

胡泊, 申红艳, 王晓娟, 等. 2018. 东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水特征及环流型的异同性研究 [J]. 大气科学, 42 (1): 109–123. Hu Po, Shen Hongyan, Wang Xiaojuan, et al. 2018. A study on characteristics of precipitation and circulation pattern in early summer, midsummer and conventional summer in Northeast Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 109–123, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16290.

东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水特征及环流型的异同性研究

胡泊¹ 申红艳¹ 王晓娟³ 封国林^{1,2,4}

1 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

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 常熟理工学院物理信息与工程学院, 江苏常熟 215100

4 扬州大学物理科学与技术学院, 江苏扬州 225002

摘 要 本文利用 1979~2015 年 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 逐月降水资料, 采用经验正交函数 (EOF) 分解和 Morlet 小波分析方法, 对东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水的时空分布特征以及环流型开展了系统性的研究, 揭示了东北亚地区传统夏季降水表现为盛夏降水贡献占主导, 其年际和年代际特征以及环流特征同盛夏降水特征相一致, 而初夏降水和盛夏降水特征及形成机制则具有显著差异。空间分布上, 初夏的降水 EOF 第一模态表现为“+ - +”的三极型分布, 而盛夏和传统夏季则表现为南北相反的偶极型特征; 时间演变方面, 初夏降水表现为 5~6 a 振荡周期, 盛夏为 2~3 a 为主的振荡周期, 传统夏季则兼具上述两类振荡周期; 在年代际调整方面, 在 1990 年代末, 盛夏降水和传统夏季降水在华北和东北地区发生了显著的年代际转折。此外, 分析降水与环流的联系发现: 初夏, 由于西太平洋上空异常反气旋将西太平洋等地的水汽向北方地区输送, 且受欧亚 II 型 (EUII) 遥相关的作用, 东北亚地区初夏降水异常具有明显纬向特征。盛夏, 东北亚地区降水主要受到西太平洋副热带高压西伸北进、孟加拉湾和南海等地水汽加强的影响。欧亚 I 型 (EUI) 遥相关和亚洲太平洋型 (EAP) 遥相关与我国东北以西和沿海地区的降水具有显著相关性。EU 型遥相关的作用使东北亚夏季降水的异常中心存在西北—东南向的波列特征, EAP 型遥相关的作用则使夏季降水存在经向三极型或偶极型特征。

关键词 降水异常 东北亚地区 遥相关型 环流

文章编号 1006-9895(2018)01-0109-15

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1706.16290

A Study on Characteristics of Precipitation and Circulation Pattern in Early Summer, Midsummer and Conventional Summer in Northeast Asia

HU Po¹, SHEN Hongyan¹, WANG Xiaojuan³, and FENG Guolin^{1,2,4}

1 College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

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

3 College of Physical and Electronic Project, Changshu Institute of Technology, Changshu, Jiangsu 215500

4 College of Physical Science and Technology, Yangzhou University, Yangzhou, Jiangsu 225002

收稿日期 2016-12-21; 网络预出版日期 2017-06-15

作者简介 胡泊, 男, 1990 年出生, 博士研究生, 主要从事气候学研究。E-mail: 383876027@qq.com

通讯作者 王晓娟, E-mail: mouse0903@126.com

资助项目 公益性行业 (气象) 专项 GYHY201306021, 国家自然科学基金项目 41575082、41530531、41475096、41505061

Funded by China Meteorological Administration Special Public Welfare Research Fund (Grant GYHY201306021), National Natural Science Foundation of China (Grants 41575082, 41530531, 41475096 and 41505061)

Abstract Based on monthly Global Precipitation Climatology Project (GPCP) data from 1079 to 2015, temporal and spatial characteristics of precipitation and circulation patterns in early summer, midsummer and conventional summer in Northeast Asia are systematically investigated using empirical orthogonal function (EOF) analysis and Morlet wavelet methods. Results indicate that the conventional summer precipitation is dominated by midsummer precipitation. The interannual and interdecadal circulation variations are consistent with the characteristics of midsummer precipitation, while the mechanisms for early summer and midsummer precipitation are significantly different. Looking at the spatial distribution of precipitation, it is found that the first leading mode of early summer precipitation exhibits a “+ - +” tripole pattern along the meridional direction, while an opposite pattern is found in the first leading modes of midsummer and conventional summer precipitation. Early summer precipitation demonstrates a 5–6-a period and midsummer precipitation shows a 2–3-a period. In the late 1990s, midsummer precipitation and conventional summer precipitation experienced a significant decadal change in North China and Northeast China. Further analysis indicates that early summer precipitation anomalies are mainly zonally distributed, which is partly attributed to the water vapor transport to Northeast Asia by anomalous anticyclonic circulation over the Western Pacific and partly attributed to the effects of the Eurasian II teleconnection (EUII). In midsummer, precipitation is mainly affected by the northward extension of western Pacific subtropical high and the strengthening of water vapor transport from the Bay of Bengal and the South China Sea. Eurasia I (EUI) teleconnection pattern and East Asia-Pacific (EAP) teleconnection pattern both are significantly correlated with midsummer precipitation in western China and the coastal area of China. Summer precipitation anomalies extend from northwest to southeast due to the effects of EUII teleconnection pattern. The effect of EAP teleconnection pattern leads to the tripole or dipole patterns of summer precipitation distribution along the meridional direction.

Keywords Precipitation anomaly, Northern Asia region, Teleconnection pattern, Circulation

1 引言

东北亚地处欧亚大陆的东北部，主要包括韩国、日本、俄罗斯远东、朝鲜、蒙古东部以及我国的东北和华北大部地区，受夏季风活动强弱等因素的影响，夏季雨带的推进具有明显的阶段性特征（廉毅等，2003；Gong et al., 2006, 2015；沈柏竹等，2011），且该地区夏季洪涝和干旱等气候灾害事件频发（Zhao et al., 2010；Zhu et al., 2011；Tan et al., 2014）。以往对于夏季降水预测研究，更多关注的是传统夏季（6~8月）的降水特征，对于东北亚地区降水在其降水集中期所表现出的阶段性特征的关注度不够。事实上，沈柏竹等（2011）通过分析东北地区的降水和环流特征，已经明确指出应该对初夏和盛夏的降水特征要有区别的研究。受东亚夏季风的影响（Huang and Sun, 1992；Ding and Chan, 2005），初夏降水的主雨带主要集中在长江以南地区，盛夏降水的主雨带主要集中在华北和东北等地，而7月下旬和8月上旬后，由于夏季风的北上而带来大量低纬度的水汽，则会进一步加强东北亚地区的降水。与此同时，由于受极涡加强的影响（廉毅等，2005；沈柏竹等，2008；Zhao et al., 2015），5~6月的东北亚地区也会出现降水量较前期明显增多的特征，其对应着与盛夏降水不同的形成机制。因此，完全有必要对东北亚地区这一农业和工

业的亚洲重镇，开展相应的阶段性降水特征分析。这不仅可以加深对东北亚地区降水时空演变规律的认识，也将有助于我们更好的理解其降水形成的环流特征和外源强迫，进而为提高东北亚降水次季节—到季节尺度预报准确率提供重要的参考（封国林等，2008, 2012；龚志强等，2009；Gong et al., 2016；Zheng et al., 2016）。

开展东北亚夏季降水的时空演变规律的研究，主要需要考虑其空间分布和时间演变这两方面特征。由于受东亚—太平洋遥相关型（East Asia Pacific teleconnection, 简称 EAP）和欧亚遥相关（Eurasia teleconnection, 简称 EU）等夏季大气遥相关的影响，东亚地区夏季降水具有典型的空型特征，如魏凤英和张先恭（1988）都指出我国东部地区夏季降水雨带的位置可以分为三种类型。黄荣辉等（2007，2011）进一步揭示了中国东部季风区夏季降水存在两个主要模态，即从南到北的经向三极子型和偶极子型分布模态，两种模态的时空变化存在准两年周期振荡和年代际变化等。东北亚地区分别处于 EAP 型和 EU 型遥相关型影响的关键位置，因此分析其降水时空规律必然需要关注其是否具有典型的空型模态。另一方面，叶柏生等（2005）研究我国各月降水量的变化特征发现华北地区 5 月降水呈现显著增加趋势，7 月降水显著减少趋势。陆日宇（1999）对华北夏季不同月份降水年代际进行研究发现：华

北 6 月份降水较少, 且年代际变化趋势不明显; 7 月份降水在 1960 年代末和 1970 年代中后期均发生年代际转折。Ding et al. (2008) 和黄荣辉等 (2011) 均指出东亚地区包括其北部地区的夏季降水在 1993~1998 年期间为从南到北的“+ - +”经向三极子型与“+ -”偶极子型的结合, 而 1999~2009 年期间则调整为“南涝北旱”式的“+ -”经向偶极子型分布。此外, 经历了 1990 年代初以来的降水偏多, 东北亚地区的夏季降水距平自 1990 年代末以来出现持续偏少的特征, 但 2011 年和 2012 年则又连续出现了两年的异常偏多, 2013 年夏季东北及俄罗斯远东地区等降水持续增多, 且东北亚北部地区夏季降水的年代际特征尤为显著 (龚志强等, 2013)。因此, 对于东北亚夏季降水演变规律的认识, 必然也需要关注其是否具有年际和年代际变率, 揭示其在不同时间段具有何种空间模态特征等。

分析东北亚夏季降水时空规律的同时, 也需要考虑其对应的环流特征。廉毅等 (2003) 分析了东亚夏季风在我国东北地区的推进过程, 指出东亚夏季风 7 月下旬在东北地区建立, 而在 8 月中旬开始从东北地区向南撤退。沈柏竹等 (2011) 指出, 在东北地区初夏降水偏多年时, 东北地区西北部出现随高度向西倾斜的异常气旋性环流, 东北地区冷涡活动频繁。盛夏, 东北地区降水异常主要受到局地对流层高层的东亚高空西风急流北移以及低层的西太平洋副热带高压西伸北进的影响。随着西太平洋副热带高压西北侧西南风异常的加强, 向北输送到东北地区的水汽显著增多, 东北地区盛夏降水偏多。此外, 陆日宇和黄荣辉 (1999) 也指出在北半球中高纬度地区, 夏季不同月份期间, 行星波表现出不同的变化特征, 印证了夏季不同月份之间明显的环流调整。顾正强等 (2013) 和孙力等 (2002) 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的年代际变化特征给出有利佐证。但我们注意到, 其研究更多关注对东北区域的影响, 同时对于 EAP 和 EU 等遥相关可能起到的作用也涉及较少。因此, 有必要从更大的空间尺度上揭示, 初夏、盛夏和传统夏季中, 东北亚地区降水时空演变所对应环流的异同性特征。

综上所述, 本文试图分别对东北亚地区初夏

(5~6 月)、盛夏 (7~8 月) 以及传统夏季 (6~8 月) 的降水进行系统性的对比研究。分析其可能存在空间模态和时间变率特征, 并联系欧亚环流系统异常, 尤其是 EAP 型和 EU 型遥相关等, 分析其降水年际变化对应的主要环流特征。文章第二节给出了资料和方法; 第三节分析了东北亚地区初夏、盛夏降水和传统夏季降水的时空特征、异常降水的主模态、异常年的降水特征以及可能存在的年代际变化特征; 第四节分析了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水对应的环流特征; 第五节则给出了 EU 型和 EAP 型遥相关对东北亚夏季降水的影响; 最后给出本文的总结和简要的讨论。

2 资料和方法

本文所用资料为 1979~2015 年 GPCP (The Global Precipitation Climatology Project Version 2.1) 逐月降水资料 (Monthly Precipitation Analysis), 分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。研究的区域为东北亚地区 ($30^{\circ} \sim 55^{\circ}N$, $110^{\circ} \sim 145^{\circ}E$)。方法是经验正交函数 (EOF) 分解、合成以及相关分析。文中初夏为 5~6 月, 盛夏为 7~8 月, 传统夏季为 6~8 月。

文中 EAP 指数根据 Huang (2004) 定义的公式为

$$I_{EAP} = 0.25 \times Z_{20^{\circ}N, 125^{\circ}E} - 0.5 \times Z_{40^{\circ}N, 125^{\circ}E} + 0.25 \times Z_{60^{\circ}N, 125^{\circ}E} \quad (1)$$

由于影响东北亚初夏和盛夏降水的 EU 遥相关型位置有明显的不同, 因此, 本文中 EU 指数同时采用了 Barnston and Livezey (1987) 提到的欧亚遥相关 I 型 (EUI) 和欧亚遥相关 II 型 (EUII), 其中 Barnston 定义的 EUI 遥相关的显著中心分别位于芬兰 ($60^{\circ} \sim 70^{\circ}N$, $25^{\circ} \sim 50^{\circ}E$)、中国西北部地区 ($30^{\circ} \sim 45^{\circ}N$, $80^{\circ} \sim 100^{\circ}E$) 和日本附近地区 ($30^{\circ} \sim 40^{\circ}N$, $130^{\circ} \sim 140^{\circ}E$)。EUII 型遥相关的三个显著中心从西往东依次为靠近英国和丹麦地区 ($50^{\circ} \sim 60^{\circ}N$, $10^{\circ}W \sim 10^{\circ}E$)、里海北部地区 ($40^{\circ} \sim 50^{\circ}N$, $50^{\circ} \sim 60^{\circ}E$) 和中国东北地区 ($40^{\circ} \sim 50^{\circ}N$, $115^{\circ} \sim 135^{\circ}E$)。同时采用 Wallace and Gutzler (1981) 定义的 EU 指数方法, 本文中 EUI 型和 EUII 型的公式为

$$I_{EUI} = -0.25 \times Z_{55^{\circ}N, 20^{\circ}E} + 0.5 \times Z_{55^{\circ}N, 75^{\circ}E} - 0.25 \times Z_{40^{\circ}N, 145^{\circ}E} \quad (2)$$

$$I_{EUII} = -0.25 \times Z_{60^{\circ}N, 10^{\circ}E} + 0.5 \times Z_{50^{\circ}N, 50^{\circ}E} - 0.25 \times Z_{45^{\circ}N, 110^{\circ}E} \quad (3)$$

公式 (1) 至 (3) 中, Z 均表示标准化后的 500

hPa 月平均高度场距平。

3 东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水时空演化规律

3.1 东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水气候特征

基于 GPCP 月平均资料来对比分析东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水时空分布的异同性。图 1 为 1981~2010 年东北亚地区逐月降水直方图。可以看出，东北亚地区降水主要呈现正态分布特征，7 月份降水最多，从 5 月份开始，降水迅速增加，5~9 月降水较其他月份而言相对较多。同时东北亚夏季降水具有显著的阶段性特征。因此，分别对东亚地区初夏（5~6 月）、盛夏（7~8 月）以及传统夏季（6~8 月）降水进行详细对比研究必然具有重要的科学意义。考虑到 9 月为东亚夏季风的南

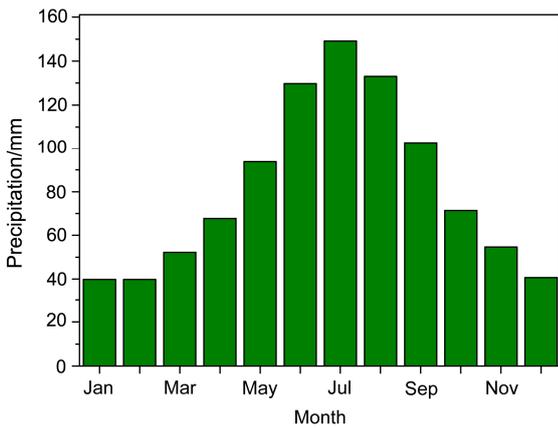


图 1 1981~2010 年东北亚地区逐月降水直方图
Fig. 1 Monthly precipitation histogram in Northeast Asia for 1981-2010

撤月份，以往的研究中多将其单独分析，所以本文未将 9 月列入对比研究的范围。

3.2 东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水时间演化特征

图 2 给出了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水标准化降水量和累积距平曲线图。从图 2a 中可以看出，东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水都表现出显著的年际变化特征，其中盛夏降水和传统夏季降水的年际振幅比初夏降水强。1979~2015 年，东北亚初夏平均降水为 223 mm，而盛夏平均降水比初夏平均降水多 50 mm，且占了传统夏季降水 70% 的降水。从图 2b 中累积距平曲线图可以看出，在 20 世纪 90 年代初之前，东北亚地区初夏降水呈逐渐减少趋势，之后降水量减少趋势相对减缓，直到 21 世纪初，东北亚初夏降水又呈现增多趋势。盛夏降水和初夏降水的趋势大致呈现相反特征，在 20 世纪 90 年代初之前呈现逐渐增加的趋势，到 20 世纪 90 年代末开始急剧减少。传统夏季降水与盛夏降水相比，两者的变化趋势相一致，但在 21 世纪初之后，传统夏季降水的增多趋势更显著。为了分析东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水之间的相似程度，图 3 给出了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水之间的散点分布图。可以看出，初夏和盛夏降水之间的散点大致均匀分布在四个象限中，东北亚地区初夏和盛夏降水之间的相关性只有 0.02，即东北亚盛夏和初夏降水可能对应截然不同的形成机制。东北亚地区传统夏季降水由于包含了初夏和盛夏降水的信息，且盛夏的比重较大，所以东北亚传统夏季降水跟初夏降水相关性仅为 0.39，

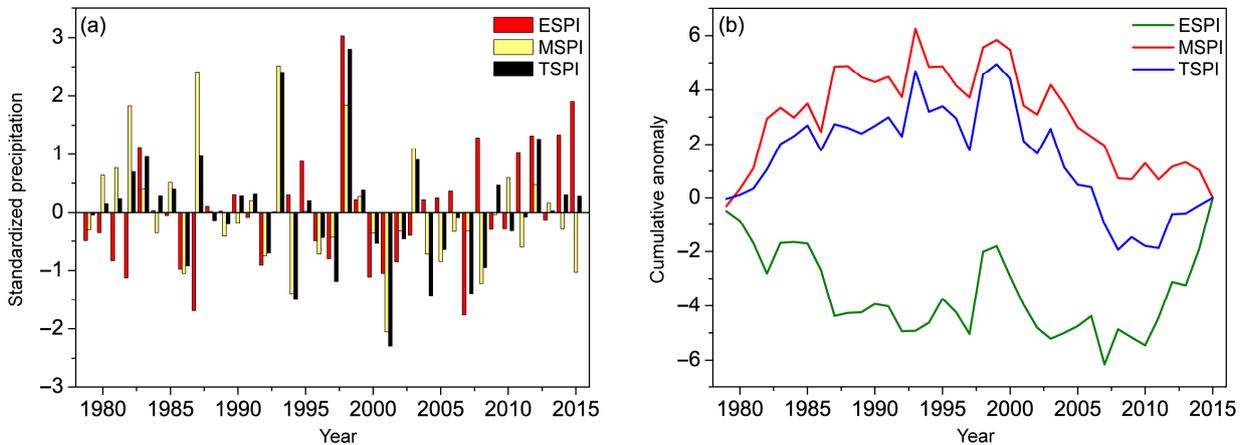


图 2 1979~2015 年东北亚地区 (a) 初夏 (ESPI)、盛夏 (MSPI) 和传统夏季 (TSPI) 标准化降水量和 (b) 标准化降水量的累积距平曲线
Fig. 2 (a) Standardized precipitation in early summer (ESPI), midsummer (MSPI), and conventional summer (TSPI) and (b) cumulative anomaly curves of standardized precipitation in Northeast Asia for 1979-2015

而与盛夏降水相关高达 0.84，由此说明东北亚传统夏季降水更多的包含了东北亚盛夏降水的变化特征。从 21 世纪初之后（2005 年之后）来看，初夏

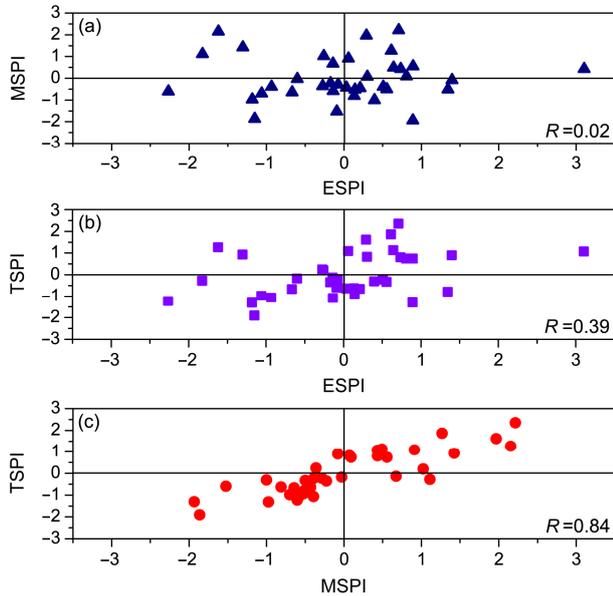


图3 1979~2015 东北亚地区散点图分布：(a) 初夏和盛夏；(b) 初夏和传统夏季；(c) 盛夏和传统夏季

Fig. 3 Scatter plots of (a) early summer and midsummer precipitation, (b) early summer and conventional summer precipitation, (c) midsummer and conventional summer precipitation in Northeast Asia for 1979–2015

与传统夏季降水相关系数为 0.53，相较 37 年的相关性高出许多，而盛夏和传统夏季降水相关系数则降低到 0.44。因此，21 世纪初之后，初夏降水对传统夏季降水的贡献有所提高。以上结果表明东北亚地区初夏、盛夏降水和传统夏季降水虽然都表现出显著的年际变化趋势，但是他们之间的振幅有明显的差异，且东北亚地区夏季降水之间的增长和减小趋势也有很大的差异。初夏和盛夏降水都对传统夏季降水有一定的影响，21 世纪初期之后传统夏季降水受到初夏降水的影响有所增强。

3.3 东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水异常的空间主模态特征

图 4 给出了东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水异常的模式的空间分布图，可以看出，东北亚地区初夏降水的第一模态 (EOF1) 从北向南呈现“+ - +”模态，其方差贡献为 33.29%；第二模态 (EOF2) 从北向南呈现正负交替的模态，其方差贡献为 16.98%。虽然两者的空间模态有类似之处，但 EOF1 多体现了西北—东南方向的三极型模态，而 EOF2 中三极型模态不明显。此外，它们的正值中心有所不同，EOF1 的正值中心主要在西太平洋地区，而 EOF2 的正值中心主要在日本南部附近。盛夏降水的第一模态 (EOF1) 出现从北向南的“+ - +”

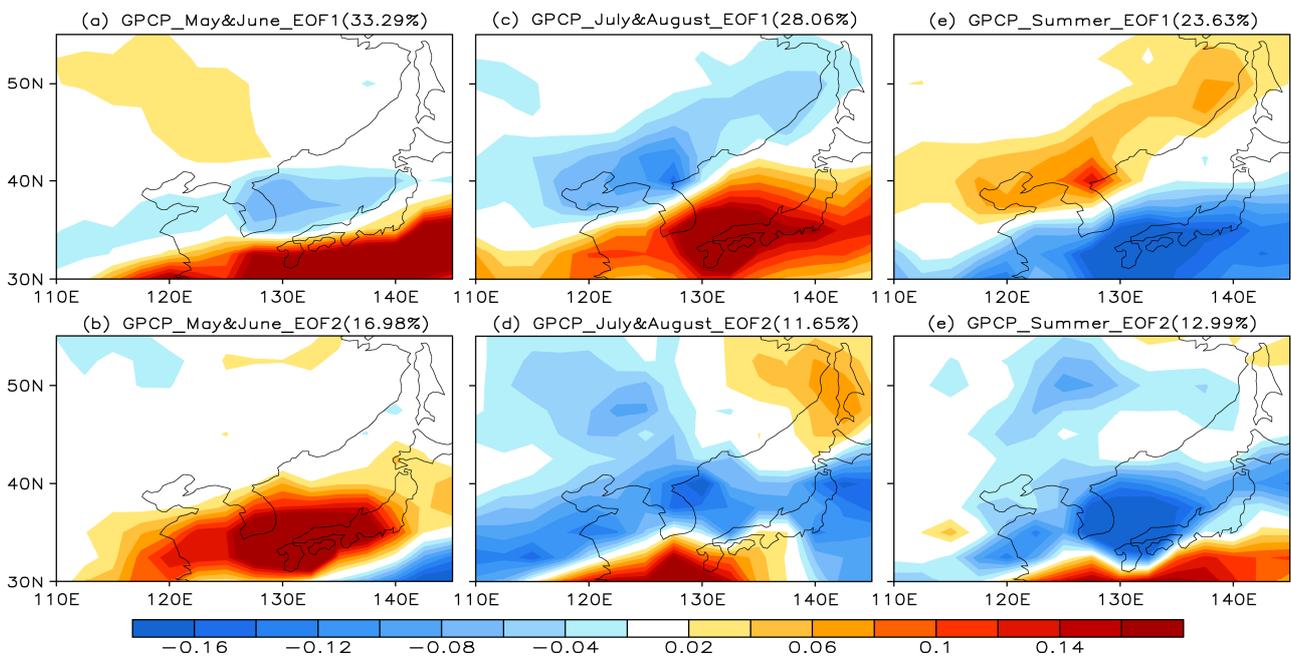


图4 1979~2015 年东北亚地区 (a, b) 初夏、(c, d) 盛夏以及 (e, f) 传统夏季降水 EOF 分析第一主模态 (第一行) 和第二主模态 (第二行) 的空间分布图

Fig. 4 Spatial patterns of the EOF1 modes (first row) and EOF2 modes (second row) of (a, b) early summer, (c, d) midsummer, and (e, f) conventional summer precipitation in Northeast Asia for 1979–2015

海陆差异模态, 其方差贡献为 28.06%; 第二模态 (EOF2) 呈现从西南到东北的“+ - +”模态, 其方差贡献为 11.65%。东北亚地区盛夏降水沿东亚沿岸的三极子正负交替的模态跟东亚-太平洋 (EAP) 型 (黄荣辉和李维京, 1988) 相类似, 正负中心分别位于鄂霍次克海-东亚中纬度地区-菲律宾附近。EAP 型遥相关结构很好的反映了东亚气候与西北太平洋之间的联系 (Nitta, 1987)。传统夏季降水的 EOF1 和东北亚地区盛夏降水 EOF1 空间分布特征虽然由“- +”模态转变为“+ -”模态, 但是两者的时间系数也呈现相反的特征 (图 5), 因此东北亚地区传统夏季降水第一模态和盛夏降水第一模态是一致的, 其方差贡献为 23.63%; 传统夏季降

水的第二模态 (EOF2) 也呈现南北向的“+ - +”模态, 其方差贡献为 12.99%。综上所述, 东北亚地区初夏降水的空间模态与盛夏降水和传统夏季降水的空间模态有很大的差异, 盛夏降水和传统夏季降水的空间模态比较接近。

从东北亚初夏、盛夏和传统夏季降水距平经验正交展开 EOF1 和 EOF2 对应的主分量 (PC1 和 PC2) 的时间系数上以及时间系数的九年滑动平均 (图 5) 来看, 东北亚地区初夏、盛夏降水和传统夏季降水空间主模态的异常分量都表现出显著的年际变化特征。东北亚地区初夏降水 EOF1 对应的主分量在 1970 年代末到 2000 年代初主要以负值为主, 之后开始转变为正值, 且 PC1 具有逐渐上升的

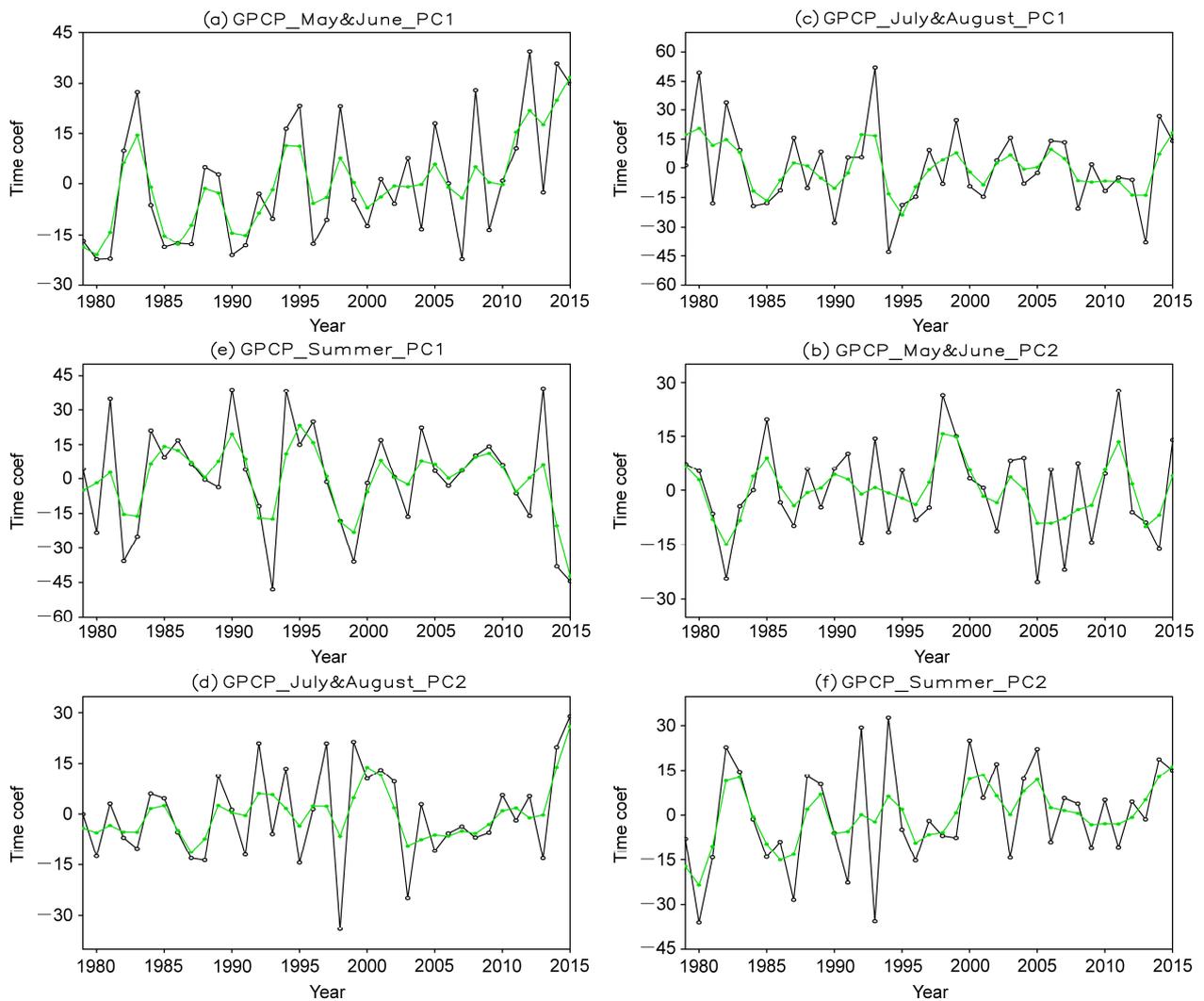


图 5 1979~2015 年东北亚地区 (a, b) 初夏、(c, d) 盛夏以及 (e, f) 传统夏季降水 EOF 分析第一主分量 (第一行) 和第二主分量 (第二行) 的时间系数 (绿线表示 9 年滑动平均)

Fig.5 Time coefficients of the EOF1 modes (first row) and EOF2 modes (second row) of (a, b) early summer, (c, d) midsummer and (e, f) conventional summer precipitation in Northeast Asia for 1979–2015. The green line denotes the nine-year moving average of precipitation

趋势。初夏降水 PC2 以 2~6 a 的振荡周期为主，并出现正负交替特征。盛夏降水的 PC1 具有逐渐较少的趋势，PC2 则具有与初夏 PC2 类似的趋势变化相特征，即都具有显著的年际振荡周期。表 1 中，传统夏季降水的 PC1 与盛夏降水的 PC1 呈现相反的变化特征，两者的相关系数为 -0.83，通过 0.01 的显著性水平检验；两者 PC2 的相关系数为 0.43，也通过了 0.05 的显著性水平检验。东北亚初夏降水和盛夏降水的影响机制有所不同，两者降水没有直接的联系，故其相应主分量之间的相关性均不显著。由于传统夏季降水包含初夏部分降水，传统夏季降水与初夏降水的 PC1 和 PC2 的相关系数也分别通过了 0.05 和 0.01 的显著性水平检验。图 6 给出了东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水 PC1 和 PC2 的小波分析图。可以看出，初夏降水的 PC1 在 80 年代中期存在 5~6 a 为为主的短期振荡周期，盛夏降水 PC2 在 1990 年代中后期存在 2~3 a 的振荡周期。传统夏季降水包含了初夏降水和盛夏降水的振荡周期，同时具有 5~6 a 和 2~3 a 的振荡周期。因此，东北亚初夏降水特征相对独立，而盛夏降水一定程度上能够反映东北亚传统夏季降水的变化的特征。

表 1 1979~2015 年东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水量 EOF 分析异常主模态时间序列的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between time series of anomalous principal EOF modes of precipitation in early summer, midsummer, and conventional summer in Northeast Asia for 1979–2015

		异常主模态时间序列的相关系数			
		初夏降水		传统夏季降水	
		PC1	PC2	PC1	PC2
盛夏降水	PC1	-0.04	-0.03	-0.83**	-0.28
	PC2	0.01	-0.15	-0.09	0.43**
传统夏季降水	PC1	-0.39*	-0.16	-	-
	PC2	0.48**	-0.44**	-	-

*表示通过 0.05 的显著性水平检验。

**表示通过 0.01 的显著性水平检验。

表 2 1979~2015 年东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水异常年份

Table 2 Years of precipitation anomalies in early summer, midsummer, and conventional summer in Northeast Asia for 1979–2015

	偏多年	严重偏多年	偏少年	严重偏少年
初夏降水	1983、1995、1998、2008、2011、2012、2014、2015	1998、2012、2014、2015	1981、1982、1986、1987、1992、1997、2000、2001、2002、2007	1987、2007
盛夏降水	1982、1987、1993、1998、2003	1982、1987、1993、1998	1986、1994、2001、2005、2008、2015	1994、2001
传统夏季降水	1983、1987、1993、1998、2003、2012	1993、1998	1986、1994、1997、2001、2004、2007、2008	1994、2001、2004、2007

3.4 东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水的异常特征

本节具体分析东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水的异常年对应的的空间分布特征。我们利用东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水序列大于（小于）0.8 倍标准差的为降水偏多（偏少）年，降水序列大于（小于）1.3 倍标准差的为降水严重偏多（偏少）年。根据此定义，得出的东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季异常降水存在较大的差异（表 2）。降水偏多年时，东北亚地区初夏有 8 年，盛夏为 5 年，由于受到盛夏降水的影响，传统夏季降水偏多年则减少到 6 年。从严重偏多年来看，初夏降水主要是在 1998、2012、2014 和 2015 年，盛夏降水则主要是在 1982、1987 和 1998 年，而传统夏季降水则在 1993 年和 1998 年出现严重偏多年。东北亚地区初夏降水偏少年有 10 年，盛夏降水偏少年为 6 年，而传统盛夏降水偏少年则有 7 年。从严重偏少年来看，初夏降水主要是在 1987 年和 2002 年，盛夏降水主要是在 1994 年和 2001 年，而传统夏季降水则主要是在 1994、2001 和 2007 年。同时，从表上也可以看出东北亚地区初夏、盛夏与传统夏季降水存在着相反的年份。如：1987 年，东北亚地区初夏降水为偏少年，而盛夏降水和传统夏季降水则是偏多年；2015 年，东北亚地区降水在初夏为偏多年时，而盛夏降水和传统夏季降水则属于偏少年份。还可以看出，东北亚地区初夏和盛夏降水偏多年份没有一年是相同，偏少年份则只有两年呈现相同的年份。由此说明东北亚地区初夏和盛夏降水异常存在着很大的差异性，同时传统夏季降水异常更多是由于盛夏降水异常造成。

图 7 给出了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水异常百分率偏多年和偏少年的空间分布图。东北亚地区降水为偏多年时，初夏降水大部呈现沿海地区降水相对偏少，其中降水偏多地区主要集中在华北和日本下游地区（图 7a），与初夏降水 EOF1 的空间分布型相匹配；盛夏和传统夏季降水则表现

为大部分偏多，仅在鄂霍次克海附近地区降水相对偏少（图 7b、c）。从东北亚地区降水百分率偏少年合成图上可以看出，初夏降水整体呈现一致偏少，且偏少区域主要集中在华北和东北区域（图 7d）。盛夏，日本海附近以及华北上部地区降水相对偏少

（图 7e）。传统夏季降水由于初夏降水的影响，在日本海附近降水偏少率没有盛夏时期明显（图 7f）。东北亚地区夏季降水的异常年空间分布图的给出，将有利于我们在实际降水预报中更好的把握异常和严重异常降水的可能落区。

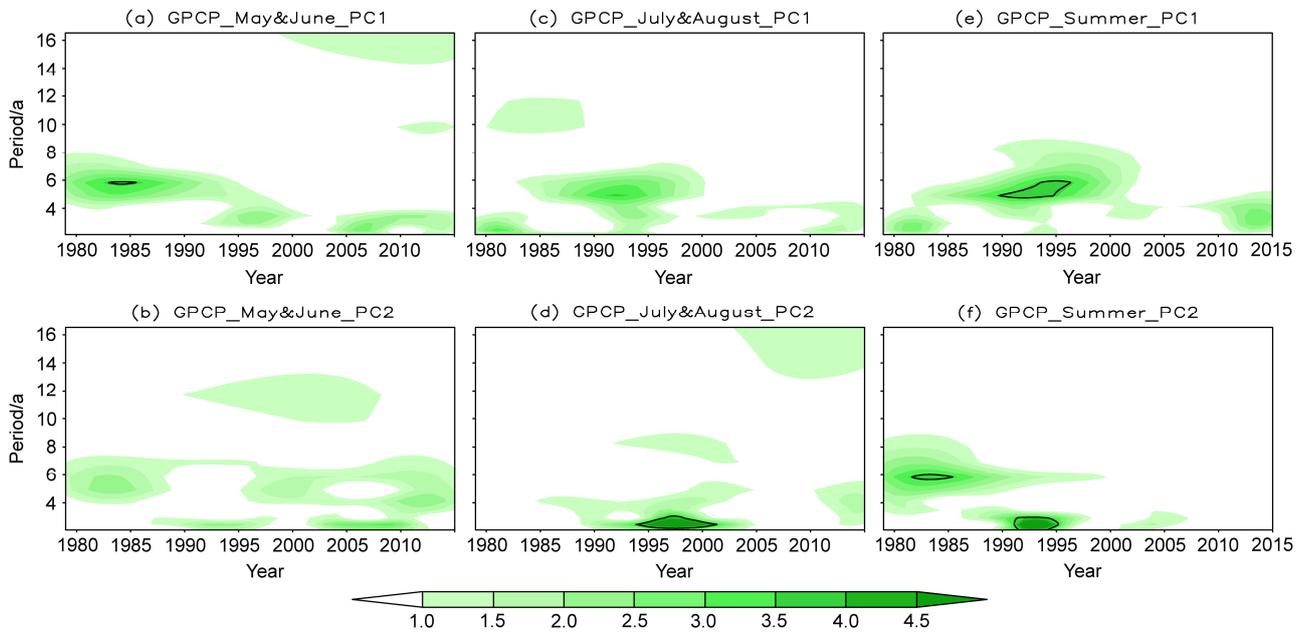


图 6 1979~2015 年东北亚地区 (a、b) 初夏、(c、d) 盛夏以及 (e、f) 传统夏季降水 EOF 分析第一主分量 (第一行) 和第二主分量 (第二行) 时间系数的小波分析图

Fig. 6 Morlet wavelet transform power spectra for the time series of the EOF1 modes (first row) and EOF2 modes (second row) of (a, b) early summer, (c, d) midsummer and (e, f) conventional summer precipitation in Northeast Asia for 1979–2015

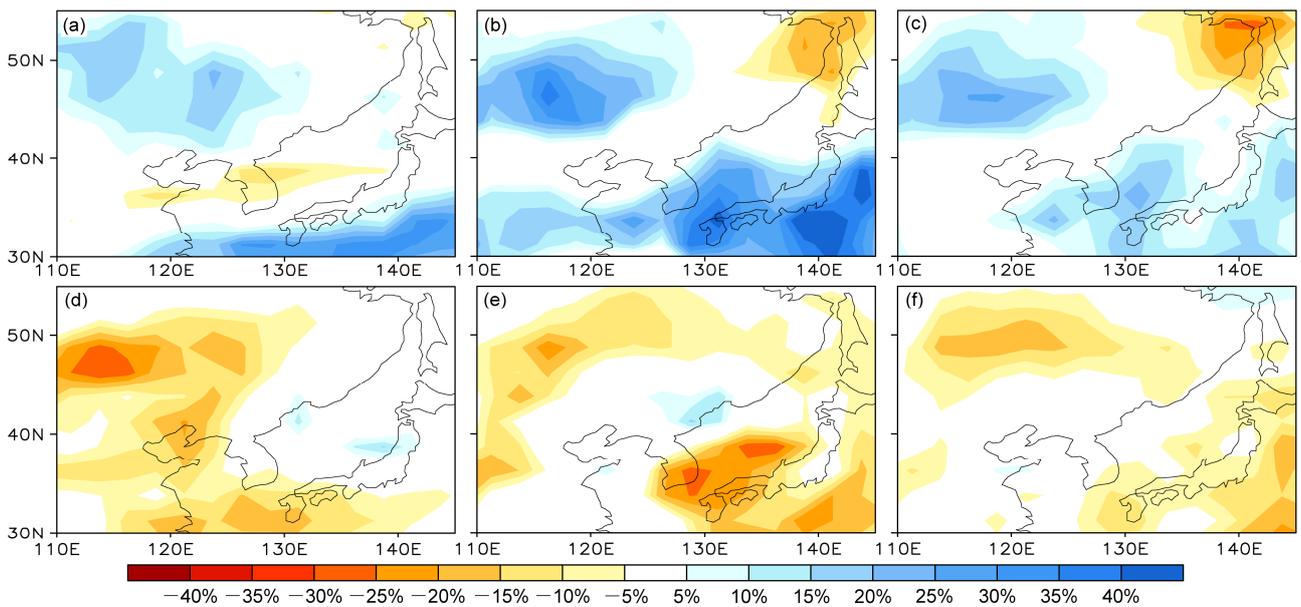


图 7 东北亚地区 (a、d) 初夏、(b、e) 盛夏和 (c、f) 传统夏季降水距平百分率在降水偏多 (第一行) 和偏少年 (第一行) 合成图

Fig.7 Composite distributions of precipitation anomaly percentages in (a, d) early summer, (b, e) midsummer, and (c, f) conventional summer in Northeast Asia. (a, b, c) are for years of positive precipitation anomalies and (d, e, f) are for years of negative precipitation anomalies

3.5 东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水年代际变化特征

前人研究表明(黄荣辉等, 2013; Si and Ding, 2013), 东亚地区夏季降水在 20 世纪 90 年代末具有非常明显的年代际变化特征。因此, 为了进一步的理解东北亚初夏、盛夏和传统夏季降水的年代际变化特征, 图 8a-c 给出了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水滑动 t 检验(简称 MTT)(魏凤英, 1999)的空间分布图。可以看出, 东北亚地区在 90 年代之后的年代际变化特征不明显, 只有少部分内陆地区存在通过 0.05 的显著性水平检验。而东北亚盛夏降水发生年代际变化特征的区域主要集中在华北附近和东北部分地区, 且发生年代际的时间主要集中在 1999 年前后。传统夏季降水的年代际变化特征主要受到盛夏降水的年代际特征的影响, 发生年代际转折的区域与盛夏降水发生年代际转折的区域相一致。为了更清楚的了解东北亚初夏、盛夏和传统夏季降水的年代际变化特征, 选取通过 0.05 显著性水平检验的区域($40^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$), 画出显著区域的初夏、盛夏和传统夏季降水距平时间序列图(图 9)。图 9 进一步证实了 20 世纪 90 年代末东北亚盛夏降水和传统夏季降水在

华北等的盛夏和传统夏季降水发生了由持续偏多转为持续偏少的年代际转折特征(图 9b、c), 而初夏降水更多体现年际变化特征(图 9a)。

4 大气环流变化特征对东北亚初夏、盛夏以及传统夏季降水的作用

以上的结果分析表明, 东北亚地区夏季降水不仅具有年代际变化特征, 还具有显著的年际变化特征。同时, 东北亚地区初夏和盛夏降水也有着明显的差异。本文接下来主要探讨造成东北亚初夏、盛夏和传统夏季降水年际异常的大气环流成因。因此图 10 给出了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季总降水量时间序列回归的 500 hPa 高度场分布。

从图 10a 可以看出, 东北亚地区初夏降水跟中亚中高纬度地区和贝加尔湖异常高压、局地异常低压和西太平洋地区异常高压有关, 从空间型上具有类似 EU 型遥相关的分布特征。图 10b、c 中, 盛夏和传统夏季, 具有类似高度场异常的空间分布。东北亚地区降水的异常不仅跟西太平洋地区异常高压、乌拉尔山高压, 东北亚局地异常低压有关, 还和欧洲西部异常低压有显著的联系。EU 型遥相关存在于欧亚大陆上空从北大西洋传播至乌拉尔地

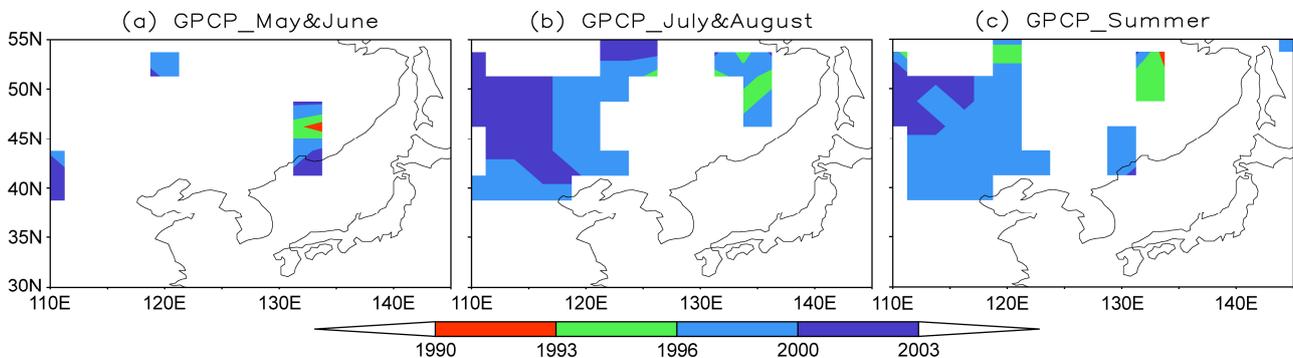


图 8 东北亚地区 (a) 初夏、(b) 盛夏和 (c) 传统夏季降水 MTT 突变检验空间分布

Fig. 8 Spatial distributions of moving t -test (MTT) of (a) early summer, (b) midsummer, and (c) conventional summer precipitation in Northeast Asia

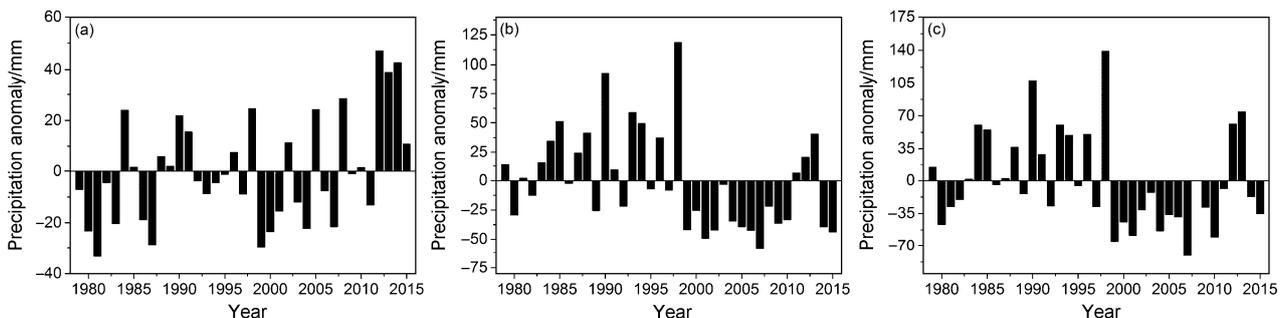


图 9 显著区域 (a) 初夏、(b) 盛夏和 (c) 传统夏季降水距平时间序列(单位: mm)

Fig. 9 Time series of (a) early summer, (b) midsummer, and (c) conventional summer precipitation anomalies in the significance region (units: mm)

区以东的遥相关波列, 表现为乌拉尔山地区、东亚沿岸和欧洲西部地区异常高度场的正负相间的相关关系, 即纬向表现为受 EU 型的控制 (Barnston and Livezey, 1987; 乔少博等, 2015)。回归的 500 hPa 高度场在经向存在一定的正负异常中心波列分布, 具有类似 EAP 遥相关的模态。这种经向模态在初夏表现为负异常区域在日本海附近出现了断裂, 但在高纬度的正异常中心较显著, 而在盛夏和传统夏季则具有更为典型的 EAP 型遥相关模态特征。EU 型的存在对应了初夏、盛夏和传统夏季的 EOF1 模态的大值中心均存在一个西北—东南方向的波列特征, 而 EAP 型的存在则决定了其经向存在的初夏的三极型分布和盛夏和传统夏季的偶极型分布。此外, 虽然东北亚初夏在 500 hPa 上空从欧洲西部到东亚地区也出现了正负相间的波列, 东北亚地区的降水与欧亚西部地区的异常低压相关性较小, 即东北亚地区初夏降水更容易受到局地以及周边系统的影响。如李辑等 (2014) 研究发现东北冷涡是造成辽宁初夏降水异常偏多的主要影响因子。刘刚等 (2017) 指出东北初夏降水的 62.5% 为冷涡降水。

与高度场的异常分布相对应的, 在西太平洋上空形成的异常反气旋 (图 11a), 将副热带西太平洋及沿海地区等地的水汽 (图 12a) 从韩国半岛向东北亚地区输送, 同时由于贝加尔湖等地的异常高压, 有利于北方的干冷气流南下, 在东北亚地区与来自低纬度地区的水汽汇合, 形成东北亚地区的初夏降水。同时, 由于副热带地区副高带高压主要集中在 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 之间, 偏东偏南的副热带高压位置对东北亚地区初夏降水影响较小。图 11b、c 和图 12b、c 对应盛夏和传统夏季的风场和可降水量异常场中, 来自低纬度夏季风较强, 孟加拉湾和南海等地的水汽输送强盛, 西太平洋上空的出现异常的反气旋偏东。同时, 西太平洋副热带高压中心位置向北移动, 日本、韩国、朝鲜和我国东北部分地区异常低气压处于西太平洋副热带高压的西北部, 异常的水汽沿着西太平洋副热带高压西侧的南风异常向北输送到东北亚地区。盛夏和传统夏季的可降水量主要来自长江地区以及东北偏北地区。通过图 11 和图 12 的分析, 更清晰给出了东北亚降水在初夏、盛夏和传统夏季降水对应的可降水量的可能源地和水汽通过风场输送的异同性特征。

对比初夏和盛夏的情况不难发现, 初夏主要表现为纬向 EU 型遥相关, 而来自低纬度地区的水汽

输送相对弱, 降水更多表现为与欧亚地区冷涡相联系的冷涡性降水; 盛夏和传统夏季则不仅表现为受纬向的 EU 型影响, 同时也受经向典型的 EAP 遥相关的影响, 降水则主要表现为由于低纬度水汽输送显著加强、副高北抬而引起的季风性降水。相关结果, 与廉毅等 (2010)、何金海等 (2006)、胡开喜等 (2011) 等研究结论是一致的。

5 EAP 型和 EU 型遥相关对东北亚初夏、盛夏以及传统夏季降水的影响

某个区域的气候异常与全球各个区域的环流有着一定的联系, 大气遥相关型能够很好的解释某一区域的气候异常变化。夏季东亚地区气候异常与西北太平洋之间有着强力的相互作用。图 10 中, 传统的夏季降水受到 EAP 型遥相关和 EU 型遥相关显著, 因此本节主要分析 EAP 型遥相关和 EU 型遥相关对东北亚地区初夏、盛夏以及传统夏季降水的影响。

东亚—太平洋遥相关型 (EAP) 是北半球夏季重要的遥相关型 (Huang and Li, 1987), 主要是由纬度副热带西太平洋地区、东亚中纬度地区和雅库茨克及鄂霍次克海地区这三个正负相间的中心构成。因此 EAP 型遥相关的异常主要反映了西太平洋与东亚沿岸地区环流系统之间的相互配置。刘毓赞和陈文 (2012) 也指出, EU 遥相关型对副热带西风急流、东亚大槽有一定的作用, 并进而影响到我国的降水。从图 10 上可以看出影响东北亚初夏和盛夏的从欧洲西部到东亚地区的遥相关显著位置有明显的差异。Barnston and Livezey (1987) 研究将欧亚遥相关型分解为欧亚遥相关 I 型 (EUI)、欧亚遥相关 II 型 (EUII)、东大西洋遥相关型 (EA) 和热带/北半球遥相关型 (TNH)。因此根据 Barnston 定义的遥相关型可以看出, 东北亚初夏降水主要受 EUII 遥相关型, 东北亚盛夏降水则受到 EUI 遥相关型的影响。结合 Huang (2004) 定义的 EAP 指数和 Wallace and Gutzler (1981) 和 Barnston and Livezey (1987) 定义的 EU 指数, 表 3 给出了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水分别与 EAP、EUI、EUII 指数的相关系数。

从表 3 中可以看出, 东北亚地区初夏降水跟初夏 EAP 指数的相关系数为 0.24, 与初夏 EUI 指数相关系数是 0.20, 均没有通过 0.05 的显著性水平, 而与 EUII 指数相关系数为 0.32, 通过了 0.05 的显著性水平检验。Hu et al (2010) 对东北冷涡研究表明, 初

夏东北冷涡主要在贝加尔湖及偏东地区形成，因此东北初夏降水跟东北冷涡持续日数有显著的相关性。同时，Wang et al. (2010) 的研究也表明，EU 型遥相关的增强往往伴随着乌拉尔阻塞等环流异常。因此，东北亚初夏降水主要受到冷涡和局地阻塞高压等影响。东北亚地区盛夏降水和盛夏 EAP 指数、EUI 指数和 EUII 指数的相关系数分别为 0.37、0.47 和 0.08，传

统夏季降水和传统夏季 EAP 指数、EUI 指数和 EUII 指数的相关系数分别为 0.50、0.49 和 0.29，盛夏和传统夏季降水均和 EUII 指数的相关系数没有通过 0.05 的显著性水平检验。因此，EAP 遥相关对东北亚盛夏和传统夏季降水有一定的作用，同时东北亚盛夏和传统夏季降水只受到 EUI 遥相关的影响。

图 13 给出了 EAP 指数、EUI 指数和 EUII 指数

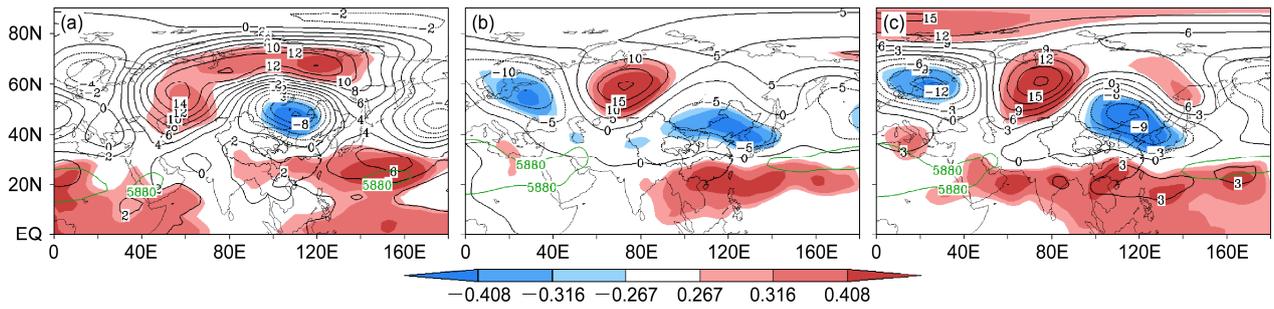


图 10 东北亚地区 (a) 初夏、(b) 盛夏和 (c) 传统夏季总降水量标准化时间序列对 500 hPa 高度场的回归系数分布。绿色实线代表 500 hPa 位势高度 5880 gpm 线；图中阴影由浅到深依次表示通过 0.10、0.05 和 0.01 的显著性水平检验

Fig. 10 The spatial distribution of 500-hPa geopotential height that is regressed by the standardized precipitation in (a) early summer, (b) midsummer, and (c) conventional summer in Northeast Asia. The green line represents the 5880 geopotential meter geopotential height contour at 500 hPa; the shaded areas from shallow to deep denote the values pass test at 0.10, 0.05, 0.01 significance levels

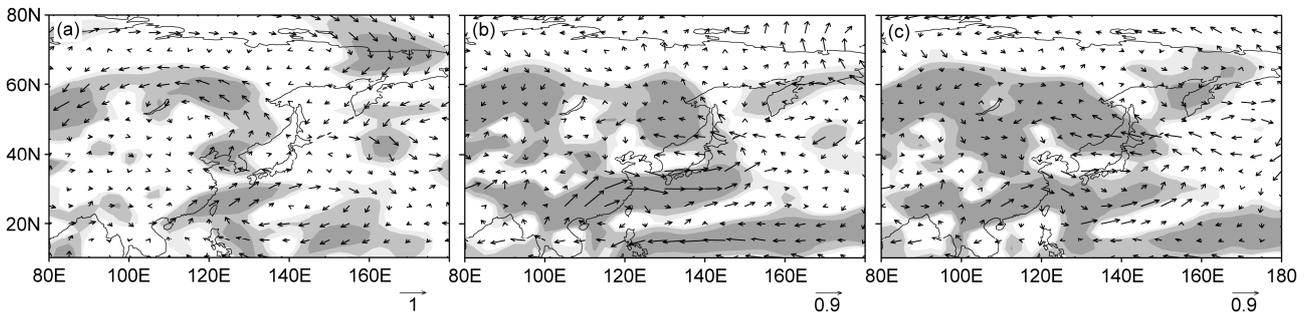


图 11 东北亚地区降水量标准化时间序列对 850 hPa 风场的回归系数分布：(a) 初夏；(b) 盛夏与初夏差值；(c) 传统夏季与初夏差值。阴影由浅到深依次表示通过 0.1、0.05 和 0.01 的显著性水平检验

Fig. 11 The spatial distribution of 850-hPa wind field that is regressed by the standardized precipitation in Northeast Asia: (a) Early summer, (b) the difference between midsummer and early summer, (c) the difference between conventional summer and early summer. The shaded areas from shallow to deep denote the values pass test at 0.10, 0.05, 0.01 significance levels

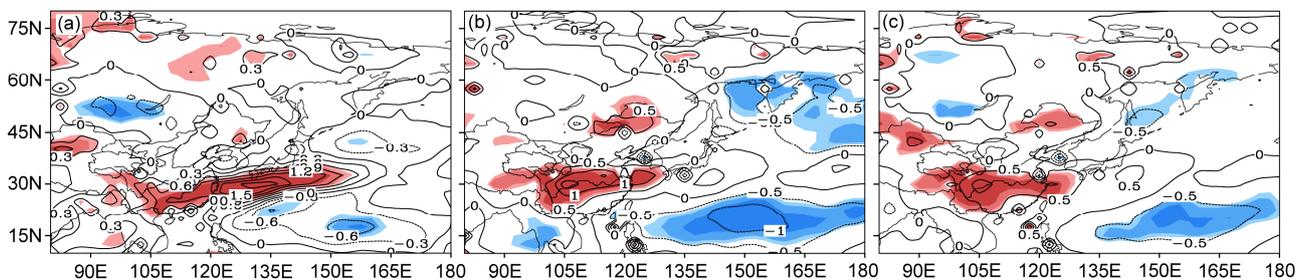


图 12 东北亚地区降水量标准化时间序列对可降水量的回归系数分布：(a) 初夏；(b) 盛夏与初夏差值；(c) 传统夏季与初夏差值。阴影由浅到深依次表示通过 0.1、0.05 和 0.01 的显著性水平检验

Fig. 12 The spatial distribution of precipitable water that is regressed by the standardized precipitation in Northeast Asia : (a) Early summer, (b) the difference between midsummer and early summer, (c) the difference between conventional summer and early summer. The shaded areas from shallow to deep denote the values pass test at 0.10, 0.05, 0.01 significance levels

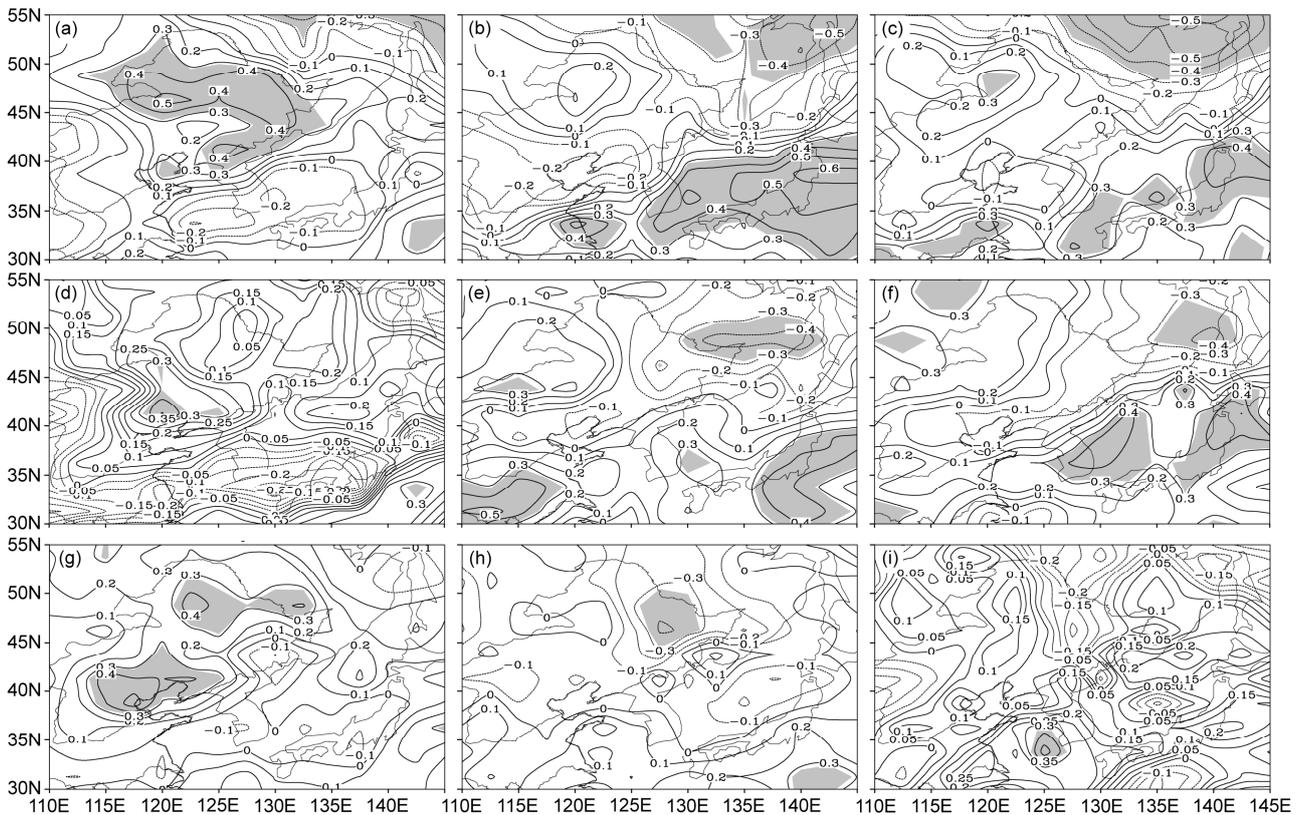


图 13 (a、b、c) EAP 指数、(d、e、f) EUI 指数和 (g、h、i) EUII 指数与东北亚初夏(左列)、盛夏(中间列)以及传统夏季(右列)格点降水的相关系数

Fig. 13 Correlation coefficients between indices of (a, b, c) EAP, (d, e, f) EUI, (g, h, i) EUII and the precipitation in early summer (left column), middle summer (middle column), conventional summer (right column) in Northeast Asia

表 3 东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水分别与 EAP 指数、EUI 指数、EUII 指数的相关系数

Table 3 Correlation coefficients between indices of EAP, EUI and EUII and early summer, middle summer, and conventional summer precipitation in Northeast Asia

	EAP 指数	EUI 指数	EUII 指数
初夏降水	0.24	0.20	0.32*
盛夏降水	0.37*	0.47*	0.08
传统夏季降水	0.50*	0.49*	0.29

*表示通过 0.05 的显著性水平检验。

分别与东北亚初夏、盛夏和传统夏季降水的相关系数图。从图上可以更清楚的了解 EAP 和 EU 遥相关对东北亚初夏、盛夏和传统夏季降水的影响区域。在初夏, EAP 和 EUII 型遥相关主要影响东北及华北部分地区降水, EUI 型遥相关对东北亚地区降水没有显著相关关系(图 13a、d、g)。在盛夏, EAP 型遥相关主要影响日本、西太平洋地区以及鄂霍次克海地区降水, EUI 型遥相关对西太平洋、长江中下游以及黑龙江上游等地具有一定的作用, 而 EUII

型遥相关对东北亚地区部分地区产生一定的影响(图 13b、e、h)。传统夏季降水也是主要受到 EAP 和 EUI 遥相关型的影响, 且与盛夏降水受到影响的区域相类似(图 13c、f、i)。

6 结论与讨论

本文利用 1979~2015 年 GPCP 逐月降水资料分析了东北亚地区初夏、盛夏和传统夏季降水的时空变化特征以及 EAP 和 EU 遥相关对其影响。分析结果表明:

(1) 东北亚地区初夏降水表现为显著“+ - +”模态 (EOF1 和 EOF2), PC1 和 PC2 表现出显著的年际变化特征, 其中 PC1 具有 5~6 a 振荡周期; 盛夏降水从北向南则表现为“- +”模态 (EOF1) 和“+ - +”模态 (EOF2), PC1 和 PC2 也表现出明显的年际变化特征, 且 PC2 中存在 2~3 a 的振荡周期。传统夏季降水由于同时包含了初夏和盛夏的降水信息, 其时间序列中既包含 5~6 a 也包含了 2~

3 a 振荡周期。东北亚地区初夏降水的空间模态与盛夏降水和传统夏季降水的空间模态有很大的差异,这可能是引起初夏降水和盛夏降水的影响因素所导致的。盛夏降水和传统夏季降水的空间模态比较接近,但第一模态的空间分布特征跟传统夏季降水第一模态的空间分布特征出现相反的模式。就年代际调整而言,东北亚地区只有在华北和东北地区在盛夏和传统夏季降水发生显著的年代际变化特征,且发生转折的时间为 20 世纪 90 年代末。对比异常年发现,无论是降水偏多年份还是降水偏少年份,东北亚地区初夏和盛夏降水分布特征都有显著的差异性。因此,我们在研究东北亚夏季降水的时候,需要对初夏和盛夏两个时期区别对待,因为其时空演化特征存在显著差异。同时,盛夏的降水时空演化特征与传统夏季基本相似,我们在研究 6~8 月夏季东北亚降水的需要将侧重点放在 7~8 月的盛夏,因为这个时间段的降水对传统夏季的降水的异常特征起到决定性作用。

(2) 初夏,西太平洋上空异常反气旋将西太平洋等地的水汽向北输送,将副热带西太平洋及沿海地区等地的水汽向北输送,同时由于北方的干冷气流南下,在东北亚地区与来自低纬度地区的水汽汇合,并受到 EUII 遥相关型的影响,造成东北亚地区初夏降水。盛夏,东北亚地区降水主要受到西太平洋副热带高压西伸北进和孟加拉湾和南海等地水汽加强的影响,西太平洋上空的出现异常的反气旋偏东异常的水汽沿着西太平洋副热带高压西侧的南风异常向北输出到东北亚地区,同时受 EUI 型和 EAP 型两类遥相关型的协同作用。

参考文献 (References)

- Barnston A G, Livezey R E. 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 115 (6): 1083–1126, doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1083:CSAPOL>2.0.CO;2.
- Ding Y H, Chan J C L. 2005. The East Asian summer monsoon: An overview [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 89 (1–4): 117–142, doi:10.1007/s00703-005-0125-z.
- 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, 龚志强, 支蓉. 2008. 气候变化检测与诊断技术的若干新进展 [J]. *气象学报*, 66 (6): 892–905. Feng Guolin, Gong Zhiqiang, Zhi Rong. 2008. Latest advances of climate change detecting technologies [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 66 (6): 892–905, doi:10.11676/qxxb2008.081.
- 封国林, 侯威, 支蓉, 等. 2012. 极端气候事件的检测、诊断与可预测性研究 [M]. 北京: 科学出版社, 350pp. Feng Guolin, Hou Wei, Zhi Rong, et al. 2012. *Detection, Diagnosis and Predictability Research of Extreme Climate Events (in Chinese)* [M]. Beijing: Science Press, 350pp.
- 龚志强, 封国林, 万仕全, 等. 2006. 基于启发式分割算法检测华北和全球气候变化的特征 [J]. *物理学报*, 55 (1): 477–484. Gong Zhiqiang, Feng Guolin, Wan Shiquan, et al. 2006. Analysis of features of climate change of Huabei area and the global climate change based on heuristic segmentation algorithm [J]. *Acta Phys. Sinica*, 55 (1): 477–484, doi:10.3321/j.issn:1000-3290.2006.01.084.
- 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.
- 龚志强, 王晓娟, 支蓉, 等. 2009. 中国近 58 年温度极端事件的区域特征及其与气候突变的联系 [J]. *物理学报*, 58 (6): 4342–4353. Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, Zhi Rong, et al. 2009. Regional characteristics of temperature changes in China during the past 58 years and its probable correlation with abrupt temperature change [J]. *Acta Phys. Sinica (in Chinese)*, 58 (6): 4342–4353, doi:10.7498/aps.58.4342.
- Gong Z Q, Feng T C, Fang Y H. 2015. Objective identification research on cold vortex and mid-summer rainy periods in Northeast China [J]. *Chin. Phys. B*, 24 (4): 049204, doi:10.1088/1674-1056/24/4/049204.
- Gong Z Q, Hutin C, Feng G L. 2016. Methods for improving the prediction skill of summer precipitation over East Asia-West Pacific [J]. *Wea. Forecasting*, 31 (4): 1381–1392, doi:10.1175/WAF-D-16-0007.1.
- 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]. *程度信息工程学院学报*, 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]. *J. Chengdu Univ. Inform. Technol. (in Chinese)*, 28 (6): 651–658, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2013.06.015.
- 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, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2006.01.001.
- 胡开喜, 陆日宇, 王东海. 2011. 东北冷涡及其气候影响 [J]. *大气科学*, 35 (1): 179–191. Hu Kaixi, Lu Riyu, Wang Donghai. 2011. Cold vortex over Northeast China and its climate effect [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (1): 179–191. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.01.15.
- Hu K X, Lu R Y, Wang D H. 2010. Seasonal climatology of cut-off lows and associated precipitation patterns over Northeast China [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 106 (1–2): 37–48, doi:10.1007/s00703-009-0049-0.
- Huang G. 2004. An index measuring the interannual variation of the East Asian summer monsoon—the EAP index [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 21 (1): 41–52, doi:10.1007/BF02915679.

- 黄荣辉, 李维京. 1988. 夏季热带西太平洋上空的热源异常对东亚上空副热带高压的影响及其物理机制 [J]. 大气科学, 12 (S1): 107–116.
- Huang Ronghui, Li Weijing. 1988. Influence of heat source anomaly over the western tropical Pacific on the subtropical high over East Asia and its physical mechanism [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12 (S1): 107–116.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606.
- Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over Eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.04.01.
- 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 R H, Li W J. 1987. Influence of the heat source anomaly over the tropical western Pacific on the subtropical high over East Asia [J]. Proc. International Conference on the General Circulation of East Asia. Chengdu, China, 10–15.
- Huang R H, Sun F Y. 1992. Impacts of the tropical western Pacific on the East Asian summer monsoon [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 70 (1B): 243–256, doi:10.2151/jmsj1965.70.1B_243.
- 李辑, 房一禾, 李菲, 等. 2014. 辽宁初夏降水大尺度环流影响因子及 2012 年初夏异常多雨成因分析 [J]. 气象, 40 (9): 1114–1122. Li Ji, Fang Yihe, Li Fei, et al. 2014. Large-scale circulation factors of early summer precipitation in Liaoning Province and causes analysis of heavy precipitation in 2012 [J]. Meteor. Mon. (in Chinese), 40 (9): 1114–1122, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2014.09.009.
- 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:10.11676/qxsb2003.055.
- 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭, 等. 2005. 中国气候过渡带干旱化发展趋势与东亚夏季风、极涡活动相关研究 [J]. 气象学报, 63 (5): 740–749. Lian Yi, Shen Baizhu, Gao Zongting, et al. 2005. Correlation of drought development tendency on China's climate transition zone and activity of East Asia summer monsoon and polar vortex [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 63 (5): 740–749, doi:10.11676/qxsb2005.071.
- 廉毅, 布和朝鲁, 谢作威, 等. 2010. 初夏东北冷涡活动异常与北半球环流低频变化 [J]. 大气科学, 34 (2): 429–439. Lian Yi, Buch Cholaw, Xie Zuowei, et al. 2010. The anomalous cold vortex activity in Northeast China during the early summer and the low-frequency variability of the northern hemispheric atmosphere circulation [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 429–439, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.02.16.
- 刘刚, 封国林, 秦玉琳, 等. 2017. 初夏东北地区冷涡降水“累积效应” [J]. 大气科学, 41 (1): 202–212. Liu Gang, Feng Guolin, Qin Yulin, et al. 2017. “Cumulative effect” of cold vortex precipitation in northeast China in early summer [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 41 (1): 202–212, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1602.15231.
- 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.
- 陆日宇. 1999. 华北夏季不同月份降水的年代际变化 [J]. 高原气象, 18 (4): 509–519. Lu Riyu. 1999. Interdecadal variations of precipitations in various months of summer in North China [J]. Plateau Meteor. (in Chinese), 18 (4): 509–519, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.1999.04.005.
- 陆日宇, 黄荣辉. 1999. 夏季西风带定常扰动对东北亚阻塞高压的影响 [J]. 大气科学, 23 (5): 533–542. Lu Riyu, Huang Ronghui. 1999. Influence of the stationary disturbance in the westerlies on the blocking highs over the northeastern Asia in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (5): 533–542, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1999.05.03.
- Nitta T. 1987. Convective activities in the tropical western Pacific and their impact on the Northern Hemisphere summer circulation [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 65 (3): 373–390, doi:10.2151/jmsj1965.65.3_373.
- 乔少博, 张志森, 王晓娟, 等. 2015. 晚秋与后冬间欧亚遥相关型波列反相现象探究 [J]. 气象学报, 73 (4): 711–724. Qiao Shaobo, Zhang Zhisen, Wang Xiaojuan, et al. 2015. An investigation into the phase reversal of EU teleconnections from late autumn to the late winter [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 73 (4): 711–724, doi:10.11676/qxsb2015.045.
- 沈柏竹, 李尚锋, 廉毅. 2008. 初夏东北冷涡活动的谐波分析 [J]. 吉林大学学报 (地球科学版), 38 (S): 204–208. Shen Baizhu, Li Shangfeng, Lian Yi. 2008. The harmonic analysis of cold vortex of the North-East China in early summer [J]. J. Jilin Univ. (Earth Sci. Ed.) (in Chinese), 38 (S): 204–208.
- 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., 54 (7): 1095–1104, doi:10.1007/s11430-011-4173-6.
- 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.
- 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.
- Tan L C, An Z S, Huh C A, et al. 2014. Cyclic precipitation variation on the western Loess Plateau of China during the past four centuries [J]. Sci. Rep., 4: 6381, doi:10.1038/srep06381.

- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the northern Hemisphere winter [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 109 (4): 748–812, doi:10.1175/1520-0493(1981)109<0784:TITGHF>2.0.CO;2.
- Wang L, Chen W, Zhou W, et al. 2010. Effect of the climate shift around mid 1970s on the relationship between wintertime Ural blocking circulation and East Asian climate [J]. *Int. J. Climatol.*, 30 (1): 153–158, doi:10.1002/joc.1876.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社.
- Wei Fengying. 2007. *Modern Climatic Statistical Diagnosis and Forecasting Technology* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 魏凤英, 张先恭. 1988. 我国东部夏季雨带类型的划分及预报 [J]. *气象*, 14 (8): 15–19.
- Wei Fengying, Zhang Xiangong. 1988. The classification and forecasting of summer rain-belt in the east part of China [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 14 (8): 15–19, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1988.8.003.
- 叶柏生, 李翀, 杨大庆, 等. 2005. 我国过去 50 a 来降水变化趋势及其对水资源的影响 (II): 月系列 [J]. *冰川冻土*, 27 (1): 100–105.
- Ye Baisheng, Li Chong, Yang Daqing, et al. 2005. Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 years (II): Monthly variation [J]. *J. Glaciol. Geocryol.* (in Chinese), 27 (1): 100–105, doi:10.3969/j.issn.1000-0240.2005.01.015.
- Zhao J H, Yang L, Hou W, et al. 2015. Extra-seasonal prediction at summer 500 hPa height field in the area of cold vortices over East Asia with a dynamical-statistical method [J]. *Chin. Phys. B*, 24 (5): 059202, doi:10.1088/1674-1056/24/5/059202.
- Zhao P, Yang S, Yu R C. 2010. Long-term changes in rainfall over eastern china and large-scale atmospheric circulation associated with recent global warming [J]. *J. Climate*, 23 (6): 1544–1562, doi:10.1175/2009JCLI2660.1.
- Zheng Z H, Hu Z Z, L'Heureux M. 2016. Predictable components of ENSO evolution in real-time multi-model predictions [J]. *Sci. Rep.*, 6: 35909, doi:10.1038/srep35909.
- 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.