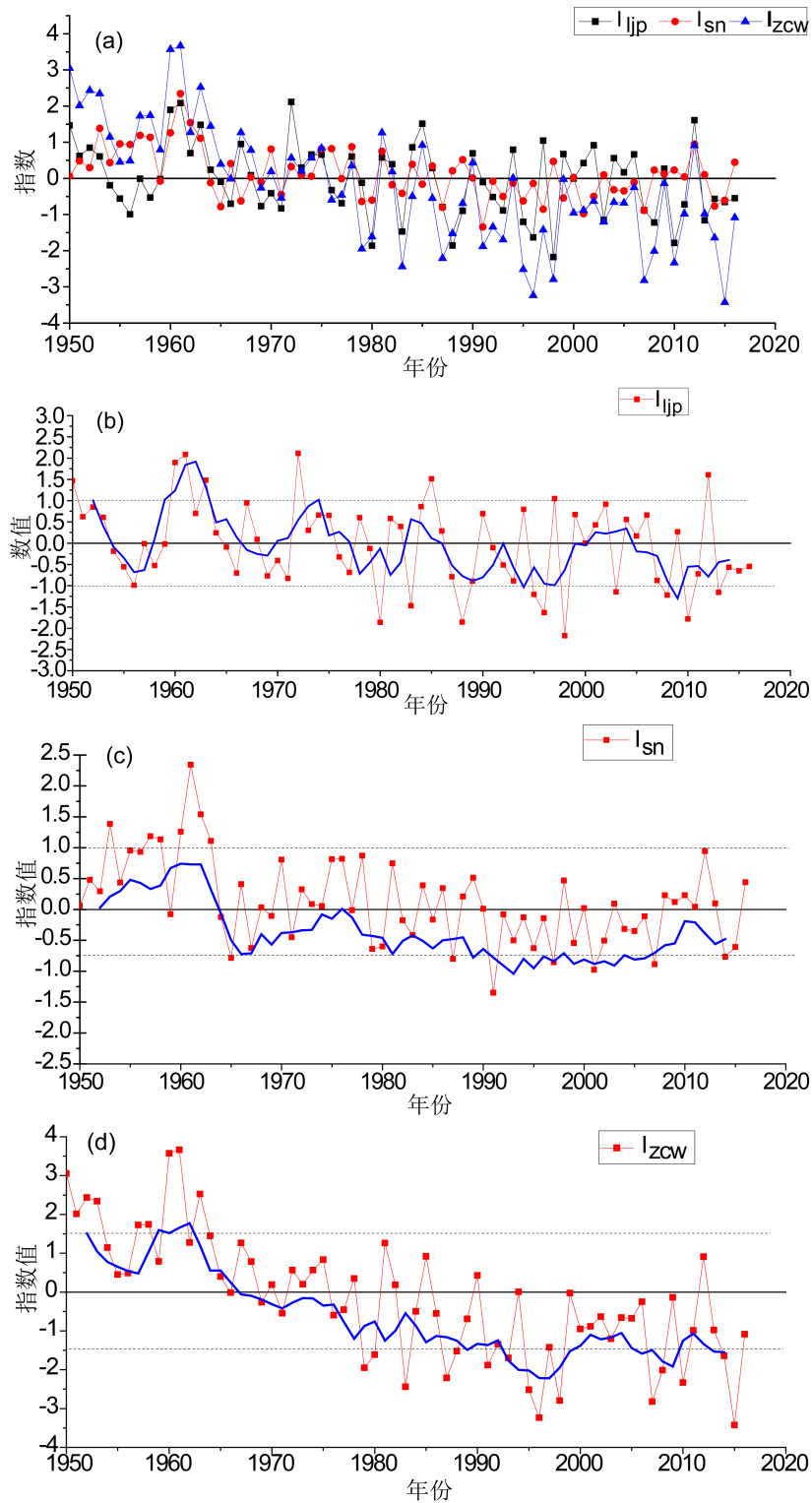


Figure 1. Time series of the three East Asian summer monsoon indices from 1950~2016 (the blue unsigned solid line is the time series of the exponential 5-year running mean)

图 1. 1950~2016 年三种东亚夏季风指数的时间序列(蓝色无符号实线是指数 5 年滑动平均的时间序列)

图 2 给出了 1950~2016 年三种 ENSO 指数的时间序列。从图 2(a)看出 ENSO 指数随时间的变化主要体现在指数大小以及变化趋势上,从数据最开始 Nino3 和 Nino3.4 无论变化趋势还是数值都十分接近。这主要与两个监测区接近甚至重合有关。EMI 指数于这两个指数相比其变化趋势整体有滞后,而在 1975 年之后与 Nino3 和 Nino3.4 指数的变化趋势十分接近,在数值上 EMI 指数离散程度小比较整齐且与 Nino3 和 Nino3.4 指数相比差异较大。相对来说, Nino3 和 Nino3.4 指数更容易判断 ENSO 事件的强度变化。现在我们可以将 Nino3、EMI 指数单独列出来分析,得到图 2(b)、图 2(c)。

从图 2(b),可以看出 EMI 指数显示自 1950 以来总体趋势稳定,但是波动较大。根据图 2(c),可知 Nino3 指数在 20 世纪 70 年代后期有所上升,之后主要以正值为主。根据 $EMI > 0.3$ 选出 10 个 ENSO 正相位年,根据 $EMI < -0.3$ 选出 16 个 ENSO 负相位年。同样根据 $Nino3 > 1.0$, 选出 11 个 ENSO 正相位年,根据 $Nino3 < -1.0$, 选出 9 个 ENSO 正相位年。

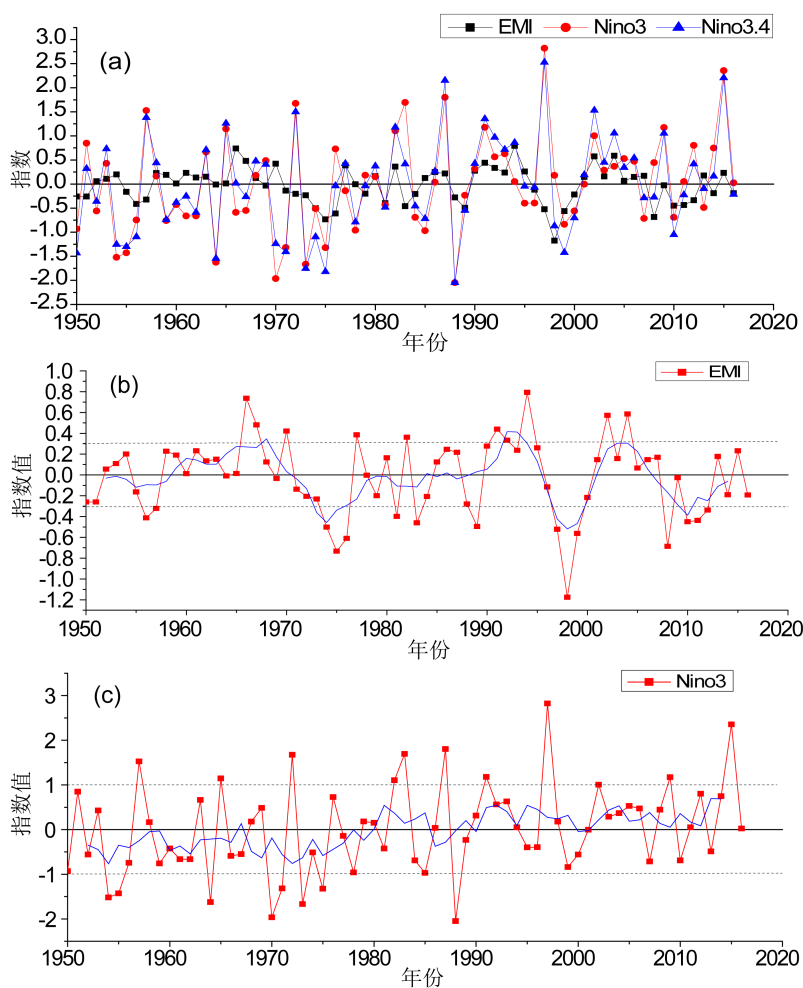


Figure 2. Time series of the three ENSO indices from 1950~2016 (the blue un-signed solid line is the time series of the index 5-year running mean)

图 2. 1950~2016 年三种 ENSO 指数的时间序列(蓝色无符号实线是指数 5 年滑动平均的时间序列)

两种 IOD 指数趋势完全相同只是数值不同(图略), 主要是因为它们同样用海表温度来反映热带印度洋偶极子。所以我们可以任取一种进行具体分析, IOD 指数的时间序列主要趋势是上升的, 根据 $DMI <$

-0.3 的标准, 选出 8 个 IOD 负位相年, 根据 $DMI > 0.3$ 的标准, 选择 19 个正位相年。

为更详细地了解东亚夏季指数与各海温模式指数之间的相关密切程度, 表 1 给出了 1950~2016 年各指数之间两两相关系数。

Table 1. Linear correlation coefficients between the various indices (where the data are labeled *, **, *** have passed the 90%, 95%, 99% confidence tests, respectively)

表 1. 各种指数之间的线性相关系数(其中数据上标为*、**、***分别是通过了 90%、95%、99%的置信度检验)

	I _{LJP}	I _{SN}	I _{ZCW}	DMI	TIOD	EMI	Nion3	Nion3.4
I _{LJP}	1.000	0.274**	0.719***	0.180	0.209 *	0.173	0.061	0.118
I _{SN}		1.000	0.631***	-0.153	-0.054	-0.184	-0.288**	-0.300**
I _{ZCW}			1.000	-0.216*	0.008	0.107	-0.261**	-0.208*
DMI				1.000	0.781	-0.037	0.462***	0.392***
TIOD					1.000	0.045	0.342***	0.313 ***
EMI						1.000	0.021	0.371***
Nion3							1.000	0.917 ***
Nion3.4								1.000

分析表 1 可知: 1) 3 种季风指数间, 两两相关系数都通过了 95%置信水平的相关系数检验, 相关性很高。其中 I_{ZCW} 和 I_{LJP} 相关高达 0.791, 与 I_{SN} 的相关高达 0.631, 可能是由于祝从文[15]定义的东亚夏季风指数是综合类的, 同时分析了海平面气压场及风场的特征变化。不同的 ENSO 和 IOD 指数对东亚夏季风强弱变化的反应能力差异较大。2) 3 种指数与 ENSO Modoki 型的 ENSO 事件相关性都不高, 未通过检验, 说明东亚夏季风受 ENSO Modoki 型的 ENSO 事件影响不大。 I_{ZCW} 、 I_{SN} 与 Nino3、Nino3.4 的相关性都很高, 所以后文我们只讨论东亚夏季风与统型 ENSO 事件的联系, 而且 I_{ZCW} 、 I_{SN} 与 Nino3 的相关系数都很高, 数分别是 -0.261、-0.288, 都通过了 95%置信水平的相关系数检验, 比 Nino3.4 效果更好, 所以我们可以选用 Nino3 指数, 来研究东亚夏季风与 ENSO 事件的特征分析。3) I_{ZCW} 、 I_{SN} 与 DMI 指数的相关性比较低。 I_{LJP} 与 TIOD 指数相关系数为 0.209, I_{ZCW} 与 DMI 相关性为 -0.216 都通过了 90%置信水平的相关系数检验。 I_{LJP} 是用大范围风场直接定义的夏季风指数, 这与行星尺度季风环流异常存在联系, 因而较其他夏季风指数与 IOD 的相关更高。由于 I_{SN} 主要反映的是小尺度的海陆热力差异, 因此它对印度洋上海气相互作用对东亚季风系统的影响的反映较弱。所以这两种 IOD 指数在下文研究中都能用到。综上, 对于 ENSO 指数我们则选取 Nino3, 对于 IOD 指数 DMI 和 TIOD 根据具体情况使用。

4. 东亚夏季风与 ENSO、IOD 间联系的特征分析

4.1. 时间上的联系分析

通过讨论发现: 1963、1972、1982、1997, 2015 年等很多年份正 IOD 事件和厄尔尼诺事件同时发生的。图 3 给出了 1950~2016 年 6~8 月原 IOD 指数、纯 IOD 指数及原 Nino3 指数、纯 Nino3 指数标准化海温指数时间序列。图 3 显示: 纯 IOD 指数与原 IOD 指数相比, 所显示的 IOD 强度明显变小(图 3(a)), 同时纯 Nino3 指数也小于原 Nino3 指数(图 3(b))。事实上, 当 IOD 与 ENSO 同时发生时, 存在共同影响[13]。本文需要讨论 IOD、ENSO 对东亚夏季风单独的影响, 于是需要用到纯 DMI 或纯 TIOD (已滤除 ENSO 信号)、纯 Nino3 (已滤除 IOD 信号)指数。

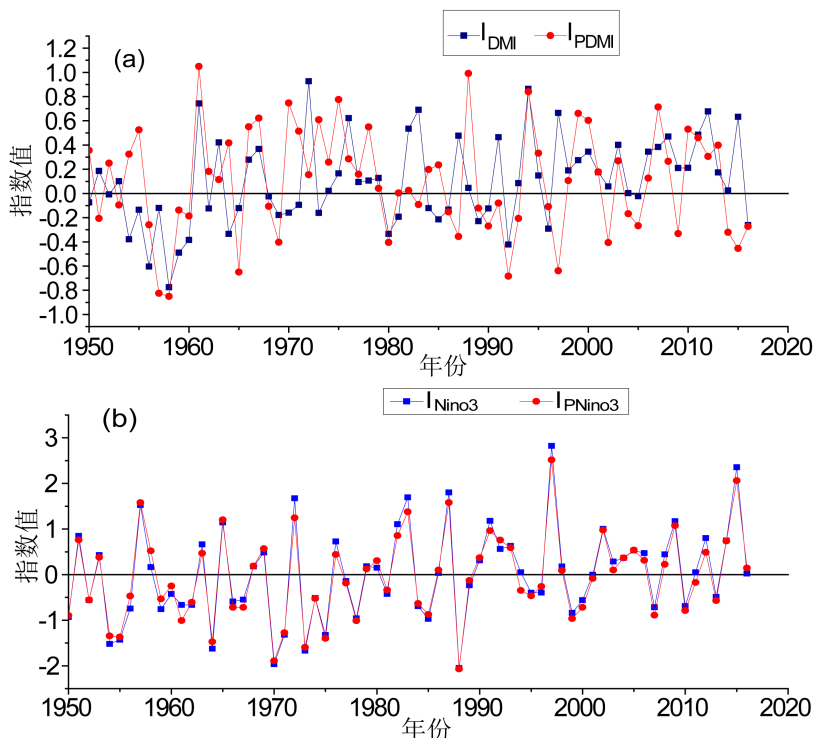


Figure 3. Standardized original IOD index (I_{DMI} , blue), pure IOD index (I_{PDMI} , red) (a) and original Nino3 index (I_{Nino3} , blue), pure nino3 index (I_{PNino3} , red) (b) from June 1950~August 2016

图3. 1950~2016年6~8月原IOD指数(I_{DMI} , 蓝色)、纯IOD指数(I_{PDMI} , 红色) (a) 及原 Nino3 指数(I_{Nino3} , 蓝色)、纯 Nino3 指数(I_{PNino3} , 红色) (b) 标准化海温指数时间序列

图4给出了已滤除 ENSO 信号的 DMI 或纯 TIOD、已滤除 IOD 信号的 Nino3 指数与 3 种夏季风指数之间的 11 年滑动相关系数随时间的变化(I_{jp} 与 DMI 指数未通过相关系数的显著性检验, 故而选取其与 TIOD 作 11 年滑动相关)。由图4可知: 1) 东亚夏季风指数分别与海温模式指数的滑动相关关系有年代际变化。在 20 世纪九十年代之前的 50 年代, 70 年代中期及 90 年代初李建平定义的夏季风指数与 ITIOD 关系比较强, 其余时段均与 ITIOD 具有相对偏弱的正的相关关系, 在 20 世纪 90 年代之后则表现为明显的负的相关关系(图4(a)); 图4(b)显示 I_{sn} 除了在 21 世纪前后与 I_{DMI} 有较弱的相关关系外其余时间内均显示为较明显的正的相关关系; 由图4(c)可以看出 I_{zew} 指数与 I_{DMI} 在 21 世纪前后呈现负的相关关系, 其余时间段内主要显示为正的相关关系。1985~1998 年由环流场定义的 I_{jp} 指数与 ENSO 的相关系数显示为正相关时, ENSO 与由海平面气压场定义的 I_{sn} 指数的相关性仍显示为负值, 当 1998 年之后才变化为正相关。而所有的指数在 70 年代末~80 年代早期以及 20 世纪 90 年代后期至今都与 ENSO 相关关系偏强, 其他时期关系较弱。所以每个指数对东亚夏季风受 IOD 和 ENSO 影响的反应能力不同。尽管如此, 三个指数之间还是有很好的共同性。2) 当季风指数与 IOD 指数为正相关时, 其与 ENSO 则呈负的相关关系。反之, 当季风指数与 IOD 指数为负相关时, 其与 ENSO 则呈正的相关关系, 当这说明两者对夏季风的作用是相反的。3) 当季风指数与 IOD 指数开始增强时, 季风指数与 ENSO 指数的相关性也开始反向增强, 这体现了大气海洋系统的自动调节能力。4) 在某些年份当季风指数与 IOD 正相关关系很密切时, 其与 ENSO 的相关较弱; 如 1950 年到 1955 年, 当季风指数与 I_{Nino3} 呈密切的负相关时, 其与 IOD 指数的相关性相对较弱, 如 70 年代末至 80 年代初期。这一结论与 Ashok 等[17]得出的 IOD、ENSO 和印度季风之间的关系

相似,与杨霞等[13]所得出东亚季风分别与 IOD 和 ENSO 相关性结果一致。5) 通过参考图 2 在这些年份未对应的东亚夏季风指数往往有较强的绝对值(图 4(a)~(c))。

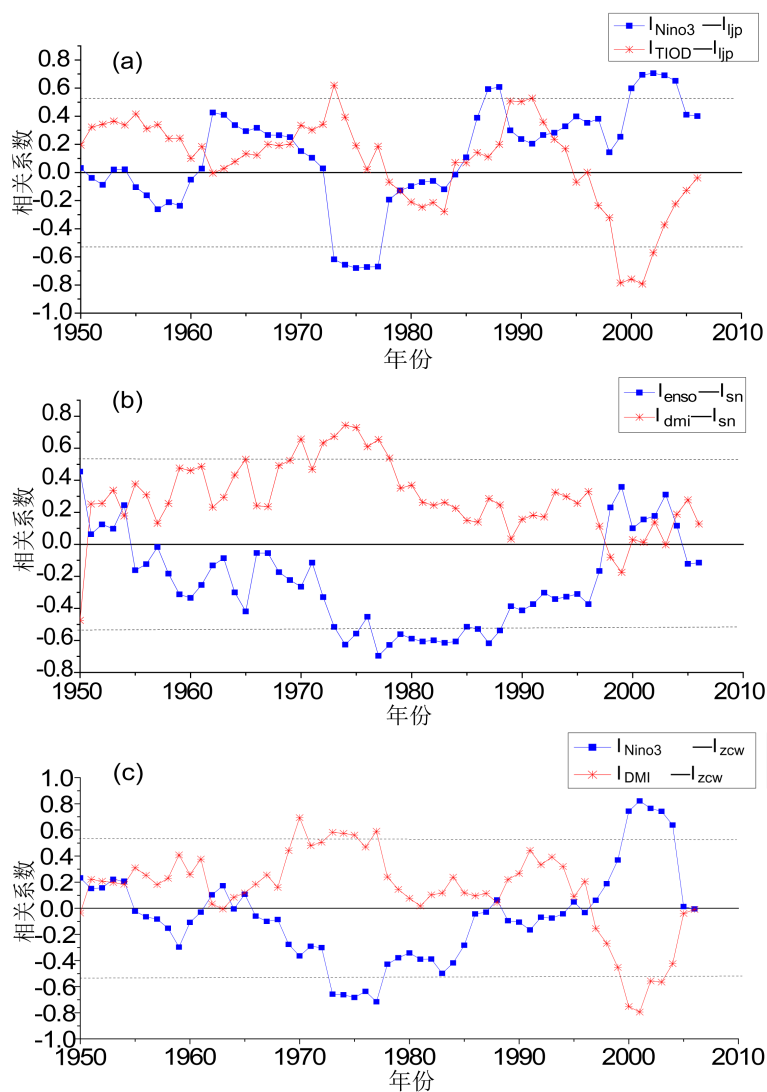


Figure 4. Changes in 11a running correlation coefficients between pure DMI ($I(PIOD)$) and summer monsoon index (filtered ENSO signal), pure nino3 index ($I(PNino3)$) and summer monsoon index (filtered IOD signal) (dashed lines indicate t test up to 90% confidence levels)

图 4. 纯 DMI ($I(PIOD)$)与夏季风指数(滤除 ENSO 信号)、纯 Nino3 指数 ($I(PNino3)$)与夏季风指数(滤除 IOD 信号)之间的 11a 滑动相关系数的变化(虚线表示达 90%置信水平的 t 检验)

4.2. 空间上的联系分析

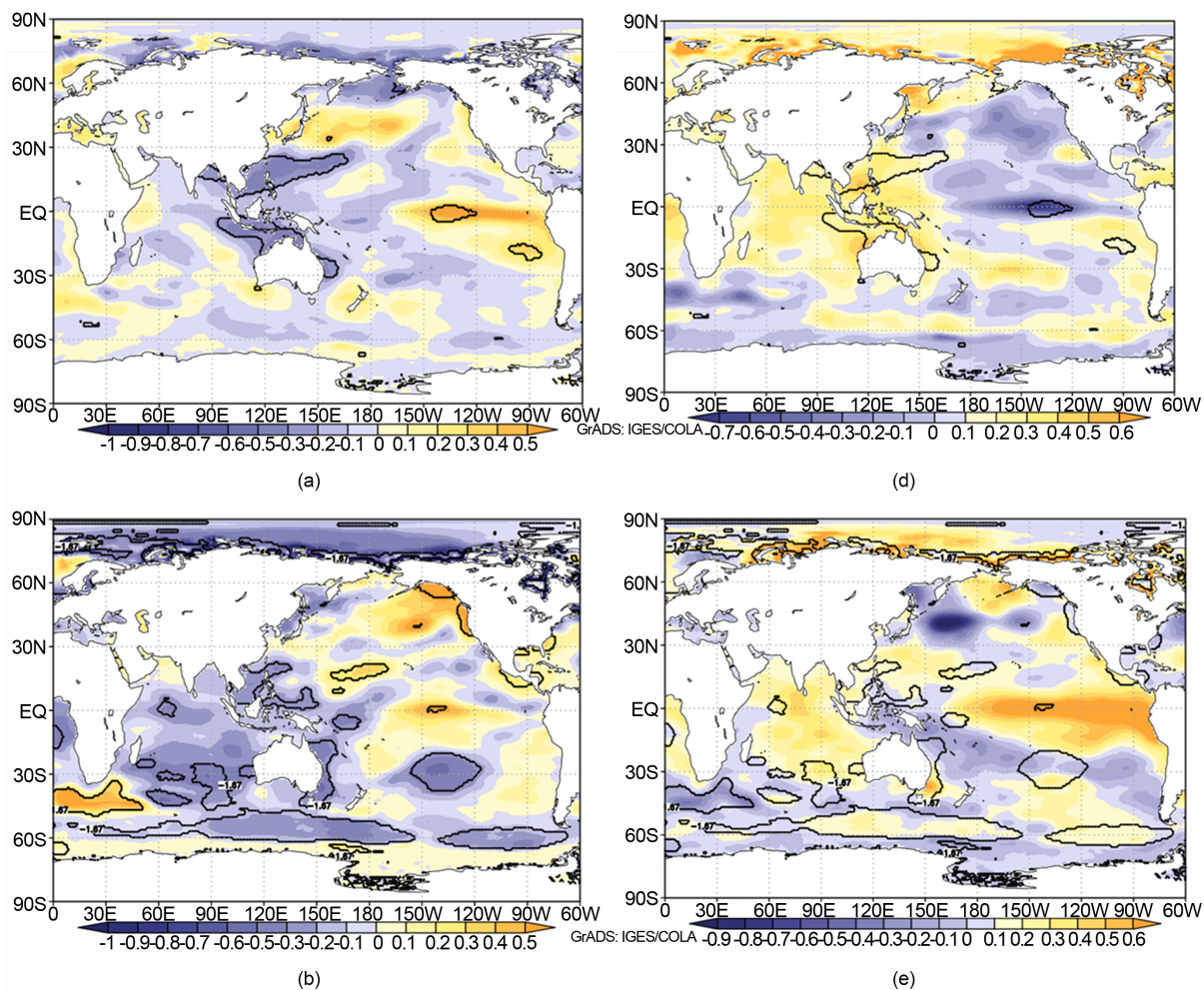
为了更好地研究东亚夏季风与 ENSO、IOD 间联系的特征,图 5 给出了 1950~2016 年季风偏强年(左)、偏弱年(右)三种东亚夏季风指数与海温的合成分析图。

海温距平分布图(图 5(a)~(c))显示,在东亚夏季风偏强年:赤道印度洋整体偏冷,赤道东印度洋比赤道西印度洋更偏冷一些;太平洋上,赤道东部异常偏暖,赤道西部太平洋异常偏冷,估计同期出现 ENSO

暖事件；IOD 事件表现不如 ENSO 事件明显，只有图 5(a) I_{Ijp} 指数偏强年显示印度洋上出现西高东低正相位变化，其他都显示赤道印度洋整体偏冷。可能是由于 IOD 事件通常在夏季开始发展，秋季才达到顶峰，冬季又开始衰弱这一变化特征的缘故。故而夏季印度洋偶极子海温模态对同期东亚夏季风影响并不明显。

在东亚夏季风偏弱年：赤道印度洋整体偏暖，而且暖中心的值可达 0.5 左右；不同的东亚季风指数显示的偏弱年太平洋上海温状态并不相同。图 5(d)显示 I_{Ijp} 指数定义的东亚夏季风偏弱年，赤道中东太平洋异常偏冷，冷中心距平值可达-0.7 度，赤道西部太平洋异常偏暖，同期可能发生 ENSO 冷事件；图 5(e)显示 I_{sn} 指数定义的东亚夏季风偏弱年，赤道太平洋大部分地区海温异常偏暖，暖中心距平值在 0.6 度以上，赤道西部东南亚附近太平洋海温偏冷；图 5(f)显示 I_{zcw} 指数定义的东亚夏季风偏弱年，赤道东部和西部太平洋地区海温异常偏暖，暖中心距平值在 0.5 度以上，赤道中部太平洋海温则偏冷。这可能是由于 I_{Ijp} 反映的是行星尺度季风环流状况，而 I_{sn} 反映的是小尺度季风强弱状况，而太平洋海温模式不同，影响不同地区的气候特征。

同时通过对各图内粗实线内显著区分析发现由于 I_{Ijp} 使用风场直接定义，而 I_{sn} 反映的是海陆热力差异，故而 I_{Ijp} 指数强弱与太平洋海表温度变化相关性的能力不如 I_{sn} 和 I_{zcw} 这也与表 1 中的相关系数相佐证了。



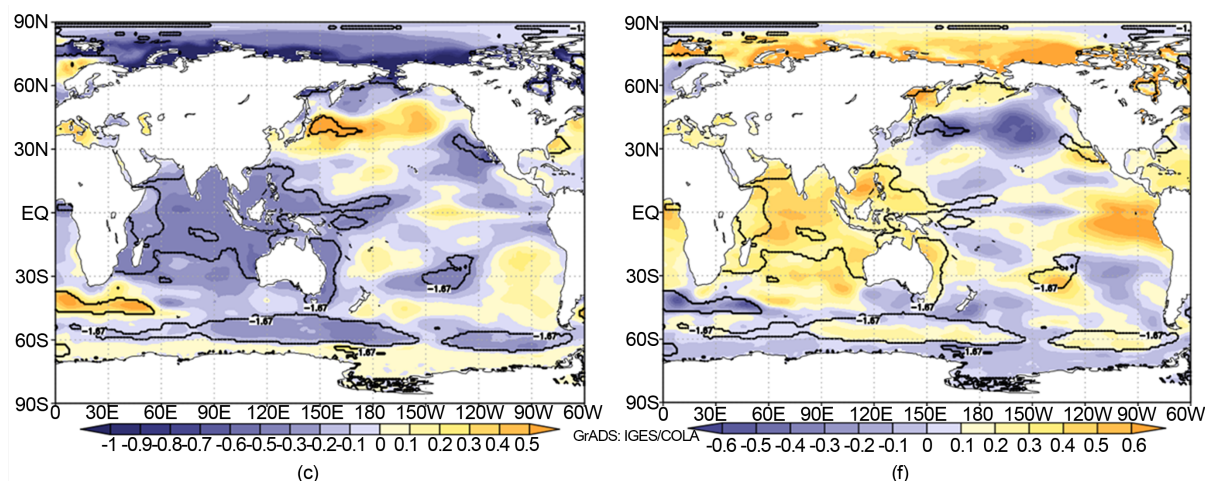


Figure 5. Synthetic analysis plots of three East Asian summer wind indexes (I_{jip} (a, d), I_{sn} (b, e), I_{zcw} (c, f), sea temperature) and sea temperature from 1950~2016 monsoon strong year (left), weak year (right). (Regions within the thick solid line passed the 90% t test)

图 5. 1950~2016 年季风偏强年(左)、偏弱年(右)三种东亚夏季风指数(I_{jip} (a,d)、 I_{sn} (b,e)、 I_{zcw} (c,f))与海温的合成分析图。(粗实线内区域通过了 90%的 t 检验)

5. 结论

本文通过从各方面分析 IOD 指数、Nino3 指数和普遍使用 3 种东亚夏季风指数来比较分析 ENSO、IOD 与东亚夏季风间联系的特征变化。得到以下几点结论:

1) IOD 指数、Nino3 指数与各个东亚夏季风指数呈现年代际变化特征。20 世纪 90 年代以前东亚夏季风与 IOD 指数具有很好的正相关, 20 世纪 90 年代后期开始则开始转变为负相关。所有的夏季风指数在 20 世纪 70~80 年代早期与 ENSO 负的相关很明显, 在 21 世纪初期呈现正相关。

2) 季风指数与 IOD 指数表现为正相关, 与 Nino3 指数通常表现为负相关, 1990s 后期开始呈现相反状态, 说明这两者对夏季风的作用是相反的。

3) 不同的东亚夏季风指数受到 ENSO 和 IOD 的影响程度不同。在季风偏强年, 赤道印度洋整体偏冷, 赤道东太平洋异常偏暖, 赤道西太平洋异常偏冷, 同期出现 ENSO 暖事件; 在东亚夏季风偏弱年: 赤道印度洋整体偏暖, 不同的东亚季风指数显示的偏弱年太平洋上海温状态不相同。

参考文献

- [1] 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常[J]. 大气科学, 1996, 20(5): 575-583.
- [2] 赵俊杰, 薛峰, 林万涛, 等. El Niño 对东亚夏季风和夏季降水季节内变化的影响[J]. 气候与环境研究, 2016, 21(6): 678-686.
- [3] 杨霞, 管兆勇, 朱保林. IOD 对 ENSO 影响中国夏季降水和气温的干扰作用[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 170-177.
- [4] 符淙斌, 滕星林. 我国夏季的气候异常与厄尔尼诺/南方涛动现象的关系[J]. 大气科学, 1988, 12(S1): 133-141.
- [5] 陈菊英. 中国春夏降水与厄尔尼诺的互相关分析及对 1986-1987 年厄尔尼诺的预测效果检验[M]//长期天气预报论文集. 北京: 海洋出版社, 1992: 174-181.
- [6] Saji, N.H., Goswami, B.N., Vinayachandran, P.N., et al. (1999) A Dipole Mode in the Tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**, 360-363. <https://doi.org/10.1038/43854>
- [7] Webster, P.J., Moore, A.M., Loschnigg, J.P., et al. (1999) Coupled Ocean Atmosphere Dynamics in the Indian Ocean during 1997-98. *Nature*, **401**, 356-360. <https://doi.org/10.1038/43848>
- [8] 闫晓勇, 张铭. 印度洋偶极子对东亚季风区天气气候的影响[J]. 气候与环境研究, 2004, 19(3): 435-440.

- [9] 肖子牛, 晏红明, 李崇银. 印度洋地区异常海温的偶极振荡与中国降水及温度的关系[J]. 热带气象学报, 2004, 18(4): 335-344.
- [10] 李崇银, 穆明权, 潘静. 印度洋海温偶极子和太平洋海温异常[J]. 科学通报, 2001, 46(20): 1747-1751.
- [11] 谭言科, 张人禾, 何金海, 等. 热带印度洋海温的年际变化与 ENSO [J]. 气象学报, 2004, 62(6): 831-840.
- [12] 巢纪平, 巢清尘, 刘琳. 热带太平洋 ENSO 事件和印度洋的 DIPOLE 事件[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 594-602.
- [13] 杨霞, 管兆勇. IOD 对 ENSO 影响亚澳地区降水和气温的干扰作用[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(2): 170-175.
- [14] 施能. 近40年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系[J]. 应用气象学报, 1996, 17(2): 175-181.
- [15] 祝从文, 何金海, 吴国雄. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系[J]. 气象学报, 2000, 58(4): 391-402.
- [16] 黄嘉佑, 李庆祥, 等. 气象数据统计分析方法[M]. 北京: 气象出版社, 2015.
- [17] Ashok, K., Guan, Z. and Yamagata, T. (2003) A Look at the Relationship between the ENSO and the Indian Ocean Dipole. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **81**, 41-56. <https://doi.org/10.2151/jmsj.81.41>