

沈迪桑, 陈海山. 2018. 中国东部春季极端降水与同期欧亚大陆地表感热的可能联系 [J]. 气候与环境研究, 23 (1): 103–112. Shen Disang, Chen Haishan. 2018. Possible linkage between spring extreme precipitation over East China and surface sensible heat flux over the Eurasian Continent [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 23 (1): 103–112, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16226.

中国东部春季极端降水与同期欧亚大陆地表感热的可能联系

沈迪桑 陈海山

南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

摘 要 利用 1960~2010 年 ERA-20C 再分析资料和中国东部站点降水观测资料, 探讨了我国东部春季极端降水与欧亚大陆地表感热通量的联系和可能影响途径。结果发现, 当春季欧亚大陆中纬度巴尔喀什湖以西及贝加尔湖以南区域地表感热通量偏弱 (强), 我国东部沿海地区地表感热通量偏强 (弱) 时, 我国东部春季极端降水呈现南少 (多) 北多 (少) 的反相分布特征。当春季欧亚大陆中纬度关键区地表感热偏弱, 低纬度关键区地表感热通量偏强时, 春季副热带西风急流偏弱、位置偏北, 我国东部北方地区大气斜压不稳定和对流不稳定偏强, 北方地区极端降水偏强, 而南方地区大气斜压不稳定和对流不稳定偏弱, 南方地区极端降水偏弱。当春季欧亚大陆中纬度关键区地表感热偏强, 低纬度关键区地表感热通量偏弱, 我国东部极端降水的情况大致相反。

关键词 地表感热 欧亚大陆 极端降水 中国东部

文章编号 1006-9585 (2018) 01-0103-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16226

Possible Linkage between Spring Extreme Precipitation over East China and Surface Sensible Heat Flux over the Eurasian Continent

SHEN Disang and CHEN Haishan

Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education/ Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change/ Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract Based on the ERA-20C reanalysis data and observational precipitation data collected at the 332 stations in eastern China (to the east of 105°E) during 1960–2010, the possible linkage between spring extreme precipitation over eastern China and surface sensible heat flux over the Eurasian Continent is explored. Results show that when weakened (intensified) spring surface sensible heat flux occurs in the middle latitudes of the Eurasian Continent (i.e., regions to the west of Lake Balkhash and to the north of Lake Baikal) while intensified (weakened) sensible heat occurs in eastern China, the spring extreme precipitation is usually more (less) than normal over northern China but less (more) than

收稿日期 2016-12-23; 网络预出版日期 2017-11-09

作者简介 沈迪桑, 女, 1991 年出生, 硕士研究生, 主要从事陆面过程与短期气候预测研究。E-mail: shendisang@163.com

通讯作者 陈海山, E-mail: haishan@nuist.edu.cn

资助项目 科技部公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206017, 国家自然科学基金项目 41230422、41625019, 江苏省自然科学基金项目 BK20130047, “新世纪优秀人才支持计划”

Funded by Special Scientific Research Fund of Meteorological Public Welfare Profession of Ministry of Science and Technology (Grant GYHY201206017), National Natural Science Foundation of China (Grants 41230422, 41625019), Jiangsu Natural Science Foundation Project (Grant BK20130047), “New Century Excellent Talent Support Program”

normal over southern China. Further analysis suggests that weakened sensible heat in the middle latitudes and intensified sensible heat in the lower latitudes tend to weaken spring subtropical westerly and shift it northward, which are favorable for enhanced convective and baroclinic instabilities, leading to more extreme precipitation in North China. However, they tend to decrease baroclinic and convective instabilities and result in less extreme precipitation in South China. On the contrary, intensified sensible heat in the middle latitudes and weakened sensible heat in the lower latitudes tend to have opposite effects.

Keywords Surface sensible heat flux, Eurasian Continent, Extreme precipitation, East China

1 引言

全球变暖背景下, 极端天气气候事件的发生频率和强度均发生了显著变化; 极端天气气候事件的变化对社会和环境影响极大 (Kunkel et al., 1999)。近年来, 极端天气气候事件的研究受到广泛关注。已有研究表明, 全球不同区域极端降水事件的频率和强度表现出不同程度的增加 (Yamamoto and Sakumi, 1999; Easterling et al., 2000; Goswami et al., 2006)。极端降水事件变化的形态与总降水量的变化相似, 总降水量增加的区域, 极端降水事件也表现出不同程度的增加 (Zhai et al., 2005), 极端降水占总降水的比例也呈现增加趋势 (Karl and Knight, 1998; Zhang et al., 2008)。大量的研究表明, 我国极端降水的变化具有显著的区域性特征。Zhang et al. (2008) 指出长江流域年极端降水增多, 伴随着无雨日增多、雨日减少, 降水强度显著增强。Feng et al. (2007) 发现年极端降水事件在中国北部减少, 在长江流域和中国西北部增多。此外, 极端降水事件除了具有区域性差异, 还具有明显的季节性差异 (陈海山等, 2009)。

目前关于极端降水事件的时空变化特征已经有大量研究 (王冀等, 2008; 李丽平等, 2010; 陆志刚等, 2011)。然而, 由于我国特殊的地质地貌特征, 极端降水的物理成因也十分复杂, 这方面的认识还十分有限 (高涛和谢立安, 2014)。陈海山等 (2013) 从大气内部动力过程探讨了我国极端降水的可能成因, 认为天气尺度瞬变波异常活动对极端降水的发生具有示范重要的影响。另外的研究表明, 极端降水事件对外源强迫的响应相较于平均气候更为敏感 (Wang et al., 2000)。大多数从外强迫角度来研究极端降水成因的工作多集中于海温异常。例如: 张永领和丁裕国 (2004) 分析了我国东部极端降水与北太平洋海温的遥相关关系; 杨金虎等 (2010) 研究认为前冬赤道中东太平洋和前冬热

带西太平洋是影响我国夏季极端降水的关键区。而 Wang and Yan (2011) 的研究指出前冬 ENSO 型太平洋海温会影响长江中下游夏季极端降水。

相比之下, 目前从陆面热力异常的角度探究极端降水成因的研究较少。陆面作为气候系统的一个重要分量, 对大气环流和气候状况具有不可忽视的作用 (孙菽芬, 2005)。而感热通量作为一个重要的陆面因子, 其异常可以通过影响地表能量平衡进而影响上层大气甚至更大范围的大气环流 (钱正安等, 2001)。不少学者研究指出不同区域的地表感热通量异常能够对我国气候产生重要影响 (柏晶瑜等, 2003; 宁亮和钱永甫, 2006; 周长春等, 2009; 陈圣劼等, 2012; 吴荷等, 2015)。既然地表感热通量与我国气候有紧密联系, 那么其与我国极端降水事件之间是否也存在一定的联系? 基于以上考虑, 本文试图分析中国东部春季极端降水事件与同期欧亚大陆地表感热之间的联系, 并为深入理解中国东部春季极端降水的成因提供一定的参考。

2 资料与方法

本文采用国家气候中心提供的 1950~2010 年中国区域 753 站逐日降水观测资料, 选取 105°E 以东的站点, 剔除缺测站点, 最终选取 332 个站点 (图 1)。地表感热通量资料、风场、温度场、水汽场等气象变量均选自 1960~2010 年欧洲中心 ERA-20C 的再分析资料, 分辨率 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)。

首先, 根据翟盘茂和潘晓华 (2003) 对极端降水事件的定义和 Bonsal et al. (2001) 提出的计算方法计算得到每个站点的极端降水阈值。具体的做法如下: 将某站 1960~2010 年逐年春季 (3~5 月) 湿日 (日降水量 ≥ 0.1 mm) 降水量序列的第 95 个百分位值的多年平均值作为该站点的极端降水阈值, 当该站点的某日降水量超过这一阈值时, 则记为一次极端降水事件。

此外, 在研究中还采用了湿位涡 MPV 诊断,

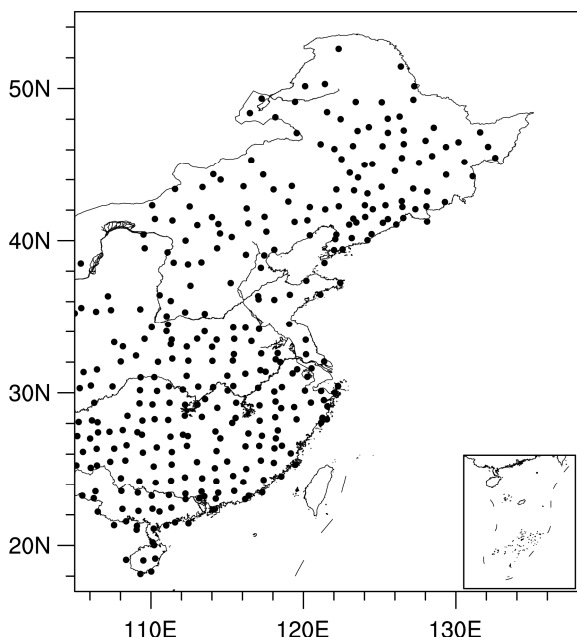


图1 中国东部 332 站分布图

Fig. 1 Spatial distribution of the 332 stations in eastern China

相关说明如下: p 坐标系下, 忽略 ω 的水平变化, 湿位涡 MPV (下文记为 M) 可表示为

$$M = -g(\xi + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right), \quad (1)$$

其中, ξ 为垂直方向涡度, f 为地转涡度, θ_e 为假相当位温, u 为纬向风速, v 为经向风速, g 为重力加速度, 湿位涡的单位为 $10^{-6} \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2$ 。湿位涡可分为湿正压项和湿斜压项两部分, 分别为

$$M_1 = -g(\xi + f) \frac{\partial \theta_e}{\partial p}, \quad (2)$$

$$M_2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_e}{\partial y} \right), \quad (3)$$

其中, M_1 表示湿正压项, M_2 表示湿斜压项。湿位涡是表征大气稳定性的一个重要参数, 其中湿正压项 (M_1) 可表征大气对流不稳定, 湿斜压项 (M_2) 可表征大气斜压不稳定。

3 中国东部春季极端降水与同期欧亚大陆地表感热通量的可能联系

3.1 中国东部春季极端降水频次的时空分布特征

图 2 给出了 1960~2010 年中国东部春季极端降水频次 EOF (Empirical Orthogonal Function) 分解前两个模态的空间分布及相应的时间系数, 其中

第一模态的方差贡献为 20.3%, 第二模态的方差贡献为 14.3%。第一模态的空间分布主要表现为中国东部的一致变化型分布; 第二模态则反映了南北呈“+”“-”的反相分布特征; 二者对应的时间系数均表现出明显的年际变化。

3.2 影响我国东部春季极端降水的感热关键区

为了寻找影响我国东部春季极端降水的感热关键区, 将中国东部极端降水频次的前两个模态的时间系数分别与同期欧亚大陆地表感热通量进行了相关分析。结果表明, 第一模态与同期欧亚大陆地表感热通量的相关并不显著, 而第二模态则存在显著的相关区, 这说明影响中国东部极端降水频次前两个模态的外强迫因子可能存在明显不同。为了进一步验证上述结果, 将中国东部极端降水频次的前两个模态与前期、同期太平洋海表温度进行相关分析发现, 第一模态与太平洋海表温度的相关性非常显著, 而第二模态与海温的相关显著并不显著 (图略)。考虑到, 我国东部春季极端降水第一模态主要与太平洋海表温度有关, 第二模态则主要与欧亚大陆地表感热通量有关。本文将重点讨论与第二模态有关的欧亚大陆地表感热通量关键区的选取及其异常特征的分析。

图 3a、3b 为中国东部春季极端降水频次第二模态时间系数分别与冬、春季欧亚大陆地表感热通量的相关分布。不难发现, 春季极端降水与冬季地表感热的显著负相关区主要位于巴尔喀什湖以西的西亚地区 (图 3a); 而春季的显著相关区较冬季更明显, 负相关区主要出现在巴尔喀什湖以西的西亚及贝加尔湖以南地区, 而我国东南沿海地区则为显著的正相关 (图 3b)。这说明上述区域从冬季到春季的地表感热通量异常可能与我国东部春季极端降水之间存在一定的联系。进一步的分析发现, 西亚地区的地表感热通量从冬季到春季具有较好的持续性 (图 3c)。因此, 可以认为影响春季极端降水的地表感热信号可能从冬季延续至春季, 并主要通过春季感热异常影响大气环流进而影响春季极端降水, 从这个角度来说, 西亚地区冬季的感热异常可以为春季极端降水的发生提供一定的前期信号。为了更进一步分析地表感热异常与极端降水之间的联系, 将上述地表感热通量与我国东部春季极端降水之间的显著相关区定义为影响极端降水的感热关键区。冬季欧亚大陆感热关键区为: 西亚地区 ($34^\circ\text{N} \sim 46^\circ\text{N}$, $58^\circ\text{E} \sim 77^\circ\text{E}$); 春季欧亚大陆

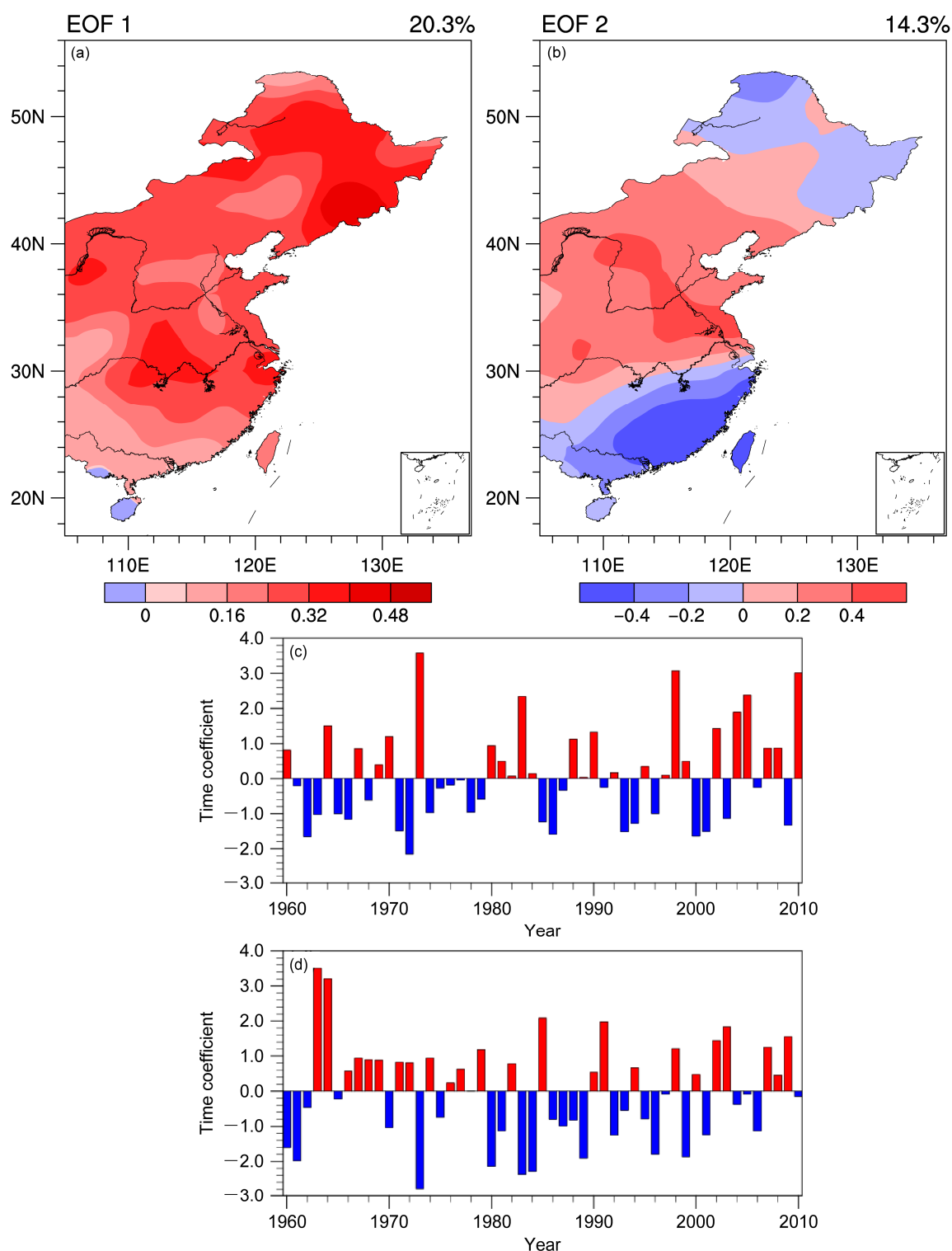


图2 1960~2010年中国东部春季极端降水频次 EOF 分解的前两个模态的 (a、b) 空间分布及其对应的 (c、d) 时间系数: (a、c) 第一模态; (b、d) 第二模态

Fig. 2 (a, b) Spatial patterns and (c, d) principal components of the first and second EOF (Empirical Orthogonal Function) modes of spring extreme precipitation frequency over eastern China during 1960–2010: (a, c) The first EOF mode; (b, d) the second EOF mode

感热关键区为：西亚地区(34°N~46°N, 51°E~77°E)、贝加尔湖以南地区(36°N~50°N, 98°E~118°E)、中国东南沿海地区(21°N~32°N, 106°E~122°E)；分别用 W1、S1、S2、S3 代表上述感热关键区。1960~2010 年冬、春季关键区地表感热区域平均的标准化距平序列，其与我国东部春季极端降水第二模态的时间系数的相关系数见表 1。由表中可见，各感热关键区的区域平均标准化距平序列与极端降水第二模态的时间系数的相关系数均通过了 0.05 的显著性检验。

表 1 极端降水频次 EOF 第二模态时间系数与冬、春季各关键区感热区域平均相关系数

Table 1 Correlation coefficients between principal component of the second EOF mode of extreme precipitation and winter/spring sensible heat flux in the selected areas

关键区	极端降水频次第二模态时间系数与关键区感热相关系数
W1	-0.41**
S1	-0.33*
S2	-0.34*
S3	0.44**

*, **分别表示通过 0.05、0.01 的显著性检验。

3.3 感热指数的定义及其与极端降水的可能联系

上文发现关键区感热与我国春季极端降水存在较密切的联系。进一步，将春季欧亚大陆地表感热通量与我国东部春季极端降水频次进行了奇异值分解(SVD)分析，图 4 给出春季欧亚大陆地表感热通量与中国东部春季极端降水频次 SVD 分析第二模态，由图可见，图 4a 地表感热通量的异类相关场的显著相关区与前文所选取的感热关键区总体一致，图 4b 极端降水的异类相关分布型与前文分析的极端降水频次 EOF 第二模态一致，进一步说明春季欧亚大陆感热与我国东部春季极端降水之间可能存在的密切关系。图 5 为春季欧亚大陆地表感热通量与中国东部春季极端降水频次 SVD 第二模态时间系数，两个时间序列相关达到 0.77，通过 0.01 的显著性检验。为了便于下文的分析，将春季欧亚大陆地表感热通量与中国东部春季极端降水频次 SVD 第二模态的地表感热通量场的时间序列定义为感热指数 IMAM，以下主要利用春季感热指数 IMAM 进行感热相关影响的分析。

4 关键区地表感热异常影响我国东部春季极端降水可能途径的初步分析

以上分析表明春季感热关键区的感热异常与

我国东部春季极端降水存在密切的联系，那么春季感热异常又是如何对我国东部春季极端降水产生影响的呢？大气环流异常往往是大范围气候异常的直接原因，而强降水事件不仅需要大范围异常大气环流的配合，其发生发展还存在强烈的垂直运动和大气不稳定能量的存储、释放。Bennetts and Hoskins (1979) 提出了湿位涡的概念，用于表征大气的动力及热力特性。张艳霞等(2008)将湿位涡用于气候异常诊断，利用湿位涡探讨了江淮地区夏季降水异常的机理。王苗(2011)则用湿位涡的特性来解释极端降水形成的原因，并发现湿位涡在北方地区的负(正)距平区很好对应了极端降水正(负)距平区，并认为利用湿位涡理论能够在一定程度上帮助探究极端降水的成因。以下重点分析与感热异常相关的湿位涡特征和大气环流异常特征，以期探究欧亚大陆感热影响我国东部春季极端降水的可能过程提供一些参考。

为了便于进一步讨论，将去趋势后的标准化指数 IMAM 大(小)于等于 0.8 (-0.8) 个标准差的年份定义为春季感热正(负)指数年。选取 1963 年、1964 年、1969 年、1977 年、1987 年、1991 年、1998 年、2003 年、2010 年为正指数年，1965 年、1970 年、1973 年、1975 年、1984 年、1999 年、2000 年、2001 年为负指数年。其中，正指数年代表中纬度巴尔喀什湖以西、贝加尔湖以南地区感热通量偏弱，我国南方沿海地区感热通量偏强；负指数年情况相反。以下重点通过正负异常年的合成分析，从大气环流、湿位涡场等角度来探讨欧亚大陆感热异常影响我国东部春季极端降水的可能途径。

4.1 东亚副热带急流

况雪源和张耀存(2007)的研究表明地表加热场的变化可以通过影响对流层中、高层温度场和高度场，使对流层中上层经向温差发生变化而引起高层纬向风变化。最近，吴荷等(2015)的研究也发现欧亚大陆中高纬春季感热通量增强时，夏季东亚副热带西风急流位置偏东强度偏强，那么本文所关注的感热关键区感热异常对春季东亚副热带西风急流这一东亚地区的关键环流系统会产生什么样的影响呢？图 6a 给出了标准化感热指数 IMAM 与春季 200 hPa 纬向风的相关分布，不难发现 45°N 以北为显著的正相关区，而以南区则为负相关区；上述相关结果说明，感热正(负)指数年急流偏北(南)、强度减弱(加强)。之前的研究表明，

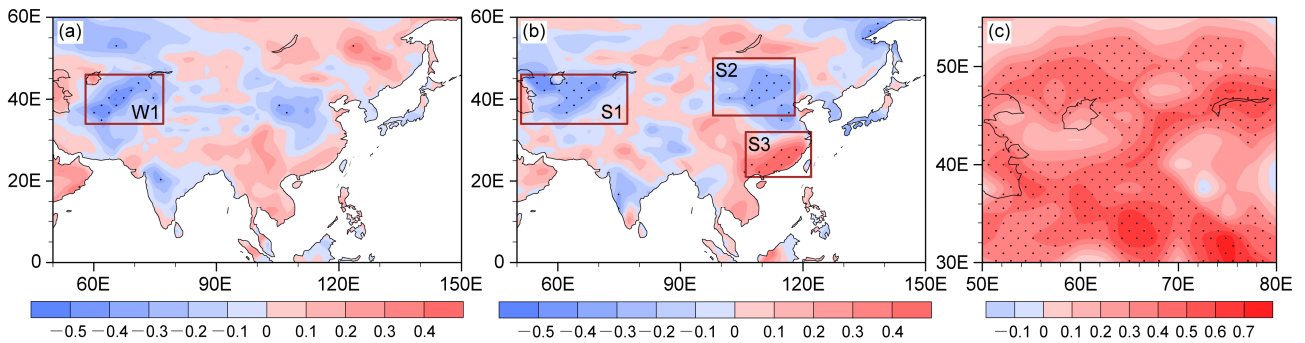


图 3 中国东部春季极端降水频次 EOF 第二模态时间系数与 (a) 冬季、(b) 春季欧亚大陆地表感热通量的相关分布, 与 (c) 关键区冬、春季地表感热通量的相关分布 (打点区域表示通过 0.05 显著性检验, 方框表示本文所选取的关键区)

Fig. 3 Correlation between the principal component of the second EOF mode of spring extreme precipitation frequency over eastern China and (a) winter, (b) spring sensible heat flux over the Eurasian continent, and (c) winter and spring sensible heat fluxes in the key area (dotted areas indicate statistical significance at 0.05 level; boxes show the key areas selected in this study)

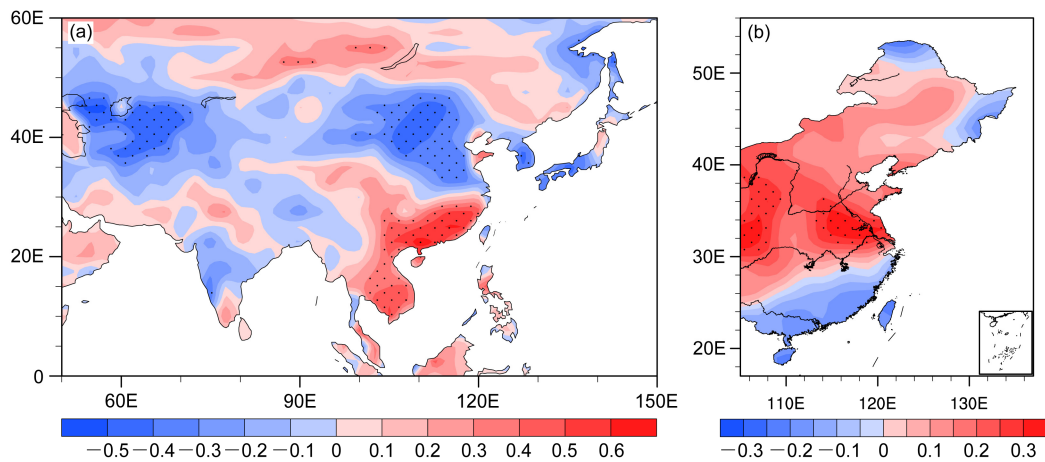


图 4 春季欧亚大陆地表感热通量与中国东部春季极端降水频次 SVD 第二模态与 (a) 欧亚大陆感热通量场、(b) 极端降水频次场异质相关系数空间分布

Fig. 4 Heterogeneous correlation patterns of the second SVD (Singular Value Decomposition) mode for spring sensible heat flux over Eurasian Continent and spring extreme precipitation frequency over eastern China and (a) sensible heat flux, (b) extreme precipitation frequency

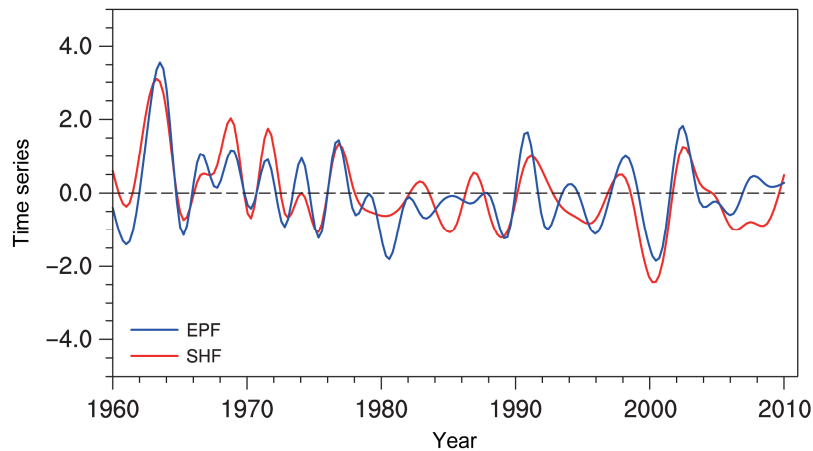


图 5 春季欧亚大陆地表感热通量与中国东部春季极端降水频次 SVD 第二模态时间系数 (EPF 表示 SVD 第二模态中国东部春季极端降水频次场的时间序列, SHF 表示 SVD 第二模态春季欧亚大陆地表感热通量场的时间序列)

Fig. 5 Time series of the second SVD mode for spring sensible heat flux over Eurasian Continent and spring extreme precipitation frequency over eastern China (EPF represents time series of spring extreme precipitation frequency over eastern China, SHF represents time series of spring sensible heat flux over Eurasian Continent)

中高层南北热力差异的改变会影响到东亚副热带西风急流的位置和强度(况雪源和张耀存, 2006), 急流的上述变化可能与感热加热引起的大气南北热力差异有关。图 6b 进一步给出了感热指数 IMAM 正、负指数年春季 200 hPa 纬向风距平场的合成差值场, 其异常分布形势和图 6a 的相关分布基本一致: 感热正指数年, 40°N 以北主要为纬向风正距平, 而 40°N 以南主要为纬向风负距平, 说明在感热正指数年东亚副热带西风急流较常年位置偏北、偏弱。由于春季东亚副热带西风急流较冬季偏弱, Wu et al. (2016) 在研究中将春季 3、4 月东亚副热带急流的强度定义为春季 3、4 月东亚副热带急流区 (20°N~35°N, 110°E~135°E) 区域平均纬向风。为了更好衡量东亚副热带西风急流的强度, 这里将西风急流区 (20°N~35°N, 110°E~135°E) 区域平均 200 hPa 纬向风定义为春季西风急流强度指数 (EASJII)。图 6c 给出了标准化感热指数 IMAM 和 EASJII 的时间序列, 二者相关系数为 -0.72 (通过了 0.01 显著性检验)。总体而言, 感热正指数年, 春季东亚副热带西风急流偏弱; 感热负指数年, 情形相反。由以上分析可知, 在欧亚大陆中高纬关键区感热偏弱, 低纬关键区感热增强时, 春季东亚副热带西风急流位置偏北且强度偏弱, 容易使我国东部南方地区垂直切变减弱, 抑制对流活动 (Wu et al., 2016), 不利于我国东部南方地区极端降水的发生; 而北方地区情况大致相反。但相关机制值得在今后的研究中深入探究。

4.2 湿位涡

图 6a 为感热指数 IMAM 正、负指数年我国东部地区低层春季湿位涡距平差值场。图中可见, 我国北方地区以负距平为主, 南方地区则以正距平为主; 表明感热正指数年, 有利于我国北方地区极端降水偏多, 南方地区极端降水易少。张艳霞等 (2008) 研究发现湿位涡正压项可以表征大气对流不稳定, 其负距平对应更强的对流不稳定; 湿位涡斜压项可以较好地表征大气斜压不稳定, 其负距平对应更强烈的大气斜压不稳定。为了进一步说明感热正负指数年我国东部地区的大气性质, 对湿位涡的湿正压项和湿斜压项分别进行了感热正负指数年的合成差值。图 6b 为低层湿正压项距平差值场, 我国东部北方地区为负距平为主, 南方地区以正距平为主, 这说明在感热正指数年, 我国东部北方地区对流不稳定较负异常年偏强, 南方地区对流不稳

定较弱。图 6c 为低层湿斜压项距平差值场, 图中我国东部北方地区为负距平为主, 我国东部南方地区则以正距平为主, 我国东部北方地区斜压不稳定在正异常年较负异常年偏强, 而南方地区斜压不稳定偏弱。通过以上分析, 在感热正指数年, 我国东部北方地区大气对流不稳定和斜压不稳定较强, 大气中不稳定能量积聚, 容易造成我国东部北方地区极端降水偏多, 南方地区则情况相反。

综上所述, 感热正指数年, 有利于春季东亚副热带西风急流减弱、位置偏北, 容易引起我国东部北方地区产生对流不稳定, 而南方地区对流受到抑制; 以此同时, 我国东部北方地区大气斜压不稳定和对流不稳定偏强, 北方地区极端降水偏强; 南方地区大气斜压不稳定和对流不稳定偏弱, 南方地区极端降水偏弱。感热负指数年, 情况大致相反。

5 结论与讨论

本文利用欧洲中心 ERA-20C 的地表感热通量资料、NCEP/NCAR 再分析资料和国家气候中心 332 站逐日降水观测资料, 分析了我国东部春季极端降水与同期地表感热之间的联系, 并初步探讨了欧亚大陆地表感热通量影响我国东部春季极端降水的可能途径。主要结论如下:

(1) 我国东部春季极端降水 EOF 分解第一模态表现为中国东部的全区一致型, 第二模态则表现为南北反相分布, 两个空间模态的时间系数均表现为年际变化特征。

(2) 我国东部春季极端降水第二模态与同期欧亚大陆地表感热通量关系密切, 且欧亚大陆地表感热通量存在着显著影响我国春季极端降水的关键区; 当欧亚大陆中纬度巴尔喀什湖以西、贝加尔湖以南地区地表感热通量偏低 (高), 而我国南部沿海地区地表感热通量偏高 (低) 时, 我国东部北方地区极端降水偏多 (少), 南方地区极端降水偏少 (多)。

(3) 欧亚大陆地表感热通量与我国东部春季极端降水之间的关系与大气性质以及环流异常有着密切联系。当欧亚大陆中纬度关键区感热偏弱, 低纬度关键区感热偏强, 春季东亚副热带西风急流强度偏弱且位置偏北, 我国东部北方地区对流不稳定偏强, 南方地区对流受到抑制; 进一步分析发现, 我国东部北方地区斜压不稳定和对流不稳定偏强,

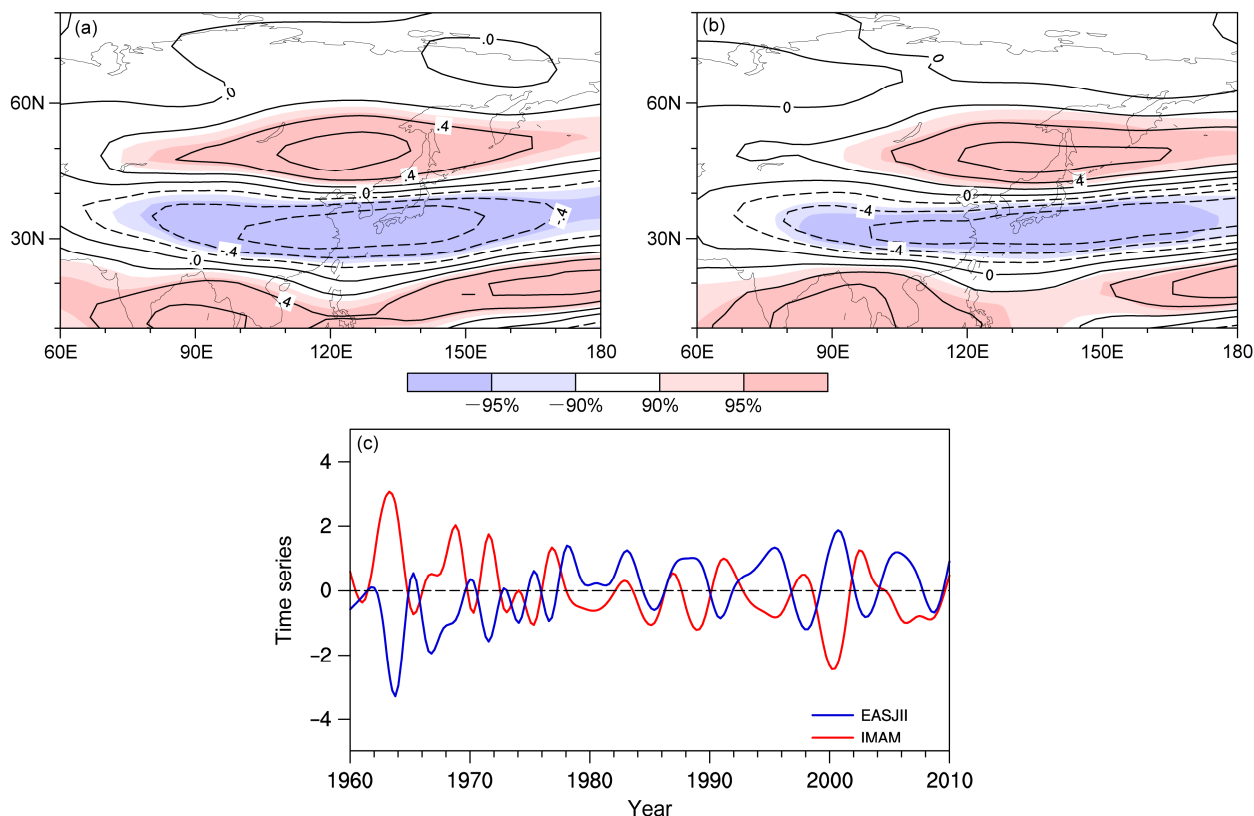


图 6 (a) 标准化感热指数 IMAM 与春季 200 hPa 纬向风的相关系数分布, (b) 感热指数 IMAM 正、负异常年春季 200 hPa 纬向风距平差值场 (单位: m/s, 深、浅阴影区分别通过 0.05、0.1 显著性检验); (c) EASJII 与感热指数 IMAM 时间序列

Fig. 6 (a) Correlation coefficients between standardized IMAM (heat flux index) and spring 200-hPa zonal wind, (b) differences in spring 200-hPa zonal wind anomaly between positive and negative anomaly years (dark shadings indicate statistical significance at 0.05 and light shadings indicate statistical significance at 0.1); (c) time series of EASJII (East Asian Subtropical Jet Intensity Index) and IMAM

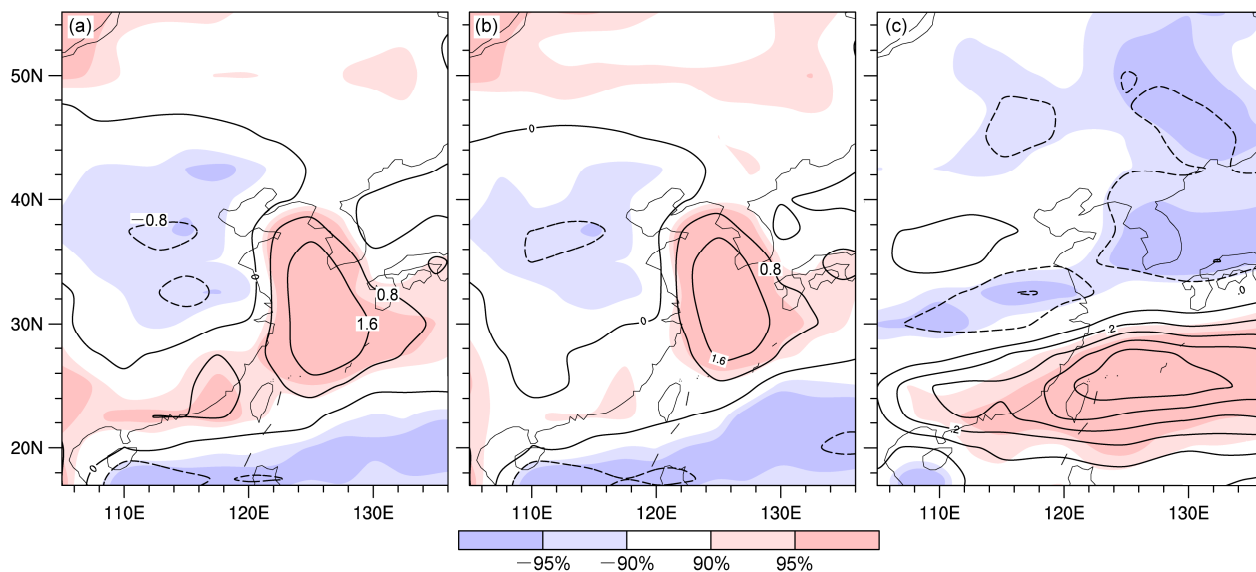


图 7 春季 (a) 湿位涡距平、(b) 湿正压项距平和 (c) 湿斜压项距平正、负异常年合成差值场 (单位: $10^{-6} \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2$, 深、浅阴影区分别通过 0.05、0.1 显著性检验)

Fig. 7 Differences between positive and negative anomaly years of (a) moist potential vorticity anomaly, (b) M_1 anomaly, and (c) M_2 anomaly in spring (units: $10^{-6} \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1} \text{ m}^2$, dark and light shadings indicate statistical significance at 0.05 and 0.1 level, respectively)

有利于北方地区极端降水的发生, 而南方地区斜压不稳定和对流不稳定偏弱, 不利于极端降水的发生。感热负异常年, 则情况相反。

本文从陆面感热通量的角度探究了我国春季极端降水的可能联系, 对于进一步理解极端降水的复杂成因可以提供一定的线索。然而, 本文的分析结果仅仅是基于观测资料的统计分析, 至于大气环流对感热异常究竟是如何响应的以及欧亚大陆地表感热异常影响大气环流和我国极端降水的机制还有待在今后的工作中深入探究。

参考文献 (References)

- 柏晶瑜, 徐祥德, 周玉淑, 等. 2003. 春季青藏高原感热异常对长江中下游夏季降水影响的初步研究 [J]. 应用气象学报, 14 (3): 363–368. Bai Jingyu, Xu Xiangde, Zhou Yushu, et al. 2003. Preliminary research on inhomogeneous distribution of Tibetan Plateau sensible heat fluxes in spring [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 14 (3): 363–368, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2003.03.012.
- Bennetts D A, Hoskins B J. 1979. Conditional symmetric instability—A possible explanation for frontal rainbands[J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 105 (446): 945–962, doi:10.1002/qj.49710544615.
- Bonsal B R, Zhang X, Vincent L A, et al. 2001. Characteristics of daily and extreme temperatures over Canada [J]. J. Climate, 14 (9): 1959–1976, doi:10.1175/1520-0442(2001)014<1959:CODAET>2.0.CO;2.
- 陈海山, 范苏丹, 张新华. 2009. 中国近 50 a 极端降水事件变化特征的季节日节性差异 [J]. 大气科学学报, 32 (6): 744–751. Chen Haishan, Fan Sudan, Zhang Xinhua. 2009. Seasonal differences of variation characteristics of extreme precipitation events over China in the last 50 Years [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 744–751, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2009.06.003.
- 陈海山, 朱月佳, 刘蕾. 2013. 长江中下游地区冬季极端降水事件与天气尺度瞬变波活动的可能联系 [J]. 大气科学, 37 (4): 801–814. Chen Haishan, Zhu Yuejia, Liu Lei. 2013. Relationship of synoptic-scale transient eddies and extreme winter precipitation events in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (4): 801–814, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12033.
- 陈圣劼, 李栋梁, 何金海. 2012. 北亚洲大陆冬季地表感热通量对我国江淮梅雨的影响 [J]. 高原气象, 31 (2): 359–369. Chen Shengjie, Li Dongliang, He Jinhai. 2012. Influence of the surface sensible heat flux of North Asian continent in winter on Meiyu in Yangtze–Huaihe valleys [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (2): 359–369.
- Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. 2000. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 81 (3): 417–425, doi:10.1175/1520-0477(2000)081<0417:OVATIE>2.3.CO;2.
- Feng S, S. Nadarajah S, Q. Hu. 2007. Modeling annual extreme precipitation in china using the generalized extreme value distribution [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 85 (5): 599–613, doi:10.2151/jmsj.85.599.
- 高涛, 谢立安. 2014. 近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述 [J]. 地球科学进展, 29 (5): 577–589. Gao Tao, Xie Li'an. 2014. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 29 (5): 577–589, doi:10.11867/j.issn.1001-8166.2014.05.0577.
- Goswami B N, Venugopal V, Sengupta D, et al. 2006. Increasing trend of extreme rain events over India in a warming environment [J]. Science, 314 (5804): 1442–1445, doi:10.1126/science.1132027.
- Karl T R, Knight R W. 1998. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79 (2): 231–241, doi:10.1175/1520-0477(1998)079<0231:STOPAF>2.0.CO;2.
- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流季节变化特征及其热力影响机制探讨 [J]. 气象学报, 64 (5): 564–575. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. The seasonal variation of the East Asian subtropical westerly jet and its thermal mechanism [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (5): 564–575, doi:10.3321/j.issn:0577-6619.2006.05.003.
- 况雪源, 张耀存. 2007. 东亚副热带西风急流与地表加热场的耦合变化特征 [J]. 大气科学, 31 (1): 77–88. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2007. The characteristics of the coupling variation between the subtropical westerly jet and the surface heating fields over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (1): 77–88, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2007.01.08.
- Kunkel K E, Pielke R A Jr, Changnon S A. 1999. Temporal fluctuations in weather and climate extremes that cause economic and human health impacts: A review [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 80 (6): 1077–1098, doi:10.1175/1520-0477(1999)080<1077:TFIWAC>2.0.CO;2.
- 李丽平, 章开美, 王超, 等. 2010. 近 40 年华南前汛期极端降水时空演变特征 [J]. 气候与环境研究, 15 (4): 443–450. Li Liping, Zhang Kaimei, Wang Chao, et al. 2010. Temporal and spatial variations of extreme precipitation in the pre-flood period of South China in recent 40 years [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 443–450, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2010.04.12.
- 陆志刚, 张旭晖, 霍金兰, 等. 2011. 1960~2008 年淮河流域极端降水演变特征 [J]. 气象科学, 31 (S1): 74–80. Lu Zhigang, Zhang Xuhui, Huo Jinlan, et al. 2011. The evolution characteristics of the extreme precipitation in Huaihe River basin during 1960–2008 [J]. Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese), 31 (S1): 74–80, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.z1.012.
- 宁亮, 钱永甫. 2006. 北非和青藏高原感热振荡特征及与我国东部夏季降水的关系 [J]. 高原气象, 25 (3): 357–365. Ning Liang, Qian Yongfu. 2006. Oscillation characteristics of sensible heat in North Africa and Qinghai–Xizang plateau and their impacts on the rainfall in East China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (3): 357–365, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2006.03.001.
- 钱正安, 吴统文, 宋敏红, 等. 2001. 干旱灾害和我国西北干旱气候的研究进展及问题 [J]. 地球科学进展, 16 (1): 28–38. Qian Zheng'an, Wu Tongwen, Song Minhong, et al. 2001. Arid disaster and advances in arid climate researches over Northwest China [J]. Advance in Earth Sciences (in Chinese), 16 (1): 28–38, doi:10.3321/j.issn:1001-8166.2001.01.007.
- 孙菽芬. 2005. 陆面过程的物理、生化机理和参数化模型 [M]. 北京: 气象出版社, 61–70. Sun Shufen. 2005. Physical Biochemical Mechanism

- and Parametric of Land Surface Processes (in Chinese) [M]. Beijing: Chinese Meteorological Press, 61–70.
- 王苗. 2011. 我国东部极端降水变化特征及成因分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Wang Miao. 2011. Variation characteristics of extreme precipitation over the east of china and the reason analysis [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- Wang Y, Yan Z W. 2011. Changes of frequency of summer precipitation extremes over the Yangtze River in association with large-scale oceanic-atmospheric conditions [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (5): 1118–1128, doi:10.1007/s00376-010-0128-7.
- Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *J. Climate*, 13 (9): 1517–1536, doi:10.1175/1520-0442(2000)013<1517:PEATHD>2.0.CO;2.
- 王冀, 江志红, 严明良, 等. 2008. 1960–2005 年长江中下游极端降水指数变化特征分析 [J]. *气象科学*, 28 (4): 384–388. Wang Ji, Jiang Zhihong, Yan Mingliang, et al. 2008. Trends of extreme precipitation indices in the mid-lower Yangtze River valley of China during 1960–2005 [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 28 (4): 384–388, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2008.04.005.
- 吴荷, 陈海山, 黄菱芳. 2015. 欧亚中高纬春季地表感热异常与长江中下游夏季降水的可能联系 [J]. *气候与环境研究*, 20 (1): 119–128. Wu He, Chen Haishan, Huang Lingfang. 2015. Possible linkage between spring surface sensible heat flux anomalies over the mid-high latitudes of the Eurasian Continent and summer precipitation in the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 20 (1): 119–128, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14003.
- Wu Z W, Li X X, Li Y J, et al. 2016. Potential influence of Arctic Sea ice to the interannual variations of East Asian spring precipitation [J]. *J. Climate*, 29 (8): 2797–2813, doi:10.1175/JCLI-D-15-0128.1.
- Yamamoto R, Sakurai Y. 1999. Long-term intensification of extremely heavy rainfall intensity in recent 100 years [J]. *World Resource Review*, 11 (2): 271–281.
- 杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 2010. 太平洋 SSTA 同中国东部夏季极端降水事件变化关系的研究 [J]. *海洋学报*, 32 (1): 23–33. Yang Jinhu, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, et al. 2010. Relation research on between SSTA of Pacific and extreme precipitation events in the eastern China [J]. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 32 (1): 23–33.
- 翟盘茂, 潘晓华. 2003. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化 [J]. *地理学报*, 58 (S1): 1–10. Zhai Panmao, Pan Xiaohua. 2003. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 58 (S1): 1–10, doi:10.11821/xb20037s001.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan X H, et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. *J. Climate*, 18 (7): 1096–1108, doi:10.1175/JCLI-3318.1.
- Zhang D Q, Feng G L, Hu J G. 2008. Trend of extreme precipitation events over China in last 40 years [J]. *Chinese Physics B*, 17 (2): 736–742, doi:10.1088/1674-1056/17/2/062.
- 张永领, 丁裕国. 2004. 我国东部夏季极端降水与北太平洋海温的遥相关研究 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (2): 244–252. Zhang Yongling, Ding Yugu. 2004. The teleconnection between summer extreme precipitation over East China and North Pacific SST [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology* (in Chinese), 27 (2): 244–252, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2004.02.014.
- 张艳霞, 钱永甫, 翟盘茂. 2008. 大气湿位涡影响夏季江淮降水异常的机理分析 [J]. *高原气象*, 27 (1): 26–35. Zhang Yanxia, Qian Yongfu, Zhai Panmao. 2008. Mechanism analysis of the influence of atmospheric moist potential vorticity on anomalies of precipitation over Yangtze-Huaihe River basins in summer [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 27(1): 27–35.
- 周长春, 高晓清, 陈文, 等. 2009. 中亚感热异常对我国西北温度、降水的影响 [J]. *高原气象*, 28 (2): 395–401. Zhou Changchun, Gao Xiaoqing, Chen Wen, et al. 2009. The impact of sensible heat flux anomaly over central Asia on temperature and precipitation in Northwest China [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 28 (2): 395–401.