

钱卓蕾, 娄小芬, 马洁华, 等. 2018. 2014 年夏季浙江低温多雨的大尺度环流特征及与海温异常关系 [J]. 气候与环境研究, 23 (2): 199–209. Qian Zhuolei, Lou Xiaofen, Ma Jiehua, et al. 2018. Large-scale circulation characteristics corresponding to the cold and rainy summer of 2014 in Zhejiang Province and the relationship with SST anomalies [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (2): 199–209, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17012.

2014 年夏季浙江低温多雨的大尺度环流特征 及与海温异常关系

钱卓蕾¹ 娄小芬² 马洁华^{3,4} 江丽俐¹ 罗玲²

¹ 绍兴市气象台, 浙江绍兴 312000

² 浙江省气象台, 杭州 310000

³ 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

⁴ 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

摘要 利用 NECP/NCAR 再分析资料、国家气候中心和 NOAA 相关资料, 研究了与 2014 年浙江夏季低温多雨事件相关的大尺度环流特征和海温因子。结果表明: 中纬度我国东部到日本南部气旋性环流异常的存在有利于浙江夏季出现低温多雨, 异常偏强偏南的西太平洋副热带高压 (简称副高) 是 8 月罕见低温多雨的直接原因; 东亚—太平洋型遥相关 (EAP) 和欧亚型遥相关 (EU) 是影响浙江夏季低温阴雨的主要遥相关型, 当 EAP 负位相和 EU 正位相时, 冷空气容易堆积和南下, 与暖湿气流交汇, 有利于降水降温, 8 月罕见低温阴雨是 EAP 负位相和 EU 正位相协同作用的结果。进一步的分析表明 ENSO 暖位相激发了西太平洋上空强烈的异常下沉气流和反气旋, 使得副高偏南偏强, 东亚地区呈 EAP 波列型响应; 热带印度洋海温全区一致模态 (IOBW) 暖位相的维持进一步减弱了 8 月海洋性大陆地区的对流活动; 北大西洋中部海温季内的变化或许与 EU 位相的转变有联系。

关键词 浙江夏季低温多雨 西太平洋副热带高压 遥相关 海温 ENSO

文章编号 1006-9585 (2018) 02-0199-11

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17012

Large-Scale Circulation Characteristics Corresponding to the Cold and Rainy Summer of 2014 in Zhejiang Province and the Relationship with SST Anomalies

QIAN Zhuolei¹, LOU Xiaofen², MA Jiehua^{3,4}, JIANG Lili¹, and LUO Ling²

¹ Shaoxing Meteorological Office, Shaoxing, Zhejiang Province 312000

² Meteorological Bureau of Zhejiang Province, Hangzhou 310000

³ Climate Change Research Centre, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

⁴ Nansen–Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Using NECP/NCAR reanalysis data, NCC (National Climate Center) and NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) relevant data, large-scale circulation characteristics and sea surface temperature corresponding to the cold and rainy summer of 2014 in Zhejiang Province are analyzed. The results are as follows. The anomalous cyclonic circulation in the middle and low latitudes from eastern China to southern Japan was conducive to cold and rainy summer in Zhejiang, while the abnormally strong and southward expanding western Pacific subtropical

收稿日期 2017-01-23; 网络预出版日期 2017-08-31

作者简介 钱卓蕾, 女, 1985 年出生, 硕士, 副高级工程师, 主要从事天气预报和气候研究。E-mail: qianzl@mail.iap.ac.cn

资助项目 中国气象局预报员专项 CMAYBY2015-029

Funded by China Meteorological Administration Forecaster Project (Grant CMAYBY2015-029)

high was also an important factor for the extremely cold and rainy August; EAP and EU were two main teleconnection patterns that affected the abnormal cold and rainy summer in Zhejiang Province. The negative EAP (East Asia-Pacific teleconnection pattern) phase and positive EU (Eurasian teleconnection pattern) phase were in favor of cold air accumulation and southward moving. The cold and warm air intersected over Zhejiang Province, leading to cold rainy weather. The rare cold rainy August was the synergistic result of negative EAP phase and positive EU phase. Further analysis reveals that the warm ENSO phase triggered a strong abnormal descending airflow and an anticyclone over the western Pacific in August, which forced the western Pacific subtropical high to move southward and become stronger, while EAP wave trains occurred over East Asia in response. The maintenance of the warm IOBW (Indian Ocean Basin Wide) phase further weakened convective activities over the Maritime continent in August. Intraseasonal SST changes in the central North Atlantic might be associated with the shifts of the EU phase.

Keywords Zhejiang cold and rainy summer, Western Pacific subtropical high, Teleconnection pattern, Sea surface temperature, ENSO

1 引言

对浙江而言,夏季高温少雨可以造成干旱,低温多雨会造成洪涝,因而研究夏季低温多雨变化规律是迫切需要解决的问题。目前,对中国南部夏季低温多雨成因的研究主要是从大气环流和海气相互作用等方面出发。

许多研究表明大气环流异常对南方夏季气温和降水异常有直接影响:长江中下游夏季温度变化与西太平洋副热带高压(简称副高)的位置和强度联系十分密切(向元珍和包澄澜,1986;Gong et al., 2004;蔡佳熙和管兆勇,2007)。除了西太平洋副高,南亚高压与我国南部地区的气温和降水也有重要影响(钱永甫等,2002)。郭玲等(2012)的研究表明东亚夏季风的异常直接导致中国东部夏季降水的异常。黄荣辉(1990)在研究我国夏季旱涝时指出,江淮流域旱涝的发生与从菲律宾经东亚到北美的东亚-太平洋(简称EAP型)夏季遥相关波列相联系。在菲律宾周围对流活动强的年份,强的副高位于日本及我国江淮流域上空,我国江淮流域及日本高温少雨,反之,则江淮流域降水偏多。

海温变化与夏季气温和降水也有重要联系。许多学者对ENSO事件进行了深入研究,发现El Niño事件同赤道东太平洋、正SSTA赤道中太平洋、OLR负异常及西太平洋副热带海域负SSTA,印尼附近OLR正异常相联系,即同热带太平洋Walker环流异常减弱对应;在El Niño当年,全国大部分地区温度偏低(李崇银,1989;刘永强和丁一汇,1995;马乃孚和杨景勋,2000)。2014年夏季正是处于El Niño事件发展期,Walker环流减弱,热带西太平洋出现异常下沉气流,导致副高位置偏南,对浙江出

现罕见低温多雨事件有重要影响。顾骏强等(2001)研究指出:浙江夏季降水量变化与前期某些月份关键海区的海温变化有显著相关,这些海区包括北太平洋西风漂流区、赤道东太平洋、黑潮区、加利福尼亚洋流区,这在浙江的北部地区表现得尤其突出。

以往对夏季降水和温度的研究,主要针对单个因子或者大范围区域,并采用统计方法研究多年平均得出普适因子,而一个地区的某一次低温多雨事件与气候概况既有共同性,也有特殊性。我们选取2014年夏季浙江低温多雨事件,正是因其特殊性:该年夏季气温明显偏低,降水异常偏多,特别是8月,在持续海温异常的作用下,西太平洋副高偏南,同时北侧冷空气南下较频繁,出现了历史罕见的低温阴雨寡照天气。通过分析大气环流和海温异常特征,得出本次低温多雨事件的大尺度成因,为后续深入研究奠定基础。

2 数据资料来源和实况分析

文中所用的资料为:(1)浙江省自动站温度和降水资料;(2)NCAR/NCEP月平均的再分析资料,资料水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度);(3)NOAA发布的Nino3区($5^{\circ}\text{S}\sim 5^{\circ}\text{N}$, $150^{\circ}\text{W}\sim 90^{\circ}\text{W}$)海表温度距平指数;(4)国家气候中心提供的热带印度洋全区一致海温指数(IOBW指数)($20^{\circ}\text{S}\sim 20^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{E}\sim 110^{\circ}\text{E}$)

2014年夏季浙江全省平均温度 26.5°C ,比常年同期偏低 0.5°C ,降水量 750.1mm ,比常年同期偏多30%。分析图1,可以发现,6、7、8月分别出现了不同程度的低温多雨,6月降水比常年平均偏多18%,气温偏低 0.2°C ,7月降水比常年偏多

13%，气温偏低 0.3 °C，8 月最显著，降水比常年同期偏多 55%，平均气温比常年偏低 1.2 °C（图 1）。

3 大尺度环流影响因子

3.1 东亚夏季风环流系统

东亚夏季风是北半球夏季中低纬度活跃的环流系统，中国夏季降水的年际变化与东亚夏季风环流变化有直接联系，中国大部分地区特别是东部夏季降水受东亚夏季风强弱和进退、爆发早晚以及持续时间长短影响。在 2014 年夏季 850 hPa 风场距

平分布图上（图 2a），东亚季风区被异常气旋控制，其中气旋西侧的东北风较强，控制我国东部沿海上空，菲律宾北部也有异常气旋，使得我国东部到南海都维持异常东北风，气旋的存在使得这些地区的辐合上升运动加强，同时东北风异常阻碍了西南季风的推进，使得该年夏季季风雨带明显偏南。从 6、7、8 月各月的风场距平变化（图 2b、2c、2d）来看，从 6 月开始，浙江特别是浙中北地区上空始终存在北风异常，表明在整个夏季，冷空气活动都较常年频繁，而西南季风位置始终偏南。6 月（图 2b）浙江正处于梅雨季节，我国东部到日本南部维持一

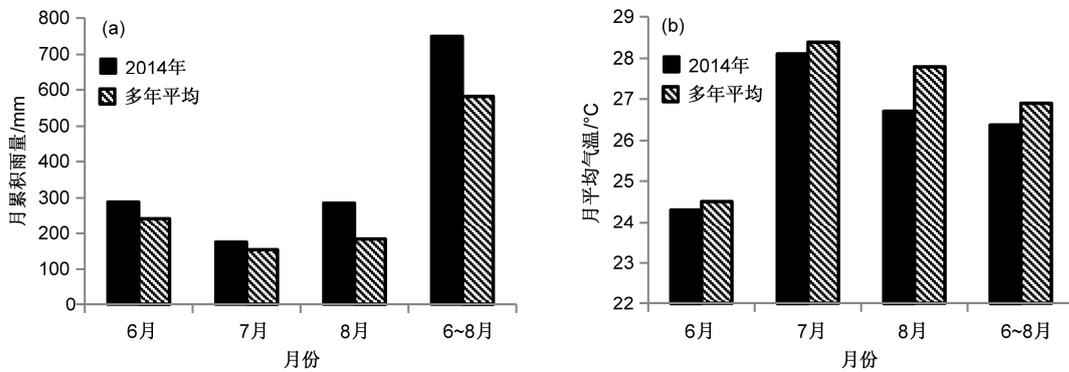


图 1 2014 年夏季和多年平均浙江 (a) 雨量和 (b) 平均气温

Fig. 1 (a) Cumulative rainfall and (b) average temperature in the summer of 2014 and annudmeans in zhejiang Province

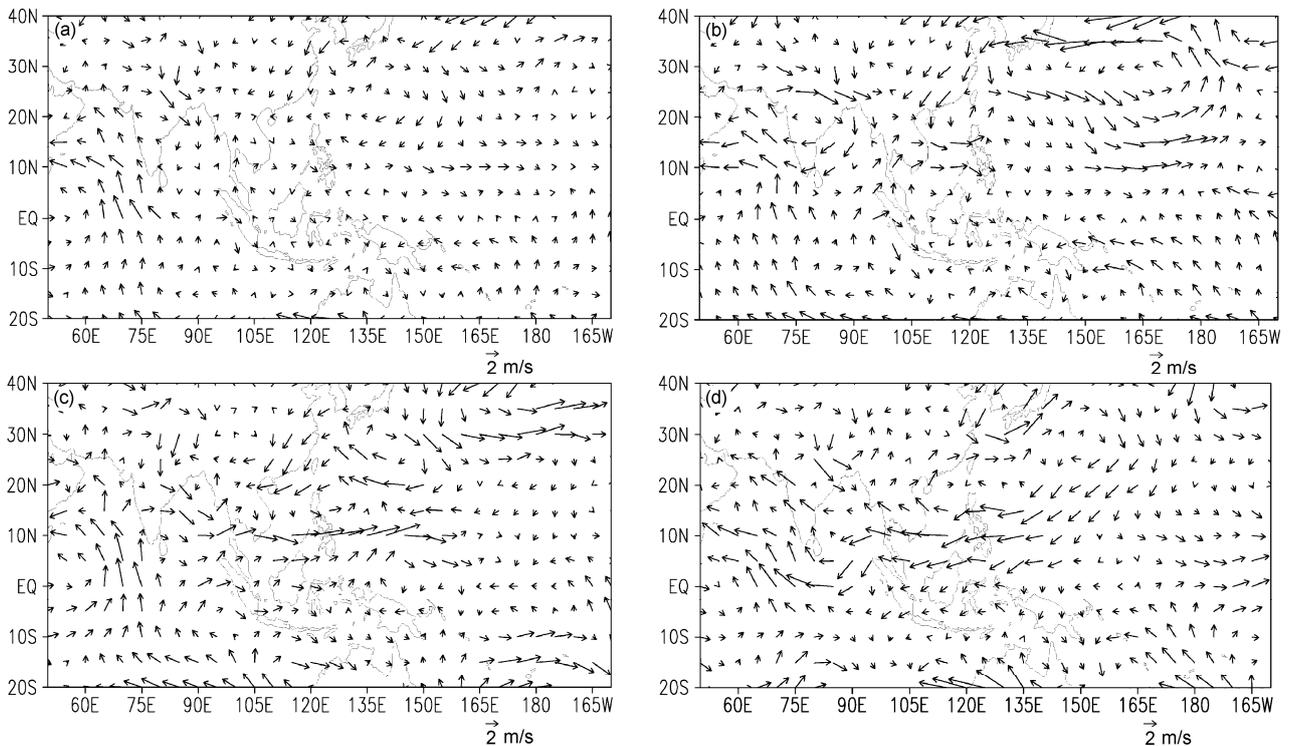


图 2 2014 年夏季 850 hPa 风场距平：(a) 夏季平均；(b) 6 月；(c) 7 月；(d) 8 月

Fig. 2 850-hPa wind anomalies in the summer of 2014: (a) June–August (JJA); (b) June; (c) July; (d) August

宽广的异常气旋,同时在华南沿海也为一异常气旋环流控制,这种形势与夏季平均是类似的。中低纬度异常气旋的出现表明当年梅雨锋偏强,导致梅汛期气温偏低降水偏多。西太平洋上的异常反气旋环流中心在 10°N 以南,表明副高的位置明显偏南。进入 7 月(图 2c),气旋西侧的北风异常向南推进至 10°N ,按照常年平均,浙江出梅后受副高控制出现高温干旱,而当年受异常气旋控制,对流活动较强,降水偏多,同时由于冷空气的不断南下,不利于出现大范围的高温干旱,此时异常反气旋已东退至日本南部至西太平洋。6~7 月的环流形势都表现为东北风异常活跃而夏季风显著偏南,前者使得冷空气顺利南下至浙江与西南气流交汇,对降水和降温有利,而后者削弱了浙江上空强的暖湿气流,水汽输送能力减弱,不利于降水,因此 6~7 月的低温多雨不显著。而到了 8 月(图 2d),我国东部到日本南部的异常气旋继续维持,位置向北移动, 30°N 附近由东北风转成西北风, 30°N 以南的异常气旋消失,取而代之的是强大的异常反气旋,中心脊线在 20°N 左右,向西一直延伸到中南半岛,异常西南风向北推进至 28°N 附近,在浙江上空形成西北风与西南风的辐合中心。常年 8 月副高脊线一般在 30°N 附近,而当年 8 月副高明显偏南,原本应位于华北的锋区和雨带随之南退至长江中下游地区。锋区北侧是异常的干冷西北气流,冷空气频繁渗透,南侧是异常的西南暖湿气流,浙江上空的水汽输送和辐合上升运动较常年和当年 6~7 月都异常偏强,更容易出现大范围降雨,且西北气流干冷,西南气流暖湿,斜压性和锋区更强,进一步加剧了降水。同时,北方冷空气持续影响有利于降温,配合长期的阴雨寡照,导致了 8 月的罕见低温。

3.2 北半球遥相关

由前述可知,东亚夏季风环流异常是浙江夏季气温和降水异常的直接成因,而东亚夏季风环流异常是与中高纬环流以及欧亚其他环流系统相关联的,因此有必要进一步研究北半球遥相关型。我们将 1985~2014 年这 30 年中出现的夏季低温多雨和高温少雨事件的 500 hPa 位势高度场进行合成分析,发现 500 hPa 上北半球存在两个明显的遥相关型,分别为东亚—太平洋型遥相关(简称 EAP)和欧亚型遥相关(简称 EU)。在 2014 年夏季平均和各月 500 hPa 位势高度距平场上(图 3),这两个遥

相关也是客观存在的,但不同月份间,遥相关的显著性有明显差异。

3.2.1 东亚—太平洋型遥相关(EAP)

从图 3a 可以看到 2014 年夏季平均 500 hPa 位势高度场上存在 EAP 型遥相关:在菲律宾和我国江南地区存在正距平,江淮地区至日本列岛上空为负距平,贝加尔湖到鄂霍次克海上空为正距平。低纬的正距平区表明西太平洋副高偏强偏南,中纬的负距平区表明低槽活跃,而高纬的正距平区则反映鄂霍次克海阻塞高压也较常年偏强。EAP 型遥相关的出现说明中低纬度的夏季风环流系统与中高纬度系统是相互制约、相互联系的,亚洲东北部阻塞高压和副高通过 EAP 型遥相关波列联系在一起,通过两者之间的这种关系进而可以影响到浙江的夏季降水。当 EAP 位相为负,即从高纬到低纬度表现为“+ - +”的波列时,有利于中高纬度冷空气南下与夏季西南季风交汇于较低纬度,形成连续低温阴雨,2014 年夏季就是处在 EAP 的负位相。从夏季各月的位势高度距平场(图 3b、3c、3d)变化来看,6 月虽然出现了 EAP 遥相关型,但浙江上空是负距平,说明槽底位置比较低,雨带相比常年梅汛期要偏南一些,因此 6 月浙江降水量并没有出现明显增多;7 月 EAP 不显著,且呈现极弱的正位相,东亚中纬度和低纬度均为弱的正距平,鄂霍次克海附近出现了负距平,这个形势是不利于中高层冷空气南下的,冷空气可能只局限于低层,这也是不利于降水明显偏多的原因之一。而在 8 月的 500 hPa 高度场上,东亚的 EAP 比较典型, 30°N 以南地区都为正距平控制, $30^{\circ}\text{N}\sim 55^{\circ}\text{N}$ 为负距平控制,且负距平一直向西延伸到 90°E ,说明中纬度槽十分宽广,高纬正距平在整个夏季中最强,意味着高纬形势更加稳定,有利于冷空气持续从中纬度槽底南下直达浙江,副高偏南使得西南季风较常年明显偏南,与西北气流交汇点正好位于 30°N 附近,形成该地区的低温多雨。这与前面对东亚夏季风的分析结果是一致的。从 EAP 指数各月的变化来看,6 月 EAP 指数为 -0.291 ,7 月为 0.093 ,8 月为 -0.461 ,可以看到除了 7 月 EAP 不显著外,6 月和 8 月都为 EAP 负位相,其中 8 月最显著,EAP 负位相的存在对于浙江整个夏季的低温多雨和 8 月的罕见低温多雨有重要意义。

3.2.2 欧亚型遥相关(EU)

除了 EAP,我们还发现:在(图 3d)上,自欧

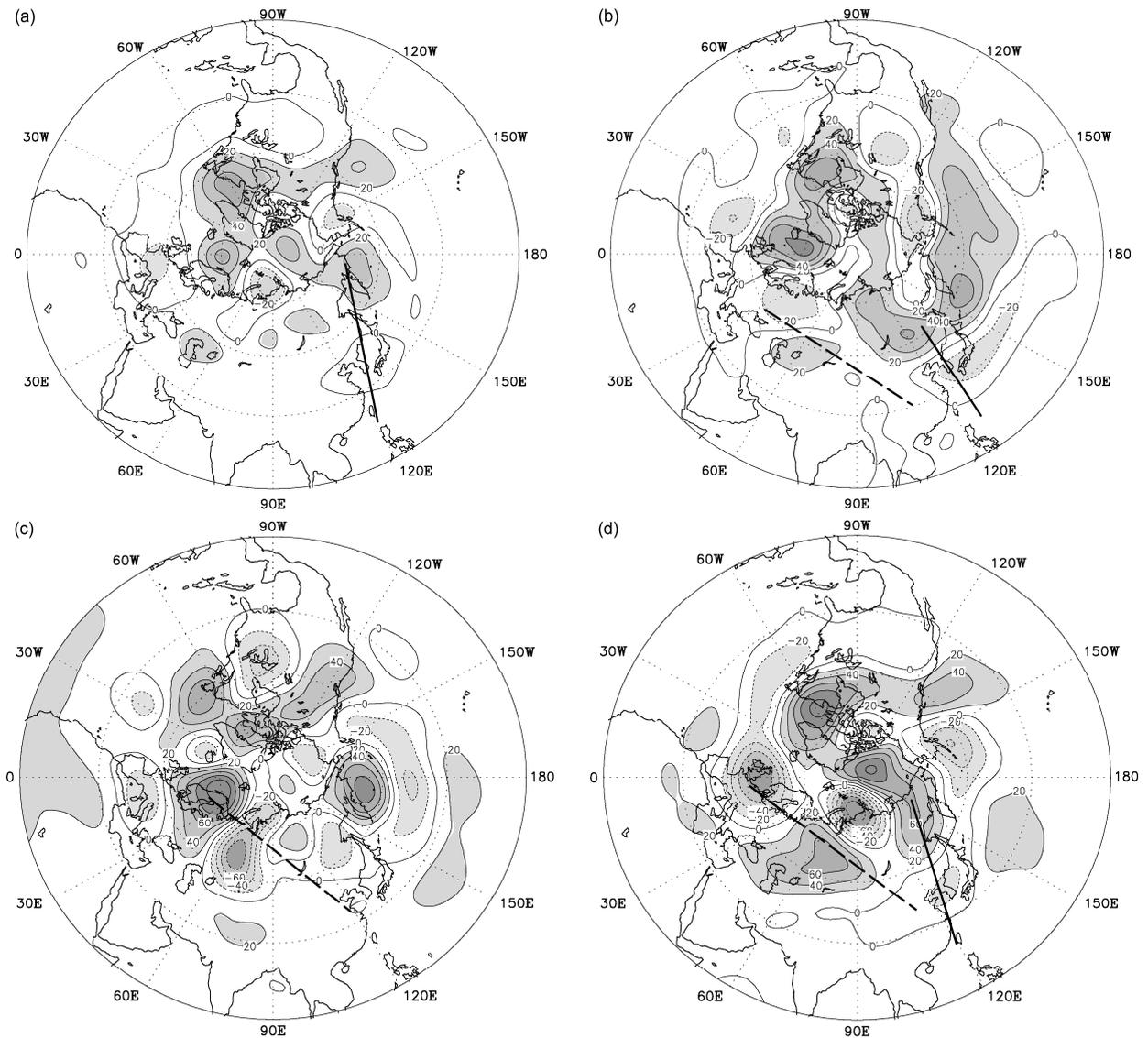


图 3 2014 年夏季 500 hPa 位势高度距平 (单位: gpm): (a) 夏季平均; (b) 6 月; (c) 7 月; (d) 8 月。加粗实线为 EAP 型遥相关, 加粗虚线为 EU 型遥相关

Fig. 3 500-hPa geopotential height anomalies (gpm) in the summer of 2014: (a) JJA; (b) June; (c) July; (d) August. Thickening solid line is for EAP (East Asia–Pacific teleconnection pattern) and thickening dotted line is for EU (Eurasian teleconnection pattern)

洲西部地区、乌拉尔山地区到东亚沿岸呈现出“一十一”的异常距平波列; 类似于 Wallace and Gutzler (1981) 定义的欧亚遥相关型 (EU), 当 EU 指数为正时, 乌拉尔山高压脊偏强, 欧洲西部和亚洲东岸槽也偏强。从冷暖空气影响路径不难解释这一反相关关系: 欧洲西部槽偏强, 有利于冷空气积聚, 乌拉尔山高压脊偏强, 意味着沿脊前西北气流南下的冷空气偏强, 亚洲东岸槽偏强, 槽底偏低, 冷空气能到达更南的位置, 与南侧强盛的暖湿气流汇合。因此 EU 的作用主要是源源不断地提供干冷空气, 加强气流辐合和斜压性, 促进降水增幅。6 月

(图 3b) EU 为较弱的正位相, 正负中心较弱, 中心值为 ± 20 gpm, 乌拉尔山的正距平范围小, 位置偏西, 而东亚的负距平中心位置又过于偏东, 从乌拉尔山南下的冷空气难以到达东亚沿岸, 梅汛期低层冷空气又主要来自贝加尔湖的阻塞高压底部, 因此 EU 对 6 月降水的影响比较小; 7 月 (图 3c) EU 转为明显的负位相, 不利于中高纬度高层西部冷空气的堆积和东移南下; 到了 8 月 (图 3d), EU 转为典型的正位相, 中心明显加强, 乌拉尔山和欧洲西岸的正负中心值分别达到 ± 60 gpm。从 EU 指数的月变化来看, 6 月为 0.197, 7 月为 -0.746 , 8 月为

0.811, 6~8月平均后 EU 指数很小, 因此在夏季平均场上该遥相关不明显(图 3a)。以上分析可知 8 月冷空气南下影响浙江的条件最好, 也最有利于降温 and 引发低温阴雨天气。

结合 EAP 的分析, 8 月 EAP 和 EU 都比较显著, 且 EAP 为负位相, 而 EU 为正位相。当 EAP 和 EU 均活跃且位相相反时, 雨带集中在长江流域(邹珊珊等, 2013)。因而 8 月的罕见低温阴雨正是在 EAP 和 EU 的协同作用下发生的。

4 海温影响因子

4.1 ENSO 循环

ENSO 作为海温年际气候变化中的最强信号, 是影响东亚季风环流系统从而导致东亚气候异常的关键因素。类似于上面的形势场分析, 对近 30 年的

夏季低温多雨和高温少雨事件的海温场进行合成分析, 发现 Nino3 区 SST 是影响夏季降水和气温变化最显著的相关因子, 它存在一定的年际振荡, 是表征 ENSO 循环的关键区海温, 从春季到夏季, Nino3 区正(负)距平, 即 ENSO 暖(冷)位相, 浙江夏季容易出现低温多雨(高温少雨)。2014 年 1~3 月, Nino3 区的海温偏低(图 4 和表 1), ENSO 呈现冷位相, 自 4 月起, Nino3 区海温出现正距平, ENSO 转变为暖位相。Huang and Wu (1989) 的研究表明: 在 El Niño 发展期的夏季, 西太平洋副高偏南, 影响我国的西南气流偏弱, 东亚夏季风偏弱, 我国夏季主要季风雨带偏南, 中南半岛和华南大部降水偏少, 东南沿海偏多, 夏季中期江淮流域多雨; 薛峰和刘长征(2007)发现 El Niño 对东亚夏季风的影响随季节进程有明显变化, 6 月影响较弱, 而 8 月影响最强。

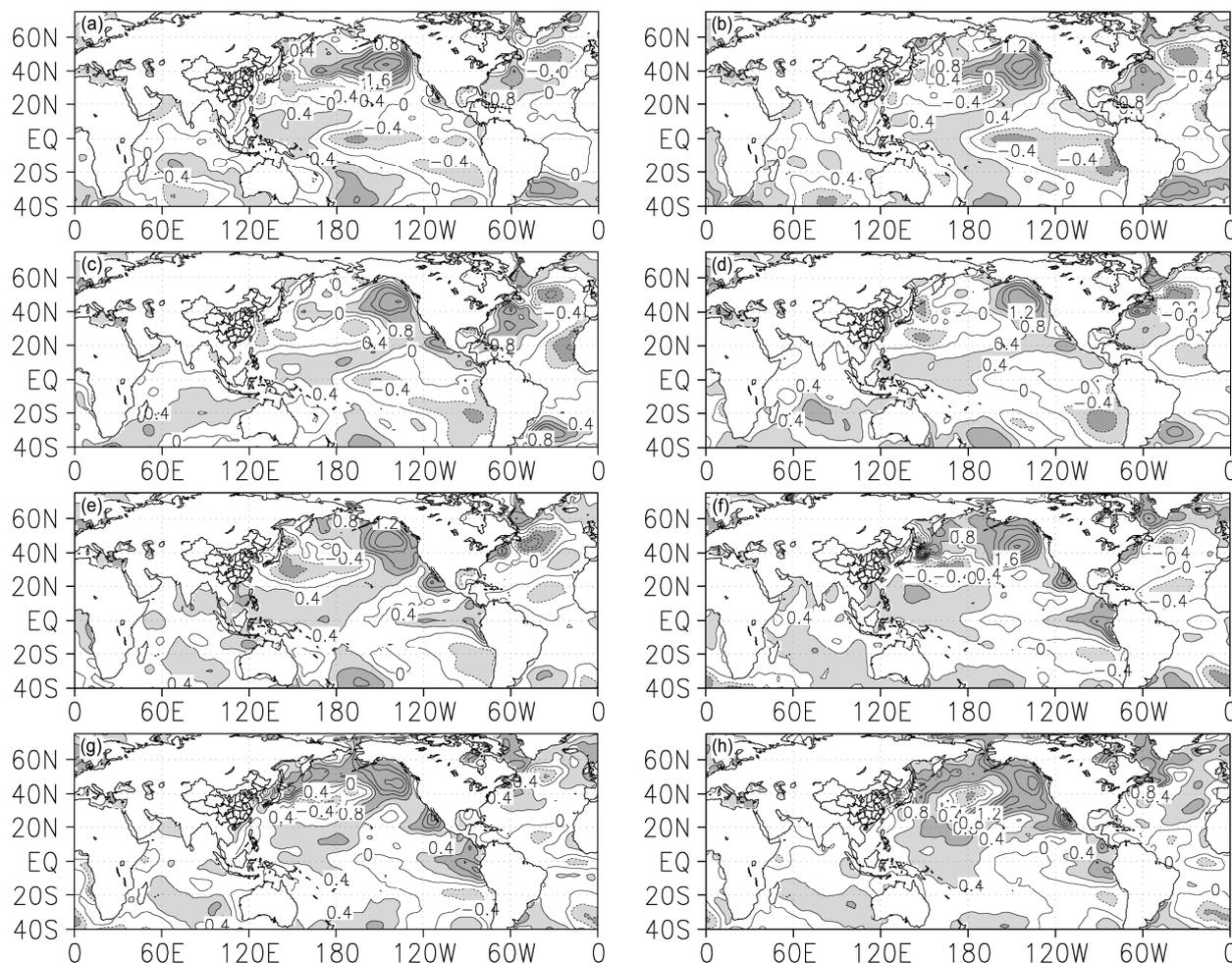


图 4 2014 年海表温度距平(单位: °C): (a) 1 月; (b) 2 月; (c) 3 月; (d) 4 月; (e) 5 月; (f) 6 月; (g) 7 月; (h) 8 月
Fig. 4 SST anomalies (°C) in 2014: (a) January; (b) February; (c) March; (d) April; (e) May; (f) June; (g) July; (h) August

表 1 2014 年 Nino3 指数、IOBW 指数和 Mid-NA 指数的月变化

Table 1 Monthly variations of Nino3, IOBW, and Mid-NA indexes in 2014

	Nino3 指数	IOBW 指数	Mid-NA 指数
1 月	-0.39	0.05	-0.36
2 月	-0.83	0.02	-0.30
3 月	-0.25	0.12	-0.44
4 月	0.22	0.24	-0.63
5 月	0.60	0.35	-0.59
6 月	0.88	0.38	-0.44
7 月	0.62	0.22	0.27
8 月	0.48	0.20	0.79

El Niño 对大气环流的强迫作用主要是通过海气相互作用将 Walker 环流上升支从西太平洋东移至中东太平洋来实现的, 从而使得赤道太平洋洋面上的对流活动异常形成东升西降的结构, 赤道中太平洋和以东地区对流活跃, 西太平洋地区对流活动却受到抑制。热带西太平洋海洋性大陆上空的对流减弱冷却效应使得热带大气在对流层低层产生 Rossby 波响应, 从而在海洋性大陆以北的热带西太平洋和我国南海地区强迫出反气旋环流的异常 (Zhang et al., 1999), 使得西太平洋副高呈现明显偏南之势。2014 年 5~8 月, ENSO 处于暖位相, 即 El Niño 发展期, 对太平洋上的对流和低层辐散场产生了影响, 这个影响在 8 月非常显著, 表现为 850 hPa 风场上 (图 2d), 热带西太平洋出现大范围异常东风, 东风分量越往西越强, 在热带西太平洋上呈现明显的辐散, 抑制该地区的上升运动, 而此时东太平洋是西风 and 东风的辐合区 (图略), 促使当地上升气流的发展, 表现为垂直方向上东升西降的偶极子结构 (图 5c)。再比较夏季各月的水平和纬向垂直环流 (图 2 和图 5), 可以看到, 6 月 (图 5a) 在西太平洋上的异常环流西升东降, 在 130°E~160°E 为异常下沉运动区, 与低层风场上 (图 2b) 的异常反气旋环流对应; 7 月, 西太平洋和中太平洋以异常上升运动为主, 风场上表现为宽广的异常气旋 (图 2c), 东太平洋则表现为异常下沉气流。从 6~7 月的垂直环流场来看, ENSO 暖位相的强迫效应不明显。而到了 8 月, 如前所述, 在 170°E~90°W 之间的太平洋中东部, 出现较强的异常上升运动, 而在 120°E~170°E 之间的赤道西太平洋上, 是大范围的异常下沉气流, 辐散和下沉气流在低层风场上 (图 2d) 形成西太平洋到南海的异常反气旋, 其北侧异常的西南季风使得 30°N 附近的水汽和热

量输送明显加强, 并产生异常辐合, 导致降水明显偏多。

ENSO 对东亚季风环流的影响主要是通过改变热带纬向环流从而影响西太平洋副高位置和强度来实现的。而西太平洋副高是 EAP 遥相关的主要成员之一, 我们用 Nino3 区的海温来回归 8 月 500 hPa 位势高度场 (图 6a), 发现在北半球存在类似 EAP 的遥相关, 位置略偏东, 说明 ENSO 是 EAP 的强迫源, ENSO 不但能制约热带大气环流, 通过 EAP 也能影响中高纬环流。因此, 2014 年 ENSO 暖位相对 EAP 的强迫作用, 不仅使西太平洋副高偏南, 也让中高纬度的冷空气能持续南下, 造成罕见低温多雨。

4.2 热带印度洋海温全区一致模态 (IOBW)

除了太平洋, 印度洋也是夏季风活动的重要下垫面, 其海温特性对于夏季风环流异常有非常重要的影响。热带印度洋海温异常最主要的模态是全区一致的海温变化, 通常在春季最强, 热带印度洋的一致增暖 (变冷) 有利于南海夏季风爆发的推迟 (提早) (袁媛和李崇银, 2009); 当印度洋偏暖时, 我国夏季华南气温偏高、东北气温偏低、长江流域降水偏多 (Hu et al., 2011); 热带印度洋海盆一致偏暖使西太平洋副高增强, 位置偏南, 导致西北太平洋反气旋异常的形成和维持, 有利于中国南方降水加强 (李维京等, 2016); 图 4 和表 1 都表明印度洋出现较明显增暖是从春季开始的, 在夏季低层距平风场上 (图 2) 表现为西南季风异常偏南, 这与印度洋一致增暖有关。印度洋海温与太平洋海温的变化是有密切联系的, 有研究表明印度洋的增暖是 ENSO 事件发生的结果而不是其前期信号 (周天军等, 2004), 印度洋起一种信号储存的作用, 将冬季的 ENSO 信号储存起来, 并影响夏季东亚气候 (Yang et al., 2007; Xie et al., 2009)。因而印度洋海温的作用也可以认为是对 ENSO 效应的一种辅助加强和延续。从表 1 也可以发现: 在 ENSO 转为暖位相之后, IOBW 暖位相才逐渐显著起来, 虽然正距平值比较弱, 但持续增暖也会对印度洋—西太平洋上空的大气环流产生影响。

在纬向垂直环流场上 (图 5), 6 月印度洋盛行异常下沉气流, 只在 60°E 有小范围弱的上升气流, 印度洋海温一致增暖的效应不明显, 7 月印度洋呈现西升东降的异常垂直环流形势, 异常信号弱, 但此时印度洋的效应已经显现。8 月以后, 受前期和

同期热带印度洋海温持续偏暖影响, 印度洋上空的对流发展, 垂直方向上的环流类似于 7 月, 在沿赤道的纬向垂直环流圈上西印度洋也是弱的异常上升运动 (图 5c), 低层风场上 (图 2d) 表现为显著的东风距平从热带西太平洋穿过海洋性大陆到东

印度洋, 而在赤道西印度洋是西风距平。低层风场的辐合在赤道印度洋中部形成异常气旋, 这个气旋在 7 月已经生成, 8 月增强, 进一步加强了其上空的对流活动和上升运动。同时由于高层西风距平从印度洋吹向西太平洋 (图略), 这样由热带印度洋

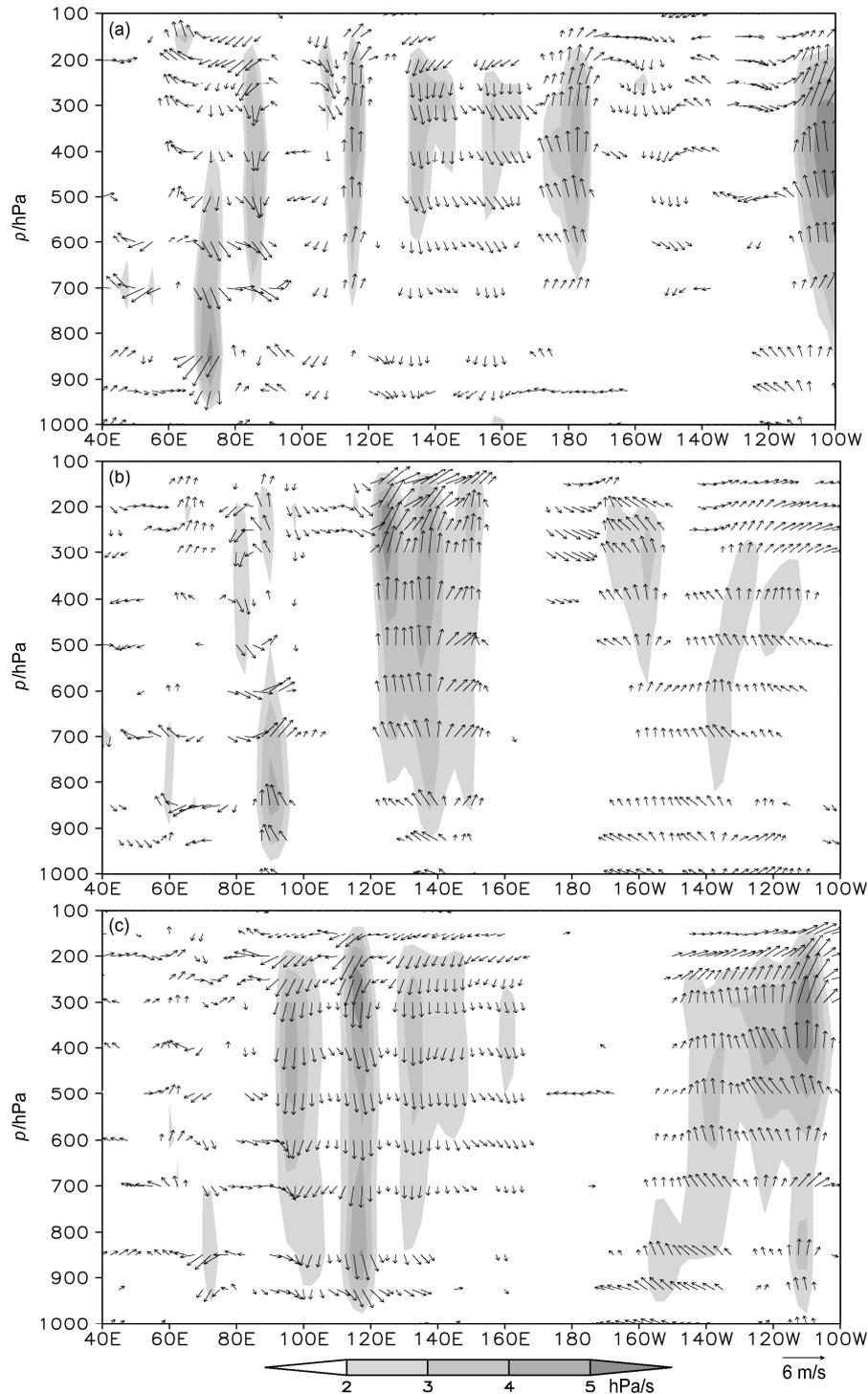


图 5 2014 年 (a) 6 月、(b) 7 月和 (c) 8 月 $0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$ 平均纬向-垂直风场距平 (单位: m/s) 的经度-高度剖面 (阴影代表垂直风速大于 2hPa/s)
Fig. 5 Longitude-pressure cross sections of meridional-vertical wind anomalies averaged over ($0^{\circ}\sim 10^{\circ}\text{N}$) (m/s) in (a) June, (b) July, and (c) August of 2014 (shaded areas indicate vertical wind $\geq 2\text{hPa/s}$)

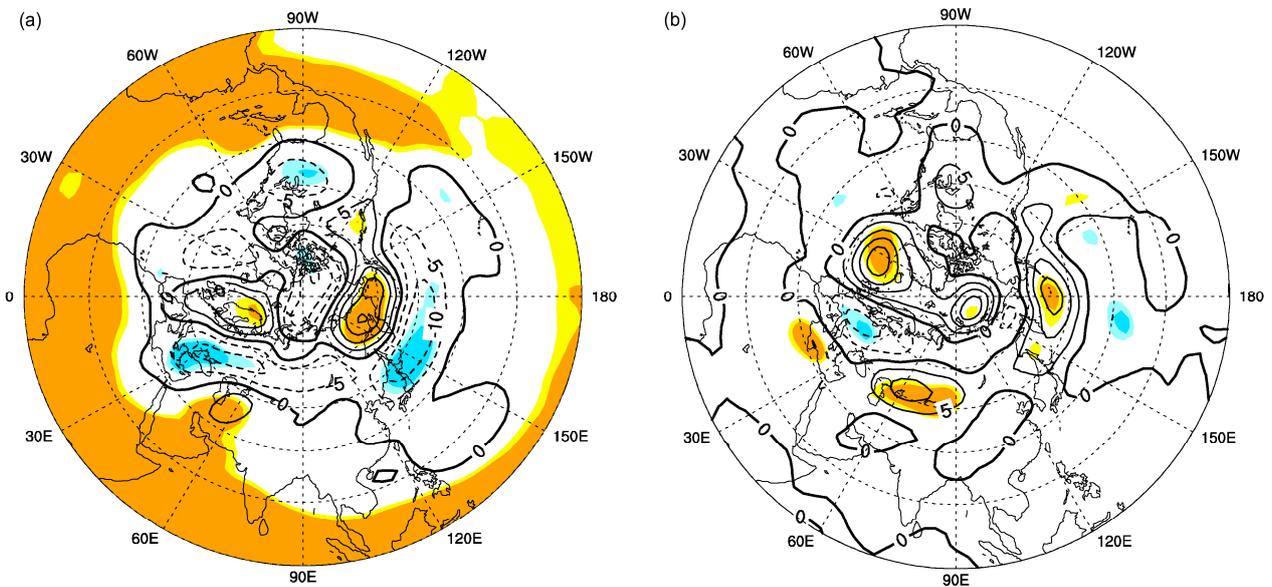


图6 (a) Nino3指数和(b)北大西洋中部海表温度回归的8月500 hPa位势高度场(浅、深填色表示通过90%、95%的置信水平检验)

Fig. 6 Regression maps of 500-hPa geopotential height in August onto (a) Nino3 index and (b) Mid-North Atlantic Ocean SST (Light/dark colored areas are for values that pass the confidence level of 90%/95%)

的增暖驱动了一个横跨热带印度洋—西太平洋的异常反 Walker 环流,由此而产生的异常下沉运动合并入西太平洋上空的异常下沉支中,加强了下沉气流的强度,使得海洋性大陆地区的对流进一步减弱,增强了 El Niño 的效应,维持西太平洋至南海的异常反气旋,更有利于西太平洋副高和季风主雨带位置偏南。印度洋海温的增暖加强了 ENSO 对大气环流的影响,我们推测其对 EAP 也有一定的调制作用。

4.3 北大西洋海温

对北半球的遥相关分析表明:2014年夏季特别是8月气候主要受EAP和EU的共同影响。耿全震(1996)的研究指出EU型遥相关的涡度源和能量源主要位于北大西洋地区;在欧亚大陆上空,大气内部存在与EU相联系的波列从北大西洋传播到乌拉尔山以东的欧亚大陆地区(刘毓赞和陈文,2012)。所以本文进一步分析了北大西洋地区海温的变化。从图4可以发现:北大西洋中部地区(40°N~60°N,90°W~20°W)海温在1~6月有较明显的负距平,从7月开始,负异常范围明显缩小,出现较大范围正距平,从区域平均的海温距平(简称Mid-NA)变化也可以清楚地看到这一变化趋势:1~6月海温偏低,7、8月海温偏高,尤其是8月,海温正距平达到0.79℃。在北大西洋中部海温回归

的8月500 hPa位势高度场(图6b)上,欧亚大陆自西向东呈现“—+—”的距平波列,正负中心位置与EU的中心对应,表明北大西洋中部海温与EU有关。比较两者的月际变化,发现确实是有一定联系的:EU在1~7月除了6月有非常弱的正位相之外,都表现为负位相,与海温异常偏低有关,而8月是显著正位相,与海温异常偏高相联系。

5 结论

通过对环流形势和海温场的分析,我们研究了2014年夏季特别是8月罕见低温阴雨寡照事件的大尺度影响因子,得出以下结论:

(1)东亚夏季风环流异常是导致浙江低温多雨的直接大尺度因子,从6月开始,浙江被气旋性异常环流控制,有利于上升运动发展促进降水,同时浙江上空的偏北风异常有利于降温。6~7月冷空气活跃,但西南季风偏南,水汽条件不足,因此低温多雨不显著,而8月异常偏强偏南的副高为浙江上空提供了强烈的西南气流,有强的水汽和能量输送,与北侧异常偏北风交汇,导致降水偏多,阴雨天气配合冷空气降温,气温持续走低。

(2)从大气环流的遥相关来分析,2014年夏季北半球有两个显著遥相关,分别为EAP和EU。当

满足 EAP 负位相、EU 正位相时, 高纬环流形势稳定, 中纬度盛行西风槽, 冷空气容易堆积并南下, 低纬度西太平洋副高偏南, 西南季风南退, 冷暖空气在 30°N 附近交汇, 造成低温多雨天气。6 月虽然 EAP 为负位相, EU 为正位相, 但两个系统强度均较弱, 对低温多雨有一定作用但不显著。而 7 月 EAP 不明显, EU 为负位相, 这样的高空环流配置对出现低温多雨不利, 7 月的低温阴雨主要跟低层环流有关。8 月环流形势同时满足 EAP 负位相和 EU 正位相, 且遥相关显著, 受到两者的协同作用, 浙江出现了罕见的低温多雨寡照天气。

(3) 海温变化对 2014 年浙江夏季低温多雨也有重要指示意义。ENSO 暖位相激发出东升西降的垂直异常环流, 西太平洋地区为下沉气流, 使得西太平洋副高位置明显偏南, 与其相伴的西南气流和雨带也偏南。EAP 波列的响应与以往研究中 ENSO 暖位相时一致(宗海锋等, 2008; 汪靖等, 2009)。而 IOBW 较弱暖位相的存在, 进一步减弱了海洋性大陆地区的对流活动, 有利于副高偏强。同时我们还推测北大西洋海温变化与 EU 相关, 8 月 EU 显著正位相可能与海温正异常有关联, 不过这个结论有待进一步证实, 同时海温的影响机理也需要进行后续深入研究。

参考文献 (References)

蔡佳熙, 管兆勇. 2007. 我国南方地区夏季低温变化特征及其成因 [J]. 南京气象学院学报, 30 (6): 799–806. Cai Jiayi, Guan Zhaoyong. 2007. Characteristics of cold summer events in southern China and their relations with variations of Asian summer monsoon [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (6): 799–806.

耿全震. 1996. 北半球对流层上层遥相关型的涡度源、能量源与能量传播 [J]. 应用气象学报, 7 (4): 414–420. Geng Quanzhen. 1996. Vorticity source, energy source and energy propagation of the teleconnection patterns in the upper troposphere of Northern Hemisphere [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 7 (4): 414–420.

Gong D Y, Pan Y Z, Wang J A. 2004. Changes in extreme daily mean temperatures in summer in eastern China during 1995–2000[J]. Theor. Appl. Climatol., 77: 25–37, doi: 10.1007/s00704-003-0019-2.

顾骏强, 徐集云, 樊高峰. 2001. 浙江夏季降水变化及与北太平洋海温关系 [J]. 科技通报, 17 (2): 17–23. Gu Junqiang, Xu Jiyun, Fan Gaofeng. 2001. The variability of summer rainfall in Zhejiang and its correlation with SST in the North Pacific [J]. Bulletin of Science and Technology (in Chinese), 17 (2): 17–23.

郭玲, 何金海, 祝从文. 2012. 影响长江中下游夏季降水的前期潜在预报因子评估. 大气科学, 36 (2): 337–349. Guo Lin, He Jinhai, Zhu Congwen. 2012. Evaluations of prior potential predictors for the summer

rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 337–349, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11060.

黄荣辉. 1990. 引起我国夏季旱涝的东亚大气环流异常遥相关及其物理机制的研究 [J]. 大气科学, 14 (1): 108–117. Huang Ronghui. 1990. Studies on the teleconnections of the general circulation anomalies of East Asia causing the summer drought and flood in China and their physical mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 14 (1): 108–117, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1990.01.14.

Huang R H, Wu Y F. 1989. The influence of ENSO on the summer climate change in China and its mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 6: 21–32, doi: 10.1007/BF02656915.

Hu K M, Huang G, Huang R H. 2011. The impact of tropical Indian Ocean variability on summer surface air temperature in China [J]. J. Climate, 24: 5365–5377, doi: 10.1175/2011JCLI4152.1.

李崇银. 1989. El Niño 事件与中国东部气温异常 [J]. 热带气象, 5 (3): 210–219. Li Chongyin. 1989. El Niño event and the temperature anomalies in eastern China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 5 (3): 210–219.

李维京, 张若楠, 孙丞虎, 等. 2016. 中国南方旱涝年际年代际变化及成因研究进展 [J]. 应用气象学报, 27 (5): 577–591. Li Weijing, Zhang Ruonan, Sun Chenghu, et al. 2016. Recent research advances on the interannual–interdecadal variations of drought/flood in South China and associated causes [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 27 (5): 577–591.

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 (in Chinese), 19 (2): 200–208, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1995.02.09.

刘毓赞, 陈文. 2012. 北半球冬季欧亚遥相关型的变化特征及其对我国气候的影响 [J]. 大气科学, 36 (2): 423–432. Liu Yuyun, Chen Wen. 2012. Variability of the Eurasian teleconnection pattern in the Northern Hemisphere winter and its influences on the climate in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 423–432, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11066.

马乃孚, 杨景勋. 2000. 厄尔尼诺与华中夏季低温 [J]. 长江流域资源与环境, 9 (4): 491–496. Ma Naifu, Yang Jingxun. 2000. Enso and the lower temperature in Huazhong region in summer [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 9 (4): 491–496, doi: 10.3969/j.issn.1004-8227.2000.04.015.

钱永甫, 张琼, 张学洪. 2002. 南亚高压与我国盛夏气候异常 [J]. 南京大学学报 (自然科学版), 38 (3): 295–307. Qian Yongfu, Zhang Qiong, Zhang Xuehong. 2002. The South Asian high and its effects on China's mid-summer climate abnormality [J]. Journal of Nanjing University (Natural Sciences) (in Chinese), 38 (3): 295–307.

Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 784–812, doi: 10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2.

汪靖, 何金海, 刘宣飞, 等. 2009. 江淮梅雨建立的年际变化及其前期强影响信号分析 [J]. 科学通报, 54 (1): 85–92. Wang Jing, He Jinhai, Liu Xuanfei, et al. 2009. Interannual variability of the Meiyu onset over

- Yangtze–Huaihe River valley and analyses of its previous strong influence signal [J]. *Chinese Science Bulletin*, 54 (4): 687–695.
- 向元珍, 包澄澜. 1986. 长江中下游地区的四季天气 [M]. 北京: 气象出版社, 187–198. Xiang Yuanzhen, Bao Chenglan. 1986. *The Weather of the Four Seasons in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River Region* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 187–198.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22: 730–747, doi: 10.1175/2008JCLI2544.1.
- 薛峰, 刘长征. 2007. 中等强度 ENSO 对中国东部夏季降水的影响及其与强 ENSO 的对比分析 [J]. *科学通报*, 52 (23): 2798–2805. Xue Feng, Liu Changzheng. 2008. The influence of moderate ENSO on summer rainfall in eastern China and its comparison with strong ENSO [J]. *Chinese Science Bulletin*, 53 (5): 791–800.
- Yang J L, Liu Q Y, Xie S P, et al. 2007. Impact of the Indian Ocean SST basin mode on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34: L02708, doi: 10.1029/2006GL028571.
- 袁媛, 李崇银. 2009. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响 [J]. *大气科学*, 33 (2): 325–336. Yuan Yuan, Li Chongyin. 2009. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China Sea summer monsoon onset [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (2): 325–336, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2009.02.11.
- Zhang R H, Sumi A, Kimoto M. 1999. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 16 (2): 229–241, doi: 10.1007/BF02973084.
- 周天军, 余永强, 宇如聪, 等. 2004. 印度洋对 ENSO 事件的响应: 观测与模拟 [J]. *大气科学*, 28 (3): 357–373. Zhou Tianjun, Yu Yongqiang, Yu Rucong, et al. 2004. Indian Ocean response to ENSO: Observation and air–sea coupled model simulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (3): 357–373, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2004.03.04.
- 宗海峰, 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.
- 邹珊珊, 郭品文, 杨慧娟. 2013. 东亚太平洋与欧亚遥相关型的相互配置及其气候影响 [J]. *气象科学*, 33 (1): 10–18. Zou Shanshan, Guo Pinwen, Yang Huijuan. 2013. The configuration between the East Asia Pacific and the Eurasian teleconnection patterns and its influence on the summer climate of China [J]. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 33 (1): 10–18.