

赵俊虎, 支蓉, 申茜, 等. 2014. 2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析 [J]. 大气科学, 38 (2): 237–250, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12215.
Zhao Junhu, Zhi Rong, Shen Qian, et al. 2014. Prediction of the distribution of the 2012 summer rainfall in China and analysis of the cause for anomaly [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 237–250.

2012 年我国夏季降水预测与异常成因分析

赵俊虎^{1,2} 支蓉² 申茜¹ 杨杰¹ 封国林²

¹ 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000

² 国家气候中心气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 本文对 2012 年我国夏季降水的实况和预测进行简要回顾, 发现 2012 年夏季降水大体呈北方涝、长江旱的分布, 主雨带位于黄河流域及其以北, 降水异常偏多的区域主要位于西北大部、内蒙古和环渤海湾, 黄淮与江淮地区降水偏少, 江汉至淮河上游一带干旱严重; 预测的主雨带位于华北南部至淮河, 较实况偏南。对我国北方降水异常偏多的成因分析表明: 2012 年夏季欧亚中高纬地区阻塞高压 (简称阻高) 强盛, 同时东北冷涡活动频繁, 中高纬 500 hPa 高度场从西至东呈“十—十”的分布, 这种环流形势没有造成长江洪涝是因为东亚夏季风异常偏强, 同时西太平洋副热带高压 (副高) 偏北, 冷暖空气对峙于我国北方地区, 导致北方降水异常偏多。分析还表明阻高、东北冷涡、东亚夏季风和副高这四个系统的不同配置影响着冷暖气流的对峙位置, 进而形成我国夏季的主雨带。最后通过定量和定性判断相结合的方法, 选取了 2012 年夏季降水的最佳相似年和最佳相反年, 对比分析了 2012 年夏季降水与其最佳相似年和最佳相反年的海温演变与东亚夏季风环流系统主要成员的差异: 1959 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相似年, 虽然海温及东亚夏季风系统关键成员异常不明显, 但是和 2012 年也呈近似相反的特征; 而 1980 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相反年, 海温及东亚夏季风环流系统关键成员和 2012 年呈显著的反向特征, 这些观测事实反映了我国夏季降水与海温及东亚夏季风环流系统关键成员这些主要影响因子之间关系的年代际变化。

关键词 夏季降水 东亚夏季风环流系统 天气模型 年代际变化

文章编号 1006-9895(2014)02-0237-14

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12215

Prediction of the Distribution of the 2012 Summer Rainfall in China and Analysis of the Cause for Anomaly

ZHAO Junhu^{1,2}, ZHI Rong², SHEN Qian¹, YANG Jie¹, and FENG Guolin²

¹ College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

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

Abstract The observed and predicted 2012 precipitation in China is reviewed. The distribution of the observed summer precipitation shows flooding in northern China and drought in the Yangtze River basin. The main rain band is located in the Yellow River basin and north of that region. Areas of abnormally positive precipitation anomalies are mainly located in northwestern China, Mongolia, and the area around Bohai Gulf, whereas areas of negative precipitation anomalies are located in the Huaihe River and Yangtze River basin, especially the Jiangnan to Huaihe region. The main predicted rain

收稿日期 2012-12-12, 2013-04-02 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 40930952、41105055, 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955902、2013CB430204, 公益性行业科研专项 GYHY201106016

作者简介 赵俊虎, 男, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事气候变化和短期气候预测研究。E-mail: huzi348637577@sina.com

通讯作者 支蓉, E-mail: z_rongphy@cma.gov.cn

band is located in the region from southern North China to the Huaihe River, which is to the south of the observed rain band. Further analysis of the reason behind the extremely heavy northern summer precipitation shows that the blocking high was strong over mid-high latitudes in Eurasia in the summer of 2012, whereas the Northeast China cold vortex was frequent and the 500 hPa geopotential height field over the mid-high latitudes showed the pattern of “+ - +” from west to east. However, there is no correlation of floods in the Yangtze River basin and atmospheric circulation. The floods are primarily attributed to the abnormally strong East Asia summer monsoon, whereas the western Pacific subtropical high (WPSH) moves northward causing the cold and warm air to meet, which leads to positive precipitation anomalies in the north. Furthermore, the analysis suggests that the position of the main rain belt in the summer depends on the location of the interaction between cold and warm air, which is influenced by the different configurations of the blocking high over Eurasia at mid-high latitudes, the northeast cold vortex, the East Asia summer monsoon, and the WPSH. Finally, by combining quantitative calculations with qualitative judgment, the most similar and most opposite year to the summer precipitation of 2012 were selected and the three-year differences for the SST and the main members of the summer monsoon circulation system of East Asia were analyzed. In 1959, which a year most similar to 2012, the SST and key elements of the East Asia summer monsoon system do not show obvious abnormal signals, whereas it shows approximately opposite features compared to 2012. In 1980, which a year much different than 2012, the features of SST and key elements of the East Asia summer monsoon system are opposite compared to 2012. These features reflect the decadal variations in the summer rainfall in China and the main factors affecting it; that is, the SST and the East Asia summer monsoon system.

Keywords Summer precipitation, East Asia summer monsoon system, Weather pattern, Decadal variations

1 引言

我国气候灾害发生频率较高,大范围的干旱和洪涝等气候灾害极大的影响着经济建设和社会发展,据统计,每年气候灾害所造成的损失占我国国民生产总值的 2.7%左右(黄荣辉等, 2006)。在近几十年全球气候变暖背景下,某些灾害性天气、气候事件频繁发生(Ren et al., 2004; Lin et al., 2004; 鲍名和黄荣辉, 2006),且随着经济的发展,气象灾害造成的经济损失越来越严重(吴国雄等, 2006)。因此,对月、季时间尺度旱、涝气候,尤其是夏季汛期旱、涝趋势的预测是我国大气科学家的一项重要课题(丑纪范和徐明, 2001)。

2012 年夏季我国极端强降水事件频发,总降水整体偏多,且大体呈北方涝、长江旱的分布格局,黄河流域及其以北大部分地区降水较同期偏多 2 成以上,是 1998 年之后降水最多的一年,其中青海北部、甘肃西部及内蒙古中西部等地区降水偏多 5 成至 2 倍不等,发生较严重的洪涝灾害,而黄河下游至长江中下游之间地区及华南降水较同期偏少,江汉至淮河上游降水偏少 5 成以上,干旱严重;且整个夏季降水时空分布极不均匀。6 月,全国平均降水量较常年同期偏多 11.2%,降水呈南北多、中间少的分布,我国北方大部地区降水量较常年同期偏多 2 成以上,其中东北大部、华北中部和东北部及内蒙古大部、陕西北部等地区较常年同期

偏多 3 成至 4 倍不等,而华北南部、黄淮、江淮、江汉大部以及陕西中部和南部等地区偏少 3~8 成,局部偏少 8 成以上,气象干旱严重。7 月,全国平均降水量较常年同期偏多 14.4%,为 1951 年以来同期第 4 多,且降水也呈南北多、中间少的分布,除长江中下游及江南和华南部分地区外,全国大部分地区降水偏多,其中西北地区中部、内蒙古大部及河套地区偏多 5 成至 2 倍,局部偏多 2 倍以上。8 月,全国平均降水量较常年同期偏少 12.4%,降水呈南北少、中间多的分布,江南东部、江淮大部及沿渤海一带降水偏多,黄河流域及其以北、西南大部及华南降水偏少。(http://ncc.cma.gov.cn/influ/moni_china.php?product=moni_assessment [2012-09-01])

2012 年夏季我国降水时空分布的极不均匀,造成了区域性严重的洪涝和干旱,给国民经济带来了巨大的损失和破坏,这也增加了国家对提高短期气候预测水平更为迫切的需求。提高短期气候预测水平,就需要对异常年份的旱涝成因进行深入分析和再认识。对短期气候异常成因的分析,也是我国气象学家一直坚持的一项研究工作(陶诗言等, 1998; 陈桂英等, 2001; 王会军, 2001; 谭桂容等, 2009; 孙诚和李建平, 2012; 黄荣辉等, 2012)。本文简要回顾了 2012 年全国夏季降水分布的观测和 3 月全国会商的预测结果,通过对海温及东亚夏季环流系统关键成员的异常演变特征及配置进行分析,探讨了夏季降水北方涝、长江旱这种异常分布的成

因; 通过进一步选取 2012 年全国夏季旱涝分布的最佳相似年和最佳相反年, 对比分析了海温及东亚夏季风环流系统关键成员特征的异同, 并说明了我国夏季降水与主要影响因子之间关系的年代际变化和选取相似年做预测时需注意的问题, 以期为进一步做好汛期降水预测工作提供参考和依据。

2 资料和方法

NCEP/NCAR 1948~2012 年垂直方向 1000~10 hPa 共 17 层等压面的风场 (u 、 v 分量)、温度场 (T)、高度场 (H), 以及垂直方向 1000~300 hPa 共 8 层等压面的比湿场 (q), 水平空间分辨率均为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 的全球格点再分析日平均、月平均资料 (Kalnay et al., 1996); 美国国家海洋与大气管理局提供的 1948~2012 年月平均海温重建资料 ($2^\circ \times 2^\circ$) (Smith and Reynolds, 2004); 中国气象局国家气候中心 (National Climate Center, NCC) 提供的 160 测站 1951~2012 年逐月降水量资料和 74 项环流指数; 中国气象局信息中心提供的 753 个测站逐日降水量资料。本文主要利用相关、距平及天气气候诊断分析等方法, 取 1981~2010 年为气候态。

3 夏季降水实况及预测

3.1 夏季降水分布

2012 年夏季降水大体呈北方涝、长江旱的分布, 主雨带位于黄河流域及其以北, 降水异常偏多的区域主要位于西北部、内蒙古和环渤海湾, 此外东北大部、西南西北部、江南等地区降水偏多。黄淮、江淮、长江中游至广西北部、广东等地区降水偏少, 其中江汉至淮河上游之间地区降水异常偏少 (图 1a)。

2012 年 3 月全国汛期会商最后公布的预测为: 夏季我国多雨范围较 2011 年明显偏大, 洪涝程度较 2011 年偏重; 主要多雨区可能位于华北中东部、黄淮、江汉、江南东南部、华南东部、西南南部等地区, 其中黄淮大部地区降水偏多 2~5 成, 上述地区可能出现洪涝; 全国其余大部地区降水较常年同期偏少 (图 1b)。其中华北南部、江南东部、四川南部的多雨区以及长江中下游地区、江汉至广西北部的少雨区与实况相符, 而预测的北方降水偏少和黄淮多雨均与实况相反。

3.2 预测依据及实况

根据国内外多个气候模式的预测结果, 预计

2012 年 4 月底 La Niña 事件将转为 ENSO 中性状态; 2011 年秋季至 2012 年 2 月副热带南印度洋偶极子 (Southern Indian Ocean SST anomaly Dipole, SIOD) 处于负位相; 冬季北极海冰异常偏少。考虑到前期海温及海冰的影响, 预测南海夏季风爆发偏早, 东亚夏季风偏强, 副热带高压 (简称副高) 偏东偏北; 考虑到太平洋年代际振荡 (从 2007 年至 2012 年整体处于冷位相, 对应北方多雨型)、北大西洋年代际振荡 (1999 年之后处于暖位相) 以及我国夏季降水的年代际变化特征, 推断雨带可能北移; 再结合客观方法预测结果, 主要包括动力气候模式直接预测、多模式集合预测、动力—统计预测 (王启光等, 2011; Xiong et al., 2011; 杨杰等, 2012), 预测夏季主雨带偏北, 位于黄淮流域。

实况: 2011 年 9 月, 赤道中东太平洋拉尼娜事件爆发 (Niño3.4 指数 $\leq -0.5^\circ\text{C}$), 该事件在 2011 年 12 月至 2012 年 1 月达到最强, 中心值低于 -1.5°C 。2012 年 2 月后, 赤道东太平洋海温距平迅速上升; 3 月 Niño1+2 区海温指数为 0.17, Niño3.4 指数为 -0.41°C , 均未达到 -0.5°C 的标准, 表明 La Niña 事件已结束; 4 月南方涛动指数 (Southern Oscillation Index, SOI) 已从正位相转为负位相, 说明热带大气受拉尼娜事件的影响已经减弱 (图 2a)。从 2011 年 1 月至 2012 年 9 月热带印度洋全区一致海温模态 (Basin-Wide SSTA variation in the tropical Indian Ocean, IOBW) 指数和 SIOD 指数的演变 (图 2b) 可见, 从 2011 年 6 月至 2012 年 9 月中, 除 2012 年 3 月以外, 其他月份 IOBW 指数全为正值, 即热带印度洋全区一致偏暖, 2012 年春季除 7 月以外 SIOD 处于负异常状态。国家气候中心监测表明: 南海夏季风自 5 月 4 候爆发, 于 10 月 2 候结束, 与常年相比, 爆发偏早、结束偏晚、强度偏弱; 东亚夏季风偏强; 夏季副高强度异常偏弱、位置偏北偏东。

上述环流和海温的演变与预测基本相符, 有利于夏季主雨带位置偏北。2012 年夏季我国主雨带位于 36°N 以北的北方大范围地区, 比预测位置偏北。从上述预测依据来看, 主要考虑了东亚夏季风和副高这两个低纬度的暖湿系统, 而未对中高纬环流形势尤其是阻塞高压 (简称阻高) 和东北冷涡进行预测, 这可能是导致预测的主雨带比实况偏南的主要原因。事实上, 夏季主雨带是由低纬的暖湿系统和高纬的冷系统二者共同决定 (张庆云等, 2003),

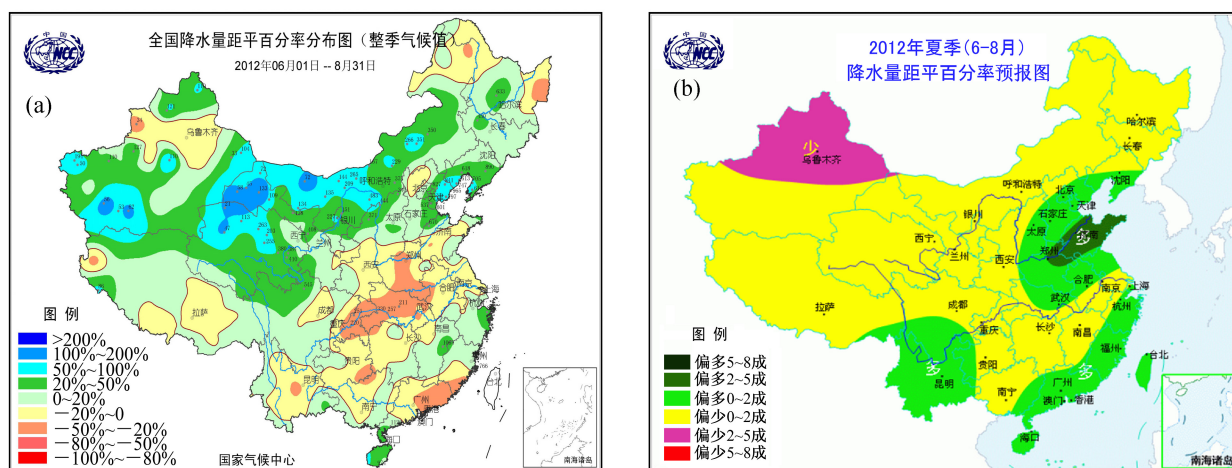


图1 2012年夏季(6~8月)降水距平百分率分布(来自NCC): (a) 观测; (b) 预测

Fig. 1 Distributions of (a) observed and (b) predicted summer rainfall anomaly percentages in 2012 (from NCC)

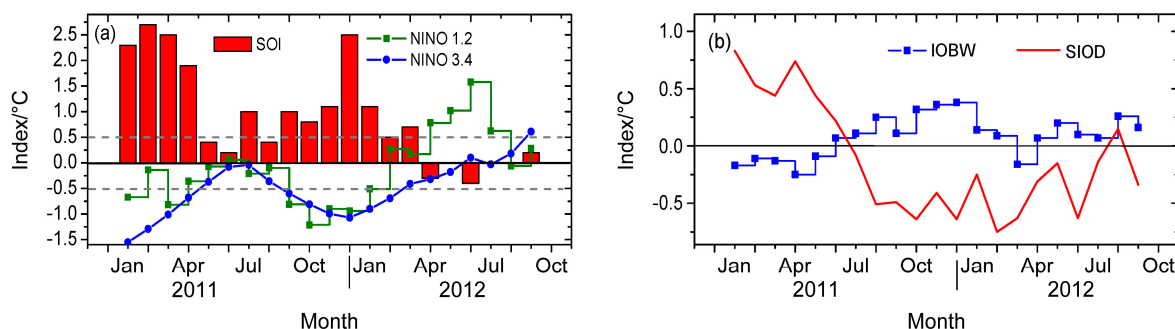


图2 2011年1月~2012年9月太平洋(a)与印度洋(b)海温指数(°C)演变

Fig. 2 The variations of SST-based indices (°C) in (a) the Pacific and (b) the Indian Ocean from Jan 2011 to Sep 2012

即冷暖系统的不同配置导致冷暖气团在某区域长时间对峙进而形成主雨带。

4 2012年夏季大气环流概况

图3、图4和表1分别给出了2012年夏季及6~8月北半球500 hPa位势高度及其距平场、850 hPa距平风场、副高的主要指数及其距平。2012年夏季北半球500 hPa位势高度及其距平场上(图3a), 欧亚中高纬地区主要为两脊一槽的环流形势, 乌拉尔山和鄂霍次克海均为正距平, 其中乌拉尔山北部正距平中心超过40 gpm, 鄂霍次克海相对偏弱, 贝加尔湖至我国内蒙古中部为负距平; 副高强度明显偏弱(达一个标准差以上), 西伸脊点位于128°E(偏东一个标准差以上), 脊线位于25°N, 比气候态偏北1个纬度; 850 hPa距平风场显示(图4a), 贝加尔湖和我国南海地区各为一个气旋式距平, 索马里急流(70°E~100°E)偏强。

6~8月逐月的环流有明显的调整。其中6月, 北半球500 hPa位势高度及其距平场上(图3b), 东亚地区呈北正南负分布, 中高纬为稳定的两脊一槽环流形势控制, 槽脊偏深, 乌拉尔山至西西伯利亚平原和鄂霍次克海地区为超高40 gpm的正距平控制, 其中西西伯利亚平原高度距平中心达160 gpm, 贝加尔湖至我国华北为低压槽区, 西风带经向环流异常发展; 副高强度明显偏弱, 西伸脊点位于130°E, 脊线位于22°N, 比气候态偏北1.5个纬度; 850 hPa距平风场显示(图4b), 贝加尔湖东南侧地区和我国南海地区各为一个气旋式距平, 索马里急流偏强。7月, 北半球500 hPa位势高度及其距平场上(图3c), 东亚地区从北至南大体呈“一十一”分布, 除贝加尔湖至我国西北一带地区以外40°N~60°N为正距平带, 因此中高纬仍为两脊一槽的环流形势, 鄂霍次克海的高压中心已经向东南移动到日本岛以东洋面上; 副高强度明显偏弱, 西伸脊点

位于 125°E, 脊线位于 28°N, 比气候态偏北 2.5 个纬度; 850 hPa 距平风场显示 (图 4c), 贝加尔湖东南侧地区和我国南海地区各仍为一个气旋式距平, 索马里急流偏强。8 月, 北半球 500 hPa 位势高度及其距平场上 (图 3d), 东亚地区从北至南大体仍呈“一十”分布, 与 7 月相比正距平带南移至 30°N~50°N, 欧亚中高纬东西方向仍为两脊一槽的环流形势, 但槽脊深度减弱, 西风带环流相对平稳; 副高主体偏弱偏北; 850 hPa 距平风场显示 (图 4d), 长江流域至南海地区为异常明显的气旋距平, 日本岛及其以东洋面为反气旋距平。

表 1 2012 年夏季副高各指数特征

Table 1 Seasonal and monthly indices of the western Pacific subtropical high (WPSH) in summer 2012

副高指数	6 月		7 月		8 月		夏季平均	
	指数	距平	指数	距平	指数	距平	指数	距平
强度指数	26	-25*	11	-43*	27	-23	21	-30*
脊线指数	22	1.5	28	2.5*	26	-1	25	1
西伸脊点指数	130	16*	125	7	130	11	128	10*

*表示达到一倍标准差

综上所述, 2012 年整个夏季中高纬度呈较稳定的两脊一槽环流形势, 中高纬 500 hPa 位势高度距平场从乌拉尔山至鄂霍次克海呈“一十”的波列, 东亚地区从低纬至中高纬呈“一十”分布 (逐月有差异), 研究表明这种环流形势有利于我国长江流域及其以南降水偏多 (朱乾根等, 1981; 李维京, 1999; 赵振国, 1999; Yu and Lin, 2007)。850 hPa 距平风场上, 梅雨锋区 (25°N~35°N) 呈现较大的东风距平, 却是夏季长江流域降水偏少的环流特征 (张庆云等, 2003), 在贝加尔湖至我国北方内蒙古则为气旋式距平, 冷暖空气在此辐合, 造成我国北方地区夏季降水异常偏多。北方降水偏多, 反映了从南到北的水汽输送强, 水汽一方面是由于偏北副高西北侧的气流所携带, 另一方面是由异常偏强的东亚夏季风输送而至。

根据张庆云等 (2003) 的定义, 计算得到 2012 年的东亚夏季风指数为 1.62, 位列 1951~2012 年近 62 年中的第三位, 仅次于 1985 年 (1.80) 和 1972 年 (1.72)。然而东亚夏季风最强的 5 年, 中国夏季降水差异显著: 1985 年华北北部和东北降水偏多, 1972 年全国大旱仅西北地区及其他少数地区降水偏多, 2012 年整个北方降水异常偏多, 2004 年黄河中下游降水偏多, 1978 年黄河中上游和华北

降水偏多。由此可见, 东亚夏季风异常偏强时, 中国夏季主雨带落区也不尽相同, 这是由于东亚夏季风环流系统关键成员的不同配置所致。事实上, 主雨带是由冷暖空气长期对峙形成, 副高和东亚夏季风等反映了中低纬的暖湿气流的强弱和路径, 中高纬的阻高和东北冷涡等则反映了冷空气的强弱和路径。因此, 需要通过东亚夏季风环流系统关键成员的异常特征及相互配置进行分析, 来解释 2012 年夏季北方洪涝的机理。

5 2012 年夏季北方洪涝的成因

由图 1a 可见, 2012 年我国夏季降水主要集中在 36°N 以北, 因此以 36°N 为界将我国划分为北方和南方, 分别计算 1951~2012 年全国、北方、南方以及西北东部地区 (2012 年夏季降水中心区: 36°N 以北, 92°E~112°E) 平均的夏季总降水量及其对应的距平百分率, 结果如图 5 所示。全国 160 站夏季总降水 62 年平均为 409 mm, 2012 年为 421 mm, 位列第 18 位, 偏多 2.8%; 南方 93 站夏季总降水平均为 524 mm, 2012 年为 525 mm, 位列第 25 位, 偏多 0.2%, 与多年平均基本持平; 北方 67 站夏季总降水平均为 250 mm, 2012 年为 276 mm, 位列第 14 位, 偏多 10.2%, 且为 1998 年之后的近 14 年中最多的一年; 而西北东部 25 站总降水 62 年平均为 150 mm, 2012 年为 200 mm, 位列第 6 位, 偏多 33.3%, 为 1979 年之后的近 34 年中最多的一年。

图 6 为北方地区平均的夏季逐日降水演变图 (考虑到 105°E 以东为季风区, 以此分为东西两部分)。由图 6 可见, 夏季整个北方地区平均降水超过 5 mm 的有 5 次过程, 分别为 6 月 14~16 日、6 月 26~30 日、7 月 10~12 日、7 月 21 日至 8 月 6 日、8 月 29~30 日, 其中第四次过程持续时间最长、影响范围最广、降水量最大。105°E 以东的北方地区平均降水的逐日演变与整个北方地区平均降水逐日演变一致, 105°E 以西的北方地区平均降水的高峰区早于整个北方和 105°E 以东。

极端干旱和洪涝这些重大的气候异常事件均是受到东亚夏季风的影响而产生 (黄荣辉等, 2006), 但东亚夏季风各子系统自身的异常差异, 各子系统之间的不同配置, 东亚夏季风与中高纬系统的配置形势等又会造成相同气候背景下不同区域的旱涝分布 (贾小龙等, 2011)。因而, 详细分析各年夏

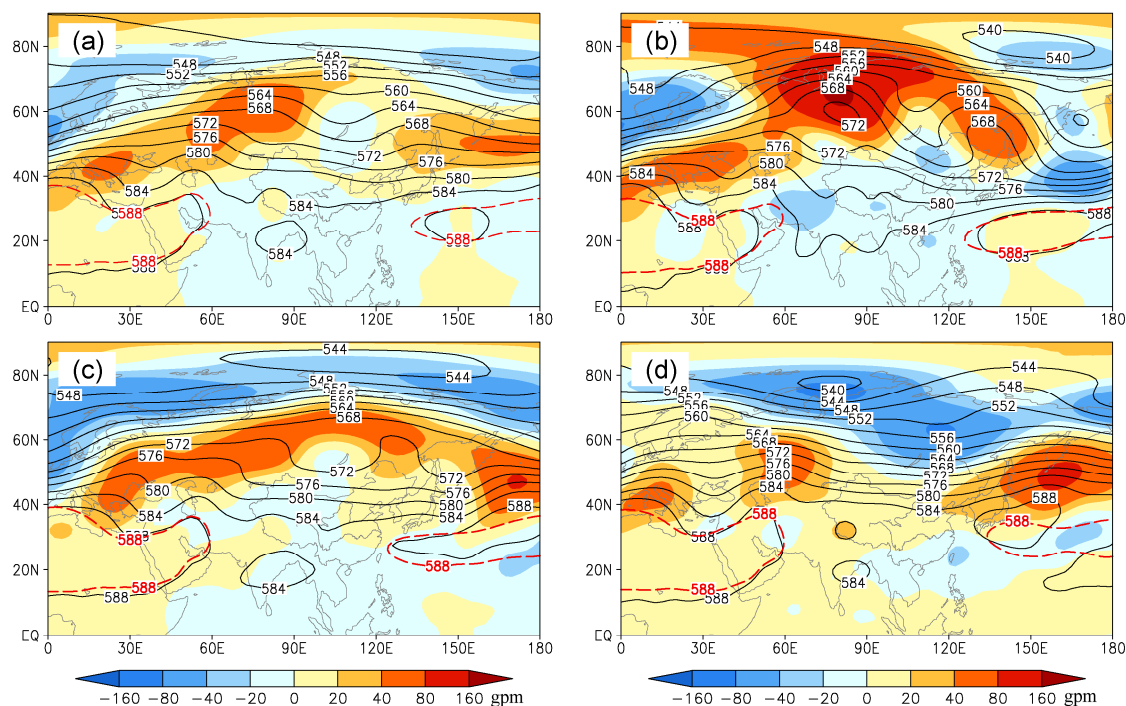


图3 2012年夏季500 hPa位势高度(黑色曲线:高度场,单位: dagpm;红色虚线:气候态588 dagpm)及其距平场(阴影,单位: gpm): (a)夏季; (b)6月; (c)7月; (d)8月

Fig. 3 The distribution of 500-hPa geopotential height (black line: geopotential height, units: dagpm; red dashed line: 588 dagpm for climatic states) and its anomalies (shading) in (a) summer, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug of 2012

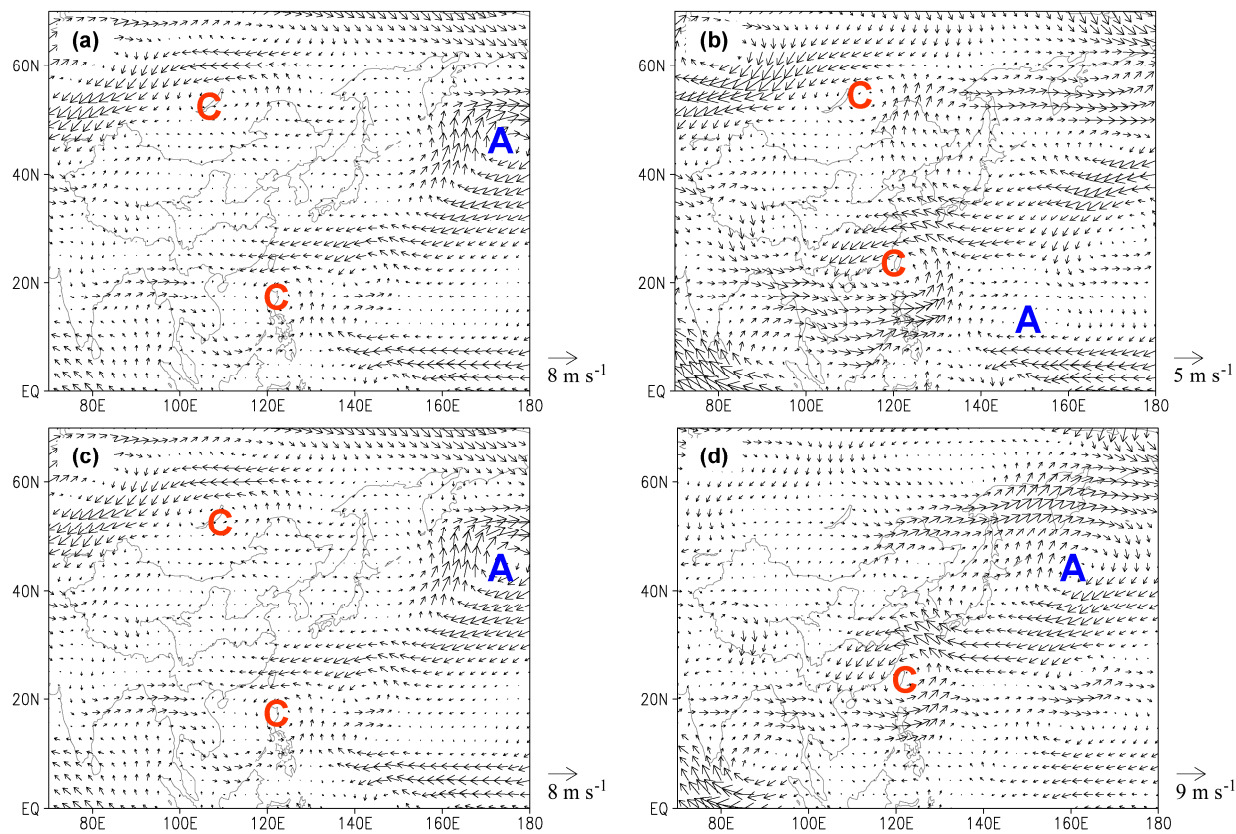


图4 2012年850 hPa距平风场(单位: m s^{-1}): (a)夏季; (b)6月; (c)7月; (d)8月

Fig. 4 The distribution of 850-hPa wind anomalies in (a) summer, (b) Jun, (c) Jul, and (d) Aug of 2012

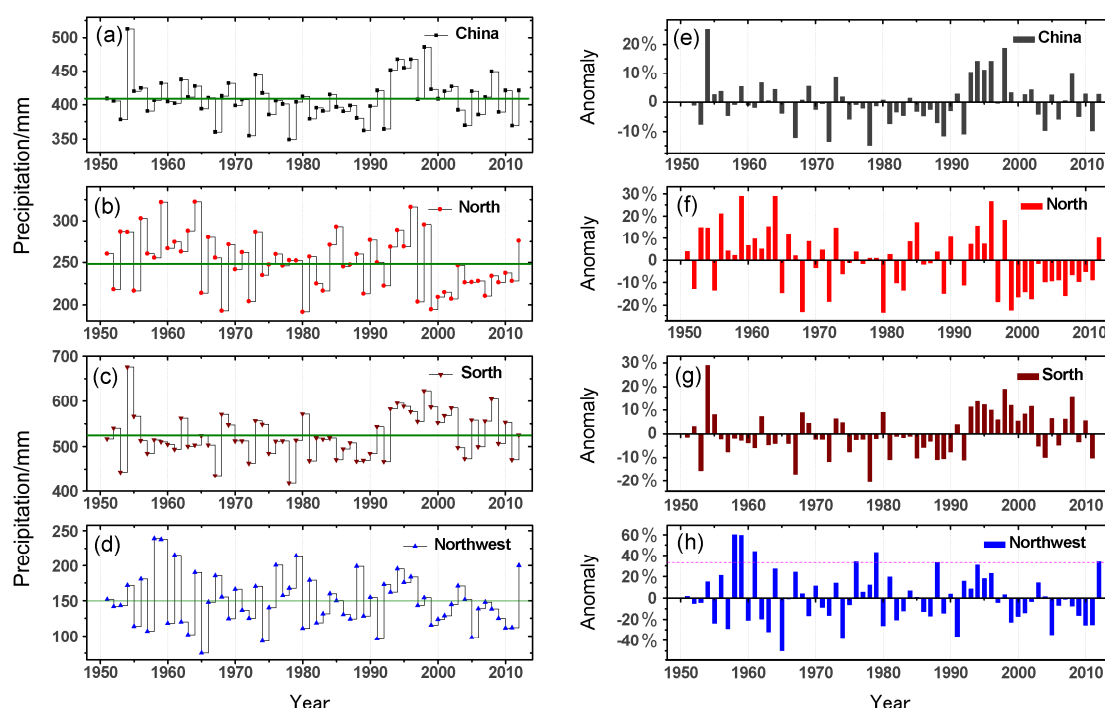


图 5 1951~2012 年夏季降水量 (a-d) 及其距平百分率 (e-h) 年际变化: (a, e) 全国; (b, f) 北方; (c, g) 南方; (d, h) 西北东部

Fig. 5 The interannual variations of (a-d) summer precipitation and (e-h) its anomaly percentage in (a, e) China, (b, f) northern China, (c, g) southern China, and (d, h) eastern Northwest China, respectively

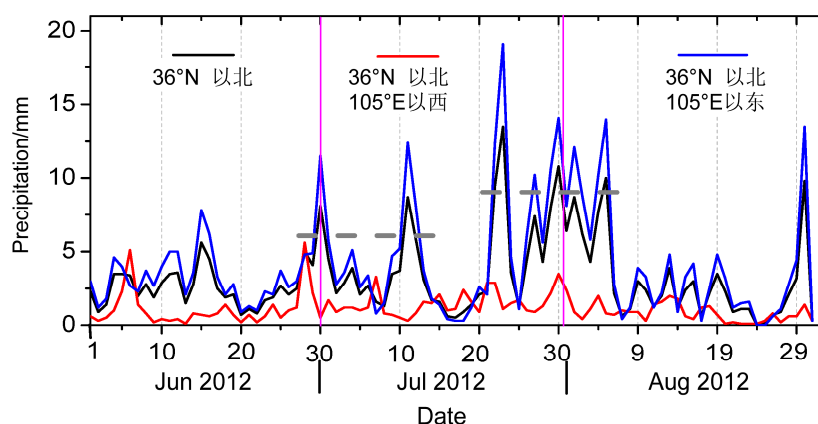


图 6 2012 年夏季我国北方地区平均降水量时间演变 (黑线: 36°N 以北; 红线: 36°N 以北 105°E 以西; 蓝线: 36°N 以北 105°E 以东; 单位: mm)

Fig. 6 The time evolution of the average precipitation in northern China in the summer of 2012 (black line: north of 36°N; red line: north of 36°N and west of 105°E; blue line: north of 36°N and east of 105°E)

季的气候异常特征和可能成因对于监测和预测很有必要。近半个多世纪以来, 国内外诸多研究表明东亚夏季风系统的关键成员: 阻高 (Elliott and Smith, 1949; 陶诗言等, 1958; Wang, 1992; 张培忠和杨素兰, 1996; 张庆云和陶诗言, 1998; 李维京, 1999)、东北冷涡 (孙力等, 2000; 何金海等, 2006; 廉毅等, 2010; 杨涵洧等, 2012)、东亚夏季风 (丁一汇, 1994; 施能等, 1996; 廉毅等, 2004)、副高 (吴国雄等, 2003; 赵俊虎等, 2012),

这四个天气气候系统均对我国夏季气候有着重要影响。阻高的形成、维持以及崩溃, 增强了中高纬的经向环流, 有利于冷空气的南下; 东北冷涡活动一方面导致东北地区降水偏多气温偏低, 另一方面也有利于冷空气频繁南下影响我国南方地区; 东亚夏季风把大量的暖、湿空气从海洋输送到我国大陆地区, 为持续性强降水提供了充足的水汽供应; 副高的东、西进退及南、北向摆动对降水量的多寡和雨带位置有重要影响。主雨带的形成是阻高、东

北冷涡、东亚夏季风和副高的最佳配置(或锁定),四个系统的不同配置影响着夏季冷暖气流的对峙位置,进而导致夏季主雨带位置发生差异。基于此,图 7 给出了 2012 年夏季这四个系统的配置特征和北方洪涝的天气学模型。

由 500 hPa 位势高度场可见阻塞形势主要出现在 $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 区域(图 3),对 500 hPa 位势高度场作 $40^{\circ}\text{N}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 平均的经度—时间剖面来分析阻塞形势在 2012 年夏季随时间的演变过程(图 7a)。2012 年夏季欧亚中高纬阻高强盛:6 月初,乌拉尔山地区首次出现阻塞高压(乌阻),但仅持续数日;6 月中旬至 8 月底,乌拉尔山地区出现 5 次阻塞高压过程,活动十分频繁,尤其是第四次过程从 7 月下旬持续至 8 月中旬;贝加尔湖也有几次阻塞高压过程(贝阻),但均持续时间较短;鄂霍次克海地区出现了 3 次阻塞高压过程(鄂阻),分别是 6 月下旬、7 月中下旬和 8 月上旬。由图 7a 和 f 对比可见,阻高活动阶段北方降水量也增加。

2012 年夏季东北冷涡活动频繁(图 7b)。其中 6 月,共发生两次冷涡活动,分别是 6 月 7~14 日和 6 月 18~23 日,活动日数达 14 天;7 月东北冷涡活动最为频繁,共发生 5 次冷涡活动,分别是 7 月 1~4 日、8~10 日、12~18 日、21~24 日、28~30 日,活动日数达 20 天。6~7 月东北冷涡路径偏西,主要出现在我国内蒙古东部及其以北地区,冷涡活动一方面导致东北地区降水偏多气温偏低,另一方面也有利于冷空气频繁南下影响我国南方地区。冷空气南下与西南季风带来的充沛水汽交汇,导致 7 月以来我国西北中部及北部、华北大部、黄淮地区普遍降水偏多。8 月东北冷涡频次较常年偏少,共有两次冷涡过程,分别是 4~9 日和 8~10 日;东北冷涡频次偏少是 8 月以来东北地区降水偏少的主要原因之一。

根据以往的研究可知,夏季欧亚中高纬阻高强盛和东北冷涡活跃,均有利于长江流域降水偏多(张庆云和陶诗言,1998;何金海等,2006;封国林等,2012)。然而 2012 年却是长江流域降水偏少而北方降水偏多,主要是因为 2012 年东亚夏季风异常偏强,同时副高偏北,导致冷暖空气对峙于 40°N 附近(图 7c)。

2012 年东亚夏季风整体偏强,阶段性变化显著。从东亚夏季风指数逐日演变图可见(图 7d),整个 6 月除 22~23 日外,其他时间都异常偏强,7

月中上旬季风指数处于正常状态,7 月中下旬至 8 月上旬,季风指数异常偏强。6 月中旬至 7 月中旬,季风涌稳定在 $20^{\circ}\text{N}\sim 30^{\circ}\text{N}$,并在 6 月下旬和 7 月中旬有两次北进过程;7 月下旬至 8 月上旬,季风涌向北推进并维持在 $30^{\circ}\text{N}\sim 40^{\circ}\text{N}$,最北影响达 50°N (图 7e)。季风涌北进的几个阶段中一次次的脉动把大量的水汽输送至我国北方地区,与中高纬南下的冷空气相遇对峙,造成北方地区持续性强降水(图 7f)。

由于受到前期 La Niña 事件影响,2012 年夏季副高强度偏弱,位置偏北偏东。6 月中上旬,副高主体正常偏南,6 月底副高主体转成北抬,并于 6 月 26 日跃过 20°N (图 7g);上旬和下旬前期偏东,中旬和下旬末有两次西伸(图 7h)。7 月,副高主体位置在 11~13 日及 19~20 日经历两次南撤活动,但 21 日以后副高主体位置较气候态持续偏北达 3°N 以上;月内副高西伸过程和东退交织进行。8 月上旬前期副高主体位置延续 7 月后期明显偏北态势,上旬末副高体零散,主体位置有所南落,中旬副高有所调整,但主体位置较常年偏南,下旬副高主体再次南落;中上旬副高略偏东,第 4 候副高北抬过程中强劲西伸,与大陆高压打通,控制我国川西高原以东地区,第 5 候副高继续维持在日本及其东南海域上空,强度偏强。副高偏北阶段,我国北方降水也偏多,降水量还与其西伸密切相关(图 7f)。

总体而言,2012 年夏季阻高、冷涡、东亚夏季风和副高这四个系统都较为异常,尤其是 7 月下旬至 8 月上旬这一阶段,四个系统同时活跃,中高纬的冷空气与低纬季风和副高带来的水汽于我国北方地区长时间对峙,造成我国北方大范围长时间的暴雨,导致整个夏季北方降水异常偏多,并引发了严重的洪涝灾害。8 月下旬虽然也有阻高和冷涡活动,但此时东亚夏季风已进入强弩之末,同时副高也南撤,导致我国北方降水减少。

此外,西风带处于极地和北大西洋地区与东亚季风区之间,在一定意义上控制着东亚季风的北界,对我国季风区夏季的气候也有重要影响(屈文君等,2004)。刘萍和彭梅香(2000)对 1997 年汛期环流形势的分析表明,1997 年汛期 500hPa 中纬度地区盛行纬向环流,西风带冷空气路径偏北、偏弱,盛夏黄河流域先后受贝加尔湖阻塞高压和青藏高原高压控制,导致盛夏期间黄河流域出现了持续

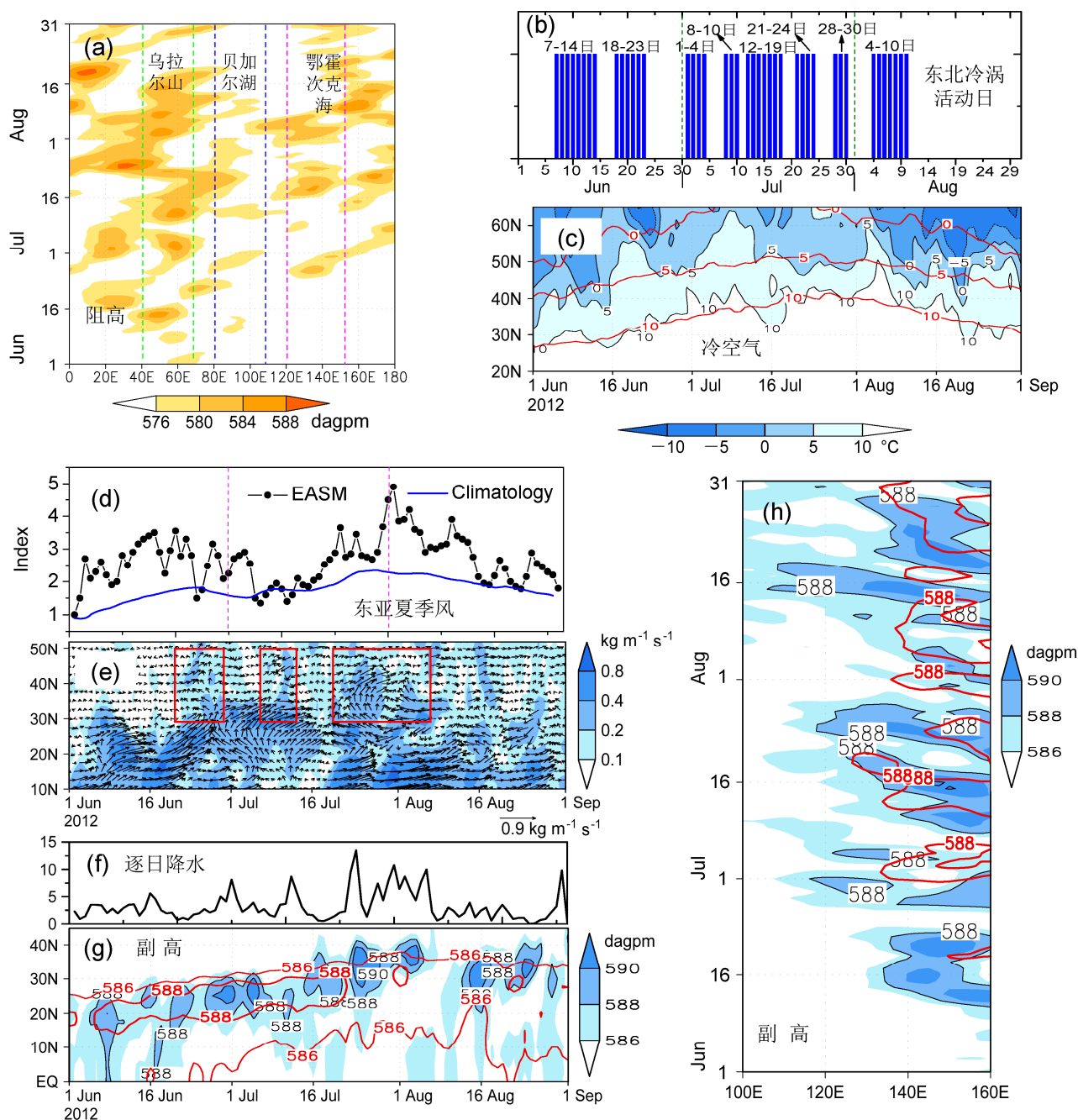


图 7 2012 年北方洪涝的天气学模型: (a) 500 hPa 位势高度 40°N~60°N 平均的 6~8 月经度—时间剖面; (b) 东北冷涡活动日 (直方图表示东北冷涡存在, 根据 NCC 检测绘制); (c) 105°E~125°E 平均的 700 hPa 温度的时间—纬度剖面 (阴影区温度 ≤ 10°C, 红色曲线为气候态, 等值线间隔 5°C); (d) 东亚季风逐日指数 (黑点为逐日指数, 蓝色曲线为气候态, 来自 NCC); (e) 105°E~125°E 平均的季风涌随时间的演变, 箭头表示整层 (1000 hPa 至 300 hPa) 季风的水汽通量 ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), 阴影区水汽通量 > 0.1 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$; (f) 北方 (36°N 以北) 平均逐日降水演变 (单位: mm); (g)、(h) 分别为 6~8 月 500 hPa 位势高度 (单位: dagpm) 120°E~140°E 平均的纬度—时间剖面 and 20°N~35°N 平均的经度—时间剖面 (红色曲线为气候态)

Fig. 7 The synoptic model of floods in northern China in the summer of 2012: (a) Time-longitude section of daily 500-hPa geopotential height along 40°N–60°N; (b) activity dates of Northeast China cold vortex (histogram indicates the presence of Northeast China cold vortex, drawn according to NCC observations); (c) time-latitude section of daily 700-hPa air temperature along 105°E–125°E (shading: temperature ≤ 10°C; the red curve is the climate state, contour interval is 5°C); (d) daily East Asian summer monsoon index (black spots: daily index; blue curve: climate state) (from NCC); (e) time-latitude section of daily monsoon surge along 105°E–125°E (arrows: vapor flux for the whole layer from 1000 hPa to 300 hPa; shading: vapor flux > 0.1 $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$); (f) time evolution of the average precipitation (mm) in northern China (north of 36°N) in the summer of 2012; (g) time-latitude section along 120°E–140°E and (h) time-longitude section along 20°N–35°N for daily 500-hPa geopotential height (dagpm) (the red curve is the climate state)

性严重干旱。而 2012 年与 1997 年恰好相反, 500 hPa 中纬度地区盛行经向环流 (图 3), 黄河流域及其以北受低压控制, 夏季降水异常偏多。西风带作为北大西洋气候区和东亚季风区的纽带, 对东亚夏季风、高纬环流 (阻高等)、副高等都有调制作用。因此, 西风带对于东亚季风气候具有和索马里急流同样重要的意义, 它的变化同样会影响中国季风区降水的分布, 然而目前这方面的研究还比较欠缺。本文从东亚夏季风环流系统的几个关键系统入手, 分析了其相互配置及对 2012 年夏季降水的影响, 由于文章篇幅有限, 对西风带的研究及其对 2012 年夏季北方降水异常的影响, 将另文给出详细分析。

6 与最佳相似年和最佳相反年的对比分析

为了进一步分析 2012 年夏季降水异常的原因及年代际的影响, 选取 2012 年夏季旱涝分布的最佳相似年和最佳相反年, 对比 2012 年与最佳相似年和最佳相反年的前期至同期关键海温区海温演变及同期东亚夏季风环流系统的关键成员演变特征的异同。

6.1 最佳相似年和最佳相反年的选取

预报评分 (Predictive Score, PS) 和空间距平相关系数 (Anomaly Correlation Coefficient, ACC) 是短期气候预测中常用的两项评估指标, 其中 PS 主要体现了在预报区域内降水的异常分布特征, ACC 则反映了两个距平场空间分布上的一致程度 (陈桂英和赵振国, 1998)。

假设将 1951~2011 年夏季降水作为 2012 年的 61 个预测结果, 便可计算得到 61 个预测结果的 PS 和 ACC。表 2 给出了分别以 PS 和 ACC 为选取标准时得到的前三个相似年和前三个相反年。由表 2 可见, PS 最大的三年分别为 1959 年、1981 年和 1985 年, 最小的三年为 1980 年、1986 年和 1968 年; ACC 最大的三年分别为 1979 年、1993 年和 1981 年, 最小的三年分别为 2009 年、1986 年和 1980 年。因此, 若以 PS 选取, 最佳相似年为 1959 年, 最佳相反年为 1980 年; 若以 ACC 选取, 最佳相似年为 1979 年, 最佳相反年为 2009 年。由各年夏季降水距平百分率分布图可见 (图略), 1979 年东北和江南降水偏少, 与 2012 年相反, 因此选取 1959 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相似年; 2009

年华北南部和东北北部降水偏多而长江中游降水偏少, 与 2012 年一致, 因此选取 1980 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相反年。

表 2 2012 年的最佳相似年和最佳相反年的选取

Table 2 The selection of the best similar years and opposite years to 2012

		年份	PS	ACC
以 PS 排序	PS 最高 3 年	1959	79	0.09
		1981	76	0.27
		1985	75	0.20
	PS 最低 3 年	1980	50	-0.24
		1986	52	-0.26
		1968	56	-0.04
以 ACC 排序	ACC 最高 3 年	1979	68	0.42
		1993	72	0.31
		1981	76	0.27
	ACC 最低 3 年	2009	65	-0.30
		1986	52	-0.26
		1980	50	-0.24

6.2 2012 年与最佳相似年和最佳相反年的对比分析

图 8 给出了 1959 年、1980 年和 2012 年前冬、春季和夏季海表温度距平的对比。由图可见, 1959 年前冬北太平洋海温呈西北负距平东南正距平的模态 (图 8a), 春季和前冬分布相似 (图 8b), 夏季中东太平洋发展为异常冷海温 (图 8c), 即从前冬至夏季赤道太平洋从暖水向冷水过渡, 而北印度洋海温一直维持偏冷状态。1980 年前冬至夏季的海温演变与 1959 年大体相似, 中东太平洋前冬偏暖, 但距平小于 0.5°C , 没有达到 El Niño 的标准 (图 8d), 春季暖海温区域缩小 (图 8e), 夏季整体处于正常偏冷状态 (图 8f)。而 2012 年前冬北太平洋及北印度洋海温的整体异常分布与 1959 年和 1980 年正好相反, 中东太平洋偏冷处于 La Niña 状态, 西北太平洋异常偏暖 (图 8g), 春季中东太平洋冷海温区域缩小 (图 8h), 夏季冷海温区域进一步缩小, 且东太平洋已进入暖海温状态, 即从前冬至夏季赤道太平洋从冷水向暖水过渡, 而北印度洋海温一直维持偏暖状态 (图 8i)。

图 9 给出了 1959、1980 和 2012 年各自的上一年 1 月至当年 9 月的 Niño1.2 和 Niño3.4 逐月指数。1958 年 1 月到 1959 年 9 月和 1979 年 1 月到 1980 年 9 月两个时段 Niño1.2 指数趋势一致, 呈弱的正相关, 与 2011 年 1 月到 2012 年 9 月呈反向变化 (图 9a); 1958 年 1 月到 1959 年 9 月和 1979 年 1 月到 1980 年 9 月两个时段 Niño3.4 指数均与 2011 年 1

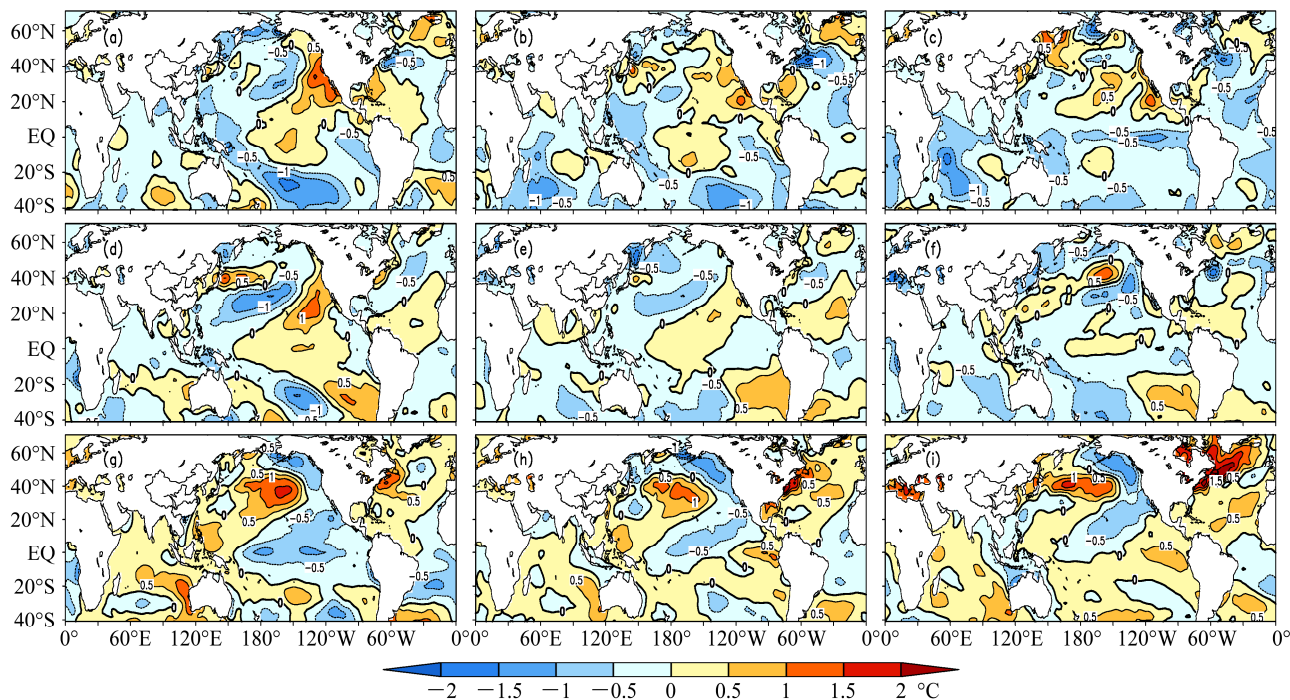


图 8 1959 年 (a-c)、1980 年 (d-f) 和 2012 年 (g-i) 海表温度距平 (°C): (a, d, g) 前冬; (b, e, h) 春季; (c, f, i) 夏季

Fig. 8 The distributions of SST anomalies (°C) in (a, d, g) pre-winter, (b, e, h) spring, (c, f, i) summer of (a-c) 1959, (d-f) 1980, and (g-i) 2012, respectively

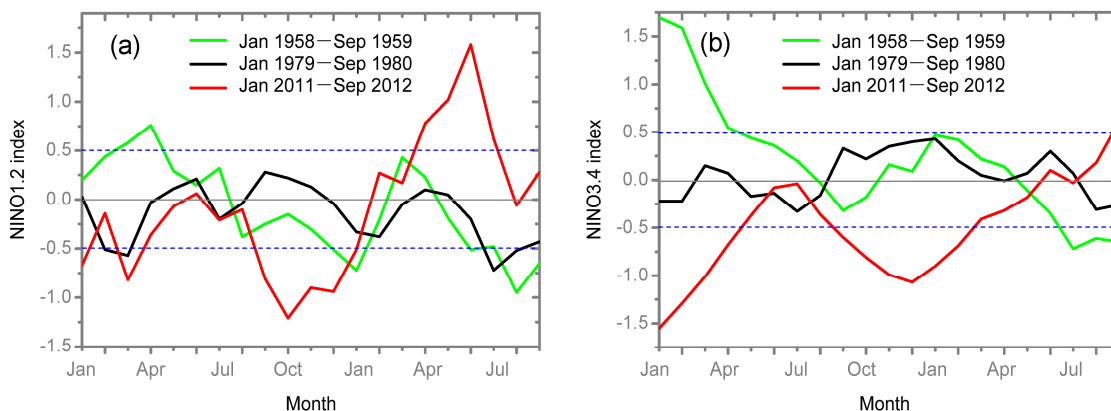


图 9 逐月 (a) Niño 和 (b) Niño3.4 指数

Fig. 9 The monthly (a) Niño1.2 and (b) Niño3.4 indexes

月到 2012 年 9 月呈明显反向变化 (图 9b), 相关系数分别为 -0.78 和 -0.35 。

表 3 给出了 1959 年、1980 年和 2012 年东亚夏季风环流系统关键成员的特征指数。由东亚夏季风 (张庆云等, 2003)、副高 (来自 NCC 的 74 项环流指数)、阻高 (赵振国, 1999) 和 6~7 月东北冷涡强度 (何金海等, 2006) 这四个指数对比可见, 三年东亚夏季风环流系统关键成员差异显著。首先, 1959 年和 1980 年东亚夏季风指数分别为 -1.10 和 -1.74 , 属于夏季风偏弱年, 尤其是 1980 年东亚

夏季风异常偏弱 (仅次于 1998 年), 而 2012 年东亚夏季风异常偏强 (第三)。1959 年夏季副高整体偏弱、脊线偏南、西伸脊点偏西, 但总体异常不明显; 1980 年夏季副高强度偏强、脊线异常偏南、西伸脊点偏西; 2012 年夏季副高强度异常偏弱, 且偏北偏东。其次, 三年夏季中高纬的阻高和东北冷涡差异显著。由乌阻、贝阻和鄂阻 6~8 月逐月强度指数可见: 1959 年仅 8 月出现鄂阻; 1980 年 7 月出现乌阻和鄂阻的双阻形势, 8 月调整为贝阻和鄂阻; 2012 年 6 月和 7 月均为三阻形态, 8 月为乌阻。

表 3 东亚夏季风环流系统关键成员特征指数

Table 3 Characteristic exponents of key members of the East Asian summer monsoon system

年份	东亚夏季 风指数	副高指数			乌阻指数			贝阻指数			鄂阻指数			6~7 月东北 冷涡指数
		强度	脊线	西伸脊点	6 月	7 月	8 月	6 月	7 月	8 月	6 月	7 月	8 月	
1959 年	-1.10*	-17	-0.5	-1	-1.2*	-1.4*	-2.1*	-0.6	-1.6	-1.5*	-0.1	-1.3*	1.2*	-0.34
1980 年	-1.74*	12	-2.0*	-8	0.1	1.4*	-0.6	0.3	0.2	2.0*	0	1.4*	2.2*	0.34
2012 年	1.62*	-30*	1.0	10*	1.6*	1.3*	1.6*	1.7*	1.3*	-0.2	1.9*	1.2*	0	-0.03

注：副高三个指数为距平，上标*表示超过一倍标准差

1959 年和 1980 年 6~7 月的东北冷涡强度均没有出现显著异常，2012 年 6~7 月的东北冷涡强度指数虽较小，但东北冷涡路径偏西，在我国内蒙古东部及其以北地区活动异常频繁。

由以上 3 年东亚夏季风环流系统关键成员特征的对比可见，1959 年各系统异常不明显，而 1980 年和 2012 年各系统各有异常，且呈大体相反的特征。其中 1980 年中高纬阻高强盛，有利于冷空气南下，同时东亚夏季风异常偏弱、副高异常偏南，导致冷暖空气对峙于长江流域，造成长江流域洪涝；而 2012 年中高纬阻高同样也盛行，同时东北冷涡也频繁活动，表明北方冷势力强盛，但由于东亚夏季风异常偏强、副高偏北，暖空气北上，冷暖空气辐合于我国北方地区，造成北方洪涝。

综上所述，从夏季旱涝分布的相似程度来看，1959 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相似年，虽然 1959 年前冬至夏季海温及东亚夏季风环流系统关键成员异常特征不明显，但是和 2012 年相比却呈现出了近似相反的特征；而 1980 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相反年，海温以及东亚夏季风环流系统关键成员异常特征明显，并且和 2012 年呈显著的反向特征。这些观测事实体现了我国夏季降水与海温及东亚夏季风环流系统关键成员这些主要影响因子之间关系随年代际发生了变化。已有研究也表明：ENSO 与我国夏季降水年际变化之间关系具有不稳定性，同样是 El Niño 或 La Niña 事件，在不同年代背景下其对我国夏季降水的影响具有不同的表现（宗海锋等，2010）；东亚夏季风的年代际变率对我国夏季降水也有不同的影响，在夏季风弱的阶段（1976~2000 年）相对强的季风与强季风阶段（1951~1975 年）相对更强的季风，对我国夏季降水分布的影响不同（郭其蕴等，2003）。因此在制作夏季降水预报尤其是通过前期影响因子选取相似年时，需要考虑因子与降水之间关系的年代际变化。

7 结论和讨论

本文通过对 2012 年我国夏季降水的实况和预测进行简要回顾，对海温和大气环流状况进行分析，初步探讨了 2012 年夏季我国北方降水异常偏多的成因，并对比分析了 2012 年夏季降水与其最佳相似年和最佳相反年的海温演变与东亚夏季风环流系统主要成员的差异。主要结论概括如下：

（1）2012 年夏季我国降水大体呈北方涝、长江旱的分布，主雨带位于黄河流域及其以北，降水异常偏多的区域主要位于西北大部、内蒙古和环渤海湾，黄淮与江淮地区等降水偏少，江汉至淮河上游一带干旱严重；预测的主雨带位于华北南部至淮河，较实况偏南；

（2）2012 年夏季欧亚中高纬地区阻塞高压强盛，同时东北冷涡活动频繁，中高纬 500 hPa 高度场从西至东呈“十一十”的分布，西风带经向环流发展，这种环流形势没有造成长江洪涝的主要原因是，夏季阻高、冷涡、东亚夏季风和副高这四个系统都较为异常，尤其是 7 月下旬至 8 月上旬这一阶段，四个系统同时活跃，中高纬的冷空气与低纬季风和副高带来的水汽于我国北方地区长时间对峙，造成我国北方大范围持续性强降水，导致整个夏季北方地区降水异常偏多，并引发了严重的洪涝灾害；

（3）从夏季旱涝分布特征来看，1959 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相似年，虽然海温及东亚夏季风环流系统关键成员异常不明显，但是和 2012 年也呈近似相反的特征；而 1980 年夏季降水作为 2012 年夏季降水的最佳相反年，海温以及东亚夏季风环流系统关键成员异常特征明显，并且和 2012 年呈显著的反向特征，这些观测事实体现了我国夏季降水与海温以及东亚夏季风环流系统关键成员这些主要影响因子之间关系的年代际变化。

夏季汛期降水对国民经济特别是对农业生产影响极大，其中大范围的旱涝气候灾害的影响尤为

严重。汛期降水是政府极为关注的重要问题,也是气象界长期以来研究的热点和难点。因此,深入地研究中国汛期降水的机理,并尽可能提前、准确地预测其旱涝分布对国民经济建设具有重大经济效益和社会效益。本文仅对 2012 年夏季降水的异常成因进行了初步探讨,以期为进一步做好汛期降水预测工作提供一定参考。

参考文献 (References)

- 鲍名, 黄荣辉. 2006. 近 40 年我国暴雨的年代际变化特征 [J]. 大气科学, 30 (6): 1057–1067. Bao Ming, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1057–1067.
- 陈桂英, 赵振国. 1998. 短期气候预测评估方法和业务初估 [J]. 应用气象学报, 9 (2): 178–185. Chen Guiying, Zhao Zhenguo. 1998. Assessment methods of short range climate prediction and their operational application [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 9 (2): 178–185.
- 陈桂英, 张培群, 许力. 2001. 1999 年夏季中国降水南多北少成因初探 [J]. 气候与环境研究, 6 (3): 312–320. Chen Guiying, Zhang Peiqun, Xu Li. 2001. Preliminary studies on the cause of southern flood and northern drought during the summer of 1999 in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 6 (3): 312–320.
- 丑纪范, 徐明. 2001. 短期气候数值预测的进展和前景 [J]. 科学通报, 46(11): 890–895. Chou Jifan, Xu Ming. 2001. Advancement and prospect of short-term numerical climate prediction [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 46(11): 890–895.
- 丁一汇. 1994. 中国的夏季风降雨及其区域特征 [C]//亚洲季风. 北京: 气象出版社, 76–83. Ding Yihui. 1994. Summer monsoon rainfall and its regional characteristics in China [C] //Asian Monsoon (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 76–83.
- Elliott R D, Smith T B. 1949. A study of the effects of large blocking highs on the general circulation in the Northern Hemisphere westerlies [J]. J. Meteor., 6 (2): 67–85.
- 封国林, 杨涵涌, 张世轩, 等. 2012. 2011 年春末夏初长江中下游地区旱涝急转成因初探 [J]. 大气科学, 36 (5): 1009–1026. Feng Guolin, Yang Hanwei, Zhang Shixuan, et al. 2012. A preliminary research on the reason of a sharp turn from drought to flood in the middle and lower reaches of the Yangtze River in late spring and early summer of 2011 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (5): 1009–1026.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2003. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响 [J]. 地理学报, 58 (4): 569–576. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2003. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 569–576.
- 何金海, 吴志伟, 江志红, 等. 2006. 东北冷涡的“气候效应”及其对梅雨的影响 [J]. 科学通报, 51 (23): 2803–2809. He Jinhai, Wu Zhiwei, Jiang Zhihong, et al. 2006. “Climate effect” of the Northeast cold vortex and its influences on Meiyu [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (5): 671–679.
- 黄荣辉, 蔡裕榕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. 大气科学, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 730–743.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 443–457. Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 443–457.
- 贾小龙, 陈丽娟, 龚振淞, 等. 2011. 2010 年海洋和大气环流异常及对中国气候的影响 [J]. 气象, 37 (4): 446–453. Jia Xiaolong, Chen Lijuan, Gong Zhensong, et al. 2011. Anomalies of ocean and atmospheric circulation in 2010 and their impacts on climate in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 37 (4): 446–453.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.
- 李维京. 1999. 1998 年大气环流异常及其对中国气候异常的影响 [J]. 气象, 25 (4): 20–25. Li Weijing. 1999. General atmospheric circulation anomaly in 1998 and their impact on climate anomaly in China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 25 (4): 20–25.
- 廉毅, 沈柏竹, 高枫亭. 2004. 关于确定东亚夏季风强度指数的探讨 [J]. 气象学报, 62 (6): 782–789. Lian Yi, Shen Baizhu, Gao Zongting. 2004. An exploration on the determination of East Asia summer monsoon index [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (6): 782–789.
- 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, Buhe 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.
- 刘萍, 彭梅香. 2000. 1997 年汛期黄河流域干旱气象成因分析 [J]. 河南气象, (3): 22–24. Liu Ping, Peng Meixiang. 2000. Analysis on meteorological contributing factors of arid during flood season in 1997 in the Yellow River basin [J]. He'nan Meteorology (in Chinese), (3): 22–24.
- Lin Zhaohui, Wang Huijun, Zhou Guangqing. 2004. Recent advances in dynamical extra-seasonal to annual climate prediction at IAP/CAS [J]. Adv. Atmos. Sci., 21 (3): 456–466.
- 屈文君, 张小曳, 王丹, 等. 2004. 西风带研究的重要意义 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 24(1): 125–132. Qu Wenjun, Zhang Xiaoye, Wang Dan, et al. 2004. The important significance of westerly wind study [J]. Marine Geology & Quaternary Geology (in Chinese), 24 (1): 125–132.
- Ren Baohua, Lu Riyu, Xiao Ziniu. 2004. A possible linkage in the inter-decadal variability of rainfall over North China and the Sahel [J]. Adv. Atmos. Sci., 21 (5): 699–707.
- 施能, 朱乾根, 吴彬贵. 1996. 近 40 年东亚夏季风及我国夏季大尺度天气气候异常 [J]. 大气科学, 20 (5): 575–583. Shi Neng, Zhu Qian'gen, Wu Bingui. 1996. The East Asian summer monsoon in relation to summer large scale weather-climate anomaly in China for last 40 years

- [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20 (5): 575–583.
- 孙诚, 李建平. 2012. 2009/2010 年北半球冬季异常低温分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 259–273. Sun Cheng, Li Jianping. 2012. Analysis of anomalously low surface air temperature in the Northern Hemisphere during 2009/2010 winter [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (3): 259–273.
- 孙力, 安刚, 廉毅, 等. 2000. 夏季东北冷涡持续性活动及其大气环流异常特征的分析 [J]. 气象学报, 58 (1): 704–714. Sun Li, An Gang, Lian Yi, et al. 2000. A study of the persistent activity of Northeast cold vortex in summer and its general circulation anomaly characteristics [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (1): 704–714.
- Smith T M, Reynolds R W. 2003. Extended reconstruction of global sea surface temperatures based on COADS data (1854–1997) [J]. J. Climate, 16: 1495–1510.
- 谭桂容, 孙照渤, 朱伟军, 等. 2009. 2007 年夏季降水异常的成因及预测 [J]. 大气科学学报, 32 (3): 436–442. Tan Guirong, Sun Zhaobo, Zhu Weijun, et al. 2009. Causes and prediction of summer rainfall anomaly distribution in 2007 [J]. Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (3): 436–442.
- 陶诗言, 赵煜佳, 陈晓敏. 1958. 东亚的梅雨期与亚洲上空大气环流季节变化的关系 [J]. 气象学报, 29 (2): 119–134. Tao Shiyan, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. 1958. The association between Mei-yu in East Asia and seasonal variation of the general circulation of atmosphere over Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (2): 119–134.
- 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998. 1998 年长江流域洪涝灾害的气候背景和大尺度环流条件 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 290–299. Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. 1998. The great floods in the Changjiang River valley in 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 290–299.
- 王会军. 2001. 1998 年夏季全球大气环流异常的预测研究. 地球物理学报, 44 (6): 729–735. Wang Huijun. 2001. A study on prediction of the anomalous atmospheric general circulation in 1998 [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 44 (6): 729–735.
- 王启光, 封国林, 郑志海, 等. 2011. 长江中下游汛期降水优化多因子组合客观定量预测研究 [J]. 大气科学, 35 (2): 287–297. Wang Qiguang, Feng Guolin, Zheng Zhihai, et al. 2011. The study of the objective and quantifiable forecasting based on optimal factors combinations in precipitation of mid-lower reaches of the Yangtze River in summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 287–297.
- 吴国雄, 丑纪范, 刘屹岷, 等. 2003. 副热带高压研究进展及展望 [J]. 大气科学, 27 (4): 503–517. Wu Guoxiong, Chou Jifan, Liu Yimin, et al. 2003. Review and prospect of the study on the subtropical anticyclone [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 503–517.
- 吴国雄, 李建平, 周天军, 等. 2006. 影响我国短期气候异常的关键区: 亚印太交汇区 [J]. 地球科学进展, 21 (11): 1109–1118. Wu Guoxiong, Li Jianping, Zhou Tianjun, et al. 2006. The key region affecting the short-term climate variations in China: The joining area of Asia and Indian-Pacific Ocean [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 21 (11): 1109–1118.
- Wang Y. 1992. Effects of blocking anticyclones in Eurasia in the rainy season (Meiyu/Baiu season) [J]. J. Meteor. Soc. Japan., 70: 929–951.
- Xiong Kaiguo, Feng Guolin, Huang Jianping, et al. 2011. Analogue-dynamical prediction of monsoon precipitation in Northeast China based on dynamic and optimal configuration of multiple predictors [J]. Acta Meteor. Sin., 25 (3): 316–326.
- 杨涵洧, 封国林, 沈柏竹, 等. 2012. 中国夏季东北冷涡强度的量化分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 487–494. Yang Hanwei, Feng Guolin, Shen Baizhu, et al. 2012. The quantitative research on cold vortex in summer over Northeast China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 487–494.
- 杨杰, 赵俊虎, 郑志海, 等. 2012. 华北汛期降水多因子相似订正方案与预报试验 [J]. 大气科学, 36 (1): 11–22. Yang Jie, Zhao Junhu, Zheng Zhihai, et al. 2012. Estimating the prediction errors of dynamical climate model on the basis of prophase key factors in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (1): 11–22.
- Yu Shuqiu, Lin Xuechun. 2007. Characteristics of two general circulation patterns during floods over the Changjiang-Huaihe River valley [J]. Acta Meteorologica Sinica, 21 (3): 366–375.
- 张培忠, 杨素兰. 1996. 阻塞高压活动的气候变化及其对中国某些地区旱涝的影响 [J]. 气象学报, 54 (5): 633–640. Zhang Peizhong, Yang Sulan. 1996. The climate change of blocking high and their effects on drought and flood of some region of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 54 (5): 633–640.
- 张庆云, 陶诗言. 1998. 亚洲中高纬度环流对东亚夏季降水的影响 [J]. 气象学报, 56 (2): 199–211. Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 1998. Influence of Asian mid-high latitude circulation on East Asian summer rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 56 (2): 199–211.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. 气象学报, 61 (5): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (5): 559–568.
- 赵俊虎, 封国林, 杨杰, 等. 2012. 夏季西太平洋副热带高压的不同类型与中国汛期大尺度旱涝的分布 [J]. 气象学报, 70 (5): 1021–1031. Zhao Junhu, Feng Guolin, Yang Jie, et al. 2012. Analysis of the distribution of the large-scale drought/flood of summer in China under different types of the western Pacific subtropical high [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (5): 1021–1031.
- 赵振国. 1999. 中国夏季旱涝及环境场 [M]. 北京: 气象出版社, 68–72. Zhao Zhenguo. 1999. Drought/Flood and Environment Field of Summer in China (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 68–72.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 1981. 天气学原理与方法 [M]. 北京: 气象出版社, 257–261. Zhu Qian'gen, Lin Jinrui, Shou Shaowen. 1981. Principles and Methods of Weather (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 257–261.
- 宗海锋, 陈烈庭, 张庆云. 2010. ENSO 与中国夏季降水年际变化关系的不稳定性特征 [J]. 大气科学, 34 (1): 184–192. Zong Haifeng, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2010. The instability of the interannual relationship between ENSO and the summer rainfall in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 184–192.