

胡泊, 张志森, 乔少博, 等. 2016. 1990 年代末东亚北部地区夏季水汽输送年代际变化特征及其影响机制 [J]. 大气科学, 40 (5): 933–945. Hu Po, Zhang Zhisen, Qiao Shaobo, et al. 2016. The interdecadal variation and physical mechanism for the summertime water vapor transport in northern East Asia in the late 1990s [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (5): 933–945, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15158.

1990 年代末东亚北部地区夏季水汽输送年代际变化特征及其影响机制

胡泊¹ 张志森³ 乔少博³ 龚志强²

¹ 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002

² 中国气象局国家气候中心开放实验室和预测室, 北京 100081

³ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

摘 要 利用 1983~2011 年降水量、环流和海温的再分析资料, 探讨了东亚北部地区夏季水汽输送的年代际变化特征, 并分析了前冬北大西洋海温对东亚北部地区夏季水汽输送与大气环流的可能影响。研究结果表明, 20 世纪 90 年代末期东亚北部地区夏季整层水汽与降水年代际的变化特征相一致, 整层水汽通量的年代际变化主要是由于纬向水汽输送异常作用的结果。东亚北部地区 (35°~55°N, 90°~145°E) 西边界的水汽输送通量由多变少, 东边界的水汽输送通量由少变多特征则直接导致了该地区降水由偏多转为偏少的年代际变化。就外强迫海温角度来说, 前冬北大西洋海温跟东亚北部地区夏季 500 hPa 高度场、850 hPa 风场和 850 hPa 比湿均显著相关。同时, 在 20 世纪 90 年代中后期前冬北大西洋海温也表现出由偏低向偏高转变的年代际变化特征, 且由于海温自身的记忆性前冬的海温异常一直延续到夏季。并在夏季激发出横跨北大西洋和欧亚大陆中高纬度地区的大西洋—欧亚 (AEA) 遥相关结构, 并进一步影响东亚北部地区夏季水汽输送。

关键词 水汽输送 年代际变化 环流 外强迫

文章编号 1006-9895(2016)05-0933-13

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1512.15158

The Interdecadal Variation and Physical Mechanism for the Summertime Water Vapor Transport in Northern East Asia in the Late 1990s

HU Po¹, ZHANG Zhisen³, QIAO Shaobo³, and GONG Zhiqiang²

¹ College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou 225002

² Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

³ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

Abstract Time water vapor transport over the northern East Asia have been analyzed using various datasets of precipitation, atmospheric circulation and sea surface temperature (SST) for the period of 1983 to 2011. The influence of preceding winter North Atlantic SST on the summertime water vapor transport and atmospheric circulation in northern East Asia are investigated. Results show that the decadal variability of summertime integrated water vapor transport,

收稿日期 2015-03-16; 网络预出版日期 2015-12-18

作者简介 胡泊, 男, 1990 年出生, 硕士研究生, 主要从事非线性大气动力学研究。E-mail: 383876027@qq.com

通讯作者 龚志强, E-mail: gongzq@cma.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41575082、41205040、41375078, 公益性行业专项 GYHY201306021, 国家重大基础研究计划项目 2012CB955902

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41575082, 41205040, 41375078), the Special Research Project for Public Interest, China (Grant GYHY201306021), the National Basic Research Program of China (Grant 2012CB955902)

which is caused by changes in zonal water vapor, is similar to that of precipitation over northern East Asia in the late 1990s. Moreover, the decadal change is more significant along the western boundary than in the eastern boundary of the study region. A significant correlation is found between preceding winter North Atlantic SST and 500 hPa geopotential height, 850 hPa wind and specific humidity in the summer. In the late 1990, SST changes from anomalously cool to anomalously warm in the winter and the warm SST anomaly persists into the following summer. The summer North Atlantic SST anomaly generates an Atlantic-Eurasia (AEA) teleconnection structure that is across the North Atlantic and the middle-high latitude of Eurasia during the corresponding period, and further influences the summertime water vapor transport over northern East Asia.

Keywords Water vapor transport, Inter-decadal variation, Circulation, Extra-forcing factor

1 引言

东亚北部地区（主要包括我国华东地区、东北地区及日本等地）地处中高纬地区，其不仅受到低纬度亚洲季风的影响，还会受到中纬度副热带环流异常所导致的水汽输送异常的影响。该区域夏季降水异常而引起的旱涝问题一直是气象学者们关注的重点（廉毅等，1997；沈柏竹等，2011；封国林等，2012；龚志强等，2013；He et al., 2015）。东亚夏季降水具有多时间尺度变化特征，不仅具有季节变化、年际变化，还具有明显的年代际变化特征。平凡等（2006）研究就指出，在考虑年际变化的同时也必须考虑年代际变化特征，将这两种时间尺度的降水进行分离，才能更好地预测中国汛期降水。影响东亚北部地区夏季降水的因素有很多（Huang et al., 1993；廉毅等，2003，2004；杨修群等，2005；张庆云，2007；Ding et al., 2008；李建平等，2013），但是大气中必须有着充足的水汽和水汽的输入才可能形成降水。黄荣辉等（1998）研究表明，水汽输送的年代际变化可能对中国夏季降水的年代际变化有着重要的影响。因此，对东亚北部区域的水汽输送异常进行的研究，有利于进一步了解中国东北和华北等地夏季降水的物理机制。

很多气象工作者对东亚北部地区的水汽输送特征做了大量的研究，得出了有助于我们理解东亚北部地区水汽输送年际和年代际特征有帮助的结论。如马京津和高晓清（2006）研究表明，华北夏季水汽输送通量及其轨迹具有明显的年际和年代际变化特征；曹丽青等（2004）研究，发现1960年代初至1980年代中期华北地区的水汽呈下降趋势，之后开始上升，1990年代中期以后华北地区水汽又呈下降趋势；此外，华北地区夏季水汽含量的变化跟中国南海至西太平洋地区和中纬度西

风带有无水汽向中国华北地区输送有关（周晓霞等，2008；韩军彩等，2012）；来源于西太平洋及中高纬度西风带的水汽输送对华北暴雨产生也有着重要的影响（梁萍等，2007）；顾正强等（2013）研究发现，1970~1990年东北区域内的水汽增加，而2000年以后东北区域内的水汽大幅度的减少，进而对东北地区夏季降水也存在明显年代际特征给出有利佐证（孙力等，2002）。总而言之，东亚北部地区水汽输送在1970年代和1990年代末存在显著的年代际转折，并直接导致了该地区降水的年代际变化。

此外，北大西洋海温是影响东亚夏季气候的重要外强迫因子之一（Sun and Wang, 2012；Sun et al., 2009）。白人海（2001）发现北大西洋冬季海温呈现出北冷南暖异常分布时，同期北大西洋中高纬度地区的阻塞形势偏强，对应来年夏季东亚西风环流指数偏低，使得东北地区夏季降水增多。Ma and Fu（2007）研究发现北大西洋海温的年代际变率是中国华北夏季降水年代际变化的一个主要原因。北大西洋涛动不仅直接影响北大西洋及附近的气候，甚至对整个北半球的天气、气候都有重要影响。Lu et al.（2006）等通过数值模拟发现，北大西洋年代际振荡会引起北大西洋以外区域的海洋和大气之间的反馈作用对东亚夏季风产生影响，并提出了一种非局地影响的机制。Xu et al.（2013）研究发现北大西洋海温三极子结构可以通过所谓“大气桥”和“海洋桥”的相互作用，影响下一季节的东亚中北部地区的降水异常。

对应20世纪90年代末发生的东亚地区夏季降水的调整（黄荣辉等，2013；Zhu et al. 2011；龚志强等，2013；Si and Ding, 2013），东亚北部地区东亚季风区北部或北部边缘，其夏季降水很大程度上取决于来自中纬度的副热带季风的影响，且受到台风等扰动极端事件的影响程度较南方地区相对较

弱, 在 1990 年代末东亚北部地区夏季降水的年代际调整特征的显著程度明显强于东亚南部地区, 有必要对该区域开展相对独立的研究。同时, 侧重从中纬度水汽输送的角度出发来研究此次年代际变化特征的研究也相对较少, 且水汽输送异常与北大西洋海温异常之间的相互作用的机理还尚不明确。因此, 本文尝试根据 1983~2011 年降水量、环流和海温的再分析资料, 利用大气学中常用的方法探讨 20 世纪 90 年代末东亚北部地区夏季水汽输送的年代际调整, 及其对应的大气环流内部过程和海温外强迫的年代际变化。文章第二节给出了资料和方法; 第三节分析了东亚北部地区夏季整体水汽输送及其各边界水汽输送的年代际变化特征; 第四节分析了北大西洋海温年代际变化与东亚北部夏季水汽输送的关系; 第五节分析了北大西洋海温对东亚北部地区夏季水汽输送的影响过程; 第六节最后给出本文的总结和简要的讨论。

2 资料和方法

资料来自美国国家环境预测中心/国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 发布的 1983 年 6 月到 2011 年 8 月的全球逐月和 6 小时再分析资料, 包括高度场、风场、比湿、地面气压 p 的月平均资料, 分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; 1983~2011 年 NOAA ERSST (Extended Reconstructed SST) 的海面温度资料, 分辨率为 $2^\circ \times 2^\circ$; PREC (The PRECipitation REConstruction data set) 6~8 月的总降水量的分析资料。

本文所采用的主要方法是合成分析、相关分析和回归分析。计算水汽输送采用的方法是从地表面 (p_s) 到 300 hPa 厚度的整层纬向水汽输送 (Q_u)、经向水汽输送 (Q_v) 的计算方法。

$$Q_v(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, p, t) v(x, y, p, t) dp, \quad (1)$$

$$Q_u(x, y, t) = \frac{1}{g} \int_{300}^{p_s} q(x, y, p, t) u(x, y, p, t) dp, \quad (2)$$

其中, p_s 为地面气压; q 为比湿; u 为纬向风; v 为经向风; g 为重力加速度。水汽输送首先每 6 小时计算一次, 再季节平均得到夏季的水汽输送。

3 1990 年代末东亚北部地区水汽输送年代际变化特征

胡泊等 (2014) 研究发现, 在 1990 年代末东

亚北部地区夏季降水比东亚南部地区夏季降水年代际变化特征更明显。在对东亚北部夏季水汽通量和边界进行研究之前, 先要了解影响东亚北部地区夏季的水汽路径有哪些。因此利用 NCAR/NCEP 发布的 6 小时再分析资料, 并通过水汽通量公式计算得到了 1983~2011 年东亚及其周边地区夏季月平均水汽输送通量的矢量分布 (图 1)。图中矩形方框代表东亚北部地区 ($35^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $90^\circ \sim 145^\circ \text{E}$)。东亚北部主要包括我国东北、华北和日本等地区。从图上可以看出输入到东亚北部地区的水汽路径主要有四支; 第一支是中纬度西风带气流所带来的水汽; 第二支是沿西太平洋副热带高压西南侧的东南季风从热带西太平洋所带来的水汽; 第三支是越赤道气流经我国南海附近来的水汽; 第四支水汽是印度西南季风经阿拉伯海, 孟加拉湾流向我国东部的水汽。四条水汽路径影响了东亚北部地区不同的水汽边界。其中, 第二支、第三支和第四支的水汽主要从东亚北部地区的南边界进入和从东边界输出, 因东亚北部地区主要集中在中纬度西风带地区, 东亚北部地区四支边界都会受到来自西风带气流所带来水汽的影响。同时在上图也可以发现, 由于地形的影响, 青藏高原、秦岭等山脉的阻挡作用, 后三支的水汽输送主要影响到我国东部沿海地区, 且到了 40°N 以北的东亚北部地区则南风风量明显减弱。由此, 中纬度西风带气流所带来的水汽对东亚北部地区的降水的作用会更突出。

为了进一步分析 20 世纪 90 年代末东亚北部地区夏季水汽输送年代际变化特征, 图 2a、b 分别是 1983~1998 年和 1999~2011 年东亚北部地区 ($35^\circ \sim 55^\circ \text{N}$, $90^\circ \sim 145^\circ \text{E}$) 夏季整层积分的水汽输送的合成图, 图 2c、d 则是与之相对应的散度场。从图 2 可以看出, 1983~1998 年期间, 来自太平洋等地的水汽在东亚北部地区形成气旋式异常输送, 水汽输送辐合, 对应着水汽输送增强, 有利于东亚北部地区降水。而在 1999~2011 年的水汽输送与前段时间的水汽输送呈现相反的趋势, 东亚北部地区水汽输送形成反气旋式异常输送, 东亚北部地区以水汽辐散为主, 不利于东亚北部地区降水偏多。图 3 给出 1983~2011 年东亚沿 $100^\circ \text{E} \sim 130^\circ \text{E}$ 夏季 (6~8 月) 的降水距平百分率的纬度—时间剖面图。从图 3 上可以看出东亚地区夏季降水存在明显的年代际的变化特征, 二十世纪八十年代初到九十年代末 30°N 以北地区降水偏多, 30°N 以南地区降

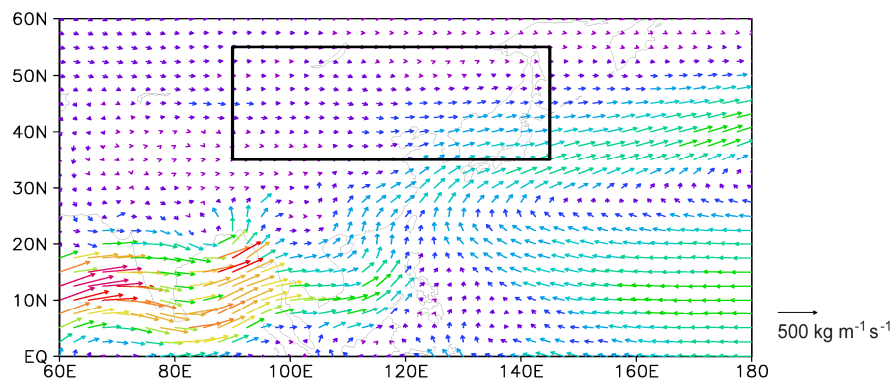


图 1 1983~2011 年东亚及其周边地区垂直积分的夏季平均水汽输送通量 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 分布

Fig. 1 Distribution of vertically integrated summer water vapor flux (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) averaged over the East Asia and its surrounding areas during 1983–2011

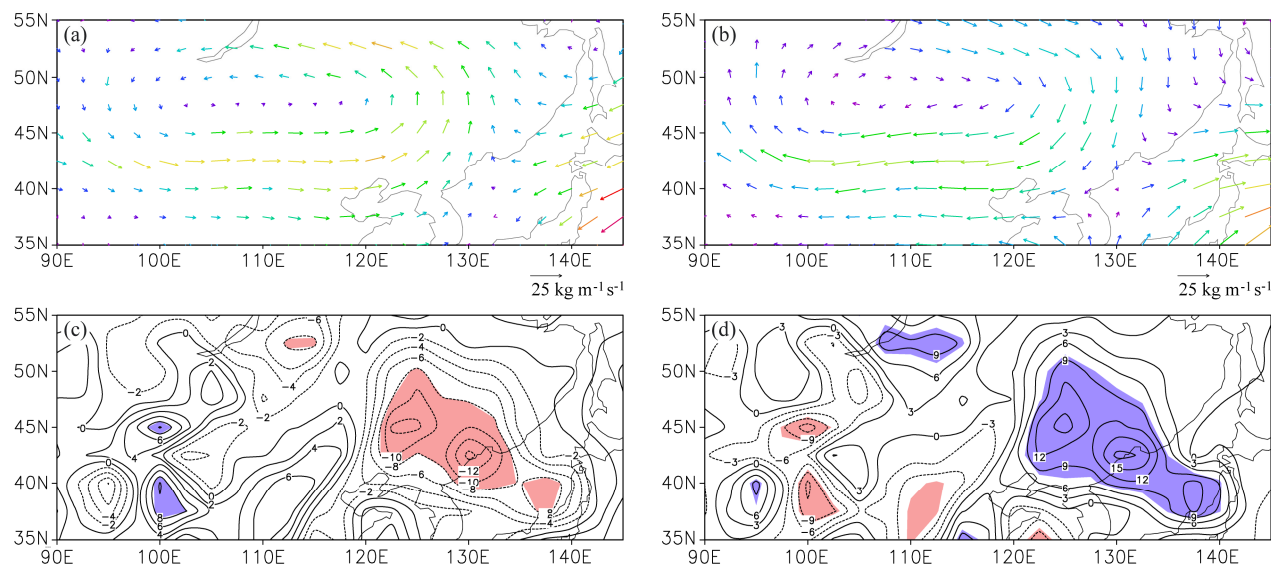


图 2 (a、b) 东亚北部地区垂直积分的夏季水汽输送通量 (矢量; 单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 及 (c、d) 其散度场 (等值线; 单位: $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$): 1983~1998 年平均与气候态之差 (左列); 1999~2011 年平均与气候态之差 (右列)。阴影部分为通过 0.1 的显著性水平检验

Fig. 2 (a, b) The summertime vertically integrated water vapor fluxes (vectors, units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and (c, d) their divergence field over northern East Asia: The average in 1983–1998 minus climatic mean (left column); the average in 1999–2011 minus climatic mean (right column). The shaded area denotes the difference pass test at 0.1 significance level

水相对于东亚北部地区偏少; 而九十年代末到今 30°N 以北地区降水由多变少, 30°N 以南降水也相应的由少变多。而且从图 3 也可以看出在东亚北部地区 (35°~55°N, 90°~145°E) 的年代际变化特征更加明显, 这与水汽输送的年代际变化特征相对应。因此从水汽输送的角度来研究东亚北部地区夏季降水的年代际变化特征具有一定的合理性。

图 4a、b 分别给出了东亚北部地区 1983~1998 年和 1999~2011 年两个时间段合成的夏季水汽收支垂直积分通过各边界的水汽收支和总水汽收支图。将通过东亚北部 (35°~55°N, 90°~145°E) 区域四个边界的水汽作为东亚北部地区各边界的水

汽收支。从图 4 可以看出 1983~1998 年和 1999~2011 年东亚北部地区夏季的水汽都是来自北边界、南边界和西边界的水汽, 并从东边界流向太平洋地区。1999~2011 年东亚北部地区夏季水汽净收入比 1983~1998 年水汽总收支明显的减少, 对应东亚北部地区夏季降水由多变少的特征。然而 1983~1998 年经向进入东亚北部地区的北边界和南边界的水汽较 1999~2011 年进入东亚北部地区的水汽增多, 而纬向进入东亚北部地区的西边界的水汽减少, 东边界输出的水汽则增多。因此, 纬向水汽输入和输出的变化可能直接导致 1990 年代末期东亚北部地区夏季水汽输送发生年代际转折。

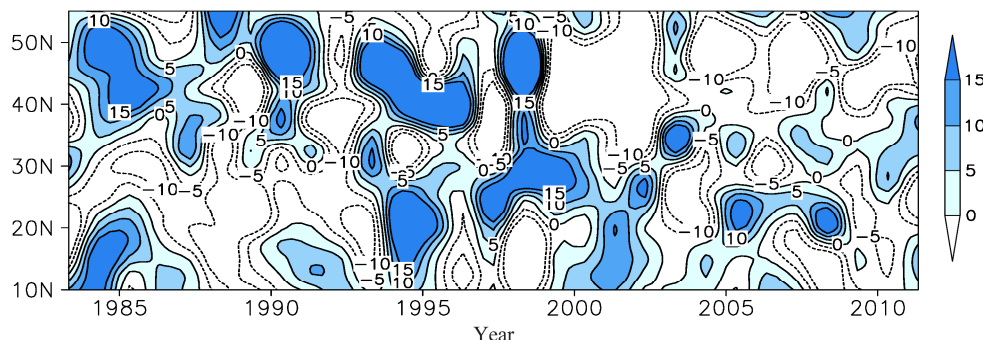
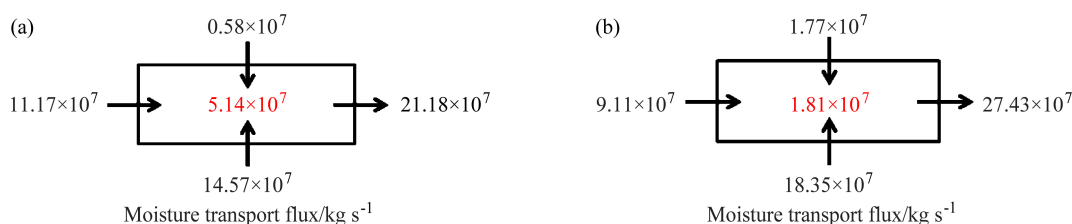


图 3 东亚沿 100°E~130°E 夏季降水距平百分率的纬度—时间剖面

Fig. 3 The latitude–time cross section of summer precipitation anomaly expressed as percentage along 100°E–130°E over East Asia

图 4 (a) 1983~1998 年和 (b) 1999~2011 年东亚北部地区夏季通过各边界的水汽收支和总的水汽收支的示意图。单位: kg s^{-1} Fig. 4 The summertime vertically integrated moisture budget at the four boundaries and the total moisture budget over northern East Asia in (a) 1983–1998 and (b) 1999–2011. Units: kg s^{-1}

基于上述结果, 我们计算了东亚北部地区纬向整层水汽输送通量和经向整层水汽输送通量的 5 年滑动平均 (图 5a、b)。从图 5 柱状图上可以看出, 纬向整层水汽输送通量在 20 世纪 90 年代中后期发生了年代际的转折, 从水汽偏少转向水汽偏多; 而经向的整层水汽输送通量在 20 世纪 90 年代末期的年代际转折没有纬向整层水汽输送通量的年代际转折明显。因此, 进一步证实了导致 20 世纪 90 年代末东亚北部地区夏季降水年代际发生转折中纬向水汽输送异常的作用强于经向水汽输送。

图 6a–d 给出了东亚北部地区各边界的水汽收支序列图和相应的滑动 t 检验 (简称 MTT; 符淙斌和王强, 1992), 其中滑动 t 检验采用的是 5 年滑动检验。从东亚北部地区四个边界的水汽输入量可以发现, 东边界水汽、南边界水汽和北边界水汽更多的表现出的是年际的振荡, 而西边界的水汽年代际的振荡更明显。西边界的水汽在 20 世纪 90 年代末由多变少, 对应着东亚北部地区夏季降水的由偏多到偏少。同时利用 5 年的 MTT 对东亚北部四个边界进行年代际调整的检验发现, 只有西边界的水汽输入量的突变检验通过了 0.05 的显著性水平检验, 且发生突变的时间大致在 20 世纪 90 年代末。由表 1 中降水量与各边界的水汽输入量相关系数可知,

降水量跟水汽净输入量相关系数为 0.76, 通过了 0.05 显著性水平检验。同时, 夏季降水量与东边界的水汽输出量相关系数为 -0.29, 与西边界水汽输入量相关系数 0.59, 与北边界水汽输入量相关系数为 0.23, 与南边界水汽输入量相关系数为 0.06。东亚北部地区夏季降水量只与总水汽收支和西边界的水汽输入量通过了显著水平为 0.05 的显著性检验。由此表明水汽净收支是降水的前提条件, 而西边界的水汽对东亚北部地区的降水起着更为重要的作用。

表 1 东亚北部地区夏季降水量与各边界水汽收支及其总收支的相关系数

Table 1 The correlation coefficients between summer precipitation and moisture budget on each boundary, the total moisture budget in northern East Asia

	降水与水汽通量的相关系数				
	东边界	西边界	南边界	北边界	总收支
夏季降水量	-0.29	0.59*	0.06	0.23	0.76*

*表示通过显著水平为 0.05 的显著性检验

4 北大西洋海温年代际变化与东亚北部地区夏季水汽输送的关系

大西洋年代际振荡 (简称 AMO) 可能是导致

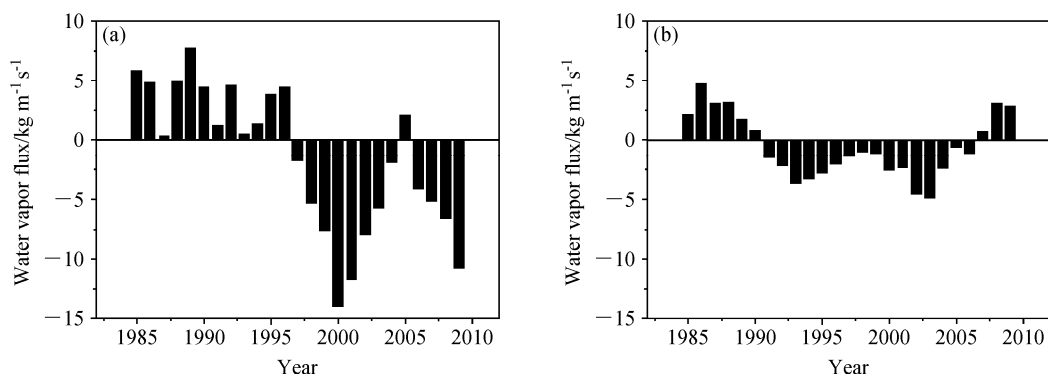


图 5 1983~2011 年夏季 (a) 纬向整层水汽输送通量和 (b) 经向整层水汽输送通量的 5 年滑动平均。单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$

Fig. 5 Time series of summertime (a) zonally and (b) meridionally integrated 5-year moving average water vapor fluxes from 1983 to 2011. Units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$

北半球海表温度 (Zhang and Delworth, 2007) 和全球空气温度发生变化 (Kravtsov and Spannagle, 2008) 的主要因素。图 7a-c 分别给出了东亚北部地区夏季西边界水汽通量与前冬, 春季和夏季北大西洋海温的相关系数分布图。前冬、春季和夏季北大西洋海温都和东亚北部地区夏季西边界的水汽通量有显著的相关性, 只是在通过 0.05 的显著性水平检验的区域有所差别。前冬北大西洋海温与东亚北部地区夏季西边界水汽通量通过检验的相关区域主要集中在北大西洋中高纬 ($55^{\circ}\text{N}\sim 70^{\circ}\text{N}$, $60^{\circ}\text{W}\sim 0^{\circ}$) 区域和中低纬 ($30^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$, $40^{\circ}\text{W}\sim 15^{\circ}\text{W}$) 区域; 春季和夏季北大西洋海温在中高纬地区依旧与东亚北部地区夏季西边界水汽通量相关性显著; 然而在中低纬地区, 北大西洋海温与东亚北部地区夏季西边界水汽通量随着季节的变化通过 0.05 的显著性水平检验的区域逐渐往东南方向转移。春季和夏季北大西洋海温与东亚北部地区西边界水汽输送通量通过相关性检验区域分别集中在 ($25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $65^{\circ}\text{W}\sim 30^{\circ}\text{W}$) 和 ($25^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$, $70^{\circ}\text{W}\sim 50^{\circ}\text{W}$) 区域。因此, 将前冬、春季和夏季北大西洋海温与东亚北部地区夏季西边界水汽输送通量通过 0.05 的显著性水平检验的区域计算逐年海温距平的平均值, 并将均值序列作为前冬、春季和夏季北大西洋海温异常指数。已有研究表明, 海表温度的异常直接影响邻近地区的气候变化, 而对远离的地区则可能是对大气产生影响后, 再通过遥相关来传播 (白人海, 2001)。冬季的大西洋海温可能对包括东亚地区在内的广大北半球中高纬度夏季气候存在显著的影响 (Ogi et al., 2003)。

为了更好的研究东亚北部地区夏季水汽输送

通量与北大西洋海温两者之间的联系, 将通北大西洋前冬、春季和夏季北大西洋海温异常指数序列与夏季东亚北部地区各个边界水汽输送和总水汽收支求相关 (表 2)。由表 2 可见, 前冬北大西洋海温与东亚北部地区夏季西边界的水汽输送通量的相关系数通过了 0.05 的显著性水平检验, 而与其他三个边界的水汽没有通过 0.05 的显著性水平检验, 同时与总水汽收支的相关性也通过了 0.05 的显著性水平检验, 并且这种相关性情况一直持续到夏季。由此, 东亚北部地区西边界的水汽通量与前期和同期的北大西洋海温有显著相关性, 并对夏季东亚北部的降水起到主要作用。

表 2 北大西洋各季海表温度指数与东亚北部各边界水汽通量、总水汽收支的相关系数

Table 2 The correlation coefficients between indices of SST in the North Atlantic Ocean and moisture budget on each boundary, the total moisture budget in northern East Asia

	海表温度指数与水汽通量的相关系数				
	东边界	西边界	南边界	北边界	总水汽收支
前冬 SST 指数	0.35	-0.58*	0.3	-0.03	-0.53*
春季 SST 指数	0.41*	-0.42*	0.35	-0.06	-0.49*
夏季 SST 指数	0.22	-0.40*	0.26	-0.07	-0.43*

*表示通过 0.05 的显著性水平检验

为了进一步分析前冬北大西洋海温对东亚北部地区水汽输送的影响, 将前冬北大西洋海温指数序列标准化, 大于 1 个标准差的年定义为偏暖年, 小于一个标准差的年定义为偏冷年。偏冷年为: 1985、1986、1987、1990、1991、1994 年; 偏暖年为: 2002、2004、2005、2006、2008、2011 年。从北大西洋海温偏冷年和偏暖年合成的东亚北部地

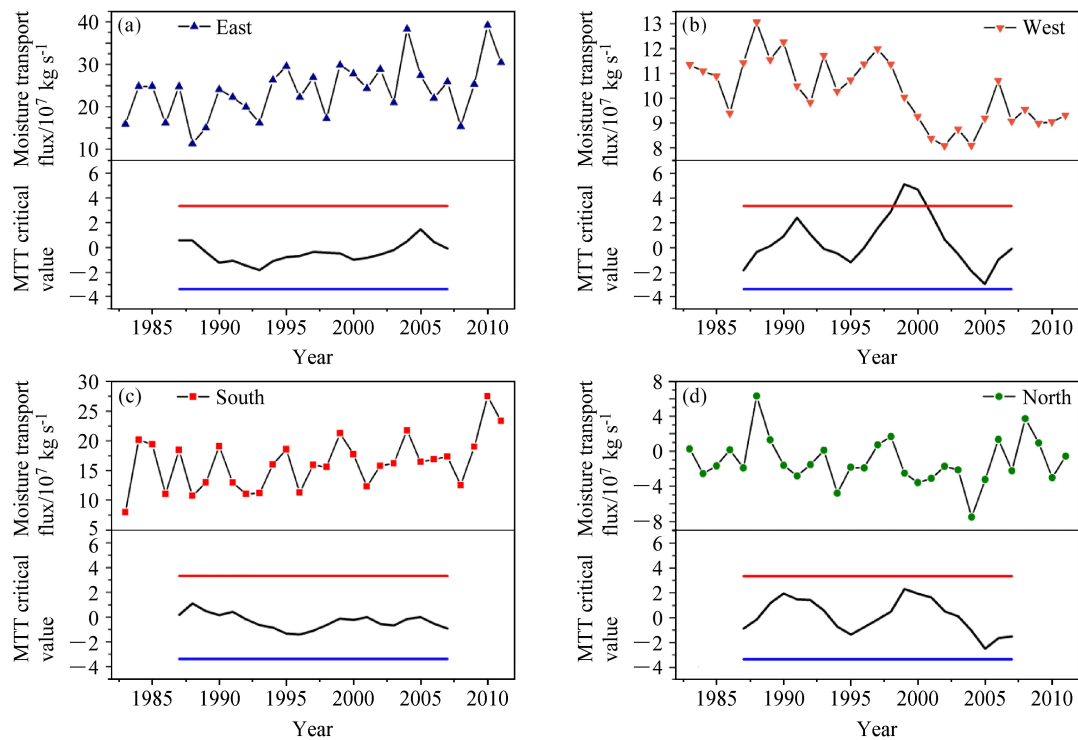


图 6 东亚北部 (a) 东边界、(b) 西边界、(c) 南边界和 (d) 北边界水汽收支序列及其滑动 t 检验 (MTT) 通过 0.05 水平显著性检验的临界值。单位: 10^7 kg s^{-1}

Fig. 6 Time series of moisture budget from the (a) eastern, (b) western, (c) southern and (d) northern boundaries and their t tests (MTT) critical value passed test at 0.05 significance level, respectively. Units: 10^7 kg s^{-1}

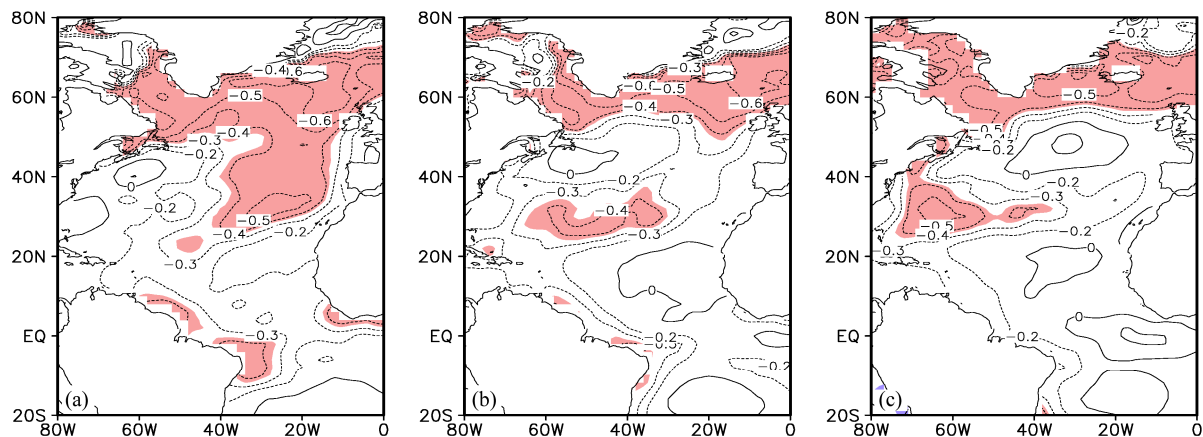


图 7 夏季西边界水汽通量与 (a) 前冬、(b) 春季和 (c) 夏季大西洋海表温度的相关系数分布 (图中阴影区域通过了 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 7 Spatial distributions of correlation coefficients between summertime water vapor flux at the western boundary and the Atlantic SST in (a) preceding winter, (b) spring, and (c) summer. The shaded area denotes the correlation coefficients pass test at 0.05 significance level

区垂直积分的水汽输送通量和散度场图上 (图 8) 可以看到, 在北大西洋海温偏冷年时, 东亚北部地区的水汽输送呈气旋式异常输送, 对应着东亚北部地区水汽输送辐合, 有利于水汽输送增强, 这样的形势使得东亚北部地区降水偏多; 对比北大西洋海温偏暖年所对应的东亚北部地区水汽输送形成反

气旋式异常输送, 东亚北部地区以水汽辐散为主, 不利于东亚北部地区降水偏多。

本节进一步分析前冬的北大西洋海温对东亚北部地区的环流形势的影响, 进而明确北大西洋海温影响东亚北部地区水汽输送的可能动力过程。大气环流也存在着年代际的转折, 大气环流的年代际

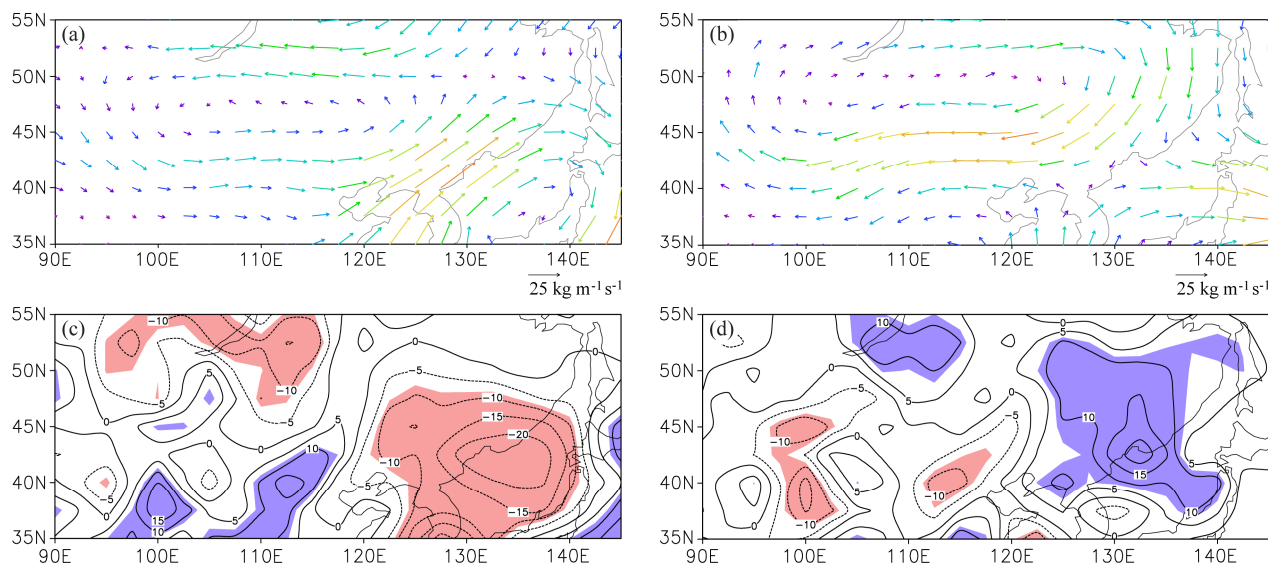


图8 (a, b) 前冬北大西洋海温合成的夏季水汽输送 (单位: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) 及 (c, d) 其散度场 (单位: $\text{g cm}^{-2} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$): 偏冷年 (左列); 偏暖年 (右列)。阴影部分通过了 0.1 的显著性水平检验

Fig. 8 Composites of (a, b) the summertime vertically integrated water vapor fluxes (units: $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$) and (c, d) their divergence field (units: $\text{g cm}^{-2} \text{hPa}^{-1} \text{s}^{-1}$) based on the preceding winter North Atlantic SST: (a, c) Cold years, (b, d) warm years. The shaded area denotes the value passes test at 0.1 significance level

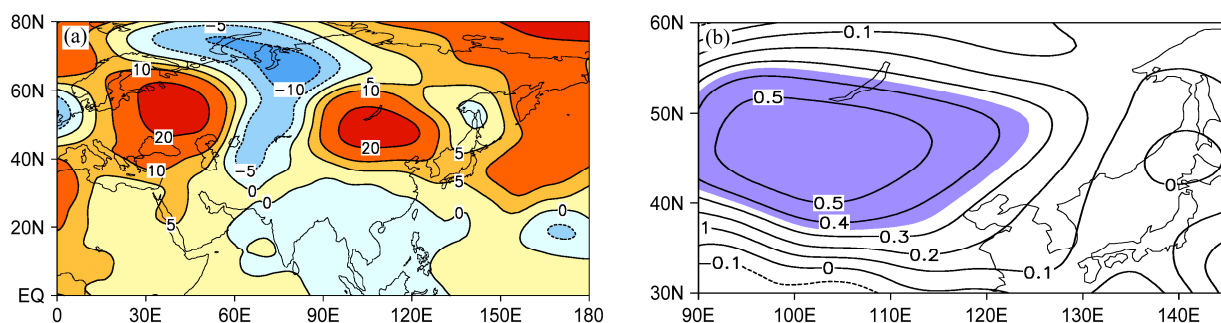


图9 (a) 500 hPa 高度场 1999~2011 年和 1983~1998 年两时段差值 (单位: gpm) 分布和 (b) 前冬北大西洋海表温度与 500 hPa 高度场的相关系数分布。(b) 中阴影区域是通过了 0.05 的显著性水平检验

Fig. 9 (a) The difference (units: gpm) in 500-hPa height field between 1983-1998 and 1999-2011, and (b) the correlation coefficient between preceding winter North Atlantic SST and 500-hPa height field. The shaded area denotes the value passes test at 0.05 significance level

演变对应着降水和水汽的年代际变化 (施能和朱乾根, 1995)。图 9a、b 给出了 500 hPa 高度场 1999~2011 年和 1983~1998 年两时段的差值图和前冬北大西洋海温与 500 hPa 高度场的相关系数分布图。从图 9b 中可以看出, 前冬北大西洋海温与 500 hPa 高度场通过检验的区域主要集中在东亚北部地区。同时图 9a 中, 1999~2011 年东亚北部地区和地中海上游地区的高度场比 1983~1998 年东亚北部地区的高度场偏高, 中亚地区到中国东部华南地区为负距平所控制, 在东亚地区从北向南呈现“+ -”的偶极分布特征。欧亚大陆中高纬度高度场从西到东呈“+ - +”分布, 即在北大西洋海温偏高时易

出现“两脊一槽”的分布, 这样的环流形势容易在东亚北部地区形成阻塞高压, 不利于东亚北部地区的水汽输送。图 10a、b 给出了 850 hPa 风场 1999~2011 年和 1983~1998 年两时段的差值图和前冬北大西洋海温与 850 hPa 纬向风场的相关系数分布图。前冬北大西洋海温跟 850 hPa 纬向风场在东亚北部地区 50°N 以北为正相关, 50°N 以南为负相关。这样的配置使得 850 hPa 风场在东亚北部为异常的反气旋所控制, 低层风场辐散, 下沉运动增强, 高层辐合。高低层环流异常配置使得 20 世纪 90 年代末以后东亚北部地区水汽输送减少, 同时不利于该地区降水。水汽通量是表示单位时间流经某个单位

截面面积的水汽含量,分为水平水汽通量和垂直水汽通量。这反映了大气中的水汽由气流携带从一个地区输送到另一个地区的输送路径和强度。水平水汽通量和垂直水汽通量分别是由纬向风和经向风与比湿相乘得来的。因此,在北大西洋海温的影响下,东亚北部地区的比湿发生明显的年代际变化,从而造成东亚北部水汽输送在 20 世纪 90 年代末发生年代际变化。图 11a、b 给出了 850 hPa 比湿 1999~2011 年和 1983~1998 年两时段的差值图和前冬北大西洋海温与 850 hPa 比湿的相关系数分布图。从图 11 可以发现,前冬北大西洋海温跟我国华北、东北地区相关性通过了 0.05 的显著性水平检验。同时我国华北地区和东北地区的比湿在 20 世纪 90 年代末以后相对减少,沿海地区水汽相对增多。这也恰好对应了 20 世纪 90 年代末东亚北部地区夏季水汽输送减少的变化特征。

5 北大西洋海温对东亚北部地区夏季水汽输送的影响过程

以上的结果表明,前冬的北大西洋海温通过影响与东亚北部地区夏季水汽输送相联系的环流特征,从而使东亚北部地区夏季水汽输送在 20 世纪 90 年代末发生年代际调整。接下来进一步分析环流结构与北大西洋海温异常对应的环流结构之间存在的对应关系。图 12 给出了东亚北部地区夏季西边界水汽输送与同期 500 hPa 高度场和 200 hPa 高度场的相关系数。从图 12a 可以发现,位势高度场在北大西洋地区为显著的正相关,北大西洋地区的上区域和下区域为显著的负相关,黑海附近区域为显著的负相关,中亚地区为显著的正相关,东亚北部地区则出现显著的负相关。这样的“+—”相间的遥相关结构在对流层中、高层均存在图 12b。同时这种遥相关结构在 200 hPa 纬向风和经向风中也存在(图略)。这种结果和 Xu et al. (2013) 等的研究结果相似,他将这种波列称为大西洋—欧亚(AEA)遥相关。Ambrizzi et al. (1995) 也发现遥相关沿着急流波导呈纬向分布,其中一支波列位于北非—亚洲地区。Branstator (2002) 以及 Ding and Wang (2005) 研究指出,中纬度地区对流层上层的急流可以作为罗斯贝波传播的波导。

为了进一步分析北大西洋海温对 AEA 遥相关结构的影响,图 13 给出了 1983~2011 年夏季北大西洋海温对 200 hPa 高度场和 200 hPa 经向风场的

回归系数分布图。从图 13 可以发现无论是在 200 hPa 高度场还是在 200 hPa 经向风场中均存在北大西洋—黑海—中亚—东亚北部遥相关结构,并且在径向风场上面表现的更明显。因此夏季北大西洋海温影响了 AEA 遥相关型,从而造成了东亚地区夏季水汽输送在 20 世纪 90 年代末发生转折。

同时北大西洋海温与东亚夏季气候异常存在着一种超前滞后的关系。周波涛(2011)研究证实了冬季海温会由于自身的持续性,将信号持续到夏季,并影响对流活动进而导致东亚夏季环流异常。因此将前冬北大西洋海温与东亚北部地区夏季西边界水汽相关性通过了 0.05 的显著性水平检验区域作为北大西洋海温距平作为指数,并做出前冬、春季和夏季北大西洋海温距平的演变图(图 14)。从图 14 可以发现,前冬、春季和夏季的北大西洋海温在 20 世纪 90 年代中后期都存在由偏低到偏高相位转变的趋势。前冬的北大西洋海温和春季的北大西洋海温的相关系数高达 0.81,春季的北大西洋海温与夏季的北大西洋海温的相关系数为 0.79,都通过了 0.05 的显著性水平检验。并且通过北大西洋海温隔季相关图(图略)上也可以看出,在中高纬地区和 20°N 附近地区隔季的海温依旧存在显著的相关性。表明了冬季的北大西洋海温由于自身的发展会延续到夏季。

6 结论和讨论

利用 1983~2011 年月总降水量、环流和海温的再分析资料,分析了 20 世纪 90 年代末东亚北部地区的夏季水汽输送的年代际调整,并从北大西洋海温这一外强迫因子出发,进行了可能的物理过程探究,得到了以下几点重要结论:

(1) 影响东亚北部地区的夏季水汽路径一共有四支,其中来自西太平洋,南海和孟加拉湾的水汽由于地形的影响,青藏高原、秦岭等山脉的阻挡作用,主要输送到我国东部沿海地区。而从西风带带来的水汽影响东亚北部整个地区;造成 20 世纪 90 年代末纬向的水汽输送比经向的水汽输送年代际特征更明显;使得从西边界输入由多变少的水汽和从东边界输出由少变多的水汽更符合东亚北部地区夏季降水由多变少的年代际变化特征。再通过对四个边界的水汽输送通量进行 MTT 检验发现,西边界的水汽输送通量的年代际变化特征最为明显,且只有西边界的水汽输送通量通过了 0.05 的显著

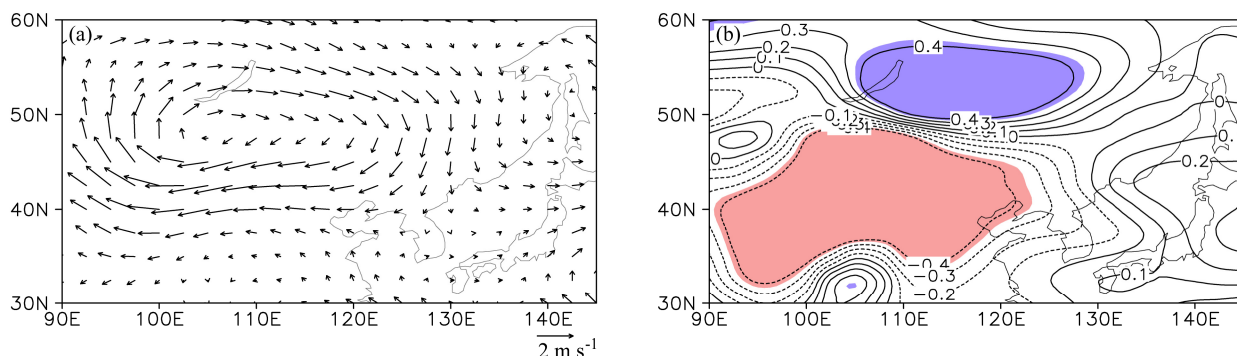


图 10 (a) 850 hPa 风场 1999~2011 年和 1983~1998 年两时段差值(单位: m s^{-1}) 和 (b) 前冬北大西洋海温与 850 hPa 纬向风场的相关系数分布。(b) 中阴影区域是通过了 0.05 的显著性水平检验

Fig. 10 (a) The difference (units: m s^{-1}) in 850-hPa wind field between different periods and (b) the correlation coefficient between preceding winter North Atlantic SST and 850-hPa u wind field. The shaded area denotes the value passes test at 0.1 significance level

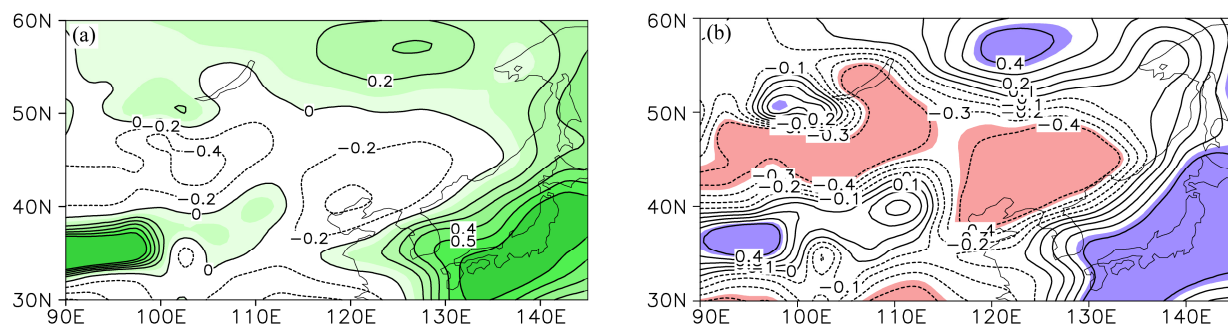


图 11 同图 10, 但为比湿

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for specific humidity

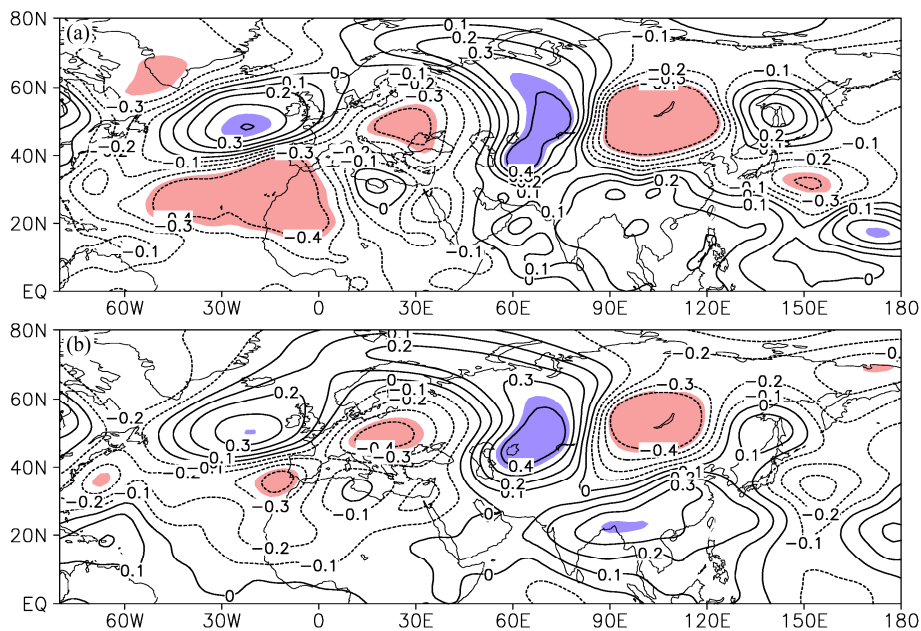


图 12 1983~2011 年夏季西边界水汽输送通量与同期 (a) 500 hPa 高度场和 (b) 200 hPa 高度场的相关系数分布(图中阴影区域通过了 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 12 Spatial distribution of correlation coefficients between summertime water vapor flux at the western boundary and the (a) 500-hPa and (b) 200-hPa height fields in the corresponding period from 1983 to 2011(the shaded area denotes the value passes test at 0.05 significance level)

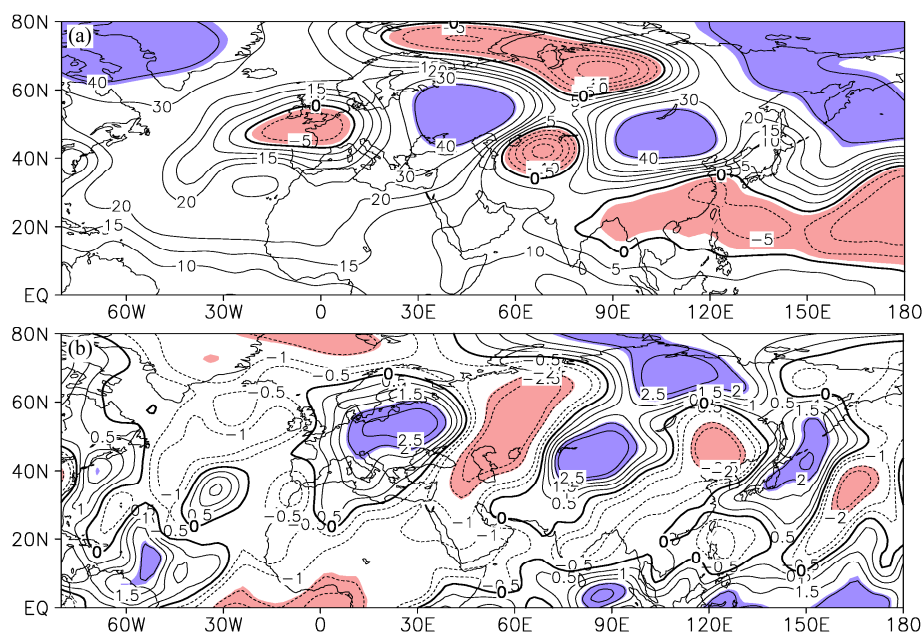


图 13 1983~2011 年夏季北大西洋海温指数对 (a) 200 hPa 高度场 [单位: $\text{gpm} (\text{°C})^{-1}$] 和 (b) 200 hPa 经向风场 [单位: $\text{m s}^{-1} (\text{°C})^{-1}$] 的回归系数分布 (图中阴影区域是通过 0.05 的显著性水平检验)

Fig. 13 The spatial distribution of 200-hPa (a) height field [units: $\text{gpm} (\text{°C})^{-1}$] and (b) meridional wind field [units: $\text{m s}^{-1} (\text{°C})^{-1}$] that is regressed by summer Atlantic SST from 1983 to 2011. The shaded area denotes the value passes test at 0.05 significance level

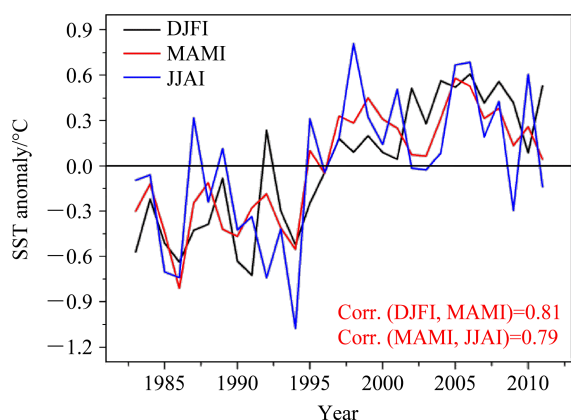


图 14 冬季(黑线)、春季(红线)和夏季(蓝线)北大西洋海表温度距平的时间序列(单位: °C)

Fig. 14 Time series of the North Atlantic SST anomalies in the winter (DJFI; black line), spring (MAMI; red line) and summer (JJAI; blue line). Units: °C

性水平检验。西边界的水汽输送异常的年代际变化特征对应着东亚北部地区水汽输送在 20 世纪 90 年代末转变为反气旋异常输送, 低层辐散, 水汽减少等特征。因此西边界的水汽通量才是导致东亚北部地区水汽输送在 20 世纪 90 年代末发生年代际转折的主要因素之一。

(2) 前冬的北大西洋海温也在 20 世纪 90 年代

中后期发生由冷变暖的年代际变化特征, 与东亚北部地区西边界水汽输送通量有良好的对应关系; 同时前冬的北大西洋海温跟东亚北部地区夏季 500 hPa 高度场、850 hPa 风场和 850 hPa 比湿显著相关; 前冬的北大西洋海温由于自身的记忆性使得前冬海温的年代际信号持续到夏季; 夏季的北大西洋海温通过“大气桥”的作用激发大西洋—欧亚 (AEA) 遥相关型, 最终影响东亚北部地区水汽输送在 20 世纪 90 年代末期发生年代际调整。

参考文献 (References)

- Ambrizzi T, Hoskins B J, Hsu H H. 1995. Rossby wave propagation and teleconnection patterns in the austral winter [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (21): 3361–3672, doi:10.1175/1520-0469(1995)052<3361:RWPATP>2.0.CO;2.
- 白人海. 2001. 大西洋海表温度异常与中国东北地区夏季降水的关系 [J]. *海洋通报*, 20 (1): 23–29.
- Bai Renhai. 2001. Relations between the anomaly of sea surface temperature in the Atlantic and the precipitation in summer over Northeast China [J]. *Marine Science Bulletin (in Chinese)*, 20 (1): 23–29, doi:10.3969/j.issn.1001-6392.2001.01.004.
- Branstator G. 2002. Circumglobal teleconnections, the jet stream waveguide, and the North Atlantic Oscillation [J]. *J. Climate*, 15 (14): 1893–1910, doi:10.1175/1520-0442(2002)015<1893:CTTJSW>2.0.CO;2.
- 曹丽青, 余锦华, 葛朝霞. 2004. 华北地区大气水分气候变化及其对水资源的影响 [J]. *河海大学学报 (自然科学版)*, 32 (5): 504–507.
- Cao Liqing, Yu Jinhua, Ge Zhaoxia. 2004. Variation of atmospheric water

- vapor with climate and its impact on water resources of North China [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)* (in Chinese), 32 (5): 504–507, doi:10.3321/j.issn:1000-1980.2004.05.006.
- Ding Q H, Wang B. 2005. Circumglobal teleconnection in the Northern Hemisphere summer [J]. *J. Climate*, 18 (17): 3483–3505, doi:10.1175/JCLI3473.1.
- Ding Y H, Wang Z Y, Sun Y. 2008. Inter-decadal variation of the summer precipitation in East China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part I: Observed evidences [J]. *Int. J. Climatol.*, 28 (9): 1139–1161, doi:10.1002/joc.1615.
- 封国林, 杨涵涓, 张世轩, 等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探 [J]. *大气科学*, 36 (5): 1009–1026. Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 36 (5): 1009–1026, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.11220.
- 符宗斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. *大气科学*, 16 (4): 482–493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 16 (4): 482–493, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.11.
- 龚志强, 赵俊虎, 封国林. 2013. 中国东部 2012 年夏季降水及年代际转型的可能信号分析 [J]. *物理学报*, 62 (9): 099205. Gong Zhiqiang, Zhao Junhu, Feng Guolin. 2013. Analysis of the summer precipitation of 2012 in East China and its possibility of decadal shift [J]. *Acta Phys. Sinica* (in Chinese), 62 (9): 099205, doi:10.7498/aps.62.099205.
- 顾正强, 巩远发, 龚强, 等. 2013. 东北区域水汽收支的变化及其与降水的关系 [J]. *成都信息工程学院学报*, 28 (6): 651–658. Gu Zhengqiang, Gong Yuanfa, Gong Qiang, et al. 2013. The variation features of moisture budgets and its relationship with precipitation over the Northeast area of China [J]. *Journal of Chengdu University of Information Technology* (in Chinese), 28 (6): 651–658, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.06.015.
- He W P, Liu Q Q, Jiang Y D, et al. 2015. Comparison of performance between rescaled range analysis and rescaled variance analysis in detecting abrupt dynamic change [J]. *Chinese Physics B*, 24 (4): 049205, doi:10.1088/1674-1056/24/4/049205.
- 胡泊, 乔少博, 封国林. 2014. 20 世纪 90 年代末东亚夏季降水年代际变化及其成因初探 [J]. *物理学报*, 63 (20): 209204. Hu Po, Qiao Shaobo, Feng Guolin. 2014. Interdecadal variation of precipitation pattern and preliminary studies during the summer of late-1990s in East Asia [J]. *Chinese Physics B*, 63 (20): 209204, doi:10.7498/aps.63.209204.
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚, 等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别 [J]. *大气科学*, 22 (4): 460–469. Huang Ronghui, Zhang Zhenzhou, Huang Gang, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 22 (4): 460–469, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1998.04.08.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. *科学通报*, 58 (8): 617–628. Huang Ronghui, Liu Yong, Feng Tao. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over Eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 58 (12): 1339–1349, doi:10.1007/s11434-012-5545-9.
- Huang J P, Yi Y H, Wang S W, et al. 1993. An analogue-dynamical long-range numerical weather prediction system incorporating historical evolution [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 119 (511): 547–565, doi:10.1002/qj.49711951111.
- Kravtsov S, Spannagle C. 2008. Multidecadal climate variability in observed and modeled surface temperatures [J]. *J. Climate*, 21 (5): 1104–1121, doi:10.1175/2007JCLI1874.1.
- 李建平, 任荣彩, 齐义泉, 等. 2013. 亚洲区域海—陆—气相互作用对全球和亚洲气候变化的作用研究进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 518–538. Li Jianping, Ren Rongcai, Qi Yiquan, et al. 2013. Progress in air–land–sea interactions in Asia and their role in global and Asian climate change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (2): 518–538, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12322.
- 廉毅, 安刚, 王琪, 等. 1997. 吉林省 40 年来气温和降水的变化 [J]. *应用气象学报*, 8 (2): 197–204. Lian Yi, An Gang, Wang Qi, et al. 1997. Variation of temperature and precipitation during the last forty years in Jilin Province [J]. *Quart. J. Appl. Meteor.* (in Chinese), 8 (2): 197–204.
- 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭, 等. 2003. 东亚夏季风在中国东北区建立的标准、日期及其主要特征分析 [J]. *气象学报*, 61 (5): 548–558. Lian Yi, Shen Baizhu, Gao Zongting, et al. 2003. The study of the on-set criterion and the date of East Asian summer monsoon in Northeast China and its main characteristic analysis [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 61 (5): 548–558, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2003.05.004.
- 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭. 2004. 关于确定东亚夏季风强度指数的探讨 [J]. *气象学报*, 62 (6): 782–789. Lian Yi, Shen Baizhu, Gao Zongting. 2004. An exploration on the determination of East Asia summer monsoon index [J]. *Acta Meteor. Sinica* (in Chinese), 62 (6): 782–789, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2004.06.007.
- 梁萍, 何金海, 陈隆勋, 等. 2007. 华北夏季强降水的水汽来源 [J]. *高原气象*, 26 (3): 460–465. Liang Ping, He Jinhai, Chen Longxun, et al. 2007. Anomalous moisture sources for the severe precipitation over North China during summer [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 26 (3): 460–465, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2007.03.004.
- Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on the Asian summer monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 33 (24): L24071, doi:10.1029/2006GL027655.
- 马京津, 高晓清. 2006. 华北地区夏季平均水汽输送通量和轨迹的分析 [J]. *高原气象*, 25 (5): 893–899. Ma Jingjin, Gao Xiaqing. 2006. The transportation paths of water vapor and its relation to climate change over North China [J]. *Plateau Meteor.* (in Chinese), 25 (5): 893–899, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.05.017.
- Ma Z G, Fu C B. 2007. Evidences of drying trend in the global during the later half of 20th century and their relationship with large-scale climate background [J]. *Sci. China Ser. D Earth Sci.*, 50 (5): 776–788, doi:10.1007/s11430-007-0036-6.
- Ogi M, Tachibana Y, Yamazaki K. 2003. Impact of the wintertime North Atlantic Oscillation (NAO) on the summertime atmospheric circulation [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (13): 1704, doi:10.1029/2003GL017280.
- 平凡, 罗哲贤, 琚建华. 2006. 长江流域汛期降水年代际和年际尺度变化影响因子的差异 [J]. *科学通报*, 51 (1): 104–109. Ping Fan, Luo

- Zhe Xian, Ju Jian Hua. 2006. Differences between dynamics factors for interannual and decadal variations of rainfall over the Yangtze River valley during flood seasons [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (8): 994-999, doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2006.01.019.
- 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 Baizhu, Lin Zhongda, Lu Riyu, et al. 2011. Circulation anomalies associated with interannual variation of early-and late-summer precipitation in Northeast China [J]. *Sci. China Earth Sci. (in Chinese)*, 54 (7): 1095-1104, doi:10.1007/s11430-011-4173-6.
- 施能, 朱乾根. 1995. 大气环流年代际变化问题 [J]. *气象科技*, (3): 12-17. Si Neng, Zhu Qian'gen. 1995. The problem of atmospheric circulation decadal changes [J]. *Meteor. Sci. Technol. (in Chinese)*, (3): 12-17.
- Si D, Ding Y H. 2013. Decadal Change in the correlation pattern between the Tibetan Plateau winter snow and the East Asian summer precipitation during 1979-2011 [J]. *J. Climate*, 26 (19): 7622-7634, doi:10.1175/JCLI-D-12-00587.1.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2009. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. *Int. J. Climatol.* 29 (9): 1276-1284, doi:10.1002/joc.1773.
- Sun J Q, Wang H J. 2012. Changes of the connection between the summer North Atlantic Oscillation and the East Asian summer rainfall [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D8), doi:10.1029/2012JD017482.
- 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 2002. 中国东北地区夏季旱涝的大气环流异常特征 [J]. *气候与环境研究*, 7 (1): 102-113. Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2002. The unusual characteristics of general circulation in drought and waterlogging years of Northeast China [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (1): 102-113, doi:10.3969/j.issn.1006-9585.2002.01.010.
- Xu H L, Feng J, Sun C. 2013. Impact of preceding summer North Atlantic Oscillation on early autumn precipitation over central China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 6 (6): 417-422, doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0027.
- 杨修群, 谢倩, 朱益民, 等. 2005. 华北降水年代际变化特征及相关的海气异常型 [J]. *地球物理学报*, 48 (4): 789-797. Yang Xiuqun, Xie Qian, Zhu Yimin, et al. 2005. Decadal-to-interdecadal variability of precipitation in North China and associated atmospheric and oceanic anomaly patterns [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 48 (4): 789-797, doi:10.3321/j.issn:0001-5733.2005.04.009.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1290-1300. Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (6): 1290-1300, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.06.23.
- Zhang R, Delworth T L. 2007. Impact of the Atlantic Multidecadal Oscillation on North Pacific climate variability [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 34 (23): L23708, doi:10.1029/2007GL031601.
- 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 2008. 影响华北汛期降水的水汽输送过程 [J]. *大气科学*, 32 (2): 345-357. Zhou Xiaoxia, Ding Yihui, Wang Panxing. 2008. Features of moisture transport associated with the precipitation over North China during July-August [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (2): 345-357, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.02.13.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn.*, 36 (7-8): 1463-1473, doi:10.1007/s00382-010-0852-9.
- 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. (in Chinese)*, 56 (16): 1301-1307, doi:10.1007/s11434-011-4497-9.