

高晶, 高辉. 2015. 副热带东南太平洋海温对东北夏季降水的影响及可能机制 [J]. 大气科学, 39 (5): 967–977. Gao Jing, Gao Hui. 2015. Relationship between summer precipitation over northeastern China and sea surface temperature in the southeastern Pacific and the possible underlying mechanisms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 967–977, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14246.

副热带东南太平洋海温对东北夏季降水的影响及可能机制

高 晶¹ 高 辉²

1 内蒙古自治区气候中心, 呼和浩特 010051

2 中国气象局国家气候中心, 北京 100081

摘 要 诊断分析表明, 前期副热带东南太平洋海温尤其是前春海温与东北夏季降水存在持续稳定的负相关关系。无论是在年际时间尺度还是年代际尺度上, 冬、春、夏季海温演变趋势与降水均呈反位相。尺度分离结果显示, 关键区海温与降水的显著负相关主要依赖于其年代际分量, 但年际分量也起到较重要贡献。相关分析和合成分析结果都发现, 当副热带东南太平洋海温偏低时, 其上空可激发出反气旋式距平风场, 而在关键区海域西北部激发出气旋式距平环流。同时在所罗门群岛和菲律宾南部分别出现反气旋式和气旋式距平环流。西太平洋副热带高压(副高)位置较常年偏西, 副高区为反气旋式距平环流。在东北地区西侧则为气旋式距平环流。在这样的环流背景下, 副高西侧的南风加强了源自南海和西太平洋的暖湿气流和北方冷空气在东北地区的交汇, 从而使东北夏季多雨。反之, 当东南太平洋海温偏高时, 其激发的气旋及反气旋距平中心和偏低年刚好相反, 副高位置偏东, 其西侧的南方水汽输送偏弱, 同时东北冷涡也偏弱, 冷暖空气汇合形成的低空辐合弱, 东北降水因此偏少。这表明, 副热带东南太平洋海温异常时确实能激发出一个从关键海区到东北地区的跨越南北半球的气旋—反气旋交替波列, 引发北半球中高纬度大气环流异常, 从而影响东北夏季降水。

关键词 副热带东南太平洋 东北冷涡 西太平洋副热带高压 降水 波列

文章编号 1006-9895(2015)05-0967-11

中图分类号 P461.2

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14246

Relationship between Summer Precipitation over Northeastern China and Sea Surface Temperature in the Southeastern Pacific and the Possible Underlying Mechanisms

GAO Jing¹ and GAO Hui²

1 Inner Mongolia Climate Center, Hohhot 010051

2 National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract A stable negative relationship between boreal summer precipitation over northeastern China and the sea surface temperatures (SSTs) in previous seasons, especially in spring, in the subtropical southeastern Pacific (SSEP) is revealed in this paper. Scale separation results show that the SSTs and precipitation possess anti-phase variations at both the interannual (less than 7 years) and interdecadal (more than 7 years) timescales. This close relationship is mainly

收稿日期 2014-08-19; 网络预出版日期 2015-03-31

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY201306033

作者简介 高晶, 女, 1981 年出生, 硕士, 工程师, 主要从事短期气候预测方面研究。E-mail: gaojing0826@sohu.com

通讯作者 高辉, gaohui@cma.gov.cn

determined by the interdecadal components, though the interannual components play an important role. Correlation and composite analyses show that the lower SSTs in the SSEP cause an anticyclonic wind anomaly over the study region, and a cyclonic wind anomaly in its northwestern region. At the same time an anticyclonic and a cyclonic anomaly exist over the Solomon Islands and southern Philippines, respectively. Under this circulation situation, the western Pacific subtropical high (WPSH) is situated more westward and stronger compared to its climatology, and the northeastern cold vortex (NECV) is stronger than its norm too. Thus, the southerly anomaly in the west of the WPSH strengthens the warm and wet moisture transportation from the South China Sea and western Pacific. The cold air in the west of the NECV becomes more powerful. Together, these lead to stronger convergence and more precipitation over northeastern China. On the contrary, higher SSTs in the SSEP generate opposite anticyclonic and cyclonic wind anomalies over the study region. This opposite wave train leads to a weaker WPSH and NECV, weaker moisture convergence in the lower troposphere, and less rainfall in the region. The results indicate that the SSTs in the SSEP exert an alternate cyclonic–anticyclonic wave train from the Southern Hemisphere to the eastern Northern Hemisphere. This wave train can impact the general circulation in northeastern Asia and ultimately affect precipitation over northeastern China.

Keywords Subtropical southeastern Pacific, Northeastern cold vortex, Western Pacific subtropical high, Precipitation, Wave train

1 引言

我国地处亚澳季风区,降水具有明显的季节变化和区域差异。受雨带位置影响,相比于我国东部其它地区,对我国东北地区气候的关注更多偏向于气温和冬季降雪(孙建奇和王会军,2006;孙建奇等,2009;王会军和贺圣平,2013;范可和田宝强,2013)。但东北地区是我国最大的商品粮和农业生产基地,其降水同样具有非常显著的季节和年际变率,尤其是东北南部降水量要高于同纬度的华北和西北地区。东北夏季降水异常直接影响到该地区的工农业生产和经济发展,因此,近年来对该地区降水的研究不断增多,尤其是造成其旱涝的大气环流异常。例如,刘宗秀等(2003)通过SVD(Singular Value Decomposition)分析发现当北太平洋涛动区前冬500 hPa高度距平场处于“北正南负”涛动的负位相阶段时,东北夏季降水尤其是中西部降水偏多的可能性增大。刘飞和何金海(2006)研究指出,亚洲夏季西风指数高(低)年东北地区降水偏多(偏少)。贾小龙和王谦谦(2006)从环流配置的角度指出东北地区汛期多(少)雨年在低层850 hPa蒙古东南部存在气旋(反气旋)式距平环流,我国大陆东部为西南风(东北风)距平气流,日本南部则出现反气旋(气旋)式距平环流,三者共同作用将加强(减弱)低层西南暖湿气流在东北地区的辐合,从而导致该地区涝(旱)。武炳义等(2008)发现,北极极涡中心位于北极西部时容易导致东北夏季降水增多。对局地环流系统而言,初夏东北冷涡作

用更为显著,冷涡活动频繁易导致东北地区降水增多,反之亦然(沈柏竹等,2011)。除对流层中低层环流系统外,青藏高原上空200 hPa西风急流也会导致东北降水异常。当急流中心强度偏强(弱),东北地区上空急流轴向东北(东南)方向倾斜时,东北降水偏多(少)(兰明才和张耀存,2011),这种影响在盛夏尤为明显(沈柏竹等,2011)。

除同期大气环流外,前期海温异常也扮演着重要角色,尤其是热带太平洋海温。孙力和安刚(2003)发现若前冬和春季赤道中东太平洋海温异常偏暖和西风漂流区有明显的SST(Sea Surface Temperature)负距平,东北夏季大部分地区降水偏多,反之偏少。研究还表明,前期西太平洋暖池热含量异常会激发东亚—太平洋型遥相关和中纬度高层沿亚洲西风急流东传波列并改变夏季东北冷涡强度,从而造成东北夏季降水异常(王晓芳和何金海,2013;何金海等,2006)。黑潮海温同样可通过改变西太平洋副热带高压(后文简称为副高)和东北冷涡强度进而导致东北夏季降水异常(高辉和高晶,2014)。大西洋海温也对东北夏季旱涝起到重要作用。研究发现,春季北大西洋中纬度海温异常和东北夏季降水关系密切(贾小龙,2003;冯新等,2006),这一作用可能是大西洋海温异常改变了北大西洋和北太平洋北部阻塞的强度进而造成东北夏季降水也出现异常。近期的研究表明,这种对应关系是东北降水—北大西洋三极子模态关系的部分体现(Zuo et al., 2013)。此外,前一年6~7月西南印度洋海温对东北汛期降水也有较好的预

示(冯新等, 2006)。

近年来关于南半球大气环流和下垫面异常对东亚夏季风影响的研究取得了诸多成果, 南半球环流的前期异常信号已成为东亚夏季风和我国汛期降水的重要预测因子之一(薛峰, 2005)。这其中, 南极涛动及其副热带分支的马斯克林高压和澳大利亚高压及南北半球间的越赤道气流等都扮演着关键角色(王会军和薛峰, 2003; 薛峰和何卷雄, 2005; 范可, 2006; 范可和王会军, 2006a, 2006b, 2006c, 2007; 高辉等, 2012)。Xue et al. (2003) 还揭示了南极海冰在其中所起的作用。若南极海冰从春到夏范围偏大, 易导致东北夏季降水偏少, 反之偏多。除海冰外, 近期的研究陆续还表明副热带西南太平洋海温对我国夏季降水年际异常也存在重要影响, 如澳大利亚东侧海温偏高将导致青藏高原东北侧夏季降水偏少(王遂缠等, 2004), 长江中下游降水偏多(刘舸等, 2008; 周波涛, 2011)。而西太平洋降水的年代际变化同样可追踪至南太平洋(Hsu and Chen, 2011)。作者最近的研究也发现(高辉和高晶, 2014), 东北夏季降水与黑潮及北大西洋海温的显著相关性存在明显的年代际变化, 但与副热带东南太平洋海区海温关系却一直稳定维持。但相比于北太平洋和热带海温, 对副热带东南太平洋与我国夏季降水关系及影响机理的研究仍很少。本文拟在前一工作的基础上讨论东南太平洋冬、春季海温对我国东北夏季降水的前兆影响, 并分析可能机理, 以求为东北夏季旱涝预测提供一定的参考。

2 资料简介

本文使用的降水资料为中国气象局最新提供的 1981~2013 年全国两千多站逐日降水资料。这套资料经过严格的质量控制, 资料时效长且站点分布远比过去观测资料密集, 已在科研和实际业务中得到全面的验证和广泛的使用。由于内蒙古东部降水特征和影响系统与黑龙江、吉林、辽宁省十分相似, 因此选取 38°N 以北、120°E 以东的区域作为东北地区, 用该区域共 194 个测站降水平均代表整个东北区域降水。

同时段大气环流资料源自 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) /NCAR (National Center for Atmospheric Research) 逐月再分析资料集(Kalnay et al., 1996; Kistler et al.,

2001), 资料水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 本文使用 500 hPa 位势高度场和 500、850 hPa 水平风场。月海表温度资料取自 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 的 ERSST (Extended Reconstructed SST), 资料水平分辨率为 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ (Smith and Reynolds, 2004)。

3 东南太平洋海温与东北夏季降水的超前相关

前文已指出, 冬、春季太平洋海温异常与东北夏季降水存在较好的对应关系, 但海洋的影响主要体现在热带太平洋海区(黄乾和姚素香, 2013)或北太平洋海区(孙力和安刚, 2003; 高辉和高晶, 2014)。作者近期的研究发现(高辉和高晶, 2014), 和其它海区相比, 东北降水与副热带东南太平洋海温存在稳定的负相关关系。图 1 分别给出了东北夏季降水与前冬、前春南太平洋海温的线性相关。可见无论是前冬或前春, 南太平洋地区显著负相关区位于副热带东南太平洋, 也即 Niño 3.4 海区以南位置。相比于前春、前冬东南太平洋海温与东北夏季降水相关性较弱, 但最强负相关中心也通过了 95% 信度检验。前春海温的负相关性则显著加强, 在 $(40^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{S}, 180^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{W})$ 范围的大部分区域负相关值都通过 95% 信度检验。图 1 的结果表明, 东南太平洋海温与东北夏季降水具有较好的季节持续性及空间连续性。为此后文选取 $(40^{\circ} \sim 20^{\circ} \text{S}, 180^{\circ} \sim 90^{\circ} \text{W})$ 作为东南太平洋海温关键区开展进一步分析。

为进一步表征副热带东南太平洋海温与东北夏季降水的超前关系, 图 2 给出了前一年 1 月至当年 8 月上述关键区海温与降水的逐月相关。在前一年春、夏季, 东南太平洋海温并未表现出与东北降水显著的负相关特性, 但自 10 月开始负相关迅速增强, 至 12 月已达 -0.3 以下, 通过 95% 信度检验。前春关键区海温与降水的负相关性进一步增强, 并在 3~4 月达最强值(接近 -0.5), 7 月开始相关性逐渐减弱。海温与降水的持续超前相关特性表明该关键区冬、春季海温异常可作为夏季东北地区降水多少的一个可能前兆信号并在气候预测中加以使用。

东南太平洋关键区海温与东北地区夏季降水稳定的超前关系还可以从图 3 进一步得以体现。图 3 给出了降水与关键区冬、春及夏季海温标准化序列。可以看出, 无论是在年际时间尺度还是年代际

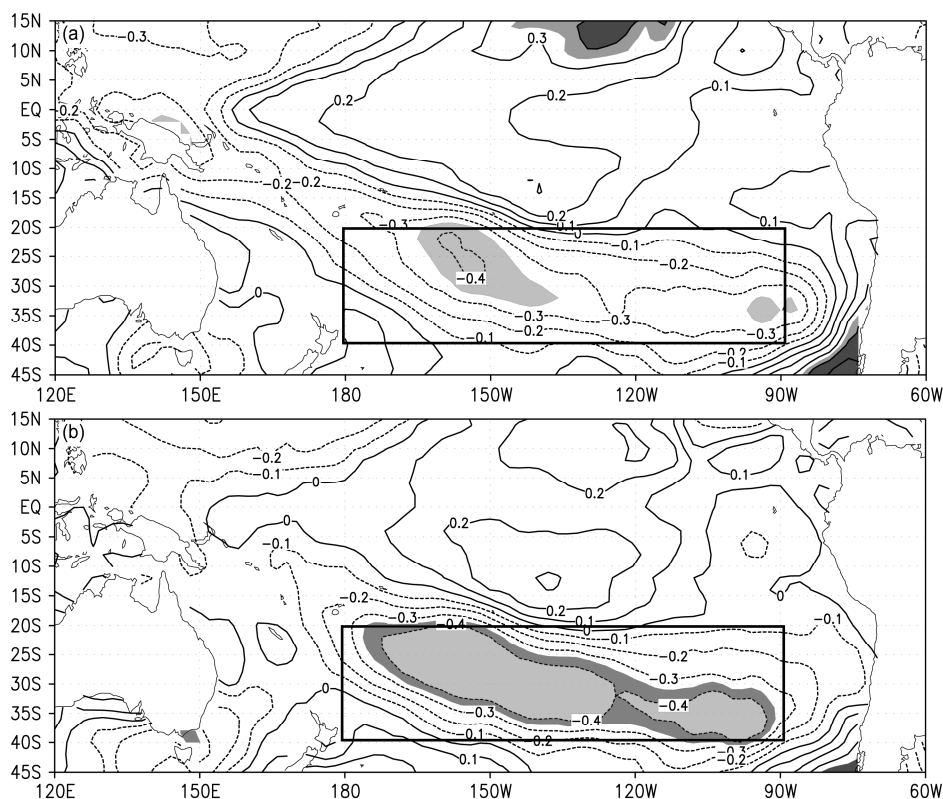


图1 1981~2013年东北地区夏季降水与(a)前冬及(b)前春南太平洋海面温度线性相关系数,阴影区通过95%信度检验。

Fig. 1 Correlation coefficients between the summer precipitation in northeastern China during 1981–2013 and the South Pacific sea surface temperature in the previous (a) winter and (b) spring. Areas with the confidence level greater than 95% according to the t test are shaded

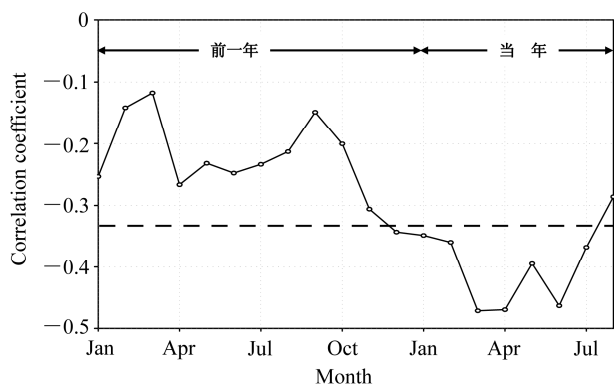


图2 1981~2013年东北地区夏季降水与不同月份东南太平洋关键区海温线性相关,虚线以下通过95%信度检验

Fig. 2 Correlation coefficients between the summer precipitation in northeastern China during 1981–2013 and sea temperature in the key region of the Southeast Pacific in different months. Values greater than the 95% confidence level according to the t test are below the dashed line

尺度上,三个季节海温演变趋势与降水基本相反。在上世纪八九十年代,海温基本以负距平为主,此时东北夏季降水处于偏多期。进入21世纪,受全球变暖影响,东南太平洋海温增温明显,几乎所有

年份都转为正距平,而这一时段东北夏季降水也呈现出偏少的趋势。统计结果表明,冬、春、夏季关键区海温与夏季降水的线性相关系数分别为 -0.37 、 -0.46 和 -0.39 ,均通过95%信度检验。2012年和2013年海温偏冷,同样对应东北降水偏多。

进一步分析年代际和年际两种时间尺度上海温和降水的对应关系,对原始序列滤波提取各自的7年以上年代际分量和以下的年际分量(图4)。年代际分量上海温与降水反位相变化特征更清楚(图4a),而且二者转型时段都非常一致地发生于上世纪九十年代末期。年代际尺度上冬、春、夏季关键区海温与降水的相关系数分别为 -0.68 、 -0.65 和 -0.54 。在年际尺度上海温与降水同样体现了相反的变化特征(图4b),例如在海温偏低的1994和1998年降水均偏多,海温偏高的1989、2011年降水都偏少。年际尺度上冬、春、夏季关键区海温与降水的相关系数分别为 -0.17 、 -0.35 和 -0.33 ,均弱于原始值和年代际分量,但后二者也通过95%信度检验,说明东南太平洋关键区海温与降水的

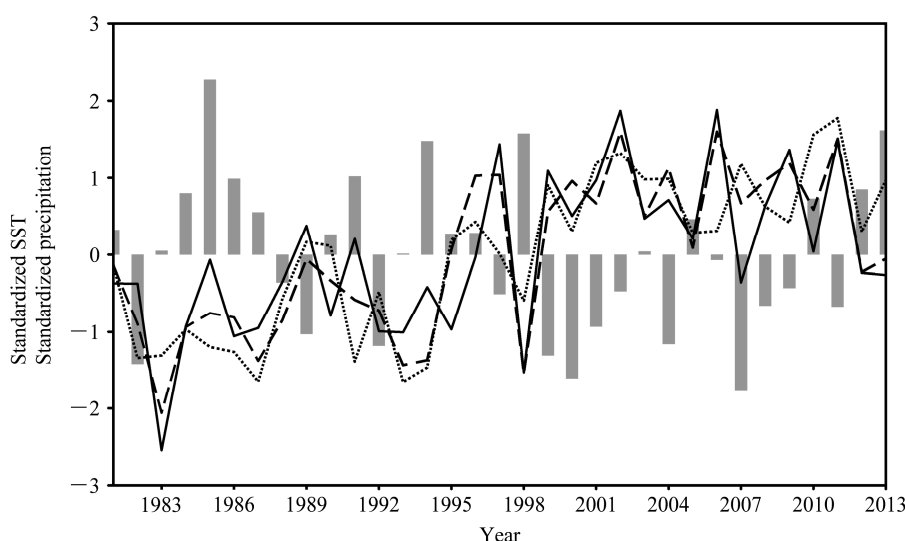


图3 东北地区夏季降水(直方图)与东南太平洋关键区冬季(实线)、春季(虚线)及夏季(点线)海温标准化序列

Fig. 3 Standardized summer precipitation in northeastern China (histogram) and standardized sea temperature in the key region of the Southeast Pacific in the previous winter (solid line) and spring (dashed line) and the summer (dotted line)

显著负相关主要依赖于其年代际分量,但年际分量也起到较重要贡献。

4 可能机制

前文已引述,北半球中高纬度的大气环流系统如东北冷涡及副热带环流系统、副高等都会对东北地区夏季降水产生影响。这一特征从东北降水异常年合成的同期大气环流场上可以很清楚看出(图5)。基于图3,本文选取降水标准化值大于1的异常偏多年分别为1985年、1991年、1994年、1998年和2013年;标准化值小于-1的异常偏少年分别为1982年、1989年、1992年、1999年、2000年、2004年和2007年。偏少年比偏多年样本略多。在降水偏多年合成图上(图5a),东北西部低空为气旋式距平风场,对应于中层涡度距平为正,有利于该地区低空气流辐合上升,因此夏季东北冷涡强度较常年偏强。在副热带地区,副高位置偏西,这从5880 gpm特征等值线可以看出。在降水偏多年副高西伸脊点平均在128°E附近,比其气候态位置(132°E)偏西约4个经度。副高偏西有利于其西侧南风分量水汽偏强并输送到更北的纬度,同时由于东北冷涡偏强,冷涡西侧的冷空气强度也偏强,从而导致东北地区冷暖气流辐合偏强,降水偏多(图5a)。降水偏少年环流特征与偏多年基本相反(图5b),东北西部上空为反气旋式距平风场,对应的涡度距平场为负,不利于低层水汽辐合,东北

冷涡较常年偏弱。同时,副高位置较常年偏西约7个经度且强度较弱。这样的环流配置不利于经向水汽向东部内陆的中高纬度地区输送并和北方冷空气在东北地区交汇,东北降水因此偏少。

东南太平洋海温异常时是否也会激发出这样的环流距平呢?为探讨可能的影响机理,图6给出了关键区前冬海温与夏季500 hPa位势高度场和850 hPa水平风场的线性相关。虽然从图2可以发现,关键区海温与东北降水最强的相关时段出现在春季,但从我国的汛期气候预测业务实际角度考虑,这里仍给出冬季的相关场。图上同时用“A”和“C”标注出反气旋式和气旋式相关矢量中心(南北半球旋转方向相反)。从图6看出,在海温关键区上方为气旋式相关矢量,也即当海温偏高时,在其上方低层辐合上升运动增强。这样在其北部被激发出反气旋式相关矢量。在关键区西北侧,即所罗门群岛附近则为气旋式相关矢量,此气旋式相关矢量西北侧也即菲律宾南部出现了反气旋式相关矢量,在西太平洋暖池上空为气旋式相关矢量,这表明当东南太平洋海温偏高时,副高强度偏弱,这和东北夏季降水偏少年对应的850 hPa距平风环流相似。另外,在东北地区西侧为反气旋式相关矢量,同样和东北少雨年冷涡异常一致。这表明,当东南太平洋前期海温偏高时能激发出一个从关键区上空到东北上空的气旋—反气旋交替波列,这一波列使东北冷涡偏弱,副高强度也减弱,从而不利于东

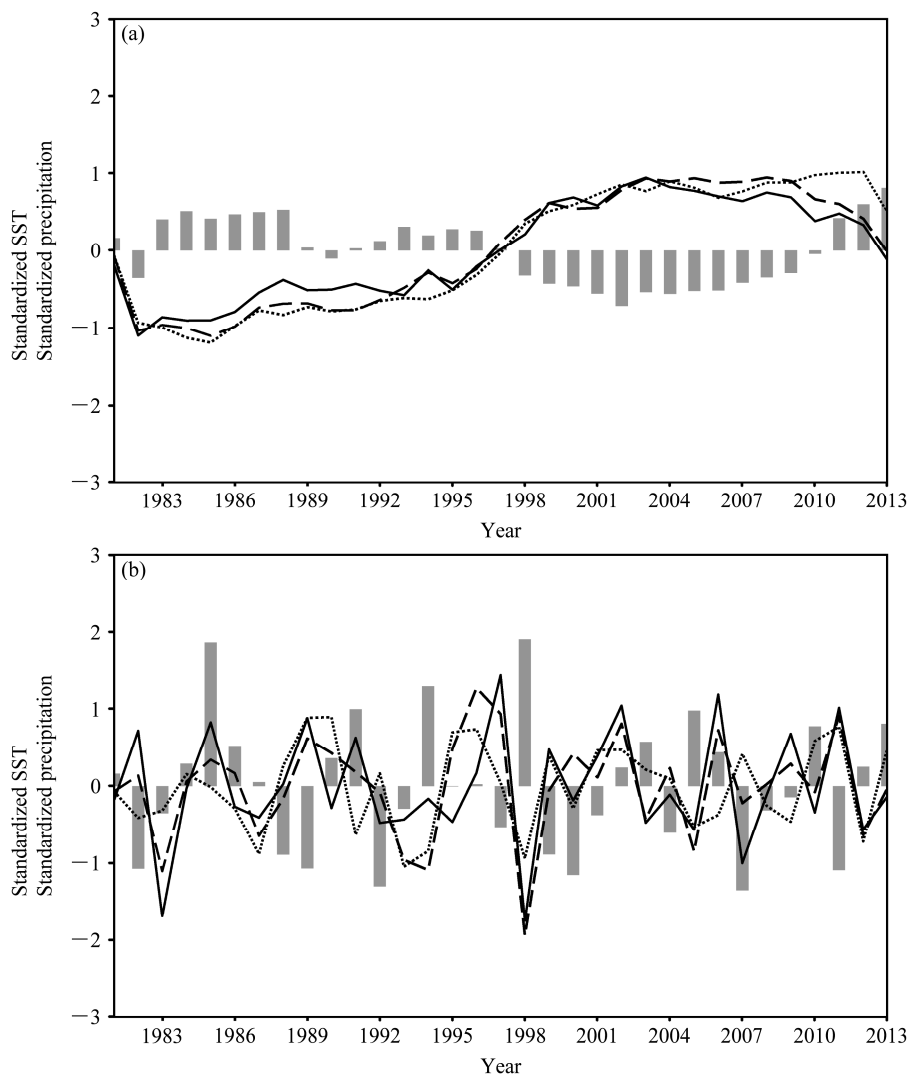


图4 同图3, 但为各自的 (a) 年代际分量和 (b) 年际分量

Fig. 4 Standardized summer precipitation in northeastern China (histogram) and sea temperature in the key region of the Southeast Pacific in the previous winter (solid line) and spring (dashed line) and the summer (dotted line): (a) Interdecadal components, (b) interannual components

北降水偏多; 反之, 当前期关键区海温偏低时, 其所激发的一系列波列造成副高偏强偏西且东北冷涡也偏强, 有利于南方水汽的经向输送并与冷涡西侧的北方冷空气在东北汇合导致水汽辐合偏强, 东北降水也随之增多。

关键区海温与 500 hPa 位势高度的相关同样表明了这一点。当关键区海温偏高时, 受上升运动的影响, 海区上空为负相关, 即对应负位势高度距平, 其北侧则为正相关, 这和海温与风场的相关非常一致。在其它标注“A”和“C”的地区也均为负相关和正相关中心, 尤其是在副高主体区西侧和东北冷涡地区, 最大相关值均通过 95% 信度检验。由此也可以推断, 东南太平洋海温所激发的波列最终可影

响到副高和东北冷涡强度, 这可能是副热带东南太平洋海温异常对东北夏季降水影响的途径。

为进一步验证相关分析得到的结论, 从图 3 中选择前冬关键区海温异常偏低和偏高年合成夏季的大气环流如图 7 所示。在海温偏低年环流场上, 由于海温持续性, 关键区海域上空中层为正涡度距平, 即对应气流为下沉运动, 因而在该区域激发出一个反气旋式距平风场。这个反气旋距平环流西北侧的东北风距平分量加强了关键区海域西北部的北风, 并在该地区形成气旋式距平环流。和图 6 结果一致, 在所罗门群岛附近有反气旋式距平环流而在菲律宾南部则为气旋式距平环流。合成的环流场上, 副高较常年位置偏西, 意味着副高强度也偏强,

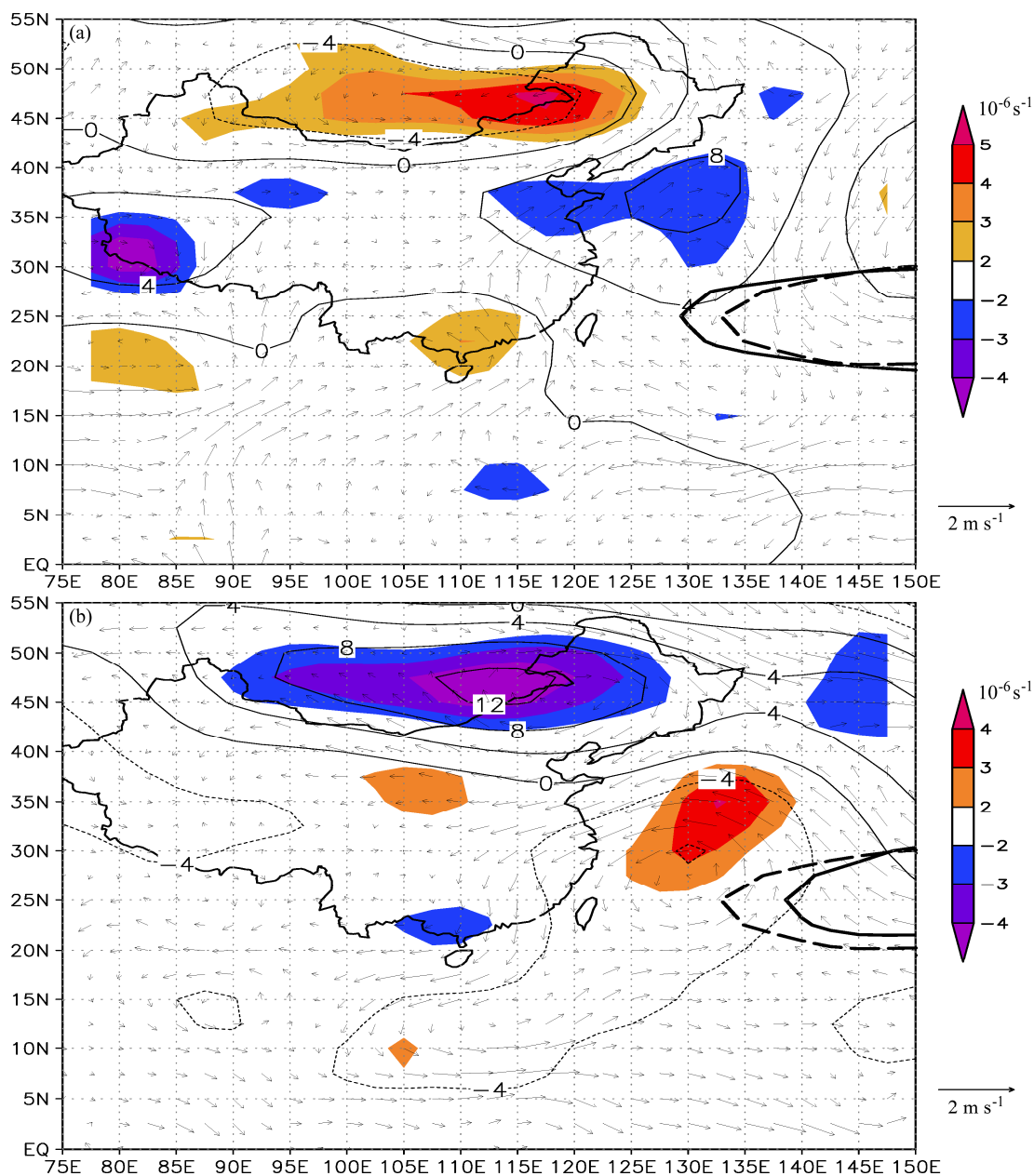


图5 东北地区夏季降水异常 (a) 偏多年和 (b) 偏少年对应的同期大气环流。填色区为 500 hPa 涡度距平 (单位: 10^{-6} s^{-1}), 细等值线为 500 hPa 位势高度距平 (单位: gpm), 粗实线为异常年合成的该层 5880 gpm 特征等值线, 粗虚线为气候平均的 5880 gpm 特征等值线, 箭头为 850 hPa 风场距平 (单位: m s^{-1})

Fig. 5 Atmospheric circulation in the years with abnormally (a) more and (b) less summer rainfall over Northeast China. The 500 hPa vorticity anomaly field is shaded (units: 10^{-6} s^{-1}); the 500 hPa geopotential height is represented by thin contours (units: gpm); the thick solid lines indicate the 5880 gpm contours in abnormal years; the thick dashed lines indicate the climatological 5880 gpm contours; arrows represent 850 hPa anomalous wind (units: m s^{-1})

因此在副高区为反气旋式距平环流。在东北地区西侧则为气旋式距平环流。这种环流型的配置与图 5 中东北多雨的环流型非常相似。这一结果表明, 东南太平洋海温偏低时确实能激发出一个从南半球到东北地区的气旋—反气旋交替出现波列, 使副高西侧的南风增强, 加强了源自南海和西太平洋的暖

湿气流向北输送, 并和北方冷空气在东北地区交汇, 从而使东北夏季多雨。反之, 当东南太平洋海温偏高时, 其激发的波列和偏低年刚好相反, 西太平洋副高位置偏东, 其西侧的南方水汽输送偏弱, 同时东北冷涡也偏弱, 冷暖空气汇合形成的低空辐合弱, 东北降水因此偏少。

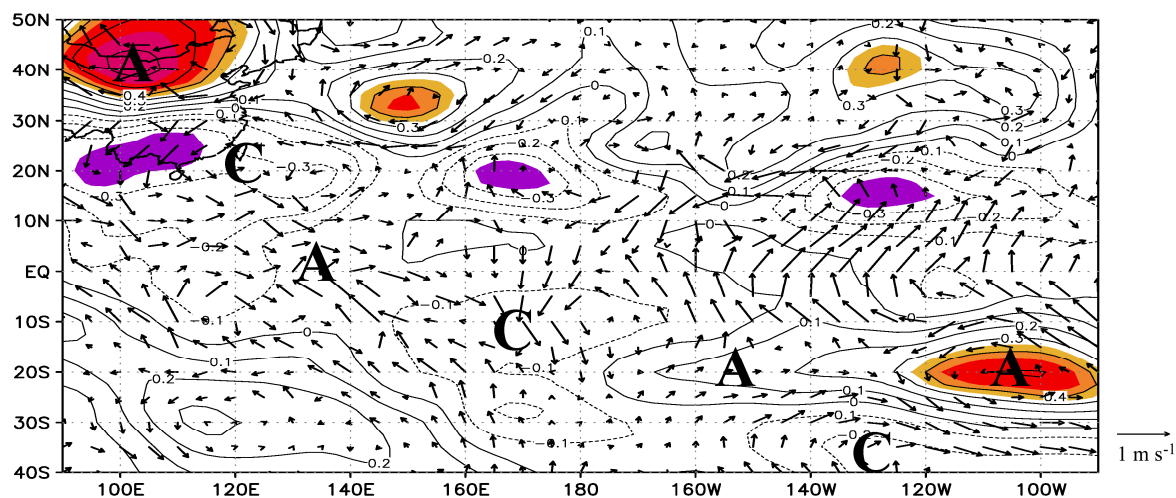


图6 副热带东南太平洋关键区前冬海表面温度与夏季 500 hPa 位势高度(等值线, 阴影区通过 95% 信度检验)及 850 hPa 风场(箭头)相关
Fig. 6 Correlation coefficients between the sea surface temperature in the key region of the Southeast Pacific in the previous winter and the 500 hPa geopotential height (contours; Areas with the confidence level greater than 95% according to the t test are shaded) and 850 hPa wind (arrows) in summer

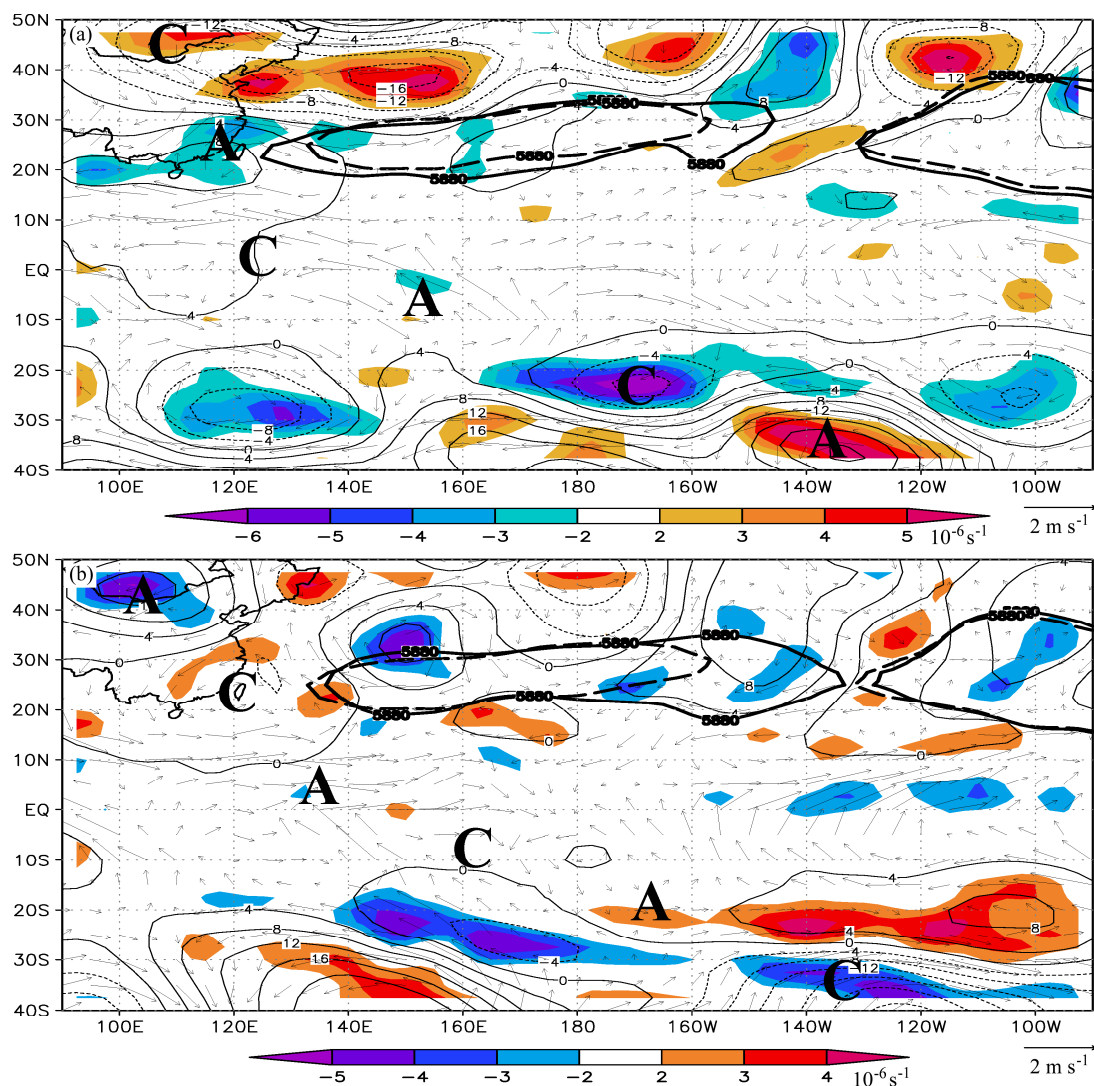


图7 同图5, 但为前冬关键区海温异常(a)偏低和(b)偏高年合成

Fig. 7 Same as Fig. 5, but for atmospheric circulation in the years with abnormally (a) low and (b) high sea temperature in the key region of the Southeast Pacific in the previous winter

除上述跨赤道遥相关波列外,海洋本身的季节演变也在其中起到了一定作用。冬季副热带东南太平洋海温与冬、春及夏季全球海温的相关分析表明(图略),当东南太平洋海温偏高时,在其北侧的赤道东太平洋有一个很显著的负相关中心,这一负相关中心在冬春季都持续存在,在夏季强度减弱,但相关分布型依旧存在。也即当副热带东南太平洋海温偏高(低)时,赤道东太平洋海温偏冷(暖),西太平洋暖池海温变暖(冷),其对全球大气的影响类似于拉尼娜(厄尔尼诺)事件的作用。而在拉尼娜背景下,我国多雨带位置偏北,反之在厄尔尼诺背景下多雨带位置偏南。另一方面,已有的一些研究表明,南半球海温可以通过影响澳大利亚东侧的位势高度和其北侧的海洋性大陆上空对流活动进而影响东亚中高纬度大气环流。副热带东南太平洋海温异常时海洋大陆上空对流异常可以从图 7 很清楚看出。进一步用东北冷涡的强度[即($40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$)面积加权平均的 500 hPa 涡度]和全球对外长波辐射(Outgoing Longwave Radiation, OLR)计算相关可以看出(图略),虽然正负相关中心没有图 5 和图 7 那么明显,但这种从南半球副热带到北半球高纬度地区的遥相关波列依然存在,这表明东北冷涡的变化也与海洋大陆对流有关联,并进而验证副热带东南太平洋海温确实可以通过这一遥相关波列影响东亚高纬度大气环流并影响东北夏季降水。

5 结论和讨论

基于最新观测资料诊断发现东北地区夏季降水与副热带东南太平洋海温存在稳定的负相关关系。无论是前冬或前春,南太平洋地区最显著的负相关区位于副热带东南太平洋,即($40^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{S}$, $180^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{W}$)海区。逐月和逐季分析发现,关键区海温与降水相关最显著季节出现在春季,但在前冬和夏季也能通过 95% 信度检验。无论是在年际时间尺度还是年代际尺度上,三个季节海温演变趋势与降水基本相反。在上世纪八九十年代,海温基本以负距平为主,此时东北夏季降水处于偏多期。进入 21 世纪,受全球变暖影响,东南太平洋海温增温明显,几乎所有年份都转为正距平,而这一时段东北夏季降水也呈现出偏少的趋势。尺度分离结果显示,关键区海温与降水的显著负相关主要依赖于其年代际分量,但年际分量也起到较重要贡献。这一

结果表明,东南太平洋海温与东北夏季降水负相关具有较好的季节持续性及空间连续性。

相关分析和合成分析结果都显示,当副热带东南太平洋区海温偏低时,其上空中层为正涡度距平,即对应气流为下沉运动,因而在该区域激发出一个反气旋式距平风场。这个反气旋距平环流西北侧的东北风距平,加强了关键区海域西北部的北风,并在该地区形成气旋式距平环流。在所罗门群岛和菲律宾南部分别出现反气旋式和气旋式距平环流。海温偏低时,副高位置较常年偏西,因此在副高区为反气旋式距平环流。在东北地区西侧则为气旋式距平环流。这种环流型的配置与东北夏季典型多雨年的环流型非常相似。这一结果表明,东南太平洋海温偏低时能激发出一个从关键海区到东北地区的气旋—反气旋交替波列,使副高西侧的南风加强,加强了源自南海和西太平洋的暖湿气流和北方冷空气在东北地区交汇,从而使东北夏季多雨。反之,当东南太平洋海温偏高时,其激发的波列和偏低年刚好相反,西太平洋副高位置偏东,其西侧的南方水汽输送偏弱,同时东北冷涡也偏弱,冷暖空气汇合形成的低空辐合弱,东北降水因此偏少。

虽然近年来对南太平洋海温影响东亚气候取得了一定的进展,但相比于其它海域尤其是热带太平洋和北太平洋,这种影响的机理还有待进一步揭示。本文初步分析了副热带东南太平洋海温对东北夏季降水的可能影响,但在详细机制上,如东南太平洋海温如何影响到其它海域海温的异常,它和 ENSO 及北太平洋海温的内在联系以及其对东北夏季降水是否还有其它影响路径等方面仍需深入开展。另外,随着气候模式的发展,大量的研究基于敏感性试验验证了不同海域海温异常对我国夏季降水的影响机理。下一步我们也将开展数值模拟,以验证副热带东南太平洋海温是否通过这一“环太平洋”遥相关波列逐步影响到东北夏季降水的多少。

致谢 感谢中国气象局短期气候预测创新团队提供的技术指导。

参考文献 (References)

- 范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 672–679. Fan Ke. 2006. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49 (3): 672–679.

- 范可, 王会军. 2006a. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展 [J]. 大气科学, 30 (3): 402–412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Studies of the relationship between Southern Hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 402–412.
- 范可, 王会军. 2006b. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响 [J]. 中国科学 (D 辑: 地球科学), 36 (4): 385–391. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring [J]. Science China Earth Sciences, 49 (5): 554–560.
- 范可, 王会军. 2006c. 南极涛动异常与 2006 年我国东部夏季降水形势预测 [J]. 应用气象学报, 17 (3): 383–384. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. The AAO anomaly and prediction of summer rainfall in East China in 2006 [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 17 (3): 383–384.
- 范可, 王会军. 2007. 南极涛动异常及其对冬春季北半球大气环流影响的数值模拟试验 [J]. 地球物理学报, 50 (2): 397–403. Fan Ke, Wang Huijun. 2007. Simulation of the AAO anomaly and its influence on the Northern Hemispheric circulation in boreal winter and spring [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 50 (2): 397–403.
- 范可, 田宝强. 2013. 东北地区冬半年大雪—暴雪日数气候预测 [J]. 科学通报, 58 (8): 699–706. Fan Ke, Wang Baoqiang. 2013. Prediction of wintertime heavy snow activity in Northeast China [J]. Chinese Sci. Bull., 58 (12): 1420–1426.
- 冯新, 王新, 王元. 2006. 东北地区汛期降水与全球大洋海温异常关系的 SVD 分析 [J]. 热带气象学报, 22 (4): 367–373. Feng Xin, Wang Xin, Wang Yuan. 2006. Anomalies of the Northeast China floods season precipitation and SVD analysis with SSTA in world oceans [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 22 (4): 367–373.
- 高辉, 高晶. 2014. 黑潮冬季海温对我国东北地区夏季降水预测信号的增强 [J]. 海洋学报, 36 (7): 27–33. Gao Hui, Gao Jing. 2014. Increased influences of the SST along the Kuroshio in previous winter on the summer precipitation in northeastern China [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 36 (7): 27–33.
- 高辉, 刘芸芸, 王永光, 等. 2012. 亚洲夏季风爆发早晚的新前兆信号: 冬季南极涛动 [J]. 科学通报, 57 (36): 3516–3521. Gao Hui, Liu Yunyun, Wang Yongguang, et al. 2012. Precursory influence of the Antarctic Oscillation on the onset of Asian summer monsoon [J]. Chinese Sci. Bull., 58 (6): 6778–683.
- 何金海, 吴志伟, 祁莉, 等. 2006. 北半球环状模和东北冷涡与我国东北夏季降水关系分析 [J]. 气象与环境学报, 22 (1): 1–5. He Jinhai, Wu Zhiwei, Qi Li, et al. 2006. Relationships among the Northern Hemisphere annual mode, the northeast cold vortex and the summer rainfall in Northeast China [J]. J. Meteor. Environ. (in Chinese), 22 (1): 1–5.
- Hsu H -H, Chen Y L. 2011. Decadal to bi-decadal rainfall variation in the western Pacific: A footprint of South Pacific decadal variability? [J]. Geophys. Res. Lett., 38: L03703, doi:10.1029/2010GL046278.
- 黄乾, 姚素香. 2013. 东北夏季降水的时间变化特征及其与太平洋海温的相关关系 [J]. 科学技术与工程, 13 (35): 10441–10445. Huang Qian, Yao Suxiang. 2013. Variation characteristics of the summer rainfall in Northeast China and its correlation with the sea surface temperature in Pacific [J]. Sci. Technol. Engin. (in Chinese), 13 (35): 10441–10445.
- 贾小龙. 2003. 东北地区汛期降水异常及其与海温异常的关系 [D]. 南京气象学院硕士学位论文. Jia Xiaolong. 2003. Anomalies of the Northeast China floods season precipitation and the relations with SSTA [D]. M.S. thesis (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology.
- 贾小龙, 王谦谦. 2006. 东北地区汛期降水异常的大气环流特征分析 [J]. 高原气象, 25 (2): 309–318. Jia Xiaolong, Wang Qianqian. 2006. Analyses on general circulation character of precipitation anomaly in Northeast China flood season [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 25 (2): 309–318.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 82: 247–267.
- 兰明才, 张耀存. 2011. 东亚副热带急流与东北夏季降水异常的关系 [J]. 气象科学, 31 (3): 258–265. Lan Mingcai, Zhang Yaocun. 2011. Relationship between the East Asian subtropical westerly jet and summer rainfall anomaly in Northeast China [J]. J. Meteor. Sci. (in Chinese), 31 (3): 258–265.
- 刘飞, 何金海, 姜爱军. 2006. 亚洲夏季西风指数与中国夏季降水的关系 [J]. 南京气象学院学报, 29 (4): 517–525. Liu Fei, He Jinhai, Jiang Aijun. 2006. Relationship between Asian summer westerly wind index and summer rainfall in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 29 (4): 517–525.
- 刘舸, 张庆云, 孙淑清. 2008. 澳大利亚东侧环流及海温异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 大气科学, 32 (2): 231–241. Liu Ge, Zhang Qingyun, Sun Shuqing. 2008. The relationship between circulation and SST anomaly east of Australia and the summer rainfall in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 231–241.
- 刘宗秀, 廉毅, 沈柏竹, 等. 2003. 北太平洋涛动区 500 hPa 高度场季节变化特征及其对中国东北区降水的影响 [J]. 应用气象学报, 14 (5): 553–561. Liu Zongxiu, Lian Yi, Shen Baizhu, et al. 2003. Seasonal variation features of 500 hPa height in North Pacific oscillation region and its effect on precipitation in Northeast China [J]. J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese), 14 (5): 553–561.
- 沈柏竹, 林中达, 陆日宇, 等. 2011. 影响东北初夏和盛夏降水年际变化的环流特征分析 [J]. 中国科学 (地球科学), 41 (3): 402–412. Shen Bozhu, Lin Zhongda, Lu Riyu, et al. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early-and late-summer precipitation in Northeast China [J]. Science China Earth Sciences, 54 (7): 1095–1104.
- 孙建奇, 王会军. 2006. 东北夏季气温变异的区域差异及其与大气环流和海表温度的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 662–671. Sun Jianqi, Wang Huijun. 2006. Regional difference of summer air temperature anomalies in Northeast China and its relationship to atmospheric general circulation and sea surface temperature [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49 (3): 662–671.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2009. 2007 年 3 月中国东部北方地区一次强灾害性暴风雪事件的成因初探 [J]. 气象学报, 67 (3): 469–477. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2009. A preliminary investigation on causes of the catastrophic snowstorm in March, 2007 in the northeastern parts of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 469–477.

- 孙力, 安刚. 2003. 北太平洋海温异常对中国东北地区旱涝的影响 [J]. 气象学报, 61 (3): 346–353. Sun Li, An Gang. 2003. The effect of North Pacific sea surface temperature anomaly on the summer precipitation in Northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (3): 346–353.
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. J. Climate, 17: 2466–2477.
- 王会军, 薛峰. 2003. 索马里急流的年际变化及其对半球间水汽输送和东亚夏季降水的影响 [J]. 地球物理学报, 46 (1): 18–25. Wang Huijun, Xue Feng. 2003. Interannual variability of Somali jet and its influences on the inter-hemispheric water vapor transport and on the East Asian summer rainfall [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 46 (1): 18–25.
- 王会军, 贺圣平. 2013. 我国东北冬季降雪的年代际增多及其与冬季风减弱的关系 [J]. 科学通报, 58 (8): 629–633. Wang Huijun, He Shengping. 2013. The increase of snowfall in Northeast China after mid-1980s [J]. Chinese Sci. Bull., 58 (12): 1350–1354.
- 王遂缠, 李栋梁, 王谦谦. 2004. 青藏高原东北侧夏季降水异常与澳大利亚东侧海温异常的关系研究 [J]. 高原气象, 23 (6): 905–911. Wang Suichan, Li Dongliang, Wang Qianqian. 2004. Correlation between the summer precipitation abnormality on the northeastern side of Qinghai–Xizang Plateau and SSTA to east of Australia [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 23 (6): 905–911.
- 王晓芳, 何金海, 廉毅. 2013. 前期西太平洋暖池热含量异常对中国东北地区夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 71 (2): 305–317. Wang Xiaofang, He Jinhai, Lian Yi. 2013. Effect of the previous anomalous heat content in the western Pacific warm pool on the summer rainfall over Northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 71 (2): 305–317.
- 武炳义, 张人禾, D'Arrigo R. 2008. 北极偶极子异常与中国东北夏季降水 [J]. 科学通报, 53 (12): 1422–1428. Wu Bingyi, Zhang Renhe, D'Arrigo R. 2008. Arctic dipole anomaly and summer rainfall in Northeast China [J]. Chinese Sci. Bull., 53 (14): 2222–2229.
- Xue Feng, Guo Pinwen, Yu Zhihao. 2003. Influence of interannual variability of Antarctic sea–ice on summer rainfall in eastern China [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (1): 97–102.
- 薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 401–408. Xue Feng. 2005. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 401–408.
- 薛峰, 何卷雄. 2005. 南半球环流变化对西太平洋副高东西振荡的影响 [J]. 科学通报, 50 (15): 1660–1662. Xue Feng, He Juanxiong. 2005. Influence of the Southern Hemispheric circulation on east–west oscillation of the western Pacific subtropical high [J]. Chinese Sci. Bull., 50 (14): 1532–1536.
- 周波涛. 2011. 冬季澳大利亚东侧海温与长江流域夏季降水的联系及可能物理机制 [J]. 科学通报, 56 (16): 1301–1307. Zhou Botao. 2011. Linkage between winter sea surface temperature east of Australia and summer precipitation in the Yangtze River valley and a possible physical mechanism [J]. Chinese Sci. Bull., 56 (17): 1821–1827.