

陈栋, 黄荣辉, 陈际龙. 2015. 我国夏季暴雨气候学的研究进展与科学问题 [J]. 气候与环境研究, 20 (4): 477–490. Chen Dong, Huang Ronghui, Chen Jilong. 2015. Recent progress and prospective scientific problems concerning climatological research on summer heavy rainfall in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (4): 477–490, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15038.

我国夏季暴雨气候学的研究进展与科学问题

陈栋^{1,2} 黄荣辉¹ 陈际龙¹

¹ 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心, 北京 100190

² 中国科学院大学地球科学学院, 北京 100049

摘 要 我国夏季暴雨频发并导致洪涝灾害, 严重影响着社会和经济的发展。基于对我国夏季降水和暴雨天气学的大量研究, 从气候学的角度综述了我国夏季暴雨的研究进展, 特别是关于我国暴雨的年际和年代际变化及趋势、与暴雨发生相关联的大尺度环流特征及年际和年代际变化成因以及全球气候变暖背景下今后我国夏季暴雨的演变趋势等方面的主要研究进展。此外, 还指出了我国夏季暴雨气候学亟待进一步研究的若干科学问题。

关键词 夏季暴雨 极端降水 趋势 气候学 进展

文章编号 1006-9585 (2015) 04-0477-14

中图分类号 P466

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.15038

Recent Progress and Prospective Scientific Problems Concerning Climatological Research on Summer Heavy Rainfall in China

CHEN Dong^{1,2}, HUANG Ronghui¹, and CHEN Jilong¹

¹ Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

² Institute of Earth Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Frequent heavy rainfall (HR) can cause flood disasters in summer, which seriously affect the development of society and the economy in China. Based on a large number of studies on summer precipitation and synoptic characteristics of summer HR in China, the main advancements in summer HR research, from the climatological standpoint, are summarized. In particular, progress in studying certain aspects such as HR-related interannual and interdecadal variations and changing trends, the characteristics of associated large-scale circulations and their causes, and the evolutionary tendency under global warming, are reviewed. In addition, this paper also highlights some scientific problems relating to the climatology of summer HR over China that require further research.

Keywords Summer heavy rainfall, Extreme precipitation, Trend, Climatology, Research progress

1 引言

我国幅员辽阔, 东部及东南部毗邻太平洋, 西南临近孟加拉湾, 西部为“世界屋脊”青藏高原, 地

处东亚季风区, 受季风以及地理位置、地形地貌等因素的影响, 是世界上暴雨洪涝灾害发生频繁而严重的国家之一。据统计, 我国气象灾害造成的经济损失约占我国自然灾害总损失的 71%, 而其中由暴雨导致的洪涝灾害仅次于干旱灾害 (叶笃正和黄荣

收稿日期 2015-03-02; 网络预出版日期 2015-04-14

资助项目 国家重点基础研究发展规划项目 2013CB430201, 国家自然科学基金项目 41375065、41375082、41230527, 海峡两岸合作基金项目 414611664005

作者简介 陈栋, 男, 1976 年出生, 博士研究生, 主要从事暴雨气候学研究。E-mail: chendong@mail.iap.ac.cn

通讯作者 陈际龙, E-mail: cjl@mail.iap.ac.cn

辉, 1996; 黄荣辉等, 2005)。

我国夏季暴雨受东亚夏季风的影响, 具有突发性、频发性和持续性的特点, 往往导致严重的洪涝灾害, 危及人民的生命财产安全, 并造成严重的国民经济损失。如 1998 年副热带高压长期稳定在华南, 导致了长江流域发生了多次持续性暴雨, 酿成了暴雨洪水, 汛期全国因洪涝而死亡达 3000 多人, 造成直接经济损失 2600 多亿元 (黄荣辉等, 1998; 陶诗言等, 1998)。并且, 我国东南沿海每年平均约 7~8 个台风登陆, 伴随暴雨灾害, 每年平均造成 250 多亿元的经济损失和重大人员伤亡 (黄荣辉和陈光华, 2007; 黄荣辉和王磊, 2010; 冯涛等, 2013)。此外, 华西暴雨也是我国夏季的典型暴雨类型, 位于长江中、上游和青藏高原东侧的四川东部、重庆和贵州地区, 在西南低涡和高原低涡 (切变线) 的作用下及大尺度环流的配合下, 极易发生暴雨强降水事件 (陈栋等, 2007)。由此可见, 针对我国夏季暴雨的天气学和气候学研究具有重要的科学和社会意义, 不仅能为暴雨预报和防灾减灾提供科学依据, 而且也是应对在全球气候变化背景下极端天气事件发生的迫切所需。

关于我国暴雨天气学已有大量研究, 特别是陶诗言 (1980) 对于我国暴雨的类型和发生的环流特征做了系统总结。相对于我国夏季暴雨天气学研究来说, 我国夏季暴雨的气候学研究较少, 尤其是其年际和年代际变化特征及其成因机理的研究还不多。随着全球气候变化的深入研究, 暴雨等极端事件对人类生产和生活造成的影响逐渐凸显, 我国暴雨的气候学特征及其变化研究也得到了更多的重视和发展。本文正是基于此背景下, 侧重于我国夏季暴雨气候学的研究进行综述, 特别是综述了有关我国暴雨的定义、暴雨的年际和年代际变化及趋势, 暴雨 (特别是持续性暴雨) 发生的大尺度环流型、暴雨发生年际和年代际变化的成因及全球变暖背景下暴雨的演变趋势等的研究进展。此外, 本文还提出当前关于我国暴雨气候学亟需研究的几个问题。

2 有关我国暴雨和极端降水的定义

暴雨既是极端降水又是小概率事件, 是由天气尺度以下的中小尺度系统造成, 因此, 目前暴雨的气候态及年际和年代际变化比较难于研究。并且, 我国暴雨具有强的区域性特征。我国夏季暴雨发生

的特点可概括为: 东部多, 西部少; 沿海地区多, 内陆地区少 (黄荣辉等, 2006b), 其时空分布的气候特征难以通过整体来描述。此外, 暴雨是降水的一种极端形式, 气候学的研究很难区分两者间的差异。为了研究暴雨的年际和年代际变化, 因此对于暴雨这种极端的降水事件必须要有一个定义。依据当前的一些研究, 有以下两种定义:

第一类, 根据降水阈值进行划分的非参数方法来定义。我国暴雨的定义主要参照气象部门规定: 24 h 累积降水量 50~99 mm 为暴雨, 100~199 mm 为大暴雨, 200 mm 及其以上为特大暴雨; 而美国通常规定日降水量大于 50.8 mm (2 inches) 为暴雨, 大于 101.6 mm (4 inches) 为大暴雨。此外, 也有考虑区域性气候差异的相对指标法, 即根据区域降水观测站的日降水气候值, 采用超过某一百分位阈值的降水事件定义为暴雨或极端降水事件 (翟盘茂等, 1999; Frich et al., 2002)。2003 年, 世界气候研究计划 (WCRP) 的研究子计划 “气候变化与可预测性研究计划” (CLIVAR) 的 “气候变化探测、监控和指标专家组” (ETCCDMI) 总结了 27 个关于极值的气候变化指标用以分析和比较包括极端降水在内的极端气候事件的异常 (Kiktev et al., 2003)。

第二类, 使用降水统计极值概率分布的参数化方法来定义。这种方法根据统计学原理, 极端气候事件可看作分布于 “尾部” 的 “小概率事件”, 可以通过拟合降水的分布来定义极端降水事件。例如, Groisman et al. (1999) 使用 Gamma 分布拟合逐日降水量来定义极端降水, 并研究几乎全球一半地区的强降水的变化。Solow and Moore (2000) 利用泊松分布 (Poisson distribution) 研究不连续飓风极端降水发生的频数来定义飓风暴雨。此外, 还有应用广义极值 (Generalized Extreme Value, GEV) 分布和广义线性模型 (Generalized Linear Model, GLM) (Coles, 2001; Nadarajah, 2005; Kao and Ganguly, 2011) 来定义暴雨。

上述两种定义各有优缺点, 因此如何使得暴雨的定义既简单又实用, 这还是值得进一步深入研究的问题。

3 关于我国夏季暴雨的年际和年代际变化特征及演变趋势的研究

受东亚夏季风的影响, 我国暴雨具有季节性和

区域性特征，它主要发生在 5~8 月，其中 6~8 月最多，分布在华北、长江和淮河流域以及华南 3 个纬向带上（陶诗言，1980；Tao and Ding，1981）。并且，发生在我国长江中、下游及江淮流域的梅雨锋上的暴雨也会影响韩国和日本，导致韩国和日本暴雨强降水事件的发生（Matsumoto and Takahashi，1999）。此外，依据鲍名（2007）的研究，我国持续性暴雨多发生在长江中、下游地区、华南、四川中东部、黄淮地区和华北东部。

我国夏季降水具有显著的年际和年代际变化特征，而暴雨（特别是持续性暴雨）发生的频数和强度的变化对于降水的气候异常贡献是很大的。因此，与我国降水具有显著的年际和年代际变化一样，我国暴雨发生有明显的年际和年代际变化。正因为如此，关于我国夏季暴雨的年际和年代际变化特征的研究近年来受到重视，并取得了重要的研究进展。

3.1 我国夏季暴雨的年际和年代际变化特征

我国东部夏季暴雨（特别是持续性暴雨）发生的年际变化基本上与洪涝灾害发生的年际变化一致，它具有准两年周期的变化（黄荣辉等，2006a）；并且，我国东部夏季暴雨造成的洪涝灾害和暴雨少的干旱灾害在空间分布上存在着经向“三极子”和“偶极子”两种模态（黄荣辉等，2006b；黄荣辉等，2012）。

我国夏季暴雨与降水有不可分割的联系，近些年来，对于我国夏季降水的年代际变化已有不少研究。陈际龙和黄荣辉（2008）指出：我国降水在 20 世纪 70 年代末的年代际变化与亚洲夏季风水汽输送的年代际减弱和西北太平洋地区水汽输送异常相关联；并且，Liu et al.（2011）和黄荣辉等（2011，2013）指出我国夏季降水在 20 世纪 70 年代末期、90 年代初期和 90 年代后期存在 3 次显著的年代际跃变，特别是我国东部夏季降水在 20 世纪 90 年代末期发生了显著的年代际变化，降水异常的主模态由“三极型”向“偶极型”转变。

与降水的年代际变化一样，我国暴雨发生有很大的年代际变化。鲍名和黄荣辉（2006）全面分析近 40 年我国夏季暴雨发生的年代际变化，结果表明：20 世纪 60 年代华北、黄淮、长江中游和华南地区暴雨日偏多；在 20 世纪 70 年代华北东部、黄淮、长江中游地区暴雨日仍偏多，而华南地区暴雨日开始减少；在 20 世纪 80 年代长江中、下游地区

和淮河流域暴雨日显著增多，而华北地区暴雨日明显减少，华南地区暴雨日继续偏少；在 20 世纪 90 年代长江中、下游和淮河流域继续偏多，华南地区暴雨日开始偏多，而华北地区暴雨日继续偏少。

最近，陈栋等（2015）也分析了近 50 多年我国东部夏季暴雨分布的年代际跃变特征，结果表明，我国夏季暴雨的发生日数（简称频数）和暴雨量占夏季降水总量的比例（简称占比）在 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初发生了显著的年代际变异。如图 1 所示，在 20 世纪 70 年代末以前，暴雨频数分布表现为江南和华南地区总体偏多、江淮流域和四川盆地偏少、华北和河套地区偏多，即呈现经向“三极子”异常分布型；从 20 世纪 70 年代末至 20 世纪 90 年代初，暴雨频数跃变为反相的经向“三极子”异常分布型，即江南和华南地区偏少、江淮流域和四川盆地偏多、而华北和河套地区偏少；而 20 世纪 90 年代初以后，暴雨频数分布表现为江南和华南地区显著增多、而北方河套至华北一带持续偏少，逐渐形成经向“偶极子”异常分布型，并导致近十多年我国夏季“南涝北旱”的整体格局。陈栋等（2015）的研究还指出，暴雨占比与暴雨频数的年代际跃变类同但并不完全一致，既说明暴雨频数的年代际变异对夏季降水总量变异的重要性，同时表明暴雨与降水的年代际演变存在一定差异，有必要区分讨论研究。

除了上述研究，Yang et al.（2013）根据广义极值（GEV）研究了季节极端降水的变化，他们的研究也表明了自 1980 年后我国夏季暴雨呈现偶极子型分布，极端降水呈现南多北少，因而导致“南涝北旱”的气候分布。Ning and Qian（2009）也分析了华南夏季暴雨的年代际变化特征，发现 20 世纪 90 年代初华南夏季暴雨发生频数增加。此外，还有一些研究揭示了我国夏季暴雨的年代际变化存在明显的地区差异，尤其是暴雨频发性和暴雨年代际变化存在区域性差异（Su et al.，2006；王小玲等，2006；Ge et al.，2008）。

我国暴雨除了年际和年代际变化外，还有季节内变化（吴丽姬等，2007）；Wu et al.（2010）使用滑动网格法分析南海夏季风爆发前以及华南前汛期暴雨的气候特征，并指出在 1961~2005 年华南持续性暴雨在南海季风爆发前呈现正态分布，而爆发后其分布几乎反转。不同于我国夏季暴雨和降水，华南前汛期的暴雨与降水已有大量研究（胡亮

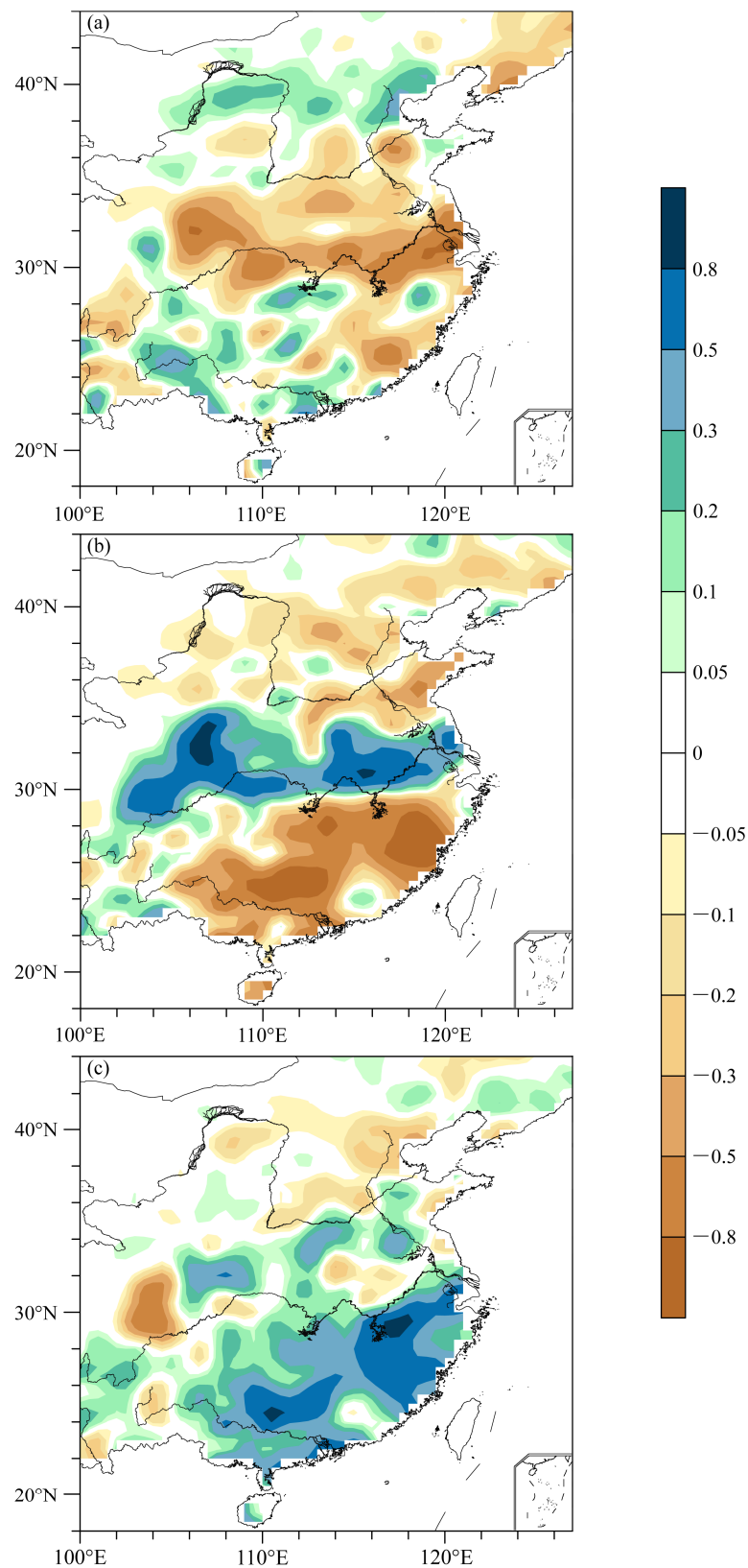


图1 我国东部夏季暴雨发生频数的年代际异常分布: (a) 1965~1979 年; (b) 1980~1991 年; (c) 1992~2001 年

Fig. 1 Distributions of the interdecadal variations of the occurrence frequency of summertime HR (Heavy Rain) in eastern China: (a) 1965~1979; (b) 1980~1991; (c) 1992~2001

等, 2007; 简茂球, 2007; 强学民和杨修群, 2008; Yuan et al., 2010), 这里不作详细介绍。

3.2 我国夏季暴雨的变化趋势

暴雨和极端降水的强度、频数、持续性以及范围是暴雨变化趋势的主要研究指标, 目前利用观测资料针对我国暴雨强度和频数的变化趋势已有不少研究。Groisman et al. (2005) 从全球的角度分析了极端降水事件的强度变化趋势, 结果表明, 全球变暖导致我国南方的极端降水出现强度增大的趋势。Zhai et al. (2005) 利用观测资料分析了 1951~2000 年我国夏季极端降水的总降水量和频数的变化趋势, 指出了中国极端降水量整体无显著变化趋势, 而区域和季节的极端降水存在显著的变化趋势, 特别是西北、西南、华南沿海和长江中下游夏季暴雨发生存在增加趋势。You et al. (2010) 应用与降水有关的 6 个极端气候指数研究了我国夏季 1 日最大降水 (Rx1D) 和 5 日最大降水 (Rx5D) 的变化, 结果也表明了无显著的变化趋势, 而暴雨日数存在显著的增加趋势, 特别是长江流域、华南和东北地区。Wang and Zhou (2005) 也利用 1961~2001 年的降水观测资料分析了我国夏季极端降水的变化趋势, 发现降水与暴雨变化趋势具有一致性, 我国东部地区夏季极端降水具有显著的增加趋势。

许多研究表明: 近 50 多年来, 我国夏季降水变化趋势具有显著区域性差异。1956~2000 年, 长江中下游和东南地区年降水量平均增加了 60~130 mm, 西部大部分地区的年降水量也有比较明显的增加, 东北北部和内蒙古大部分地区的年降水量有一定程度的增加, 而华北、西北东部、东北南部等地区年降水量出现下降趋势, 其中黄河、海河、辽河和淮河流域平均年降水量在 1956~2000 年约减少了 50~120 mm (丁一汇等, 2006; 张天宇等, 2007), 这其中暴雨变化对降水量变化趋势有很大贡献。Fu et al. (2013) 通过极端降水指标 (Extreme Precipitation Index, EPI) 的研究, 表明了过去 50 年我国夏季暴雨具有显著的年代际变化趋势特征, 东北、华北和淮河流域暴雨减少, 而长江流域、东南沿海、华南、内蒙古, 西北地区和青藏高原暴雨增多。此外, 还有一些针对我国区域性极端降水变化趋势的研究, Gemmer et al. (2011) 研究了我国华南珠江流域极端降水的变化趋势, 他通过 11 个气候极端事件指数的分析指出珠江流域极端降水

存在季节内变化趋势; Dong et al. (2011) 研究了江淮和黄淮流域夏季极端降水的变化, 并利用广义线性模型 (GLM) 对未来趋势进行预估。Jiang et al. (2013) 对中国西北新疆的极端降水也进行了指数分析, 分析结果表明了北疆和南疆北部存在显著的增加趋势。

相对而言, 当前针对持续性和大范围暴雨的认识相对薄弱, 研究较少。Tang et al. (2006) 对持续性暴雨事件进行定义, 通过组合强度研究了中国夏季持续性暴雨的变化趋势。Zou and Ren (2015) 利用区域极端降水客观识别 (OITREE) 方法 (Ren et al., 2012) 对我国夏季持续性暴雨的强度, 范围和持续性进行了分析, 指出长江中下游和华南北部持续性暴雨存在增多的趋势, 而两广之间和四川北部有减少的趋势。

台风暴雨也是影响我国南方重要的暴雨类型之一, 王咏梅等 (2008) 的研究结果表明, 我国大部分地区的台风导致的强降水显著减少, 特别是受台风影响较多的东南沿海、海南岛、台湾岛和东北南部地区台风导致的强降水有减少的趋势。

4 关于我国夏季暴雨发生的大尺度环流型的研究

我国夏季暴雨是在某些大尺度环流系统的配置 (即环流型) 下发生。虽然每次导致暴雨发生的大尺度环流型多种多样, 但从气候统计的角度看, 导致暴雨 (特别是持续性暴雨) 的发生还是有一定的大尺度环流型。因此, 从气候角度来研究我国夏季暴雨发生的大尺度环流型对于我国暴雨预报具有重要的科学意义。

4.1 夏季暴雨发生的主要大尺度环流系统

大尺度环流条件对暴雨的发生、发展有明显的动力作用, 尤其是 3 d 以上的持续性暴雨发生要受到大尺度环流系统和行星尺度环流系统的影响 (丁一汇, 1994; 陈栋等, 2007), 因而, 我国夏季暴雨的变化与大尺度环流系统的变化有密切的联系。影响我国夏季暴雨的大尺度环流系统主要有: 对流层高层的南亚高压、东亚上空对流层中层的中高纬度扰动和冷空气、西太平洋副热带高压、低层的热带季风涌等 (张顺利等, 2002; 张庆云等, 2008); 根据研究, 我国许多暴雨都是出现在大尺度环流发生显著调整的时期, 特别是中高纬度阻塞型的建立

(张庆云和陶诗言, 1998)、北极涛动强度的变化(龚道溢等, 2002)、南亚高压强度的变化(张琼和吴国雄, 2001; 黄燕燕和钱永甫, 2004)、西太平洋副热带高压的西伸北跳异常(陶诗言和卫捷, 2006)等对触发我国暴雨发生都有很大影响。此外, 研究还表明了对我国暴雨发生、发展产生影响的大尺度环流系统表现出纬向和经向两种形式: 对于经向形式有东亚上空中高纬度扰动所带来的冷空气南下和从孟加拉湾和南海来的西南季风暖湿气流; 而对于纬向形式有西太平洋副热带高压、南亚高压的东西方向移动等(陶诗言等, 1979; 陶诗言, 1980)。

许多研究都表明了我国暴雨具有多尺度系统相互作用的特点。陶诗言等(1979)和陶诗言(1980)指出: 我国暴雨是在几种尺度系统相互作用的情况下发生发展的。不仅台风、中尺度涡旋、西南低涡、东北冷涡等都是直接导致我国暴雨产生和发展的重要天气尺度的环流系统, 而且 α 、 β 中尺度扰动和云团也是直接触发暴雨发生的环流系统; 并且, 不少研究(陶诗言等, 1979; 丁一汇, 1994; 赵思雄, 1998; 张顺利等, 2002)指出: 许多持续性暴雨也是上述天气系统与大尺度的西太平洋副热带高压、中高纬度的阻塞高压等多尺度环流系统相互作用的结果。

4.2 夏季暴雨发生的主要大尺度环流型

近年来, 针对导致暴雨发生的大尺度环流系统配置(即环流型)的研究取得了重要的进展。赵思雄等(1998)分析了 1998 年 7 月长江中、上游地区持续性暴雨发生的大尺度环流型, 表明了 1998 年 7 月欧亚上空中纬度地区环流呈现两脊一槽型, 而东亚夏季风偏弱, 季风前沿停留在长江流域一带, 并形成了东西向的切变线, 从而引发了长江中、上游持续性暴雨。陶诗言和卫捷(2006)指出夏季中国东部暴雨带的变动受到西太平洋副热带高压北跳西伸的调制; 并且, 张庆云和陶诗言(1998)指出了中高纬度环流型对夏季我国强降水, 特别是梅雨锋上暴雨有重要作用。此外, 陶诗言和卫捷(2007)和温之平等(2007)还研究了我国夏季季风涌和热带大气 30~60 d 振荡(Madden-Julian Oscillation, MJO)对我国南方地区致洪暴雨的影响。马音等(2011, 2012)比较分析了淮河和江南梅雨期降水年际变化的大尺度环流背景异同及其与海温之间的关系, 指出中高纬双阻型环流的重要

性。最近, 张庆云和郭恒(2014)对比分析夏季长江和淮河流域异常降水事件对应的大尺度环流型的差异, 指出长江流域梅雨期异常降水偏多年, 东亚副热带高空西风急流加强以及南半球澳大利亚高压、马斯克林高压位置偏东。这些研究都表明了我国东部夏季暴雨(特别是持续性暴雨)的发生不仅与孟加拉湾的西南季风气流有密切关系, 而且与东亚中高纬上空扰动和冷空气活动有关, 并且与东边西太平洋副热带高压也有密切关系。

我国持续性暴雨一般都发生在一些特定的大尺度环流型。鲍名(2007)统计分析了我国夏季 50 年持续性暴雨的大尺度环流型特征, 并提出引起我国东部持续性暴雨有四类大尺度环流型, 它们分别是渤海辽西型、北方经向型、南方锋面型和华南低压型。特别是他提出了淮河流域持续性暴雨往往发生在中高纬度的乌拉尔地区和日本海上空阻塞高压不断发展, 位于华北上空的低压槽很稳定且不断有冷空气南下, 并且西太平洋副热带高压异常稳定, 这种环境系统配置形成了一个东北—西南倾斜的“鞍”型的环流型。Yuan et al. (2012)的分析表明南方持续性暴雨发生的中低层大尺度环流背景主要表现为西伯利亚低压和西太平洋副热带高压两系统间的牵制与配合。陈栋等(2007, 2010)分析研究了我国四川盆地夏季暴雨发生的大尺度环流型特征, 以及“鞍”型大尺度环流配置激发西南低涡的强烈发展过程。结果表明, 造成川东地区暴雨的大尺度环流型是: 欧亚上空中纬度地区是稳定的两槽一脊型, 西部槽位于乌拉尔地区上空, 东部槽位于我国东北上空, 此冷槽南伸到黄淮地区上空; 并且, 西太平洋副热带高压西伸; 此外, 还有从孟加拉湾来的西南气流越过云贵高原进入川东地区。在这种“鞍”型分布的大尺度环流型背景下西南低涡强烈发展, 从而导致了川东地区持续性暴雨的发生。

5 关于暴雨发生年际和年代际变异的动力、热力成因的研究

5.1 我国暴雨发生的动力成因

鉴于我国暴雨造成灾害的严重性, 因此对于暴雨发生的动力成因已有大量的研究。近些年来, 随着观测技术和数值模式的飞速发展, 我国暴雨发生的中小尺度动力过程、动力及热力不稳定机制、大

尺度环流影响等都获得了大量殷实的研究成果 (Gao et al., 1990; 丁一汇, 1994; Gao, 2000; 高守亭等, 2003; 倪允琪和周秀骥, 2004; 倪允琪等, 2006; 丁一汇和张建云, 2009; 赵思雄和孙建华, 2013), 这些研究从中尺度动力学的角度系统诊断分析了中尺度波动、涡旋、梅雨锋和锋生在我国暴雨发生过程中的作用。特别是我国暴雨研究的奠基人陶诗言先生为我国暴雨短期预测和暴雨发生的动力成因及其有关理论的研究做出了杰出的贡献 (陶诗言等, 1958, 1962, 1979; 陶诗言和徐淑英, 1962; 陶诗言, 1977, 1980), 他一系列的研究不仅揭示了暴雨和强对流发生的温湿和动力条件, 而且揭示了暴雨系统的内部热力、动力机制及其三维立体结构。

近年来, 已有一些研究从湿位涡理论来分析大尺度环流系统对暴雨中、小尺度系统作用的动力过程 (Gao, 2000; 高守亭等, 2003)。陈栋等 (2007) 应用湿位涡守恒方程分析研究了“鞍”型大尺度环流系统配置下川东大暴雨发生的动力过程。他们的研究表明: 在这种大尺度环流配置下, 在“鞍”型中心区域上空低层大气有强的暖湿平流, 而高层大气有干空气平流入侵, 这利于垂直对流不稳定发展, 从而使得西南低涡迅速发展, 引发了川东持续性暴雨的发生。

5.2 我国暴雨年际和年代际变异的动力、热力成因

随着我国暴雨气候学的研究, 关于我国暴雨年际和年代际变异的动力、热力成因也陆续开展。我国暴雨发生的年际和年代际变化直接与导致暴雨发生的大尺度环流系统的变异有关。鉴于夏季暴雨与降水的紧密联系, 目前关于我国夏季暴雨年际和年代际变异成因的研究主要局限于夏季降水变异成因的认识上。不少研究表明 20 世纪 70 年代末和 20 世纪 90 年代初我国暴雨发生和夏季降水的年代际变化可能与东亚夏季风 20 世纪 70 年代末的减弱和 20 世纪 90 年代初的增强有关 (Wang, 2001; Liu et al., 2012); 张庆云等 (2003) 也指出长江流域夏季暴雨年代际变化特征与东亚夏季风强弱有关。Li et al. (2012) 利用奇异分解法 (Singular Value Decomposition, SVD) 对我国夏季高温和极端降水的关系进行分析, 发现在 1980~1996 年我国夏季北方高温少而极端降水多, 而 1997 年后出现反转, 长江以南地区高温多而极端降水少, 并指出这与东亚夏季风减弱背景下对流层中高层的环流系统配

置反转有关。

我国夏季降水和暴雨不仅受到东亚季风系统变化的影响, 而且受到全球海陆气相互作用的影响, 特别是受到热带 ENSO 事件 (张人禾, 1999; 陈文等, 2006; Bao and Han, 2009; Wang and Yan, 2009) 和热带西太平洋暖池 (黄荣辉和孙凤英, 1994) 的影响。近年来研究揭示了太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation, PDO) 的周期和位相 (杨修群等, 2004; Zhu et al., 2011) 以及大西洋和印度洋的海气相互作用 (Lu et al., 2006; Xie et al., 2009) 可能对我国东部夏季暴雨变异也有一定影响。Zhou et al. (2009) 发现西太平洋副热带高压在 20 世纪 70 年代末以后出现了显著的西伸异常, 可能影响到我国暴雨的发生, 并指出了印度洋—西太平洋海温异常可能对此有一定影响。

我国暴雨不仅受高原热动力异常的影响 (韦志刚等, 1998; 朱乾根等, 2000; Wang and Bao, 2008), 而且青藏高原的热力强迫也会影响中国夏季暴雨的发生, 张琼和吴国雄 (2001) 分析了受高原热力作用的南亚高压与长江流域大范围旱涝的关系, 发现了南亚高压强度指数与长江流域旱涝具有显著的相关, 并具有一致的年代际变化趋势。Tao and Ding (1981) 研究指出, 我国夏季雨带和暴雨的热力、动力激发都与青藏高原有直接关系, 高原系统的东移导致我国东部暴雨发生。韦志刚等 (1998) 的研究表明了青藏高原积雪的异常导致高原热力状况异常, 从而对我国东部尤其是长江流域洪涝有重要影响。Wang and Bao (2008) 从观测资料分析和模式模拟证明了青藏高原表面温度过去 50 年升高了约 1.8°C , 高原激发的两列 Rossby 波列和等熵面的抬升对其下游我国长江流域的梅雨锋有加强作用。

近年来, 对我国夏季降水年代际变异的内动力成因已有一些研究。黄荣辉等 (2013) 提出东亚对流层上层沿副热带急流传播的“丝绸之路 (Silk Road)”型、沿东亚经向传播的东亚/太平洋 (EAP) 型和沿极锋急流传播的欧亚 (EU) 型遥相关波列的年代际异常导致了我国夏季降水在 20 世纪 90 年代末发生年代际跃变。并且, 黄荣辉等 (2013) 应用热力学方程分析研究了我国东部夏季降水年代际变化的热力成因, 表明: 20 世纪 90 年代末以后, 我国夏季南方暖平流异常加强, 从而引起上升运动加强, 降水增加, 暴雨发生频数增多, 而北方冷平

流异常加强,从而引起下沉运动加强,降水减少。因此,我国在 1999~2010 年期间夏季形成了南涝北旱的降水异常。

台风所带来的暴雨也是影响我国南方的重要暴雨类型(黄荣辉和陈光华, 2007);黄荣辉和王磊(2010)对影响我国的热带气旋和台风的年代际变化和机理进行了深入的研究,指出热带西太平洋暖池热状态和西北太平洋季风槽的年代际异常是西北太平洋台风路径和生成异常的可能机制。

此外,近年来随着暴雨动力学研究的深入,暴雨数值预报得到了很大发展,特别是暴雨数值模式中初始条件和侧边界条件的精细化,网格的嵌套,云物理参数化方案的改进,资料同化等提高了暴雨预报的时效和准确性(宇如聪等, 1994;程麟生和冯伍虎, 2001;孙健和赵平, 2003)。

6 全球气候变暖背景下我国夏季暴雨异常的演变趋势

气候变化与人类的活动密切相关,温室气体、人为气溶胶、土地使用的改变导致了全球气候的增暖,气温上升必然引起全球大气中水汽含量的增加,而最终降水增加则主要体现在极端降水事件上。因此,人类活动影响着全球气候系统,而气候异常又往往以极端事件的形式来体现(Groisman et al., 1999)。在全球增暖背景下,我国夏季暴雨气候学的研究对揭示全球气候变化对我国极端降水事件发生影响过程具有重要的科学意义。

近年来,在全球气候变化背景下,全球极端事件表现出上升的趋势,因而,气候变暖及其对暴雨等极端事件的影响趋势及其机理也得到更多的关注,并且对于暴雨和极端降水事件的检测和归因也成为各国政府关心的议题。2013 年,IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)第五次评估报告(AR5)(Stocker et al., 2013)指出更多的证据表明了自 1950~2010 年全球气温的上升很可能归因为人为强迫所致,它对极端高温影响的证据最为突出,而极端降水次之,热带气旋(台风的变化)较弱。目前的研究认为,全球增暖导致的极端降水显著增加(Kharin et al., 2007, 2013);同时,研究也表明由于能量平衡的制约,全球降水的变化趋势没有极端降水那么显著(Allen and Ingram, 2002)。Lei et al. (2013)利用 HadCM3 模

拟研究了外强迫下 1000 年我国降水的变化,Zhang et al. (2007)分析了 14 个模式资料中人类活动对全球降水分布的影响,指出北半球中纬度降水增加,北半球副热带和热带地区降水减少。

我国经济的高速发展伴随着大量的温室气体的排放,研究表明:大气中温室气体浓度的升高对我国白天气温增暖的贡献达到 89%,而夜晚 95%,北方地区尤为显著(Wen et al., 2013)。温室气体浓度的升高导致全球增暖的直接后果就是全球大气中水汽含量的增加,尤其对于中纬度地区(Willett et al, 2007)。Wang and Gaffen (2001)对我国 20 世纪末地表气温和湿度的变化研究表明,除了与东亚季风有关的季节内变化以外,我国大部分地区的湿度和温度都呈现出显著一致的增加趋势。Min et al. (2011)对北半球观测和模式模拟的极端降水比较分析发现,人为强迫导致北半球极端降水的强度加剧作用显著,我国夏季北方地区极端降水的强度呈现加强的趋势。模式分析也证明了我国夏季极端降水的变化,如 Chen et al. (2012)利用观测资料和耦合环流模式 CGCM(Coupled General Circulation Model)的降水资料,考虑到模式低估降水,采取 30 mm 为暴雨统计阈值,对比研究未来 2081~2100 年相对于 1980~1999 年我国夏季暴雨的变化趋势,结果表明了长江流域暴雨发生频数可能增加 30.9%~56.6%,华南地区暴雨发生频数可能增加 35.9%~50.2%,同时,暴雨强度和占比也存在显著的增加趋势。Chen and Sun (2014)使用 CMIP5(Coupled Model Intercomparison Project Phase 5)分别模拟人为强迫产生 1、2 和 3 °C 增暖状态下我国极端降水的变化,他们提出:增暖 2 °C 后,我国极端降水异常可能显著增加;而达到 3 °C 是,冷事件显著减少,极端强降水事件迅速增加,我国北方的干旱趋势将因此减弱,而西南地区干旱和洪涝都会加剧。Ding et al. (2007)指出:我国东部太阳辐射通量加强,旱涝灾害频数增多和强度加强,至 2050 年,由于温室气体的排放,我国降水很可能会增加 15%~40%,暴雨和极端降水事件也会加剧。

尽管模式模拟都发现了人为强迫对极端降水具有影响,但由于信噪比和模式对极端降水模拟能力较低等原因,全球极端降水的变化趋势及其归因还存在很大的不确定性(Hegerl et al., 2004; Min et al., 2009)。

和归因还亟待进一步发展。

7 需进一步研究的科学问题

鉴于我国夏季暴雨发生的严重性, 并相对于我国夏季降水和暴雨天气学的大量研究成果, 本文仅从气候学的角度回顾了近些年来有关我国暴雨气候学研究的主要进展, 特别是综述了有关暴雨的定义、我国暴雨的年际和年代际变化及趋势、暴雨发生的环流型、暴雨发生的年际和年代际变化成因以及全球变暖背景下暴雨的演变趋势等的研究进展。

(1) 受东亚季风的影响, 我国夏季暴雨的区域性和季节性特征很强, 从气候角度看, 我国暴雨不同地区应有不同定义, 并且由于暴雨过程的移动性和系统性造成其客观定义和统计的复杂性, 因此, 我国各区域暴雨和持续性暴雨如何定义, 应进一步研究。

(2) 我国夏季暴雨多发生在长江中下游、华南、四川中东部、黄淮地区和华北东部, 而在过去的 50 多年间, 我国夏季暴雨在发生频数、强度, 持续性和范围上都发生了显著的变化, 因此, 我国暴雨发生的演变趋势和年代际变化特征及其机理有待于进一步深入研究。

(3) 我国夏季暴雨的发生, 特别是持续性暴雨的发生, 必须配合特定的大尺度环流型, 如南方的低压型环流、长江流域的切变型和锋面型环流以及中高纬阻塞型环流, 特别是引发长江、淮河流域的“鞍”型大尺度环流系统的配置。因而, 从暴雨所对应的大尺度环流型特征来研究我国夏季暴雨的气候异常更有助于揭示气候系统通过大尺度环流型对暴雨发生的调制机理, 在这方面还有待于进一步深入研究。

(4) 多尺度相互作用是引发我国夏季暴雨发生的显著气候特征, 而大尺度环流系统和环流型与我国夏季暴雨发生的年际和年代际变化有着紧密关联。然而, 影响我国夏季暴雨年际和年代际变异的大尺度环流型与天气尺度环流系统相互作用过程及机理仍需进一步深入研究。

(5) 人类的活动影响着全球气候系统, 而气候异常又往往以极端事件的形式来体现。在全球增暖背景下, 我国夏季暴雨气候学的研究对揭示气候变化与极端降水事件两者间的联系和机制具有重要的科学意义, 因此, 从气候学的角度来研究全球变暖背景下我国夏季暴雨异常的演变趋势及其检测

参考文献 (References)

- Allen M R, Ingram W J. 2002. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle [J]. *Nature*, 419 (6903): 224–232, doi: 10.1038/nature01092.
- 鲍名. 2007. 近 50 年我国持续性暴雨的统计分析及其大尺度环流背景 [J]. *大气科学*, 31 (5): 779–792. Bao Ming. 2007. The statistical analysis of the persistent heavy rain in the last 50 years over China and their backgrounds on the large scale circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (5): 779–792.
- 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.
- Bao M, Han R Q. 2009. Delayed impacts of the El Niño episodes in the central Pacific on the summertime climate anomalies of eastern China in 2003 and 2007 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26 (3): 553–563, doi: 10.1007/s00376-009-0553-7.
- 陈栋, 李跃清, 黄荣辉. 2007. 在“鞍”型大尺度环流背景下西南低涡发展的物理过程分析及其对川东暴雨发生的作用 [J]. *大气科学*, 31 (2): 185–201. Chen Dong, Li Yueqing, Hunag Ronghui. 2007. The physical process analyses of the southwest vortex development and its effect on heavy rainfall in eastern Sichuan under the saddle pattern background of large-scale circulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (2): 185–201.
- 陈栋, 顾雷, 蒋兴文. 2010. 1981~2000 年四川夏季暴雨大尺度环流背景特征 [J]. *大气科学学报*, 33 (4): 443–450. Chen Dong, Gu Lei, Jiang Xingwen. 2010. Characteristics of large-scale circulation background of summer heavy rainfall in Sichuan during 1981–2000 [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 443–450.
- 陈栋, 陈际龙, 黄荣辉, 等. 2015. 中国东部夏季暴雨的年代际跃变及其大尺度环流背景 [J]. *大气科学*, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15144. Chen Dong, Chen Jilong, Huang Ronghui, et al. 2015. Interdecadal changes of summertime heavy rainfall in eastern China and their large-scale circulation backgrounds [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1504.15144.
- Chen H P, Sun J Q. 2014. Changes in climate extreme events in China associated with warming [J]. *International Journal of Climatology*, doi: 10.1002/joc.4168.
- Chen H P, Sun J Q, Chen X L, et al. 2012. CGCM projections of heavy rainfall events in China [J]. *International Journal of Climatology*, 32 (3): 441–450, doi: 10.1002/joc.2278.
- 陈际龙, 黄荣辉. 2008. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系 [J]. *地球物理学报*, 51 (2): 352–359. Chen Jilong, Huang Ronghui. 2008. Interannual and interdecadal variations of moisture transport by Asian summer monsoon and their association with droughts or floods in China [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 51 (2):

- 352–359.
- 陈文, 康丽华, 王玘. 2006. 我国夏季降水与全球海温的耦合关系分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 259–269. Chen Wen, Kang Lihua, Wang Ding. 2006. The coupling relationship between summer rainfall in china and global sea surface temperature [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 259–269.
- 程麟生, 冯伍虎. 2001. “987” 突发大暴雨及中尺度低涡结构的分析和数值模拟 [J]. 大气科学, 25 (4): 465–478. Chen Linsheng, Feng Wuhu. 2001. Analyses and numerical simulation on an abrupt heavy rainfall and structure of a mesoscale vortex during July 1998 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (4): 465–478.
- Coles S. 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values[M]. London: Springer-Verlag, 209pp, doi: 10.1007/978-1-4471-3675-0.
- 丁一汇. 1994. 暴雨和中尺度气象学问题 [J]. 气象学报, 52 (3): 274–284. Ding Yihui. 1994. Some aspects of rainstorm and meso-scale meteorology [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 52 (3): 274–284.
- 丁一汇, 张建云. 2009. 暴雨洪涝 [M]. 北京: 气象出版社, 290pp. Ding Yihui, Zhang Jianyun. 2009. Heavy Rainfalls and Floods (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 290pp.
- 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 2006. 气候变化国家评估报告 (I): 中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展, 2 (1): 3–8. Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu, et al. 2006. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2 (1): 3–8.
- Ding Y H, Ren G Y, Zhao Z C, et al. 2007. Detection, causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (6): 954–971, doi: 10.1007/s00376-007-0954-4.
- Dong Q, Chen X, Chen T X. 2011. Characteristics and changes of extreme precipitation in the Yellow–Huaihe and Yangtze–Huaihe Rivers basins, China [J]. J. Climate, 24 (14): 3781–3795, doi: 10.1175/2010JCLI3653.1.
- 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等. 2013. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 364–382. Feng Tao, Huang Ronghui, Chen Guanghua, et al. 2013. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the western North Pacific [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 364–382, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12307.
- Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. 2002. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century [J]. Climate Research, 19 (3): 193–212, doi: 10.3354/cr019193.
- Fu G B, Yu J J, Yu X B, et al. 2013. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009 [J]. J. Hydrol., 487: 48–59, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.021.
- Gao S T. 2000. The instability of the vortex sheet along the shear line[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 17 (4): 525–537, doi: 10.1016/j.jhydrol.2013.02.021.
- Gao S T, Tao S Y, Ding Y H. 1990. The generalized E-P flux of wavemeanflow interactions[J]. Science in China, Series B, 33 (6): 704–715.
- 高守亭, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 618–627. Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 618–627.
- Ge Q S, Guo X F, Zheng J Y, et al. 2008. Meiyu in the middle and lower reaches of the Yangtze River since 1736 [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (1): 107–114, doi: 10.1007/s11434-007-0440-5.
- Gemmer M, Fischer T, Jiang T, et al. 2011. Trends in precipitation extremes in the Zhujiang River basin, South China [J]. J. Climate, 24 (3): 750–761, doi: 10.1175/2010JCLI3717.1.
- 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 2002. 长江流域夏季降水与前期北太平洋涛动的显著相关 [J]. 科学通报, 47 (7): 546–549. Gong Daoyi, Zhu Jinghong, Wang Shaowu. 2002. Significant relationship between spring AO and the summer rainfall along the Yangtze River [J]. Chinese Science Bulletin, 47 (11): 948–951.
- Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, et al. 1999. Changes in the probability of heavy precipitation: Important indicators of climatic change [J]. Climatic Change, 42 (1): 243–283, doi: 10.1023/A:1005432803188.
- Groisman P Y, Knight R W, Easterling D R, et al. 2005. Trends in intense precipitation in the climate record [J]. J. Climate, 18 (9): 1326–1350, doi: 10.1175/JCLI3339.1.
- Hegerl G C, Zwiers F W, Stott P A, et al. 2004. Detectability of anthropogenic changes in annual temperature and precipitation extremes [J]. J. Climate, 17 (19): 3683–3700, doi: 10.1175/1520-0442(2004) 017<3683: DOACIA>2.0.CO;2.
- 胡亮, 何金海, 高守亭. 2007. 华南持续性暴雨的大尺度降水条件分析 [J]. 南京气象学院学报, 30 (3): 345–351. Hu Liang, He Jinhai, Gao Shouting. 2007. An analysis of large-scale condition for persistent heavy rain in South China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (3): 345–351.
- 黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. 大气科学, 18 (2): 141–151. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 18 (2): 141–151.
- 黄荣辉, 陈光华. 2007. 西北太平洋热带气旋移动路径的年际变化及其机理研究 [J]. 气象学报, 65 (5): 683–694. Huang Ronghui, Chen Guanghua. 2007. Research on interannual variations of tracks of tropical cyclones over Northwest Pacific and their physical mechanism [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (5): 683–694.
- 黄荣辉, 王磊. 2010. 台风在我国登陆地点的年际变化及其与夏季东亚/太平洋型遥相关的关系 [J]. 大气科学, 34 (5): 853–864. Huang Ronghui, Wang Lei. 2010. Interannual variation of the landfalling locations of typhoons in China and its association with the summer East Asia/Pacific pattern teleconnection [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 853–864.
- 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 300–313. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 300–313.

- 黄荣辉, 张庆云, 阮水根. 2005. 我国气象灾害的预测预警与科学防灾减灾对策 [M]. 北京: 气象出版社, 148pp. Huang Ronghui, Zhang Qingyun, Ruan Shuigen. 2005. Prediction and Warning of Meteorological Disasters in China and Scientific Decision for the Prevention and Mitigation of These Disasters (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 148pp.
- 黄荣辉, 陈际龙, 黄刚, 等. 2006a. 中国东部夏季降水的准两年周期振荡及其成因 [J]. 大气科学, 30 (4): 545–560. Huang Ronghui, Chen Jilong, Huang Gang, et al. 2006a. The quasi-biennial oscillation of summer monsoon rainfall in China and its cause [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 545–560.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006b. 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. 2006b. 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, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. 大气科学, 35 (4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (4): 589–606.
- 黄荣辉, 陈栋, 刘永. 2012. 中国长江流域洪涝灾害和持续性暴雨的发生特征及成因 [J]. 成都信息工程学院学报, 27 (1): 1–19. Huang Ronghui, Chen Dong, Liu Yong. 2012. Characteristics and causes of the occurrence of flooding disaster and persistent heavy rainfall in the Yangtze River valley of China [J]. Journal of Chengdu University of Information Technology (in Chinese), 27 (1): 1–19.
- 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 2013. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因 [J]. 科学通报, 58 (8): 617–628. Huang Ronghui, Liu Yong, Feng Tao. 2013. Interdecadal change of summer precipitation over Eastern China around the late-1990s and associated circulation anomalies, internal dynamical causes [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (12): 1339–1349.
- 黄燕燕, 钱永甫. 2004. 长江流域、华北降水特征与南亚高压的关系分析 [J]. 高原气象, 23 (1): 68–74. Huang Yanyan, Qian Yongfu. 2004. Relationship between South Asian high and characteristic of precipitation in mid-and lower-Reach of Yangtze River and North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (1): 68–74.
- 简茂球, 陈文, 乔云亭, 等. 2007. 中国汛期月降水量年际异常型的相关性分析 [J]. 热带气象学报, 23 (4): 333–340. Jian Maoqiu, Chen Wen, Qiao Yunting, et al. 2007. Connections of monthly precipitation anomalous patterns in rainy seasons in China [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 23 (4): 333–340.
- Jiang F Q, Hu R J, Wang S P, et al. 2013. Trends of precipitation extremes during 1960–2008 in Xinjiang, the Northwest China [J]. Theor. Appl. Climatol., 111 (1–2): 133–148, doi: 10.1007/s00704-012-0657-3.
- Kao S C, Ganguly A R. 2011. Intensity, duration, and frequency of precipitation extremes under 21st-century warming scenarios [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 116 (D16), doi: 10.1029/2010JD015529.
- Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X B, et al. 2007. Changes in temperature and precipitation extremes in the IPCC ensemble of global coupled model simulations [J]. J. Climate, 20 (8): 1419–1444, doi: 10.1175/JCLI4066.1.
- Kharin V V, Zwiers F W, Zhang X, et al. 2013. Changes in temperature and precipitation extremes in the CMIP5 ensemble [J]. Climatic Change, 119 (2): 345–357, doi: 10.1007/s10584-013-0705-8.
- Kiktev D, Sexton D M H, Alexander L, et al. 2003. Comparison of modeled and observed trends in indices of daily climate extremes [J]. J. Climate, 16 (22): 3560–3571, doi: 10.1175/1520-0442 (2003) 016<3560: COMAOT>2.0.CO;2.
- Lei Y H, Hoskins B, Slingo J. 2013. Natural variability of summer rainfall over China in HadCM3 [J]. Climate Dyn., 42 (1–2): 417–432, doi: 10.1007/s00382-013-1726-8.
- Li J, Dong W J, Yan Z W. 2012. Changes of climate extremes of temperature and precipitation in summer in eastern China associated with changes in atmospheric circulation in East Asia during 1960–2008 [J]. Chinese Science Bulletin, 57 (15): 1856–1861, doi: 10.1007/s11434-012-4989-2.
- Liu H W, Zhou T J, Zhu Y X, et al. 2012. The strengthening East Asia summer monsoon since the early 1990s [J]. Chinese Science Bulletin, 57 (13): 1553–1558, doi: 10.1007/s11434-012-4991-8.
- Liu Y, Huang G, Huang R H. 2011. Inter-decadal variability of summer rainfall in Eastern China detected by the Lepage test [J]. Theor. Appl. Climatol., 106 (3–4): 481–488, doi: 10.1007/s00704-011-0442-8.
- Lu R Y, Dong B W, Ding H. 2006. Impact of the Atlantic multidecadal oscillation on the Asian summer monsoon [J]. Geophys. Res. Lett., 33 (24), doi: 10.1029/2006GL027655.
- 马音, 陈文, 王林. 2011. 中国夏季淮河和江南梅雨期降水异常年际变化的气候背景及其比较 [J]. 气象学报, 69 (2): 334–343. Ma Yin, Chen Wen, Wang Lin. 2011. A comparative study of the interannual variation of summer rainfall anomalies between Huaihe Meiyu season and the Jiangnan Meiyu season and their climate background [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (2): 334–343.
- 马音, 陈文, 冯瑞权, 等. 2012. 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温的关系 [J]. 大气科学, 36 (2): 397–410. Ma Yin, Chen Wen, Fong Soikun, et al. 2012. Interannual and interdecadal variations of precipitation over eastern China during Meiyu season and their relationships with the atmospheric circulation and SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 397–410.
- Matsumoto J, Takahashi K. 1999. Regional differences of daily rainfall characteristics in East Asian summer monsoon season [J]. Geographical review of Japan. Series B, 72 (2): 193–201, doi: 10.4157/grj1984b.72.193.
- Min S K, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2009. Signal detectability in extreme precipitation changes assessed from twentieth century climate simulations [J]. Climate Dyn., 32 (1): 95–111, doi: 10.1007/s00382-008-0376-8.
- Min S K, Zhang X B, Zwiers F W, et al. 2011. Human contribution to more-intense precipitation extremes [J]. Nature, 470 (7334): 378–381, doi: 10.1038/nature09763.
- Nadarajah S. 2005. Extremes of daily rainfall in west central florida [J]. Climatic Change, 69 (2–3): 325–342, doi: 10.1007/s10584-005-1812-y.

- 倪允琪, 周秀骥. 2004. 中国长江中下游梅雨锋暴雨形成机理以及监测与预测理论和方法研究 [J]. 气象学报, 62 (5): 647–662. Ni Yunqi, Zhou Xiuji. 2004. Study for formation mechanism of heavy rainfall within the Meiyu front along the middle and downstream of Yangtze River and theories and methods of their detection and prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 62 (5): 647–662.
- 倪允琪, 周秀骥, 张人禾, 等. 2006. 我国南方暴雨的试验与研究 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 690–704. Ni Yunqi, Zhou Xiuji, Zhang Renhe, et al. 2006. Experiments and studies for heavy rainfall in Southern China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 690–704.
- Ning L, Qian Y F. 2009. Interdecadal change in extreme precipitation over South China and its mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (1): 109–118, doi: 10.1007/s00376-009-0109-x.
- 强学民, 杨修群. 2008. 华南前汛期开始和结束日期的划分 [J]. 地球物理学报, 51 (5): 1333–1345. Qiang Xuemin, Yang Xiuqun. 2008. Onset and end of the first rainy season in south China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 51 (5): 1333–1345.
- Ren F M, Cui D L, Gong Z Q, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events [J]. J. Climate, 25 (20): 7015–7027, doi: 10.1175/JCLI-D-11-00489.1.
- Solow A R, Moore L. 2000. Testing for a trend in a partially incomplete hurricane record [J]. J. Climate, 13 (20): 3696–3699, doi: 10.1175/1520-0442(2000)013<3696:TFATIA>2.0.CO;2.
- Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. 2013. Climate change 2013: The physical science basis [M]// Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge Univ Press, 1535pp.
- Su B D, Jiang T, Jin W B. 2006. Recent trends in observed temperature and precipitation extremes in the Yangtze River basin, China [J]. Theor. Appl. Climatol., 83 (1–4): 139–151, doi: 10.1007/s00704-005-0139-y.
- 孙健, 赵平. 2003. 用 WRF 与 MM5 模拟 1998 年三次暴雨过程的对比如分析 [J]. 气象学报, 61(6): 692–701. Sun Jian, Zhao Ping. 2003. Simulation and analysis of three heavy rainfall processes in 1998 with WRF and MM5 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 692–701.
- Tang Y B, Gan J J, Zhao L, et al. 2006. On the climatology of persistent heavy rainfall events in China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 23 (5): 678–692, doi: 10.1007/s00376-006-0678-x.
- 陶诗言. 1977. 有关暴雨分析预报的一些问题 [J]. 大气科学, 1 (1): 64–72. Tao Shiyen. 1977. Some problems associated with the analysis and forecasting of heavy rainfalls [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 1 (1): 64–72.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 255pp. Tao Shiyen. 1980. Heavy Rainfalls in China (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 255pp.
- 陶诗言, 徐淑英. 1962. 夏季江淮流域持久性旱涝现象的环流特征 [J]. 气象学报, 32 (1): 1–10. Tao Shiyen, Xu Shuying. 1962. Some aspects of the circulation during the periods of the persistent drought and flood in Yantze and Hwai-Ho valleys in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (1): 1–10.
- Tao S Y, Ding Y H. 1981. Observational evidence of the influence of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau on the occurrence of heavy rain and severe convective storms in China [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 62 (1): 23–30, doi: 10.1175/1520-0477(1981)062<0023:OEOTIO>2.0.CO;2.
- 陶诗言, 卫捷. 2006. 再论夏季西太平洋副热带高压的西伸北跳 [J]. 应用气象学报, 17 (5): 513–525. Tao Shiyen, Wei Jie. 2006. The westward, northward advance of the subtropical high over the West Pacific in summer [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (5): 513–525.
- 陶诗言, 卫捷. 2007. 夏季中国南方流域性致洪暴雨与季风涌的关系 [J]. 气象, 33 (3): 10–18. Tao Shiyen, Wei Jie. 2007. Correlation between monsoon surge and heavy rainfall causing flash-flood in Southern China in summer [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (3): 10–18.
- 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 Shiyen, Zhao Yujia, Chen Xiaomin. 1958. The relationship between Mei-Yü in far east and the behaviour of circulation over Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (2): 119–134.
- 陶诗言, 徐淑英, 郭其蕴. 1962. 夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征 [J]. 气象学报, 32 (2): 91–103. Tao Shiyen, Xu Shuying, Guo Qiyun. 1962. The characteristics of the zonal and meridional circulation over tropical and subtropical regions in Eastern Asia in summer [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (2): 91–103.
- 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 1979. 暴雨和强对流天气的研究 [J]. 大气科学, 3 (3): 227–238. Tao Shiyen, Ding Yihui, Zhou Xiaoping. 1979. The present status of the research on rainstorm and severe convective weathers in China [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 3 (3): 227–238.
- 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 Shiyen, 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.
- Wang B, Bao Q, Hoskins B, et al. 2008. Tibetan Plateau warming and precipitation changes in East Asia [J]. Geophys. Res. Lett., 35 (14), doi: 10.1029/2008GL034330.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 18 (3): 376–386, doi: 10.1007/BF02919316.
- Wang J X L, Gaffen D J. 2001. Late-twentieth-century climatology and trends of surface humidity and temperature in China [J]. J. Climate, 14 (13): 2833–2845, doi: 10.1175/1520-0442(2001)014<2833:LTCCAT>2.0.CO;2.
- 王小玲, 王咏梅, 任福民, 等. 2006. 影响中国的台风频数年代际变化趋势: 1951–2004 年 [J]. 气候变化研究进展, 2 (3): 135–138. Wang Xiaoling, Wang Yongmei, Ren Fumin, et al. 2006. Interdecadal variations in frequencies of typhoon affecting China during 1951–2004 [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2 (3): 135–138.
- Wang Y Q, Zhou L. 2005. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961–2001 and the associated changes in large-scale circulation [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (9), doi: 10.1029/2005GL022574.
- Wang Y, Yan Z W. 2009. Trends in seasonal precipitation over China during 1961–2007 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (3): 165–171.
- 王咏梅, 任福民, 李维京, 等. 2008. 中国台风降水的气候特征 [J]. 热带气象学报, 24 (3): 233–238. Wang Yongmei, Ren Fumin, Li Weijing, et

- al. 2008. Climatic characteristics of typhoon precipitation over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 24 (3): 233–238.
- 韦志刚, 罗四维, 董文杰, 等. 1998. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系 [J]. *应用气象学报*, 9 (S1): 39–46. Wei Zhigang, Luo Siwei, Dong Wenjie, et al. 1998. Snow cover data on Qinghai–Xizang Plateau and its correlation with summer rainfall in China [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology* (in Chinese), 9 (S1): 39–46.
- Wen Q Z, Zhang X B, Xu Y, et al. 2013. Detecting human influence on extreme temperatures in China [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 40 (6): 1171–1176, doi: 10.1002/grl.50285.
- 温之平, 董灵英, 吴丽姬, 等. 2007. 大气 30–60d 振荡特征及其与广东持续性强降水的联系 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 46 (5): 98–103. Wen Zhiping, Dong Linying, Wu Liji, et al. 2007. The characteristics of 30–60 day oscillation and its relation to the durative rainstorm in Guangdong [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (in Chinese), 46 (5): 98–103.
- Willett K M, Gillett N P, Jones P D, et al. 2007. Attribution of observed surface humidity changes to human influence [J]. *Nature*, 449 (7163): 710–712, doi: 10.1038/nature06207.
- Wu L J, Huang R H, He H Y, et al. 2010. Synoptic characteristics of heavy rainfall events in pre-monsoon season in South China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 27 (2): 315–327, doi: 10.1007/s00376-009-8219-z.
- 吴丽姬, 温之平, 贺海晏, 等. 2007. 华南前汛期区域持续性暴雨的分布特征及分型 [J]. *中山大学学报 (自然科学版)*, 46 (6): 108–113. Wu Liji, Wen Zhiping, He Haiyan, et al. 2007. The distribution features and patterns of regional durative rainstorm during pre-rainy season over South China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni* (in Chinese), 46 (6): 108–113.
- Xie S P, Hu K M, Hafner J, et al. 2009. Indian Ocean capacitor effect on Indo–western Pacific climate during the summer following El Niño [J]. *J. Climate*, 22 (3): 730–747, doi: 10.1175/2008JCLI2544.1.
- Yang L, Villarini G, Smith J A, et al. 2013. Changes in seasonal maximum daily precipitation in China over the period 1961–2006 [J]. *International Journal of Climatology*, 33 (7): 1646–1657, doi: 10.1002/joc.3539.
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. *大气科学*, 28 (6): 979–992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. 2004. Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (6): 979–992.
- 叶笃正, 黄荣辉. 1996. 长江黄河流域旱涝规律和成因研究 [M]. 济南: 山东科学技术出版社, 387pp. Ye Duzheng, Huang Ronghui. 1996. Research on the Regularity and Cause of Droughts and Floodings in the Yangtze River Valley and the Yellow River Valley (in Chinese) [M]. Ji'nan: Shandong Science and Technology Press, 387pp.
- You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. 2010. Changes in daily climate extremes in China and their connection to the large scale atmospheric circulation during 1961–2003 [J]. *Climate Dyn.*, 36 (11–12): 2399–2417, doi: 10.1007/s00382-009-0735-0.
- 宇如聪, 曾庆存, 彭贵康, 等. 1994. “雅安天漏”研究 II. 数值预报试验 [J]. *大气科学*, 18 (5): 535–551. Yu Rucong, Zeng Qingcun, Peng Guikang, et al. 1994. Research on “Ya-An-Tian-Lou” Part 2: Numerical trial-forecasting[J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 18 (5): 535–551.
- Yuan F, Wei K, Chen W, et al. 2010. Temporal variations of the frontal and monsoon storm rainfall during the first rainy season in South China[J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3 (5): 243–247.
- Yuan F, Chen W, Zhou W. 2012. Analysis of the role played by circulation in the persistent precipitation over South China in June 2010 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 29 (4): 769–781, doi: 10.1007/s00376-012-2018-7.
- 翟盘茂, 任福民, 张强. 1999. 中国降水极值变化趋势检测 [J]. *气象学报*, 57 (2): 208–216. Zhai Panmao, Ren Fumin, Zhang Qiang. 1999. Detection of trends in China's precipitation extremes [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 57 (2): 208–216.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan 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 X B, Zwiers F W., Hegerl G C, et al. 2007. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. *Nature*, 448 (7152): 461–465, doi: 10.1038/nature06025.
- 张琼, 吴国雄. 2001. 长江流域大范围旱涝与南亚高压的关系 [J]. *气象学报*, 59 (5): 569–577. Zhan Qiong, Wu Guoxiong. 2001. The large area flood and drought over Yangtze River valley and its relation to the South Asia high [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 59 (5): 569–577.
- 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, 郭恒. 2014. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究 [J]. *大气科学*, 38 (4): 656–669. Zhang Qingyun, Guo Heng. 2014. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 38 (4): 656–669.
- 张庆云, 陶诗言, 张顺利. 2003. 夏季长江流域暴雨洪涝灾害的天气气候条件 [J]. *大气科学*, 27 (6): 1018–1030. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Zhang Shunli. 2003. The persistent heavy rainfall over the Yangtze River valley and its associations with the circulations over East Asian during Summer [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (6): 1018–1030.
- 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 2008. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展 [J]. *大气科学*, 32 (4): 815–825. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Peng Jingbei. 2008. The studies of meteorological disasters over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 815–825.
- 张人禾. 1999. El Niño 盛期印度夏季风水汽输送在我国华北地区夏季降水异常中的作用 [J]. *高原气象*, 18 (4): 567–574. Zhang Renhe. 1999. The role of indian summer monsoon water vapor transportation on the summer rainfall anomalies in the northern part of China during the El Niño mature phase[J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 18 (4): 567–574.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2002. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件 [J]. *科学通报*, 47 (6): 467–473. Zhang Shunli, Tao Shiyan, Zhang Qingyun, et al. 2002. Multi-scale conditions of the flood-resulting rainstorms in the middle and lower reaches of Yangtze River [J]. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 47 (6): 467–473.
- 张天宇, 孙渤潮, 倪东鸿, 等. 2007. 近 45 a 长江中下游地区夏季降水的区域特征 [J]. *南京气象学院学报*, 30 (4): 530–537. Zhang Tianyu, Sun

- Zhaobo, Ni Donghong, et al. 2007. Regional characteristics of summer precipitation over the mid-lower reaches of Yangtze River during last 45 years [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (4): 530–537.
- 赵思雄. 1998. 中尺度动力学与暴雨等灾害性天气预测理论的研究 [J]. 大气科学, 22 (4): 503–510. Zhao Sixiong. 1998. Mesoscale dynamics and prediction of disaster weather [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 22 (4): 503–510.
- 赵思雄, 孙建华. 2013. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 297–312. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2013. Study on mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 297–312.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 368–381. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 1998. Study of heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 368–381.
- Zhou T J, Yu R C, Zhang J, et al. 2009. Why the western Pacific subtropical high has extended westward since the late 1970s [J]. J. Climate, 22 (8): 2199–2215, doi: 10.1175/2008JCLI2527.1.
- 朱乾根, 盛春岩, 陈敏. 2000. 青藏高原冬季 OLR 年际变化特征及其与我国夏季降水的联系 [J]. 高原气象, 19 (1): 75–83. Zhu Qiagen, Sheng Chunyan, Chen Min. 2000. Winter Qinghai–Xizang Plateau OLR interannual variational features and their relation to China summer rainfall[J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 19 (1): 75–83.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. Climate Dyn., 36 (7–8): 1463–1473, doi: 10.1007/s00382-010-0852-9.
- Zou X K, Ren F M. 2015. Changes in regional heavy rainfall events in China during 1961–2012 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 32 (5): 704–714, doi: 10.1007/s00376-014-4127-y.