

卢楚翰, 周洁雯, 胡叶, 等. 2019. 春季影响江淮地区的天气尺度气旋活动与同期降水的联系 [J]. 大气科学, 43 (2): 311–324. Lu Chuhan, Zhou Jiewen, Hu Ye, et al. 2019. Simultaneous relationship between precipitation and activities of springtime synoptic scale affecting cyclone over the Yangtzi–Huaihe River valleys [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 43 (2): 311–324, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17294.

春季影响江淮地区的天气尺度气旋活动与 同期降水的联系

卢楚翰¹ 周洁雯¹ 胡叶¹ 孙燕²

¹ 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

² 江苏省气象科学研究所, 南京 210008

摘 要 本文基于 1979~2013 年 ERA-Interim 逐日 4 次的 850 hPa 位势高度场资料, 利用基于最外围闭合等值线的气旋区客观识别方法得到春季影响江淮地区的二维气旋集, 依据水平尺度划分了天气尺度气旋并分析该区域气旋强度的时空分布特征以及气旋活动与站点降水异常的关系, 结果表明: 天气尺度气旋活动与江淮地区降水异常、强降水事件发生频次均存在显著的正相关关系。气旋活动指数高一低年份差值分析发现, 随着气旋活动指数增强, 东亚地区对流层中上层增温并伴随异常高压中心出现, 促使其南部南北经向温度梯度以及高空西风急流偏弱。这有利于江淮区域北部异常正涡度平流输入, 同时江淮地区对流层低层形成横槽型环流, 江淮区域南部及其上游地区对流层中下层出现异常西南气流, 有利于江淮区域涡度增大, 相应的低空辐合、高空辐散垂直结构, 为天气尺度气旋发展与维持提供了有利的动力抬升条件。横槽型异常环流配置有利于江淮区域南部的西南暖湿气流和北部的异常西向/西北向水汽输入和堆积, 导致区域云量以及降水异常的增多。

关键词 天气尺度气旋 客观识别 降水异常 江淮地区

文章编号 1006-9895(2019)02-0311-14

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1804.17294

Simultaneous Relationship between Precipitation and Activities of Springtime Synoptic Scale Affecting Cyclone over the Yangtzi–Huaihe River Valleys

LU Chuhan¹, ZHOU Jiewen¹, HU Ye¹, and SUN Yan²

¹ 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

² Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210008

Abstract Based on 850-hPa geopotential height field at 6-hour intervals extracted from the ERA-Interim reanalysis data during 1979–2013, cyclones that affected over the Yangtzi–Huaihe River valleys (YHV) in the spring were detected by using the 2D cyclone area objective identification method, which can detect the outermost enclosed contour of the cyclone. The spatial–temporal characteristics of synoptic-scale cyclones and their relationship with regional precipitation

收稿日期 2018-04-26; 网络预出版日期 2018-06-07

作者简介 卢楚翰, 男, 1981 年出生, 副教授, 主要从事大气环流异常及气候变率方面研究。E-mail: luchuhan@nuist.edu.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41575081、41741005, 江苏省自然科学基金项目 BK20161603, 江苏高校优势学科建设工程项目

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41575081, 41741005), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (Grant BK20161603), Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions

anomalies in the spring over the YHV were investigated. The results show that the inter-annual variation of synoptic-scale cyclone activities displays a significant positive correlation with precipitation anomalies as well as the occurrence frequency of heavy precipitation over the YHV. A significant quasi-barotropic high-pressure center exists in northeastern Asia when the cyclone activity intensifies, which is mainly induced by the upper troposphere warming that weakens the meridional temperature gradient to the south of Japan. Such a circulation configuration is conducive to the decrease in the upper westerly jet and positive vorticity advection in the northern part of the YHV, which are accompanied by anomalous southwesterlies in the middle and lower troposphere in the south of YHV. The horizontal trough and cyclonic circulation anomalies in the YHV result in increased vorticity over this area. The associated low-level convergence and high-level divergence provide a favorable dynamic lifting condition for the development and maintenance of synoptic scale cyclone in the YHV. The abnormal circulation configuration of the lower level horizontal trough is favorable for the intensification of warm, moist southwesterly flow in South China and anomalous easterly/southeasterly flow in northern YHV, and thus leads to increases in regional cloud cover and precipitation anomalies.

Keywords Synoptic-scale cyclone, Automatic identification, Precipitation anomaly, Yangtzi-Huaihe River valleys

1 引言

春季,我国东部地区尤其是长江中下游地区和华南地区开始进入雨季,降水量占全年总降水的30%(Wu et al., 2016)。降水异常如春旱、连阴雨等时有发生,对农业生产及人民生活造成显著影响。春季降水受海温、青藏高原大地形、大气环流异常等多种因素影响。众多研究表明,区域海温异常引起的热力变化对东亚东部春季降水有着极为重要的作用(胡桂芳等, 2005; 陈丹等, 2012; 左志燕和张人禾, 2012; 程慧萍和贾晓静, 2014; 余广昌等, 2015; 赵焯等, 2015),由前期海温异常引起的海陆热力性质差异是影响春季旱涝的主要途径。因为青藏高原大地形的存在,与地表热力特征相关的高原前期或同期热力效应(蔡学湛, 2001; Wan and Wu, 2007, 2009; 张人禾等, 2008; 杜萌萌和刘晓东, 2010),与动力作用相关的爬坡流、绕流等(朱坚, 2011),引起高原东侧地区低层风场的气旋性环流以及水汽交换或输送异常,从而对我国区域降水有显著影响。另外,大气低频信号如大气季节内振荡 MJO(白旭旭等, 2012)、北大西洋涛动 NAO(邵太华和张耀存, 2012)、南极涛动 AAO(郑菲和李建平, 2012)和副热带高压(张天圣和尤卫红, 2010)、急流位置及强度异常(张耀存和郭兰丽, 2005)等也显著影响着我国东部春季降水异常。同时,众多影响因子不完全独立,例如冬、春季海温与青藏高原感热主模态对我国东部春季降水存在协同影响(金蕊等, 2016)。

除了上述气候因子外,天气系统的发生、发展及其变化也是直接影响区域天气、气候异常的重要因素。欧亚大陆是瞬变波比较活跃的地区(梅士龙,

2008),天气瞬变扰动对东亚地区降水等天气、气候变化作用明显(谭本旭和潘旭辉, 2002; 董丽娜等, 2006; Ren et al., 2010; 陈海山等, 2013)。同时,瞬变扰动活动与大尺度环流存在相互作用。与大尺度环流相联系的大气斜压性异常促使天气尺度瞬变扰动异常,而异常的瞬变波扰动活动也可以对大尺度环流产生异常的瞬变热力和水汽强迫,使大气环流的异常得以维持或削弱(任雪娟和张耀存, 2007; 蒋伶仙等, 2011)。Ren et al. (2009)定量揭示了 NAO 与天气尺度涡旋的相互作用程度,他们指出,冬季 NAO 型异常环流促使天气涡旋结构变化,由此产生在 NAO 对应的气旋区辐合、在反气旋区辐散的瞬变涡度通量,从而增强了 NAO 型异常环流。有别于欧拉方法关注天气扰动的局地变化,拉格朗日方法对气旋的个体变化,后者能够获得更为全面的气旋属性与特征信息,因而基于气旋个体中心点的客观识别方法被国内外学者广泛应用于温带气旋研究中(例如, Hanley and Caballero, 2012; 张颖娴, 2012)。

在东亚区域的气旋长期活动及气候效应方面,我国学者开展了许多有意义的研究工作(周洁雯等, 2017)。研究表明,北方气旋活动特征与北方地区降水显著正相关(例如,姚素香等, 2003; 王艳玲和郭品文, 2005; Chen et al., 2017)。冬季东北冷涡活动偏多年份,我国东部大部分地区降水偏少(胡开喜等, 2011)。苗春生等(2006)还发现,东北冷涡强度与前汛期华南降水呈正相关。符娇兰等(2013)指出,1980 年代之后冬季北方强气旋的增加趋势意味着其带来的极端风雨、降温等天气有增加趋势,而强气旋发展及频次增加的主要原因之一是气旋内降水增强造成的潜热增强。Chen et al. (2013)发

现冬季影响中国区域的气旋/反气旋数目在 20 世纪 80 年代中期之后均出现下降趋势, 并指出气旋的变率对反气旋的活动变化起支配作用, 北极锋区急流的变化与气旋/反气旋活动的变化联系紧密。Chen et al. (2017) 利用改进的基于气压拉普拉斯值的气旋客观识别方法发现, 夏季东亚区域气旋活动变化通过天气尺度瞬变波活动产生的涡度通量向极输送引起异常的正压结构, 并影响东亚夏季风, 而气旋活动异常与欧亚大陆地面强迫非均匀变化有关。南方气旋由于自身尺度较北方气旋小, 在客观识别过程中存在较大不确定性, 以往研究主要针对个例分析及数值模拟 (例如, 张晓红等, 2016)。最近, Fu et al. (2015) 利用模式研究大别山低涡活动发现, 涡旋的几何特征和涡旋演变、对流过程、降水及环流场有关, 当涡旋倾向于东西向时更容易产生强对流过程和降水。魏建苏等 (2013) 统计发现江淮气旋的年际变化呈下降趋势, 生成的强度则呈上升趋势, 其源地主要集中在大别山及其东北侧、淮河上游及苏皖浙交界处、鄱阳湖区域。由于春季是温带气旋影响我国东部特别是江淮地区的活跃季节 (姚素香等, 2003; 魏建苏等, 2013), 温带气旋活动对该时期降水的影响值得关注。最近, Qin et al. (2017) 研究中发现春季影响江淮区域的天气尺度、次天气尺度气旋与该区域同期降水以及强降水事件发生频率均存在显著正相关关系。

综上, 江淮区域降水受外强迫、大气内部动力因子等多因素的影响, 各类天气系统活动在其中扮演了重要的角色, 气旋活动对于春季江淮区域降水异常的累积影响有多大, 其相应的准定常环流特征如何有待进一步研究。此外, 由于春季影响江淮气旋的多尺度特点 (Qin et al., 2017), 不同生命周期、水平尺度的气旋活动规律存在明显区别, 与降水的联系以及环流背景也存在差异。因此, 本文拟从气候学角度分析近三十多年来春季影响江淮地区的天气尺度气旋活动的时空分布特征, 并探讨春季影响江淮地区的天气尺度气旋活动指数的年际异常变化与我国东部同期降水的具体联系以及相应的环流场异常配置。

2 资料与方法

2.1 资料

本文采用 1979~2013 年春季 (3~5 月) 的资料如下:

(1) 欧洲中期天气预报中心 (ECMWF, European

Centre for Medium-Range Weather Forecasts) ERA-Interim 再分析资料, 在捕捉气旋时使用了水平分辨率接近 $0.7^\circ \times 0.7^\circ$ (T255 高斯格点) 的逐日 4 次的 850 hPa 位势高度 (Z_{850})。此外, 月平均高空风场、位势高度、温度、比湿、散度及云量等要素水平分辨率取为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ (Berrisford et al., 2009)。

(2) 降水资料取自中国气象数据网 (http://data.cma.cn/data/detail/dataCode/SURF_CLI_CHN_MUL_DAY_V3.0.html [2018-04-20]) 提供的中国地面气候资料日值数据集 (V3.0), 共 824 个基准、基本气象站。该资料经过质量控制, 数据质量和完整性相对于以往发布的地面同类数据产品明显提高。

2.2 方法

本文采用的研究方法是 Qin et al. (2017) 和 Lu (2017) 改进的基于最外围闭合等值线的气旋区识别方法, 相较于常用的气旋中心点识别和点一点追踪的客观识别方法, 该方法实现了二维气旋的识别与追踪, 能直观有效地描述气旋的具体形状和影响区域, 并在不限定生命周期的情况下识别不同尺度气旋。具体地, 以逐日 4 次的 Z_{850} 为识别要素, 将局地位势高度低点定为气旋中心点, 以之为中心并按 4 gpm 等值线间隔搜索其外围闭合等值线, 将有闭合等值线的中心判定为闭合气旋, 并以最后一圈闭合等值线内区域作为气旋影响区, 记录范围内的要素格点信息。

本文首先对东亚区域春季温带气旋进行识别, 并定义江淮区域的范围为 ($28^\circ \sim 34^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 122.5^\circ \text{E}$), 当某气旋个体的影响区落入江淮地区时 (即气旋影响区内存在江淮区域格点), 将其记录为影响江淮地区的气旋, 进而从识别的气旋中挑选了影响江淮区域的气旋个体 (在总的 12880 个时次中, 按时次计算共发现 5223 个气旋)。另外根据气旋影响区覆盖球面面积计算等面积圆, 将圆的直径 d 作为气旋的相当直径, 并根据直径 d 划分直径大于 1000 km 的气旋为天气尺度气旋, 介于 300~1000 km 的为次天气尺度气旋。在此基础上, 根据气旋相对于其对应最外围闭合等值线位势高度值与气旋内格点位势高度值的差值定义每个格点的春季气旋强度:

$$D_{ij} = \sum_{\text{day}=1}^{92} \left(\sum_{t=1}^4 (C_n - Z_{t_day}) \times A_{ij} \right), \quad (1)$$

其中, Z_{t_day} 为特定时次气旋影响区落入江淮区域内格点 (图 1 中红点) 的 Z_{850} , C_n 为对应气旋最外围闭合等值线位势高度值 (图 1 中的 1455 gpm 黑色闭合等值线), A_{ij} 是序号 (i, j) 网格的面积。进

行日、季度累计（一天 4 个时次，春季总共为 92 天）后，即为该年该格点春季气旋强度。该强度同时与影响气旋的发生频次和气旋自身在江淮区域位势高度数值有关，当其增大时表示该年此格点受到气旋的影响较多并且影响的气旋偏强，这与传统用气旋中心气压表示气旋的强度有明显区别，例如当某一季节发生气旋偏少但中心气压较低时，本文定义的强度代表性更高。由此得到江淮区域每个格点的春季影响气旋强度 D_{ij} ，共 35 年。根据江淮区域（共 $18 \times 9 = 162$ 个格点）的格点强度区域求和的值定义某一年江淮区域气旋强度指数：

$$I = \sum_{j=1}^9 \sum_{i=1}^{18} D_{ij}. \quad (2)$$

两种尺度气旋分别构造强度指数并作标准化，得到江淮区域逐年次天气尺度气旋强度指数 I_1 和天气尺度气旋强度指数 I_2 。

另外，利用 1000 hPa、850 hPa 和 700 hPa 大气资料计算 850 hPa 的最大涡旋增长率以表征低层大气斜压性，计算公式为

$$\sigma_{\text{BI}} = 0.31f \frac{\partial |\mathbf{V}|}{\partial z} N^{-1}, \quad (3)$$

其中， f 是科里奥利参数， N 是 Brunt-Väisälä 频率， $|\mathbf{V}|$ 是水平风速。这一指标被广泛应用于大气斜压性与气旋活动的研究中（例如，Ren et al., 2010）。

3 江淮区域气旋强度的时空分布特征

为了说明天气尺度气旋在影响江淮地区所有气旋中的作用，对由公式（1）计算的江淮区域各个格点气旋强度 D_{ij} 距平进行经验正交函数（EOF）分析。结果显示， D_{ij} 的 EOF 第一模态（EOF1）的方差贡献率为 48.26%，第二模态（EOF2）的方差贡献率为 20.24%。EOF1 空间型显示，气旋强度异常主要呈纬向分布（图 2a），并具有良好的整体一致性。其中，大值区域集中在江苏、安徽两省中北部，气旋活动对春季江淮大部分地区均有明显影响。图 3a 给出了 EOF1 对应的时间系数，其与区域气旋强度指数 I_1 和 I_2 的相关系数，分别为 0.07 和 0.68，说明 EOF1 的年际波动变化与天气尺度气旋（ I_2 ）活动联系紧密，天气尺度气旋活动指数的增多/强使得该区域整体受到气旋活动影响的几率明显增大。其中， I_2 强年主要集中在 20 世纪 90 年代初及中后期、21 世纪 00 年代初期，而 20 世纪 80 年代及 21 世纪 00 年代初期相对偏弱。20 世纪 80

年代后期、90 年代以及 00 年代前期， I_2 指数年际变化幅度明显；其他时间段， I_2 年际变化幅度较为平缓，表明 80 年代后期至 00 年代前期，影响江淮地区的天气尺度气旋活动指数年际变化显著。将 I_2 指数与区域气旋强度进行相关分析发现，除了江淮地区西南部外， I_2 指数与江淮以北的华北南部地区等的气旋强度也存在显著的正相关联系（图 3c），说明影响江淮地区的天气尺度气旋与北方气旋有一定的联系，表明影响江淮区域气旋的多样性。

EOF2 主要呈现出东南—西北“+ -”型走向分布，其中杭州湾及附近地区有一个明显的正值大值区，体现了气旋活动的区域性差异（图 2b）。计算 EOF2 对应时间系数与 I_1 、 I_2 的相关系数，分别为 0.58 和 0.31，说明 EOF2 主要体现了次天气尺度气旋活动特征和部分天气尺度气旋活动特征。鉴于上述分析，天气尺度气旋系统是春季影响江淮地区的主导系统，因此本文后面将分析天气尺度气旋活动指数 I_2 对春季江淮地区降水的影响及相关的环流配置。

4 天气尺度气旋对降水的影响及相关环流

4.1 I_2 与降水异常的联系

为研究春季影响江淮的天气尺度气旋活动与我国同期降水的联系，本文进行了 I_2 指数与我国 824 站春季月平均降水及强降水（日降水量 > 25 mm）频次的相关及合成分析。其中合成分析时，将 I_2 指数 > 0.75 （ < -0.75 ）定义为异常强（弱）年，因此有 6 个高值异常年，分别为 1990、1991、1998、1999、2002、2008 年；10 个低值异常年，分别为 1981、1986、1987、1988、1989、1993、1994、1997、2001、2011 年。

从合成场看，春季月平均降水偏多的地区与正相关区域一致，强弱年份造成的平均春季降水差异基本达到 24 mm 以上（图 4a）。同时， I_2 与整个江淮地区的区域月平均降水也存在显著的正相关联系，其相关系数为 0.48（也通过了 99% 信度水平的 t 检验）。以上分析表明，天气尺度气旋活动指数增强对江淮地区的降水存在重要的促进作用，其影响范围是全域的，以江淮地区西南部及北部最为显著。另外，当 I_2 指数增强时，江淮区域出现强降水事件的概率增大，强降水频次偏多主要集中在江淮地区西南部，从长江流域中部至黄淮地区，呈一定的西南—东北分布（图 4b），说明天气尺度气旋有

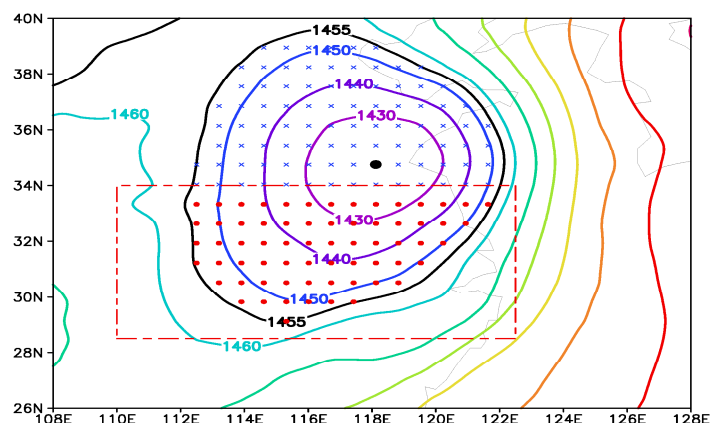


图1 1979年4月6日18时(协调世界时,下同)850 hPa位势高度场(Z_{850})的气旋示意图。等值线间隔为10 gpm, 1455 gpm黑色实线为该气旋最外围闭合等值线;红色虚线框为江淮地区($28.5^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$),下同;黑点为气旋中心点,红点为气旋落入江淮区域的格点即影响格点,蓝点为气旋在江淮地区以外的格点;气旋直径 $d=1003.1\text{ km}$

Fig. 1 Illustrative example of the cyclone at 1800 UTC 6 April 1979 in Z_{850} (850-hPa geopotential height) field. Contour interval is 10 gpm, the solid black line of 1455 gpm is the outermost contour of the cyclone; the red dashed box denotes the area YHV (the Yangtze-Huaihe River valleys, $28.5^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$), the same below; the black dot is the centre of the cyclone, the red dots represent cyclone-affected grid points within the YHV, and the blue dots denote cyclone-affected grid points outside the YHV; d (cyclonic diameter)=1003.1 km

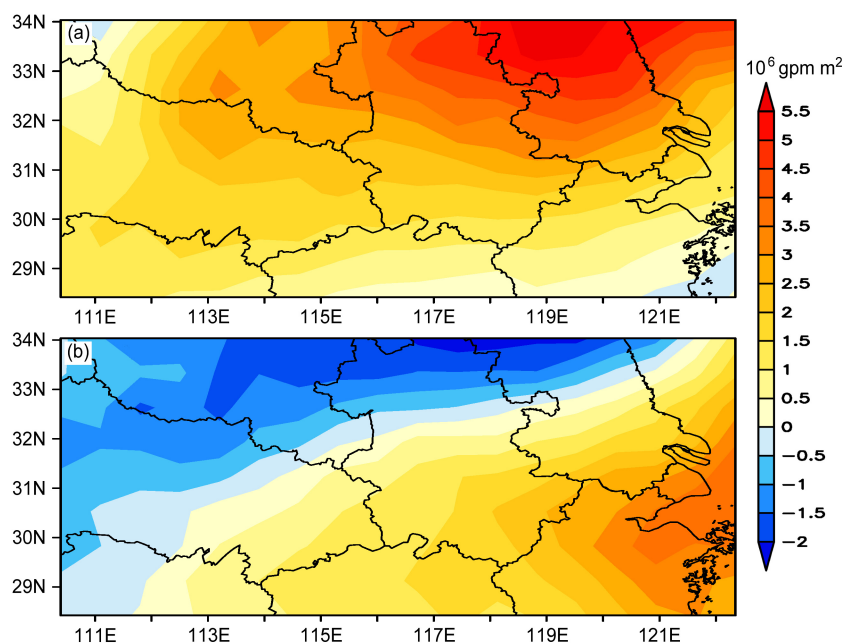


图2 1979~2013春季温带格点气旋强度距平的EOF分析的(a)第一模态EOF1、(b)第二模态EOF2。单位: 10^6 gpm m^2

Fig. 2 Spatial distributions of the EOF (empirical orthogonal function) modes (units: 10^6 gpm m^2) of gridded extratropical cyclone intensity anomalies in the spring during 1979–2013: (a) EOF1 (the first mode of EOF); (b) EOF2 (the second mode of EOF)

利于江淮区域的春季强降水事件发生。而区域性强降水(超过30%的站点降水超过 25 mm d^{-1})的频数与 I_2 的相关系数为0.31,进一步说明天气尺度气旋活动增大了春季江淮地区发生区域性强降水的可能。

除江淮区域外,华北、黄土高原、内蒙古高原

以及东北部分地区的春季月平均降水与 I_2 之间也存在较好的正相关联系。这与春季影响江淮地区的天气尺度气旋中部分源自尺度较大的北方气旋有一定的联系。此外,华南月平均降水及强降水频次则与 I_2 呈负相关。春季影响江淮区域的天气尺度气旋与其他地区同期降水的具体联系及相关机理有待

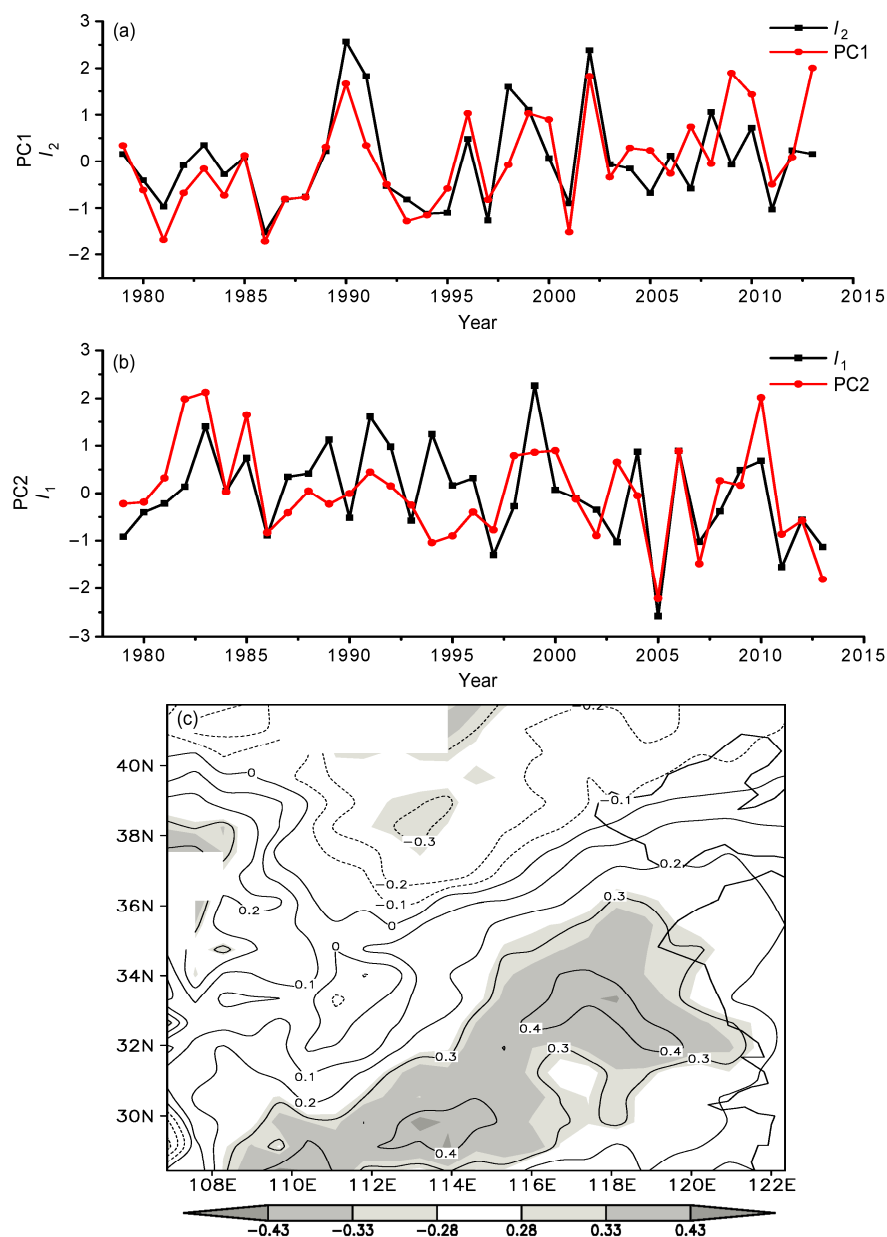


图3 1979~2013年春季格点气旋强度的(a) EOF1对应时间序列(PC1, 红点实线)与标准化天气尺度气旋强度指数(I_2 , 黑点实线), (b) EOF2对应的时间序列(PC2, 红点实线)与标准化次天气尺度气旋强度指数(I_1 , 黑点实线), (c) 格点气旋强度与 I_2 的相关系数。阴影由浅至深分别表示通过90%、95%、99%信度水平

Fig. 3 (a) Time series of the principle component of EOF1 (PC1, red dotted-solid line) of gridded cyclone intensity and standardized cyclone intensity index on the synoptic scale (I_2 , black dotted-solid line), (b) time series of the principle component of EOF2 (PC2, red dotted-solid line) and standardized cyclone intensity index on the sub-synoptic scale (I_1 , black dotted-solid line), (c) correlation coefficients between gridded cyclone intensity and index I_2 in the spring during 1979–2013. Shadings from light gray to heavy gray indicate values at the 90%, 95%, 99% confidence levels, respectively

进一步研究。

4.2 异常环流场配置

为了分析影响江淮的天气尺度气旋对东亚地区春季降水变化的影响途径, 下面给出了与 I_2 指数相联系的异常环流结构。图5分别显示了850 hPa、500 hPa、200 hPa位势高度及水平风场对 I_2 的回归

系数。可以看出, 与江淮区域天气尺度气旋增强相联系的850 hPa位势高度异常在东亚地区呈现西南—东北走向的“+ - -”型分布。其中, 从西北太平洋、日本、朝鲜半岛至我国东北地区主要受显著的正异常中心控制, 大值中心位于日本北部, 与之对应位势高度正异常区域存在尺度较大的反气旋式

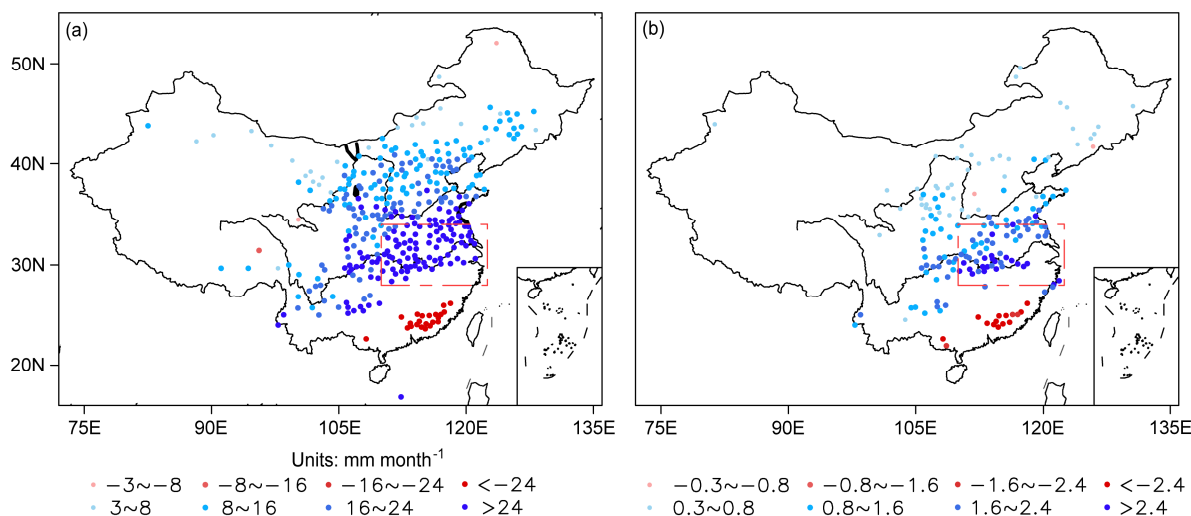


图4 1979~2013年中国春季(a)月平均降水量(单位: mm month^{-1})、(b)强降水($>25 \text{ mm d}^{-1}$)频次高、低 I_2 年份合成差值。实心点表示通过90%信度水平的站点

Fig. 4 Composite differences of (a) monthly mean precipitation (units: mm month^{-1}) and (b) occurrence frequency of heavy precipitation ($>25 \text{ mm d}^{-1}$) in China between high and low I_2 years in the spring during 1979–2013. Dots indicate values at the 90% confidence level

异常风场(图5a)。由于海陆间气压梯度降低,促使从黄海至我国华北地区出现显著的东风异常,配合江淮地区的横槽型位势高度场,容易导致江淮区域出现正异常涡度区域(图6a),有利于天气尺度气旋发展与维持。另外,在俄罗斯堪察加半岛东北侧为另一个负位势高度异常中心。随着高度增加,中心位于日本北部的正位势高度异常大值区变得更加显著,500 hPa和200 hPa层次的中心异常值分别达到150 gpm和250 gpm,并且显著区域也明显增大,欧亚大陆中部伴有位势高度负异常区(图5b、c)。以上纬向波动型环流异常配置表明东亚沿海相应区域海陆间纬向气压梯度减弱,东亚大槽变浅,尤其是位于东亚地区的准正压异常高度中心结构,导致东亚高空北支西风急流在其入口处强度降低。进一步将500~200 hPa平均温度对 I_2 回归(图5d),可看到平均温度回归场呈现出与200 hPa位势高度异常类似的分布,主要表现为日本的显著正异常中心。根据热成风关系,纬向地转风的垂直变化可由平均温度的经向梯度推算:

$$u_T = u_g(p_1) - u_g(p_0) = -\frac{R}{f} \left(\frac{\partial \bar{T}}{\partial y} \right)_p \ln \left(\frac{p_0}{p_1} \right), \quad (4)$$

其中, $p_0=500 \text{ hPa}$, $p_1=200 \text{ hPa}$, $u_g(p_0)$ 和 $u_g(p_1)$ 为地转风, R 是地球半径, $\bar{T}$ 是层间的平均温度。此异常增温结构增加了对流层中上层大气厚度,同时对应该区域南侧的南北经向温度梯度减弱,由此引起

异常的东风/东南风,对入口处高空西风急流强度产生减弱作用。根据公式(4),由区域($35^\circ \sim 40^\circ \text{N}$, $110^\circ \sim 140^\circ \text{E}$)500~200 hPa平均温度异常经向梯度估算的异常纬向热成风可达 -0.64 m s^{-1} ,对高空西风急流具有明显的减速作用。

由上述分析可知, I_2 指数高值年,异常增温结构减弱南北经向温度梯度,导致入口处高空西风急流偏弱,伴随江淮区域低层横槽型位势高度异常及相对涡度增加,可能有利于天气尺度气旋增强及降水增多。

为明确天气尺度气旋活动指数增强对江淮区域降水异常的影响,分别计算了对流层高低层散度对 I_2 指数的合成差值(图6b、c)。在850 hPa上,江淮及华北地区以辐合为主,其中,山东附近辐合较强(图6b);200 hPa上,中国东部区域特别是山东一带以显著的辐散运动为主(图6c),此高低空环流配置引起抽吸效应,为天气尺度气旋发展与维持提供了有利的动力抬升条件,从而促进了区域降水异常的增多。

为了进一步分析天气尺度气旋活动异常与春季准定常大气环流异常的联系,图7分别计算了由500 hPa异常风导致的涡度平流($-u'(\partial \zeta' / \partial x) - v'(\partial \zeta' / \partial y)$)以及对流层低层(925~700 hPa)的温度平流在 I_2 高、低年的合成差值。可以看出,江淮北部以及黄海大部分区域500 hPa出现显著的正异常涡度平流

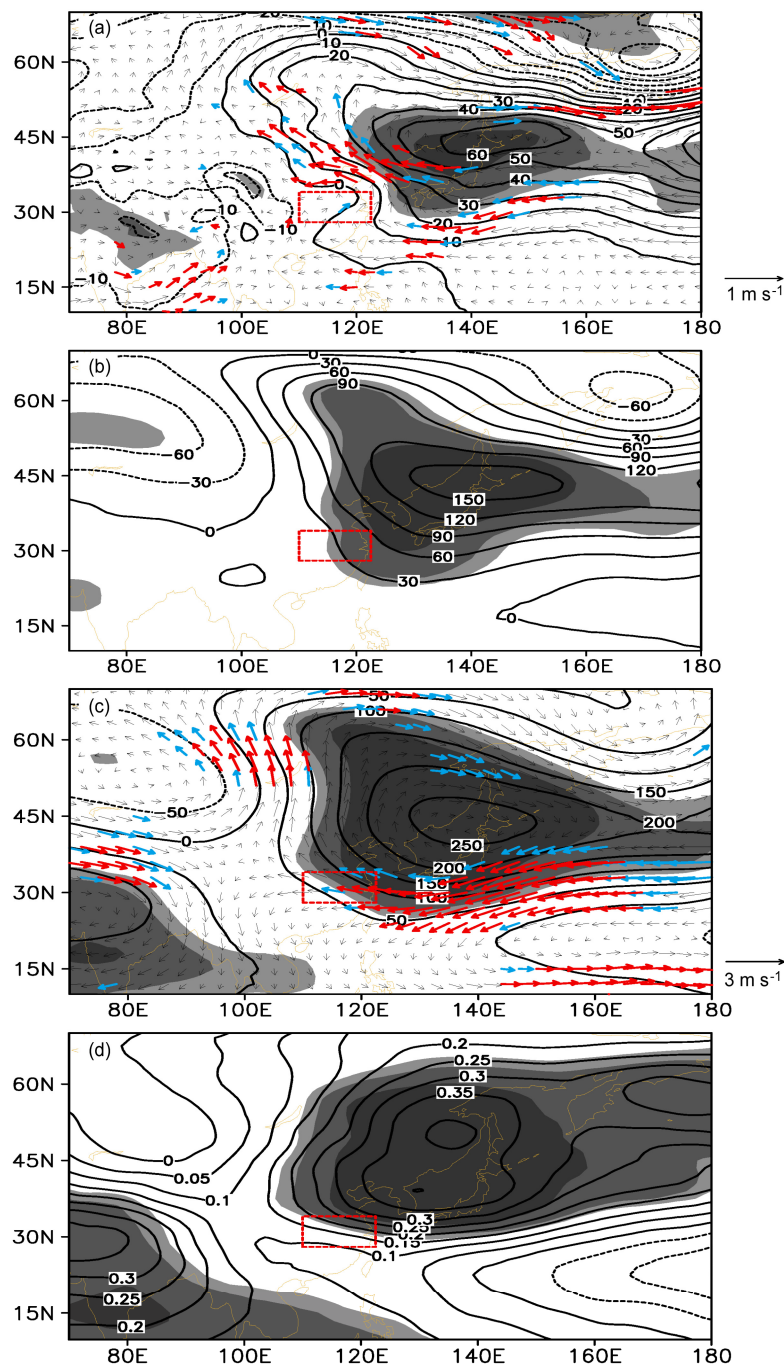


图5 1979~2013年春季(a) 850 hPa位势高度异常(等值线, 单位: gpm)和风场异常(矢量箭头, 单位: m s^{-1})、(b) 500 hPa位势高度异常(等值线, 单位: gpm)、(c) 200 hPa位势高度异常(等值线, 单位: gpm)和风场异常(矢量箭头, 单位: m s^{-1})、(d) 500~200 hPa平均温度(等值线, 单位: K)异常对 I_2 的回归系数。阴影由浅至深分别表示图a、b、c中位势高度场和图d中平均温度场通过90%、95%、99%信度水平; 蓝色、红色风矢量分别表示图a、c中风场通过90%、95%信度水平

Fig. 5 Regression coefficients of (a) 850-hPa geopotential height anomalies (contours, units: gpm), wind anomalies (vectors, units: m s^{-1}), (b) 500-hPa geopotential height anomalies (contours, units: gpm), (c) 200-hPa geopotential height anomalies (contours, units: gpm), wind anomalies (vectors, units: m s^{-1}), and (d) 500~200 hPa average temperature anomalies (contours, units: K) regressed onto I_2 in the spring during 1979~2013. Shadings from light gray to dark gray indicate geopotential height in Figs. a, b, c and average temperature Fig. d at the 90%, 95%, 99% confidence levels; blue and red vectors indicate horizontal winds in Figs. a, c at the 90% and 95% confidence levels, respectively

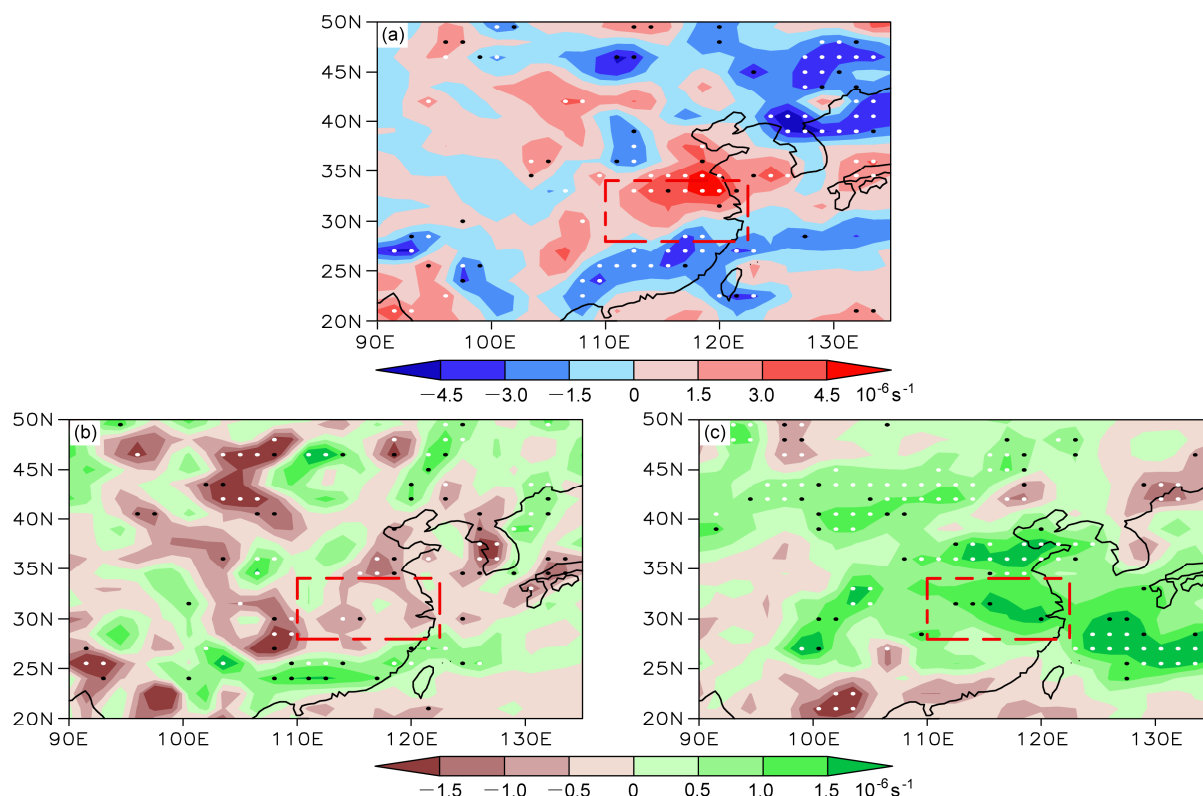


图 6 1979~2013 年春季 (a) 850 hPa 涡度、(b) 850 hPa 散度、(c) 200 hPa 散度的高、低 I_2 年份合成差值 (单位: 10^{-6} s^{-1})。黑点为通过 90% 信度水平, 白点为 95% 信度水平

Fig. 6 Composite differences (units: 10^{-6} s^{-1}) of vorticity at (a) 850 hPa, divergence at (b) 850 hPa and (c) 200 hPa between high and low I_2 years during 1979–2013. Black (white) dots are for values at the 90% (95%) confidence level

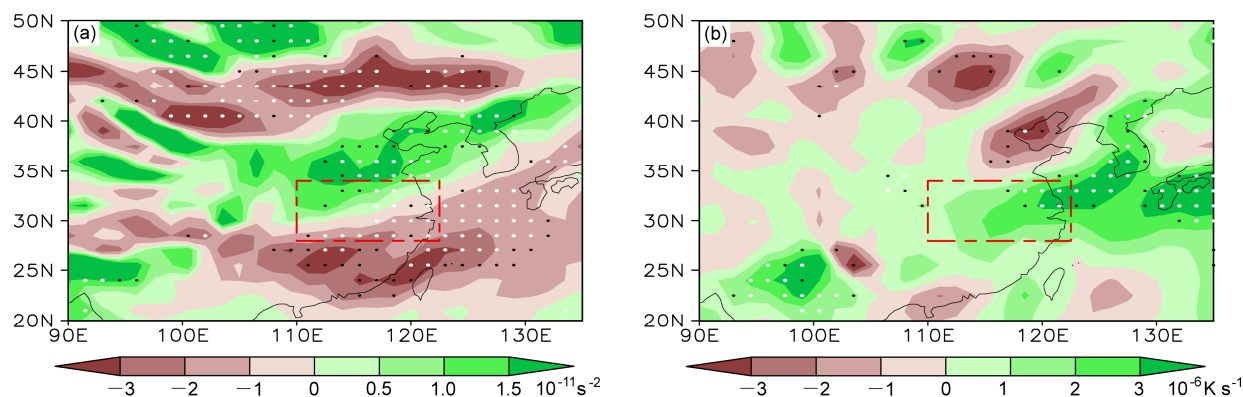


图 7 1979~2013 春季 (a) 500 hPa 异常风涡度平流 (单位: 10^{-11} s^{-2})、(b) 925~700 hPa 平均温度平流 (单位: 10^{-6} K s^{-1}) 高、低 I_2 年份合成差值。黑点为通过 90% 信度水平检验, 白点为 95% 信度水平

Fig. 7 Composite differences of (a) 500-hPa vorticity advection (units: 10^{-11} s^{-2}) by anomalous wind, (b) average temperature advection (units: 10^{-6} K s^{-1}) from 925 hPa to 700 hPa between high and low I_2 years during 1979–2013. Black (white) dots are for values at the 90% (95%) confidence level

(图 7a), 这与 850 hPa 显著的异常东南风出现位置较为一致, 表明低层异常东南风的涡度输送对这些区域局地涡度异常增大具有明显的影响。另一方面, 由于我国南方地区低层西南风加强, 伴随对流层低层出现暖平流 (图 7b)。根据 ω 方程, 高空正

涡度平流和低层暖平流结合, 有利于低层产生垂直上升运动以及地面气旋加强。

此外, 由于中纬度大气斜压不稳定是局地涡旋发展的主要因素, 根据公式 (3) 计算了 850 hPa 的最大涡旋增长率 (σ_{BI}), 据此分析低层大气斜压性

与影响江淮区域的天气尺度气旋活动的联系。图 8a 显示江淮地区南部尤其是其西南侧及其上游地区 σ_{BI} 以正值为主, 有利于这些区域局地低涡活动加强。垂直风切变的分布与 σ_{BI} 相一致 (图 8b), 是引起斜压性变化的主导因子。结合前面分析可知, 高 I_2 指数年份对应着江淮地区对流层低层横槽型环流, 其南部出现异常西南风, 且高空风速相对增强幅度大 (图略), 导致大气斜压性以及天气尺度气旋活动增强。而在江淮地区北部、华北、东北朝鲜半岛至日本海区域 σ_{BI} 以负值为主, 这些地区大气斜压性降低, 表明西风减弱抑制了大气斜压性增长, 但由于高空异常东风/东南风的涡度平流输入作用, 促进了江淮区域北部及其邻近区域气旋活动的

增强 (图 3c), 由此可推断异常风涡度平流对这些区域气旋活动起主导作用。

4.3 水汽输送及云量

由于区域降水异常受到大气动力作用以及水汽输送条件变化的共同影响, 为揭示天气尺度气旋活动对应的环流异常对降水的影响, 计算了 850 hPa 水汽通量和水汽通量散度 I_2 高一低值年合成差值 (图 9)。由水汽输送的合成差值场可知, 华南南部及近岸的南海存在从太平洋而来的异常水汽输送。25°N 附近, 水汽输送方向发生了明显的转折, 在整个长江流域呈西南—东北走向; 另一方面, 由于异常东南风作用, 江淮地区北部至华北地区出现来自东海及渤海的异常水汽输入。与

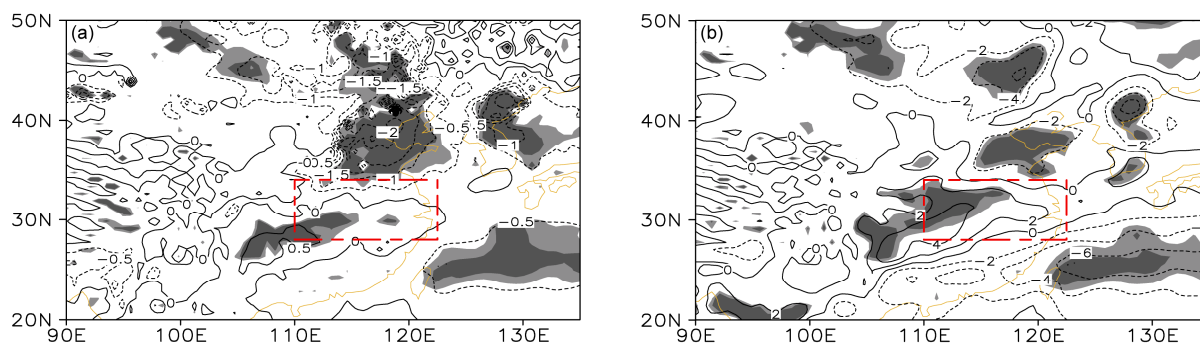


图 8 1979~2013 春季 850 hPa (a) σ_{BI} (单位: $10^{-6} s^{-1}$)、(b) 垂直风切变 (单位: $10^{-4} s^{-1}$) 高、低 I_2 年份合成差值。浅、深阴影为通过 90%、95% 信度水平

Fig. 8 Composite differences of 850-hPa (a) σ_{BI} (eddy growth rate, units: $10^{-6} s^{-1}$), (b) vertical wind shear (units: $10^{-4} s^{-1}$) between high and low I_2 years during 1979–2013. Light (dark) shadings are for values at the 90% (95%) confidence level

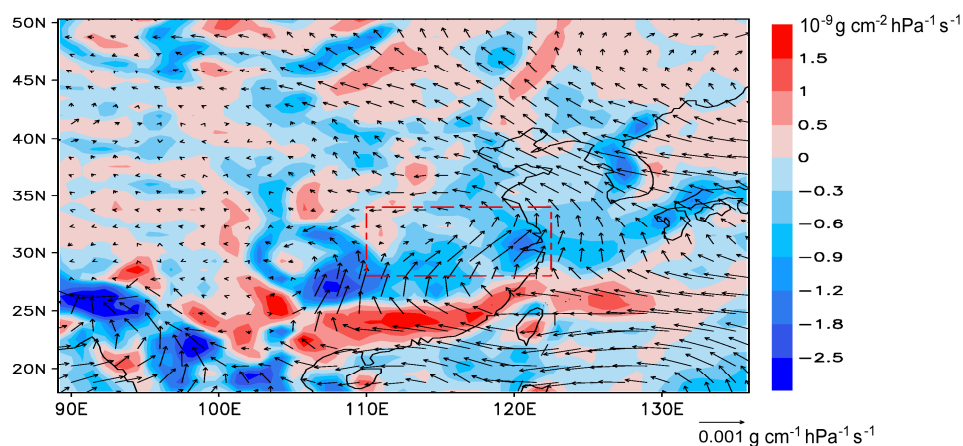


图 9 1979~2013 年春季水汽通量 (矢量箭头, 单位: $g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}$) 及水汽通量散度 (彩色阴影, 单位: $10^{-9} g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}$) 高一低 I_2 年份合成差值

Fig. 9 Composite differences of water vapor fluxes (vectors, units: $g cm^{-1} hPa^{-1} s^{-1}$) and divergence of vapor fluxes (shadings, units: $10^{-9} g cm^{-2} hPa^{-1} s^{-1}$) between high and low I_2 years in the spring during 1979–2013

之对应, 当影响江淮地区天气尺度气旋活动指数增强时, 四川盆地、湖南、湖北地区和长江三角洲附近出现明显的水汽辐合, 配合环流场高低层系统的抬升作用, 促使江淮区域降水异常偏多, 同时使得江淮西南部、北部强降水事件的发生概率增大。此外, 还通过相关及合成分析探讨了云量与 I_2 的联系。可以看到, 除华南地区外, 中国大陆的低云云量 (图 10a)、总云云量 (图 10b) 主要和 I_2 呈正相关, 其中, 江淮地区北部及其以北大范围地区更为显著。整体上, 云量与降水相关 (图 4) 以及水汽输送分布 (图 9) 均一致。从合成场看, I_2 指数异常偏高时, 低云量、总云量均在各自正相关区内偏多。中云、高云也有类似特征 (图略)。上述分析表明, 天气尺度气旋活动指数增强年份, 江淮地区附近及其以北大范围地区有较好的水汽供应及水汽辐合, 云量增多, 有利于形成降水, 反之亦然。

5 结论与讨论

本文基于最外围闭合等值线的气旋区客观识别方法, 获取春季影响江淮地区的气旋活动信息, 分析了该区域天气尺度气旋强度时空变化规律, 研究了天气尺度气旋年际活动异常与站点降水异常的关系。根据上述分析, 将春季影响江淮区域天气尺度气旋活动的环流配置以及与降水异常联系途径概括为图 11, 主要结论包括:

(1) 春季影响江淮地区的气旋格点强度异常 EOF 分析第一模态显示为区域一致性的分布 (方差贡献率为 48.26%), 该模态的时间变化与江淮区域天气尺度气旋强度指数 I_2 存在显著的正相关联系,

表明春季的气旋活动年际变化主要体现了天气尺度气旋强度变化特征。除江淮地区外, I_2 指数与华北南部等地的气旋强度也存在正相关联系, 说明春季影响江淮地区的天气尺度气旋与北方气旋也存在一定的联系, 体现了影响江淮区域气旋的多样性。

(2) 春季天气尺度气旋活动指数变化对同期降水具有明显作用。其中, 在春季天气尺度气旋活动指数增强 (减弱) 年份, 江淮区域同期降水量及强降水频次偏多 (少), 尤以江淮西南部及北部显著。此外, I_2 指数还与华北地区、内蒙古地区及东北部分地区的降水异常存在正相关, 由于天气尺度水平范围较大, 可以同时对其影响范围内的不同区域造成影响, 这显示了从二维角度分析气旋的影响范围、强度变化及其与区域气候异常联系的科学意义。

(3) 在天气尺度气旋活动指数增强年份, 由于东北亚地区出现深厚的异常高压中心, 对流层中上层增温减弱了南北经向温度梯度, 导致入口处高空西风急流偏弱, 从而有利于江淮区域北部正涡度平流输入; 而江淮地区出现横槽型环流, 对应南部及其上游地区对流层中下层出现异常西南气流, 有利于江淮区域涡度增大, 相应的低空辐合、高空辐散垂直结构, 为天气尺度气旋发展与维持提供了有利的动力抬升背景。

(4) 在影响江淮区域的天气尺度气旋活动指数偏强年, 相应的对流层低层横槽型异常环流配置有利于其南部的西南暖湿气流和北部的异常西向/西北向水汽输入和堆积, 导致区域云量以及降水异常的增多。

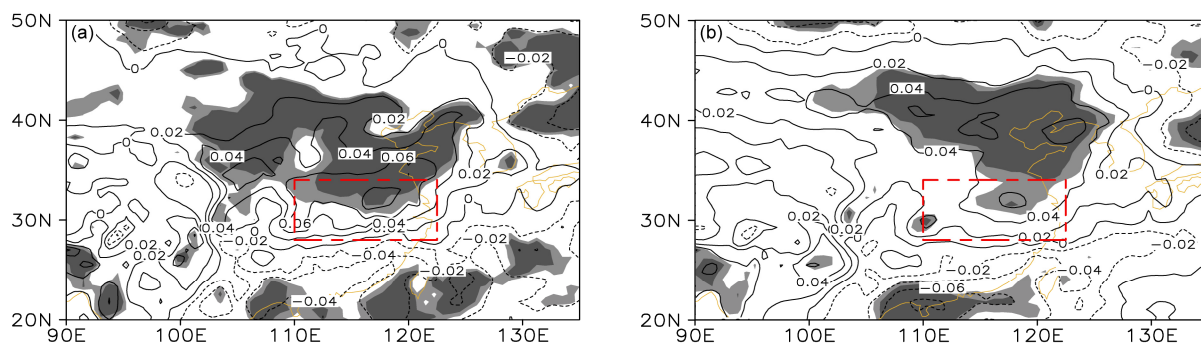


图 10 1979~2013 年春季 (a) 低云量、(b) 总云量高一低 I_2 年份合成差值 (等值线)。浅、深阴影分别为通过 90%、95% 信度水平

Fig. 10 Composite differences (contours) of (a) low cloud, (b) total cloud between high and low I_2 years in the spring during 1979–2013. Light (dark) shadings are for values at the 90% (95%) confidence level

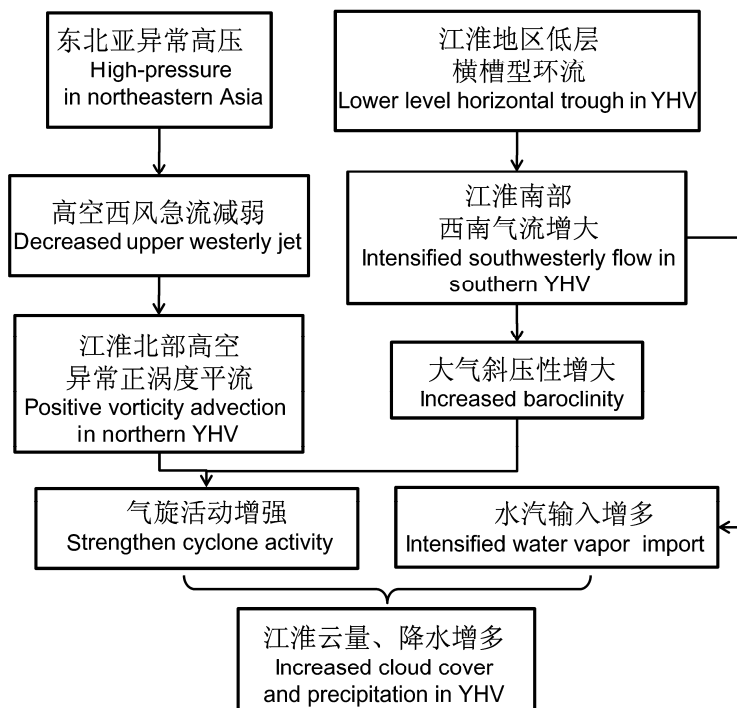


图 11 春季影响江淮区域天气尺度气旋活动的环流配置以及与降水异常联系的概念图

Fig. 11 Schematic diagram of circulation associated with springtime synoptic scale cyclone activity over the YHV and its association with regional precipitation anomalies

值得指出的是, 以往对东亚区域温带气旋活动变化的研究主要强调大气斜压性增强促进了气旋活动增强, 西风急流的增强在其中扮演了重要的角色。然而, 对于不同区域及季节, 风场垂直切变所起的作用可能有所差异。例如, Ren et al. (2010) 指出, 春季青藏高原北部区域下垫面感热迅速增加导致的大气静力稳定度降低, 是东亚区域季节大气斜压性和天气瞬变涡旋活动增强的主要原因。本文研究也发现, 大气斜压性对气旋活动变化的作用存在区域差异, 在江淮区域北部, 尽管西风明显减弱, 但由于其造成的正涡度平流作用, 使得局地气旋活动反而有所增强。另外, 文本主要针对影响气旋活动变化的同期环流异常联系, 其外部强迫因子及预测信号有待进一步全面研究。同时, 春季影响江淮地区的天气尺度气旋强度还与区域外的华北、黄土高原、内蒙古高原及东北部分地区的降水有显著联系, 这些天气尺度气旋的活动范围、生成源地及气候效应等规律有待进一步深入探讨。

致 谢 感谢欧洲中期天气预报中心 (ECMWF) 和中国气象科学数据共享服务网提供的高分辨率资料数据集。感谢审稿专家和编辑对本文

的改进提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 白旭旭, 李崇银, 李琳. 2012. MJO 对中国春季降水影响的数值模拟研究 [J]. 气象学报, 70 (5): 986–1003. Bai Xuxu, Li Chongyin, Li Lin. 2012. Numerical simulation study of the Madden Julian Oscillation influences on spring precipitation in China [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 70 (5): 986–1003, doi:10.11676/qxb2012.083.
- Berrisford P, Dee D P, Fielding M, et al. 2009. The ERA-interim archive [R]. Era Report, 1–16.
- 蔡学湛. 2001. 青藏高原雪盖与东亚季风异常对华南前汛期降水的影响 [J]. 应用气象学报, 12 (3): 358–367. Cai Xuezhao. 2001. The influence of abnormal snow cover over Qinghai-Xizang Plateau and East Asian monsoon on early rainy season rainfall over South China [J]. Quart. J. Appl. Meteor. (in Chinese), 12 (3): 358–367, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2001.03.011.
- 陈丹, 朱克云, 布和朝鲁. 2012. 前期印度洋海温异常对中国春季降水的影响 [J]. 成都信息工程学院学报, 27 (5): 479–484. Chen Dan, Zhu Keyun, BUEH Cholaw. 2012. The influence of the preceding SST of Indian Ocean on the spring precipitation in China [J]. J. Chengdu Univ. Inf. Technol. (in Chinese), 27 (5): 479–484, doi:10.3969/j.issn.1671-1742.2012.05.009.
- 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.
- Chen H S, Teng F D, Zhang W X, et al. 2017. Impacts of anomalous mid-latitude cyclone activity over East Asia during summer on the decadal mode of East Asian summer monsoon and its possible mechanism [J]. *J. Climate*, 30 (2): 739–753, doi:10.1175/JCLI-D-16-0155.1.
- Chen L, Tan B K, Gunnar Kvamstø N, et al. 2013. Wintertime cyclone activity and its relation to precipitation over China [J]. *Atmos. Oceanic Sci. Lett.*, 6 (5): 387–393.
- 程慧萍, 贾晓静. 2014. 印度洋冬季海温异常对中国春季降水的影响 [J]. *高原气象*, 33 (3): 733–742. Cheng Huiping, Jia Xiaojing. 2014. Influence of sea surface temperature anomalies of Indian Ocean in winter on precipitation over China in spring [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 33 (3): 733–742, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00024.
- 董丽娜, 郭品文, 李晓峰. 2006. 瞬变波活动与江淮地区夏季旱涝的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 29 (4): 470–476. Dong Lina, Guo Pinwen, Li Xiaofeng. 2006. Relationship between activity of transient waves and excessive/deficit summer rain in Changjiang-Huaihe River basin [J]. *J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese)*, 29 (4): 470–476, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.04.006.
- 杜萌萌, 刘晓东. 2010. 青藏高原春季冷暖对我国东南地区春夏转换时期降水异常的影响 [J]. *西北大学学报 (自然科学版)*, 40 (2): 314–318. Du Mengmeng, Liu Xiaodong. 2010. An analysis on the impacts of spring thermal conditions over the Tibetan Plateau on precipitation in Southeast China during the spring–summer transition [J]. *J. Northwest Univ. (Nat. Sci. Ed.) (in Chinese)*, 40 (2): 314–318, doi:10.16152/j.cnki.xdxbzr.2010.02.010.
- 符娇兰, 董林, 康志明. 2013. 影响我国北方冬半年气旋的气候特征及年际变率 [J]. *大气科学*, 37 (3): 679–690. Fu Jiaolan, Dong Lin, Kang Zhiming. 2013. Climatology and interannual variability of extratropical cyclones in the winter half-year in northern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 37 (3): 679–690, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12055.
- Fu S M, Li W L, Ling J. 2015. On the evolution of a long-lived mesoscale vortex over the Yangtze River basin: Geometric features and interactions among systems of different scales [J]. *J. Geophys. Res.*, 120 (23): 11889–11917, doi:10.1002/2015JD023700.
- Hanley J, Caballero R. 2012. Objective identification and tracking of multicentre cyclones in the ERA-Interim reanalysis dataset [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 138 (664): 612–625, doi:10.1002/qj.948.
- 胡桂芳, 邹瑾, 张璇. 2005. 下半年 Niño3 区海表升温对东亚春季大气环流及山东春季降水的影响 [J]. *应用气象学报*, 16 (6): 772–778. Hu Guifang, Zou Jin, Zhang Xuan. 2005. Influences of Niño3 SST rising in the second half year on East Asia spring general circulation and Shandong spring precipitation [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 16 (6): 772–778, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2005.06.008.
- 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.
- 蒋玲仙, 任雪娟, 杨修群. 2011. 东亚—北太平洋大气环流和瞬变扰动的年代际变化 [J]. *气象科学*, 31 (5): 549–557. Jiang Lingxian, Ren Xuejuan, Yang Xiuqun. 2011. Interdecadal variations of atmospheric circulation and synoptic-scale transient eddy activities over the East Asian–North Pacific [J]. *J. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 31 (5): 549–557, doi:10.3969/j.issn.1009-0827.2011.05.001.
- 金蕊, 祁莉, 何金海. 2016. 春季青藏高原感热通量对不同海区海温强迫的响应及其对我国东部降水的影响 [J]. *海洋学报*, 38 (5): 83–95. Jin Rui, Qi Li, He Jinhai. 2016. Effect of oceans to spring surface sensible heat flux over Tibetan Plateau and its influence to East China precipitation [J]. *Haiyang Xuebao (in Chinese)*, 38 (5): 83–95, doi:10.3969/j.issn.0253-4193.2016.05.008.
- Lu C H. 2017. A modified algorithm for identifying and tracking extratropical cyclones [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 34 (7): 909–924, doi:10.1007/s00376-017-6231-2.
- 梅士龙. 2008. 江淮流域强降水过程与对流层上层斜压波包活动的联系 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Mei Shilong. 2008. The relationship between the heavy rainfall in the Jianghuai River basin and the activity of the baroclinic wave packet in the upper troposphere [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science & Technology.
- 苗春生, 吴志伟, 何金海, 等. 2006. 近 50 年东北冷涡异常特征及其与前汛期华南降水的关系分析 [J]. *大气科学*, 30 (6): 1249–1256. Miao Chunsheng, Wu Zhiwei, He Jinhai, et al. 2006. The anomalous features of the Northeast cold vortex during the first flood period in the last 50 years and its correlation with rainfall in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30 (6): 1249–1256, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.19.
- Qin Y J, Lu C H, Li L P. 2017. Multi-scale cyclone activity in the Changjiang River–Huaihe River valleys during spring and its relationship with rainfall anomalies [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 34 (2): 246–257, doi:10.1007/s00376-016-6042-x.
- Ren H L, Jin F F, Kug J S, et al. 2009. A kinematic mechanism for positive feedback between synoptic eddies and NAO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (11): L11709, doi:10.1029/2009GL037294.
- 任雪娟, 张耀存. 2007. 冬季 200 hPa 西太平洋急流异常与海表加热和大气瞬变扰动的关系探讨 [J]. *气象学报*, 65 (4): 550–560. Ren Xuejuan, Zhang Yaocun. 2007. Association of winter western Pacific jet stream anomalies at 200 hPa with ocean surface heating and atmospheric transient eddies [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 65 (4): 550–560, doi:10.11676/qxxb2007.051.
- Ren X J, Yang X Q, Chu C J. 2010. Seasonal variations of the synoptic-scale transient eddy activity and polar front jet over East Asia [J]. *J. Climate*, 23 (12): 3222–3233, doi:10.1175/2009JCLI3225.1.
- 邵太华, 张耀存. 2012. 冬季北大西洋涛动对中国春季降水异常的影响 [J]. *高原气象*, 31 (5): 1225–1233. Shao Taihua, Zhang Yaocun. 2012. Influence of winter North Atlantic Oscillation on spring precipitation in China [J]. *Plateau Meteor. (in Chinese)*, 31 (5): 1225–1233.
- 谭本旭, 潘旭辉. 2002. 1998 年夏季北半球斜压波活动与长江流域洪涝灾害分析 [J]. *南京大学学报(自然科学)*, 38 (3): 354–364. Tan Benkui, Pan Xuhui. 2002. Baroclinic waves of Northern Hemisphere and Yangtze River flood in the summer of 1998 [J]. *J. Nanjing Univ. (Nat. Sci.) (in*

- Chinese), 38 (3): 354–364, doi:10.3321/j.issn:0469-5097.2002.03.010.
- Wan R J, Wu G X. 2007. Mechanism of the spring persistent rains over southeastern China [J]. *Sci. China Ser. D: Earth Sci.*, 50 (1): 130–144, doi:10.1007/s11430-007-2069-2.
- Wan R J, Wu G X. 2009. Temporal and spatial distributions of the spring persistent rains over southeastern China [J]. *Acta Meteor. Sinica*, 23 (5): 598–608.
- 王艳玲, 郭品文. 2005. 春季北方气旋活动的气候特征及与气温和降水的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 28 (3): 391–397. Wang Yanling, Guo Pinwen. 2005. Climatic characteristics of northern cyclone activity in spring and their relationship to rainfall and temperature in China [J]. *J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese)*, 28 (3): 391–397, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2005.03.015.
- 魏建苏, 刘佳颖, 孙燕, 等. 2013. 江淮气旋的气候特征分析 [J]. *气象科学*, 33 (2): 196–201. Wei Jiansu, Liu Jianying, Sun Yan, et al. 2013. Climate characteristics of Jiang-Huai cyclone [J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*, 33 (2): 196–201, doi:10.3969/2012jms.0112.
- 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.
- 姚素香, 张耀存, 周天军. 2003. 近 50 a 春季东亚温带气旋活动频数的气候特征及其变化 [J]. *南京气象学院学报*, 26 (3): 317–323. Yao Suxiang, Zhang Yaocun, Zhou Tianjun. 2003. Climatic characteristics of extratropical cyclone frequency and its variations over East Asia during recent 50 years in spring [J]. *J. Nanjing Inst. Meteor. (in Chinese)*, 26 (3): 317–323, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2003.03.004.
- 余广昌, 陈文, 徐需强, 等. 2015. 东海黑潮区潜热变化对中国春季降水的影响及其影响过程 [J]. *气候与环境研究*, 20 (5): 600–610. Yu Guangchang, Chen Wen, Xu Peiqiang, et al. 2015. Mechanistic analysis of the influence of the latent heat associated with the Kuroshio Current on Chinese rainfall anomalies in spring [J]. *Climatic Environ. Res. (in Chinese)*, 20 (5): 600–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15050.
- 张人禾, 武炳义, 赵平, 等. 2008. 中国东部夏季气候 20 世纪 80 年代后期的年代际转型及其可能成因 [J]. *气象学报*, 66 (5): 697–706. Zhang Renhe, Wu Bingyi, Zhao Ping, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 66 (5): 697–706, doi:10.11676/qxb2008.064.
- 张天圣, 尤卫红. 2010. 我国春季降水的分布特征及其与环流异常的关系 [J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 32 (5): 553–560. Zhang Tiansheng, You Weihong. 2010. The distribution feature of spring rainfall and its relation to circulation anomaly in China [J]. *J. Yunnan Univ. (in Chinese)*, 32 (5): 553–560.
- 张晓红, 罗静, 陈兴, 等. 2016. 一次春季江淮气旋形成发展特征及暴雨诊断分析 [J]. *气象*, 42 (6): 716–723. Zhang Xiaohong, Luo Jing, Chen Xing, et al. 2016. Formation and development mechanism of one cyclone over Changjiang–Huaihe River basin and diagnostic analysis of rainstorm [J]. *Meteor. Mon. (in Chinese)*, 42 (6): 716–723, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2016.06.007.
- 张耀存, 郭兰丽. 2005. 东亚副热带西风急流偏差与中国东部雨带季节变化的模拟 [J]. *科学通报*, 50 (13): 1394–1399. Zhang, Yaocun, Guo Lanli. 2005. Relationship between the simulated East Asian westerly jet biases and seasonal evolution of rainbelt over eastern China [J]. *Chinese Sci. Bull.*, 2005, 50 (14): 1503–1508, doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2005.13.017.
- 张颖娴. 2012. 北半球温带气旋的气候学及其变率研究 [D]. 南京信息工程大学博士学位论文. Zhang Yingxian. 2012. A climatology and variation research of extratropical cyclone in the North Hemisphere [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 赵焯, 徐海明, 徐蜜蜜, 等. 2015. 春季中国东海黑潮区大气热源异常对中国东部降水的影响 [J]. *气象学报*, 73 (2): 263–275. Zhao Xuan, Xu Haiming, Xu Mimi, et al. 2015. The spring atmospheric heat source over the East China Sea Kuroshio area and its impact on precipitation in eastern China [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 73 (2): 263–275, doi:10.11676/qxb2015.013.
- 郑菲, 李建平. 2012. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理 [J]. *地球物理学报*, 55 (11): 3542–3557. Zheng Fei, Li Jianping. 2012. Impact of preceding boreal winter Southern Hemisphere annular mode on spring precipitation over South China and related mechanism [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 55 (11): 3542–3557, doi:10.6038/j.issn.0001-5733.2012.11.004.
- 周洁雯, 卢楚翰, 孙燕. 2017. 基于客观识别的东亚区域温带气旋活动及其气候效应的研究综述 [J]. *干旱气象*, 35 (6): 907–917. Zhou Jiewen, Lu Chuhan, Sun Yan. 2017. Review of extratropical cyclone activities over East Asia and its climatic effects research based on objective identification [J]. *J. Arid Meteor. (in Chinese)*, 35(6): 907–917, doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-06-0907.
- 朱坚. 2011. 长江以南地区春季降水的气候特征及其与青藏高原动力作用的联系 [D]. 南京大学博士学位论文. Zhu Jian. 2011. The climatic features of spring rainfall over regions south to Yangtze River and its relationship with mechanical effects of the Tibetan Plateau [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing University.
- 左志燕, 张人禾. 2012. 中国春季降水异常及其与热带太平洋海面温度和欧亚大陆积雪的联系 [J]. *大气科学*, 36 (1): 185–194. Zuo Zhiyan, Zhang Renhe. 2012. The anomalies of spring rainfall in China and its relation with tropical Pacific SST and Eurasian snow [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 36 (1): 185–194, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.01.14.