

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, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12317. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2013. Study on the mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 297–312.

近年来灾害天气机理和预测研究的进展

赵思雄 孙建华

中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 本文对近年来灾害天气机理和预测的研究成果作了简要的概述, 涉及致洪暴雨、登陆台风、寒潮暴雪、强沙尘暴、高温酷暑等, 紧密结合一些重大的极端天气事件展开分析。近年灾害天气频发, 影响依旧十分严重。灾害天气多涉及各种尺度的系统以及它们之间的相互作用, 加上气候变化, 环流异常, 中尺度系统活跃, 使灾害天气的情况更趋复杂。本文对此作了探讨, 并提出了一些需要面对和思考的问题, 与大家切磋。

关键词 灾害天气 环流异常 多尺度相互作用 预测研究 21 世纪

文章编号 1006–9895(2013)02–0297–16

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12317

Study on Mechanism and Prediction of Disastrous Weathers during Recent Years

ZHAO Sixiong and SUN Jianhua

Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract In this paper, research results on the mechanism and prediction of disastrous weathers, including heavy rainfall causing floods, severe strong rainfall by landfall typhoons, cold waves, heavy snowfall, strong dust storms, and extreme hot events, are briefly presented. Some of the main extreme weathers are mentioned and discussed. Recently, disastrous weathers have been occurring very frequently and causing significant damages. These weathers are associated with multiscale systems and the interactions between them, particularly due to climate changes, general circulation anomalies, and activities of mesoscale systems. Therefore, the mechanism and prediction of disastrous weathers have become more complicated. Nevertheless, the abovementioned related scientific problems are still reviewed in this paper. Moreover, some suggestions are proposed for the future research.

Keywords Disastrous weathers, Circulation anomaly, Multiscale interaction, Prediction research, The 21st century

1 引言

我国是世界上气象灾害影响严重的国家之一, 其中灾害天气的影响占很大的比重, 诸如: 暴雨、台风、寒潮、暴雪、冻雨、沙尘暴及高温酷暑等。进入 21 世纪以来, 气象灾害频发, 造成严重

的生命和财产损失。陶诗言等 (2003) 已对“天气学和天气预报的研究进展”作过综述。本文继此之后, 将对近年来灾害天气研究的进展作一回顾, 主要汇报我们的工作进展, 同时, 也要涉及其他部门的一些结果。限于水平, 可能挂一漏万。灾害天气的研究涉及诸多方面, 本文拟从灾害严重的暴雨入

收稿日期 2012–10–20, 2012–10–29 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41075032, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421401

作者简介 赵思雄, 男, 1940 年生, 研究员, 主要从事灾害天气机理及中尺度气象学研究, E-mail: zhaosx@mail.iap.ac.cn

手,同时对其他的灾害天气亦作一讨论。

2 致洪暴雨及其灾害

我国历史上关于洪水灾害的记载史不绝书。《孟子·滕文公下》说过:“昔者禹抑洪水而平天下”。又据统计,自公元前 206 年西汉立国起至晚清 1840 年的 2046 年中,较大洪水灾害共计 984 次,平均每 2 年左右就发生一次(骆承政和乐嘉祥, 1996)。新中国成立以来,在 1954 年长江大洪水, 1963 年海河洪水及 1975 年河南特大暴雨之后,又经历了 1991、1998 年等江淮流域大洪水,进入 21 世纪以来又经历了 2003、2007 和 2010 年的暴雨和洪水(陶诗言, 1980; 丁一汇, 1993; 赵思雄等, 2004; 谈哲敏和赵思雄, 2010)。暴雨的研究既是一个古老的问题,又是一个崭新的问题。为此,新中国成立以来,尤其是从“七五”到“十一五”期间,国家科技部都列出重大项目,开展专门研究(周秀骥等, 2003; 倪允琪等, 2006)。但由于暴雨的形成机理及其预报是一难题,需要继续突破,要求一代又一代的气象工作者持续不断的拼搏和努力,不敢稍有放松。尽管困难,陶诗言等(2003)的文章仍对暴雨预报未来的新进展寄予厚望。

近年来,对我国东部三条主要雨带的研究又取得了新的进展。江淮流域 2003、2007、2010、2011 年出现了降水明显偏多的情况(赵思雄等, 2004, 2007; 孙建华等, 2004, 2006b; 矫梅燕等, 2004; 张庆云等, 2004; 周玉淑等, 2005; 徐广阔等, 2007; 李博和赵思雄, 2009; Sun et al., 2010)。且在 21 世纪 00 年代雨带由长江跳至淮河流域,而在 21 世纪 10 年代初,又有由淮河退回到长江的趋势,存在着明显的年际和年代际变化。随着冷暖空气的明显交绥,中尺度涡旋变得比较活跃。中尺度涡旋的发生发展一直是中日两国学者研究的热点和关键问题,因为它和强降水密切相关(张凤和赵思雄, 2003; 孙建华等, 2004; Zhang and Zhao, 2004; 董佩明和赵思雄, 2004a, 2004b; 董佩明等, 2006; Sun et al., 2010; Tochimoto and Kawano, 2012)。除了关注到上游的西南低涡(赵思雄和傅慎明, 2007; Fu et al., 2010)外,还注意到在长江中下游,尤其是大别山区也有涡旋频发(于翥, 2012; Fu et al., 2012),最近的研究表明,夏季梅雨锋上的涡旋多数向东移至东海和黄海等航海和国防高度关注区域,或者偏东北移动出海。日本方面的学者更认为,在日本发

展的梅雨锋低压中,有半数以上来源于中国大陆,中国大陆上涡源非常清楚,而且不同季节有较大的差异(Adachi and Kimura, 2007; Geng, 2008)。我国学者已对梅雨期两类中尺度涡旋作了对比研究(傅慎明等, 2012a)。孙建华等(2004)还对梅雨锋中尺度系统的发生发展作了分析。又揭示出即使在不典型的梅雨锋情况下(包括少梅年),只要在一定时段,一定地区条件具备,仍可能有涡旋的发生(在鞍型场背景下),并引发暴雨,2009 年 6 月下旬武汉城区的洪涝即是如此(于翥和赵思雄, 2013)。张立生等(2007)还对非典型梅雨期的暖性切变线引发的暴雨做了研究。针对梅雨期暴雨中心和涡旋易出现在特定的地理位置和对流降水夜间增强的观测事实,研究了地形对降水日变化和落区的影响及机理。Sun and Zhang (2012)的研究表明,由于二级地形与东部平原之间的不均匀加热形成山地—平原热力环流(MPS),夜间热力环流的上升支和增强的低空急流加强了梅雨锋从午夜到早晨的降雨;白天热力环流的下沉支减弱了梅雨锋降雨,夜间降雨的加强会生成中尺度涡旋,中尺度涡旋的东移给梅雨锋东段带来强降雨。孙晶等(2007, 2011)对梅雨期暴雨作了更精细的模拟,并对其中小尺度系统的结构特征作了分析研究,探讨了不同微物理方案对梅雨暴雨过程的影响。随着近年来雷达、卫星以及地面观测网的加密,提供了一些高时空分辨率的资料,对造成暴雨的中尺度系统也开展了一些研究工作。Sun et al. (2005)根据加密观测资料研究给出了一类 β 中尺度对流线的模型,表明在梅雨锋云系中也有中尺度的线状对流,边界层的辐合线是其组织起来的原因之一。梅雨期在高原东部的对流对下游的梅雨锋降水也有影响。Bao et al. (2011)对高原东侧暖季降水的日变化作了探讨,并且揭示了高原对流系统东移影响下游降水的特征。赵玉春等(2012)还对川西高原东坡地形暴雨做了研究。傅慎明等(2010a)和 Fu et al. (2010)的研究认为青藏高原东移对流系统影响下游地区降水存在不同的方式。其中,高原东移对流系统在四川盆地触发西南低涡,西南低涡沿梅雨锋东移沿途引发一系列暴雨,是持续时间最长,波及范围最广的影响方式。通常的情况下,梅雨期的环流型多为单阻型或双阻型,贝加尔湖为槽区,冷空气沿偏西北路径到达江淮。而近年来,尤其是 21 世纪 10 年代初以来,贝加尔湖常出现脊区,冷空

气沿脊的东、西两侧而下，常在我国长江中下游及西部地区引发较多的降水。同时由于中尺度涡旋频发，有时甚至涉及一些支流及小江河等。因此，预报这类降水的难度更大（赵思雄，2011）。

在 21 世纪 00 年代前后，我国华南前汛期仍为多雨期，2005、2006、2008 年皆如此。近年来由于外场试验的开展获得了一批宝贵的资料，从而有可能对华南前汛期的暴雨进行更深入的研究（Zhao et al., 2007），主要涉及锋前暖区暴雨，一些低层的扰动在华南地区自西向东移动，系统并不深厚，甚至引发大暴雨的系统均如此（慕建利等，2008；傅慎明等，2010b），但是低层偏南气流上的扰动很明显，不仅有风向的辐合，而且有很明显的风速辐合（夏茹娣等，2006；夏茹娣和赵思雄，2009）。2008 年开展的外场观测实验收获颇丰，已揭示出暖锋前暖区暴雨不仅涉及西风带的系统，而且涉及涡旋的发生发展，这在华南是不多见的。更有甚者，有西南涡向东南移出，再生加强（傅慎明等，2010b；Fu et al., 2011a；王东海等，2011），亦有由季风槽中新生而移来者（Li et al., 2011），这表明环流的经向发展，及较低纬度涡旋的频繁发生对华南降雨的影响。臧增亮等（2008）讨论了地表动量通量对华南前汛期降水的影响。陈红和赵思雄（2004）已对海峡两岸及邻近地区暴雨试验（HUAMEX）期间暴雨过程及环流特征作了分析研究。Wu et al.（2010）专门对华南前汛期暴雨过程的天气尺度特征作了探讨。海峡两岸同受华南前汛期暴雨的影响，台湾地区的气象工作者常把此段降水称为“梅雨”或“春雨”。贝耐芳和赵思雄（2005）对一次引发台湾地区强降水的锋面及中尺度系统做了研究，揭示了中央山脉的增幅作用、季风涌及西南气流有重要贡献。除了春夏的暴雨外，秋季华南也会出现持续性暴雨过程，Fu et al.（2011b）对海南岛由低涡引发的持续性暴雨做了研究。

对于北方暴雨，已注意到近年来有增多的趋势。为了弄清这一现象，孙建华等（2005）和孟庆涛等（2009）已做过专门的统计，他们使用 1990~2005 年全国 730 个站日降水的资料，对华北和东北地区大暴雨过程进行了分类研究，探讨了 21 世纪前后夏季华北、东北暴雨的主要特征，表明种类繁多，情况仍较复杂，指出近年来该区降水较为活跃，有所增多。北半球存在三大切断低压（Cut-off Low，简称 COL）的区域：东北亚、南欧和北美。对于后

两者，国际上已有较多研究，而对东北亚的情况了解甚少。应欧洲刊物 MAP 邀请，Zhao and Sun（2007）撰文对此作了探讨。他们注意到在环流稳定的条件下，这些切断低压有可能较长时间维持，甚至达 2~3 周，引发北方持续性夏季降雨。且在东北亚的 COL 最先多见于 500 hPa 层，而不像南欧、北美那样多见于 200 hPa 层，它除引发降水外，可能还与对流层与平流层，甚至更高层的相互作用有关，这是需要进一步深入探讨的问题。乔枫雪等（2007）对 2005 年引发持续暴雨的东北低涡的结构、涡度与水汽特征的研究发现，在加强阶段涡度在中高层增加得最快，并向低层传播，有可能诱生气旋的发展。水平涡度平流项和水平辐散项对低涡发展、加强有重要作用，但在各不同阶段，其相对重要性有差异。谢作威和布和朝鲁（2012）分析了东北冷涡低频活动特征及其环流背景。Fu and Sun（2012）和 Xia et al.（2012）还分别对东北冷涡的涡度和能量收支进行了诊断。袁美英等（2010）对东北地区一次短时大暴雨 β 中尺度对流系统进行了分析。赵宇等（2011）对引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统的结构特征作了探讨。针对华北暴雨，一些学者从复杂地形、下垫面以及城市热岛效应等诸多方面开展了研究。孙继松（2005）及孙继松和杨波（2008）指出平原与山区之间温度梯度方向、强度的变化，是北京地区夏季边界层急流形成或消失的直接原因，局地暴雨与边界层急流之间存在明显的正反馈现象，由城市热岛形成的水平温度梯度有可能在靠近城区的山前迎风坡强迫产生相对独立的中尺度风垂直切变，由此产生的低空风垂直切变是维系中尺度对流降水发生发展的重要条件。2012 年 7 月 21~22 日北京市出现历史罕见强降雨过程，其强度超过百年一遇，损失惨重。包括暴雨、洪涝在内的城市气象灾害研究已成为当前和今后国家的迫切需求。

我国过去对暴雨的研究，主要集中于东部地区，这是完全符合实际的。因为随着季风的推进，雨带由南向北分别出现于华南、江淮流域和华北等地区。随着西部大开发的进行，同样需要对西部的暴雨给予足够的关注。我国西南的云贵地区属低纬高原，受季风影响，地形复杂，其降雨天气系统与东部地区差异较大，对其机理不甚明了。董海萍等（2005a，2005b，2007a，2007b）对我国这一低纬高原初夏强降水天气进行了诊断与数值模拟研究，在

较为真实模拟的基础上,对云南地形影响作了试验,表明云南红河的喇叭口地形对降水落区和强度有明显的影响。Dong et al. (2007) 指出印缅槽的位置及冷空气的路径与暴雨有重要关系,通过计算表明水汽主要来自孟加拉湾。近年来,我国西北地区降水也趋活跃,这里与东部地区有很大不同,少受甚至不受季风影响,有“春风不度玉门关”之说。尽管相对东部地区而言,该区雨量较小,但是较强降水仍有发生。孔期等(2011)对一次乌鲁木齐暴雨的分析表明,该降水属于一次大尺度斜压过程,西风带的中亚低涡是该暴雨过程的主要影响系统,其中有明显的 γ 中尺度对流云团发生。

除了突发性暴雨以外,对持续性暴雨亦开展了探讨。最近国家又启动了新的 973 项目,对持续性暴雨开展研究。近年来江淮流域暴雨呈现出较为复杂的局面。Tang et al. (2006) 对 1951~2004 年的中国持续性暴雨事件的气候特征做了研究,得到了其频率、强度和雨带的空间和时间分布,为今后的机理研究和预报的改进提供了帮助。对暴雨的年代际变化亦进行了研究,鲍名和黄荣辉(2006)揭示出我国夏季降水发生的频率具有明显的年代际特色,20 世纪 70 年代末开始的华北暴雨减少可能与赤道中、东太平洋海表面温度的年代际变化有关,而 20 世纪 90 年代长江以南暴雨增多则可能与热带西太平洋偏东方向热对流的年代际变化有关。Li et al. (2012) 研究了中国东部与年代际变化有关的水汽输送的特征。大体而言,在 20 世纪 70 年代北方降水偏多,80 年代江淮流域增加,而华南减少,至 90 年代后华南降水增加。在过去的 30 年间,降水增加有从北到南的年代际变化。对于进入新世纪后 00 年代的变化又有集中于淮河流域的趋势,21 世纪 10 年代初雨带又有向长江流域移动的特征(赵思雄, 2011)。

暴雨的预报一直是业务工作的难题。针对暴雨的预报问题,已开发出多种动力预报因子(Gao and Cao, 2007; Gao and Ran, 2009),并在此基础上发展了集成的暴雨预报系统。张小玲等(2010)还发展了基于“配料”的暴雨预报方法。总之,暴雨的研究和预报需要进行更多的观测和研究(Qi and Sun, 2006; 徐广阔等, 2007; Zhong et al., 2007; 李博等, 2008)。现在暴雨预报已进展到关注多种尺度的影响,有时某段时间的气候异常,也许是来源于一、两次极端天气事件所致,对不同的事件应当进行具

体研究。此外,每年夏天大气所的同仁还开展汛期降水预测会商,密切参与并关注灾害天气,提炼科学问题,总结经验教训(孙建华等, 2011; 陈红等, 2007; 卫捷等, 2007)。

3 登陆台风及其引发的强降水

台风的研究涉及诸多复杂的课题,包括发生发展,移动路径,登陆及致灾等。本文因限于灾害天气机理等,对前两方面不作探讨,只讨论登陆台风引发的强降水。已有研究指出,台风的远距离输送或台风北上与西风带系统相互作用是华北及东北地区产生大暴雨或持续性大暴雨的重要条件(孙建华等, 2005; 孟庆涛等, 2009),最早者如 1975 年 8 月河南省由登陆台风所引发的特大暴雨(陶诗言, 1980)。最近以来,经过了一段时间的“停息”之后,登陆或北上的台风又有增多的趋势。龚晓雪和赵思雄(2007)已对向北移动影响我国的“麦莎”(Matsa)台风的结构、演变和能量进行了研究。麦莎登陆北移过程中,高层的无辐散风穿越等高线将位能转化为动能这一过程较麦莎整体加强为早,而辐散风是低层动能的主要来源。麦莎高层把台风环流的动能向环境输送,而北美的 Agnes 飓风则是环境区有大量的动能向台风环流区输送,这可能是 Agnes 比 Matsa 更为强烈的原因,因而后者并未像 Agnes 那样强烈变性加强为温带气旋。此外,还应强调北方大陆小高压的作用,它位于麦莎台风的西北方,对台风的移动方向有一定的影响。应该注意到,这类小高压对于“7203”和“7503”等北上产生重大灾害的台风均有明显的影响,给预报带来不少的困难。但其具体如何影响台风的结构、路径及强度方面的机制研究并不多,今后对此应给予更多的注意。孙建华等(2006a)的研究证实,“9608”台风属于比较少见的登陆台风北上受高压阻挡停滞类型,台风倒槽内发生发展的两个中尺度对流云团是造成该次超强暴雨的直接影响系统。齐琳琳等(2006)对热带气旋“蒲公英”两次登陆过程做了研究,表明它在登陆台湾期间,东亚环流形势呈典型的鞍型场分布,有利于它的维持和北上转向。更为让人关注的是“碧利斯”台风登陆我国后,未很快减弱,而是向偏西方向移动,登陆 4 天后,在湖南南部引发了大暴雨,造成惨重的人员伤亡,此种情况为数十年所罕见。Gao et al. (2009)已对其强降雨过程进行了观测分析,叶成志和李昀英

(2011) 还用数值模式探讨了热带气旋“碧利斯”与季风的相互作用过程, 季风涌对该台风登陆后经久不衰有重要影响。周海光(2008)采用多普勒雷达资料对强热带风暴“碧利斯”引发特大暴雨的中尺度结构作了分析。李英等(2007)研究台风激发的大气波动、大气三维结构及其与台风雨带的关系, Matsa 北向传播的大型雨带分布特征与大气惯性波与大气重力内波的混合波特征有关。只有在适当的大气层结与合适的重力波垂直波数条件下, 台风扰动才能激发此类远距离传播的波动, 并形成大范围波状雨带。Hao et al. (2009) 对于热带气旋的风场演变从动力学上进行了解释。近年来进入南海并登陆中南半岛的台风有所增加, Wangwongchai et al. (2010) 对台风“Chanthu”影响泰国的过程进行了研究, 又据称泰国 2011 年夏秋季的严重洪水, 前期受台风影响, 而后期则受季风涌的影响。黄立文等(2005)专门研究了中尺度海—气相互作用对台风暴雨过程的影响, 认为这是一种通过台风大风区附近海平面温度(SST)下降以调节降水和台风强度的负反馈机制。张庆红等(2010)对登陆中国大部台风的影响力作了深入的剖析。近年来, 台风及热带低压对大城市的影响也很突出。齐琳琳和赵思雄(2003, 2004)及 Qi and Zhao (2003) 对一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统作了诊断分析, 并利用非常规资料对该次过程进行了模拟研究, 表明有 4 个中尺度雨团发生发展, 属于典型的 β 中尺度系统。丁德平和李英(2009)还专门针对北京地区台风降水的特点进行了研究。对孟加拉湾的热带低压引发的暴雨的结构及其水汽供应, 以及低纬度系统之间的相互作用亦做了研究, 并与中国的梅雨锋低压作了对比(Rasul et al., 2005; 孔期等, 2005)。黄荣辉和王磊(2010)揭示登陆我国的台风和热带气旋的地点有年际变化, 与夏季北半球大气环流异常的东亚/太平洋型(EPA 型)存在遥相关的关系。

4 寒潮冷涌、冻雨及暴雪

近年来冷季灾害不断发生, 且其表现形式各异。强者如寒潮冷涌, 中等强者如冻雨, 水汽充足者甚至出现暴雪, 为何会有如此明显的不同, 应作深入探讨。研究表明, 在全球气候变化的背景下, 21 世纪仍然有强寒潮爆发。赵思雄和曾庆存(2005)对 2004~2005 年冬一次强寒潮和冷涌进行了分析

研究, 该次强寒潮的冷锋很快移过中国大陆, 在西太平洋上引发了温带气旋爆发性的发展, 后移过日本南侧, 直至阿留申地区。另, 南下的冷空气快速移动, 该冷涌后来越过赤道到达澳大利亚引发了澳洲的强降水, 这证实了李宪之 1930 年代在资料稀少情况下, 所作的分析非常精辟。Kong and Zhao (2010) 针对此次澳洲强降水的演变及中低纬系统相互作用进行了细致的探讨, 提出了一类南半球中低纬度相互作用的物理模型。傅慎明等(2012b)还对该次寒潮的能量转换进行了诊断, 表明存在很强的斜压性, 在东亚大陆有大量的有效位能向动能的转换, 因而以大风降温为主, 未出现明显的降雪。丁一汇和马晓青(2007)对 2004~2005 年冬季的一次强寒潮事件进行了等熵位涡分析, 指出该次寒潮过程冷空气来源于平流层下部和对流层上部。Wangwongchai et al. (2005) 对 2000 年 11 月的一次强冷涌入侵低纬引发泰国南部和马来西亚的强降水做了研究, 揭示了冷涌诱生的近赤道小涡旋的存在(据称, 在国际“冬季风试验”期间未曾捕捉到该类系统), 对流强烈发展, 哈德来环流将大量热量输送向中纬度。南非和马来西亚学者认为上述结果在科学上很有意义, 而过去极少这方面的研究(Juneng et al., 2007)。

对于我国南方的雨雪冰冻天气也开展了较多的研究, 并在《气候与环境研究》上出版了“2008 年 1 月中国南方低温, 雨雪, 冰冻过程的研究专辑”。陶诗言和卫捷(2008)指出, 2008 年大范围冰雪天气过程的成因是由于欧洲大陆出现异常的大气环流, 1 月中下旬亚洲中高纬度 $60^{\circ}\text{E}\sim 100^{\circ}\text{E}$ 地区阻塞形势稳定维持 20 余天, 里海以东地区长期维持一个切断低压系统, 该系统中有三次扰动沿青藏高原向东移入我国上空, 同时有大量暖湿空气被输送到我国南方, 致使出现严重的持续性的冻雨天气。赵思雄和孙建华(2008)探讨了环流异常和影响系统等特征, 并对其多尺度的结构作了分析。孙建华和赵思雄(2008a, 2008b), Sun and Zhao (2010) 指出, 在大气环流异常的条件下, 一条准静止锋稳定维持于长江流域, 是雨雪冰冻的重要影响系统, 这在冬季并不多见, 成为了“冬行夏令”的状态。他们强调了低层热力结构的特征(即逆温层及“暖鼻”的存在)以及云微物理和微气象诸多问题的共同影响, 提出了一个持续性雨雪冰冻天气的多尺度系统物理模型及雨雪冰冻的锋面结构与大气

层结特征的物理模型 (Sun and Zhao, 2010)。研究还指出: 近地面温度的影响非常敏感, 还涉及陆气之间的相互作用等。同时强调, 降水定量预报难度大, 而降水类型 (雨、冻雨、雨夹雪、雪等) 的预报是又一个难题。王东海等 (2008) 对 2008 年 1 月南方雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因作了探讨。陶祖钰等 (2008) 分析了该次冰冻灾害及其准静止锋的特征。张庆云等 (2008) 讨论了亚洲中高纬度环流异常与我国南方持续性雨雪冰冻的关系。杨贵名等 (2008) 对该次雨雪冰冻灾害天气持续的原因作了分析, 指出贝加尔湖以西阻塞高压强而稳定, 中亚、西亚低槽 (涡) 位置少动, 发展活跃, 南支槽也较活跃等。李崇银和顾薇 (2010) 揭示, 乌拉尔阻塞高压的持续活动对 2008 年 1 月中国南方雨雪冰冻灾害的发生有重要作用, 而北大西洋海温正异常的存在是该阻塞高压持续维持的重要外强迫因素。

近十年间, 我国大陆上时有持续性强降雪发生, 但我们对于降雪, 尤其是持续性降雪的研究相对薄弱。这些暴雪有其特色, 主要不是由温带气旋所引发, 也不似日本的暴雪多与出海低压的发展有关。黄翠银等 (2008) 对山东半岛冬季由海岸锋引发的暴雪做了研究, 确认与海岸锋环流相伴随的上升运动对于降雪的局地增强有重要作用。孙建华和黄翠银 (2011) 采用数值模拟的方法, 对海岸锋的三维结构和机理作了讨论, 海岸锋锋区出现在 900 hPa 以下, 强降雪落区位于海岸锋及其冷区一侧。海洋热通量是海岸锋形成的关键因子, 其中感热通量使海陆温差加大是形成海岸锋锋生的重要条件。

在对引发北京的“小雪大灾”的回流天气作了讨论 (赵思雄等, 2002; 孙建华和赵思雄, 2003) 之后, 最近又对引发暴雪的回流天气的特征做了研究 (Li et al., 2010) 通过风廓线资料发现, 回流层主要在 3 公里以下。冷高压南侧的回流 (偏东气流) 再加上低层的倒槽 (切变线) 可能使暴雪加强。雷达径向风速显示, 一条中尺度辐合线维持 10 余小时, 且在其中有活跃对流发展, 引致华北破纪录暴雪的发生。对冬季灾害中的中尺度系统发生发展应给予足够注意, 也许同是回流天气而出现强降雪和一般降雪的差别就在这里。叶晨等 (2011) 和张元春等 (2012) 还对近年来华北和北京暴雪的机理作了分析。

当然, 在我国尤其是东北地区由气旋发展引发

的降雪也有发生。刘宁微等 (2009) 对近年辽宁历史罕见暴雪过程的分析表明, 500 hPa 南北支槽合并带来的强冷暖空气交汇, 诱生低压并发展成为气旋北上, 这与北美等地的暴雪过程有一定的相似之处。这表明了我国暴雪影响系统的多样性。董啸等 (2010) 对近 50 年东北地区暴雪的特征作了统计, 暴雪主要集中在长白山、辽东半岛等地, 近 50 年来, 东北地区全年暴雪量呈现出一定的增加趋势。因而, 对于年代际的变化, 亦应给予足够的注意。

5 沙尘暴天气及其数值预报

东亚与澳洲、北非、北美一起, 为世界四大沙尘天气多发区。进入 21 世纪以来, 北方沙尘暴天气又趋活跃, 引起高度关注。叶笃正等 (2000) 强调了该类灾害天气的严重性, 建议尽快开展多方面的研究。我国相继在沙尘观测网建立, 沙尘暴气候特征, 沙尘暴的成因机理、数值模式与模拟方面有一批工作并取得了重要进展。周自江等 (2002) 对近 47 年的沙尘暴气候特征作了统计, 发现“我国北方大部分地区的沙尘暴在减少”, 但“2000 年华北和西北东部部分地区的沙尘暴多于 20 世纪 90 年代的平均值”, “沙尘暴与大风的年际振荡及多年变化趋势有一致性”。因而, 沙尘暴的发生频次时有反复, 且强沙尘暴仍有出现。石广玉和赵思雄 (2003) 对于“沙尘暴研究中的若干科学问题”作了较详细的阐述。对于沙尘暴的影响天气系统, 赵琳娜和赵思雄 (2004a, 2004b) 和 Zhao and Zhao (2006) 已对一类快速发展的温带天气系统作了诊断和数值模拟研究, 指出, 该类气旋发展迅速, 引发强风。高空锋生区叠加在低层锋区之上, 使斜压性增强, 有利于有效位能的释放, 动能的制造及气旋的发展加深, 而水汽和凝结潜热释放的作用不明显, 这不但与挪威学派的模型及 Patterssen 的 A、B 类气旋发展模型不同, 更与夏季我国江淮气旋和西南涡等低压系统有很大差异。他们提出的蒙古气旋是东北亚沙尘暴一类重要的影响系统的这一观点, 已被日本和蒙古学者肯定和引用 (Dulam and Shinoda, 2011)。曾庆存等 (2006) 在多年研究的基础上, 完成了《千里黄云——东亚沙尘暴研究》专著, 对东亚沙尘暴的天气气候特征、观测分析, 风沙动力学和沙尘数值预报, 沙尘中期预报和短期气候预测, 灾害影响评估和防治作了系统论述。

孙建华等与国家气象中心合作（孙建华等，2003，2007），采用 Shao（2000，2001）的具有清晰物理学概念的起沙模式，耦合于中尺度数值模式中，并结合输送模式、高精度 GIS 数据等，建立了一个较完整的沙尘暴起沙和输送过程的预测系统，并提交业务应用，取得了较好的效果（Sun and Zhao，2006；孙建华等，2007；Sun and Zhao，2008）。赵琳娜等（2002，2004，2007）还对沙尘暴的起沙、输送等作了一系列的模拟研究。矫梅燕等（2007）为解决沙尘观测采用能见度，而模式所得结果是沙尘浓度，二者之间如何建立联系的问题，进行了沙尘天气定量分级方法研究，并用于实际工作中。曾庆存等（2007）揭示风蚀和起沙扬尘的物理动力机理，率先提出阵风起沙的动力学理论，并用于数值预报模式。程雪玲等（2007）对观测资料进行分析后指出，我国北方春季冷锋过境后，常骤发强风，甚至起沙扬尘，持续数小时至一两天，通过对边界层超声风温仪的资料分析，发现大风常叠加有周期为 3~6 min 的阵风，较有规律，且有明显的相干结构，“阵风在动量传送上起到相当大的作用”。

张高英等（2004）对近年来强沙尘暴天气气候特征作了分析研究，指出影响我国的强沙尘暴的路径至少可分为三种类型，即偏西路径、西北路径和南疆盆地型。以西北路径偏多，主要为冷空气入侵沿途大风所致。但影响最大的主要与蒙古气旋及相伴的大风有关，它有明显的斜压结构且发展猛烈，可席卷东北亚、太平洋及南下中国东南。而新疆特殊的地形条件（高山环绕和塔里木盆地下沉气流）使沙尘不易上升而输送出来（Sun et al., 2008），这也提醒人们，国际上一些人所称沙尘重要源地在塔克拉玛干沙漠，这一看法需要再作推敲与论证。我国北方春季的连续干旱、气温偏高及冷空气活跃是强沙尘暴天气形成的重要气候背景。陈红等（2004）、郎咸梅等（2003）考察了中国科学院大气物理研究所（IAP）不同类型模式对我国春季气候异常的预测效果，并在此基础上进行了春季沙尘天气异常的动力学预测试验。结果表明，IAP 的系统对我国春季气候及沙尘天气趋势具有一定的预测能力。

沙尘暴的影响系统具有多样性，在我国东北、华北及西北地区东部可能多受蒙古气旋的影响，而在西北地区大部，尤其是偏西路径时，可能会出现

另外的情况（如 93-5 黑风暴）。赵庆云等（2012）对河西走廊“2010-04-24”特强沙尘暴特征的分析表明，西伯利亚—新疆北部的偏北大风携带着极地强冷空气入侵，造成了甘肃河西走廊的特强沙尘暴，高空有动量急骤下传，地面气温剧降，并伴有低压发展。从观测到沙尘至天空完全被沙尘遮蔽，仅仅只有 2.5 min。钱莉等（2011）强调了地面冷锋所伴随的强风是产生黑风暴的主要原因。因此，不可都去套用蒙古气旋一种模式，对不同的影响系统应作具体的分析。王丽娟等（2011）对 2009 年 4 月的一次强沙尘暴的模拟研究较好复制出该次沙尘天气的时间和空间演变特征以及强沙尘暴的范围，起沙后沙尘粒子主要靠对流层低层的大风长距离输送，对起沙量贡献最大的是粒径 d 在 $2\ \mu\text{m} < d < 11\ \mu\text{m}$ 的粒子。此外，李晓岚和张宏升（2012）利用 325 米气象塔的资料对 2010 年春北京沙尘暴的微气象学特征做了研究。孙永刚等（2011）对内蒙古一次强沙尘暴过程的观测资料作了综合分析。

王自发等（2008）已发展了沙尘和气溶胶的数值模式，取得了很好的效果，不仅用于沙尘天气预测，对环境科学和气候变化等研究均有贡献，由于本文主要涉及灾害天气问题，因而不在这里作更详细的介绍。

6 高温与酷暑

我国定义日最高温度超过 35°C 为高温天气，日最低气温超过 25°C 为闷热天气。高温闷热天气是一种灾害天气，可造成电力负荷持续升高，供水紧张，对工农业生产有重大影响，对人体健康带来很大危害，引发疾病甚至导致死亡。在气候变化的背景下，随着城市化的快速发展，我国夏季高温闷热天气频繁出现。除原有的长江流域的“火炉”外，在华北和华东又出现了新的南、北“火炉”。对此，一些学者已作了讨论，揭示出不同的影响系统，其机理和环流等有很大不同。

中国科学院大气物理研究所和北京市气象局合作，对华北和北京的酷暑天气进行了研究。谢庄等（1999）的结果指出，近 60 年中，北京出现酷暑天气的年频率为 81%，并不少见，尤以 20 世纪 40 年代和 90 年代明显偏多。华北和北京酷暑天气的出现与大气环流形势密切相关，大陆副热带高压维持于华北上空是其主要原因，空气下沉增温是酷

暑的重要机制,而大城市的热岛效应则可使城区百叶箱气温再增高 2°C 左右。孙建华等(1999)的数值模拟较好地复制出大陆高压的移动过程、强度和维持等,确认了高压中的下沉增温等是造成高温酷暑天气的主要原因。钱婷婷等(2005)对造成北京连续高温的河套高压的结构作了分析。谢庄和崔继良等(2006)又对北京城市热岛效应的昼夜变化特征作了进一步分析,制作了连续3年平均的逐月逐时热岛强度变化的三维立体图。卫捷和孙建华(2007)对华北地区夏季高温闷热天气特征作了分析。20世纪60年代,夏季亚洲中高纬 500 hPa 上,在乌拉尔山、贝加尔湖及鄂霍次克海地区分别出现长波槽、脊及槽的环流占优势,华北易受大陆高压控制,出现了高温但不闷热天气的一个高峰。20世纪90年代,亚洲中高纬地区再次出现类似60年代的环流,受大陆高压及西太平洋副高伸展的共同影响,引致高温闷热天气。史军等(2009)指出在1960~2005年的45年间华东高温日数发生有“多一少一多”的年代际变化,高温日平均最高气温以华东中西部的浙江、安徽和江西大部分地区较高。同时,高温日数与副高强度和面积指数在华东东南部有显著正相关,城市化及热岛效应也是高温日数增加的原因之一。杨辉和李崇银(2005)对2003年夏季江南高温作了分析,该年江南出现大范围异常高温天气,无论其绝对高温值,还是持续时间之长都创下了历史纪录。通过对其成因和机理进行分析,发现西太平洋副热带高压的极度持续偏强和西伸是直接原因,而西太平洋副热带高压形势的持续异常是多系统综合作用的结果。Ding et al. (2009)的研究显示我国大部分地区,尤其是北方地区的极端高温事件(EHE)的日数呈现出显著的增加趋势。孙建奇等(2011)对1961~2000年EHE异常的年际和年代际变化的大气环流因子作了探讨,北方主要是对流层中上层位势高度异常所致;中部和南部除中高层高度异常外,低层冷暖平流的作用也很重要。鉴于上述问题的复杂性,尚需进一步继续研究。近年来,我国西部地区常有的干旱问题,与东部持续时间相对较短的高温酷暑有很大不同,由于干旱持续的时间更长,多属于气候的范畴,因此不在这里作更多讨论,有兴趣者可参阅相关文献(彭京备等,2007;杨辉等,2012)。但冬季出现的干旱,似与副高关系不大,而与西风带环流异常,冬季冷空气偏弱,及南支槽偏弱有关。这些特点可帮助我们对

比思考,以更清楚理解夏季高温酷暑的成因。

7 结语和讨论

中华民族的历史,已经经历了太多的灾害(孟昭华,1999),然而,今天在全球气候变化的背景下,极端与灾害天气仍然频发,需高度关注。本文对我国的几类主要气象灾害略加归纳和评述,涉及暴雨洪涝、登陆台风、寒潮、暴雪、强沙尘暴及高温酷暑等,其实不只是这些,另外一些灾害天气亦很严重,如飑线及强风暴(梁建宇和孙建华,2012;路秀娟等,2010),浓雾(齐琳琳等,2010)和雾霾,还有一些次生灾害(曲晓波等,2010;汪君,2012)等。限于篇幅,不能在此一一列举其进展。对于下一步,有如下的思考,供参考:

(1) 中国的灾害天气有其自身特色,需要我国科学家去深入研究。由于我国处于东亚,西为青藏高原,东临太平洋,而又处在世界最大季风区,灾害天气繁多,与欧美有所不同,如梅雨锋,冷高压的回流,干冷的蒙古气旋及夏季大陆和海洋的副热带高压等,其生成演变机理及引发的灾害天气的成因,有待我们去进一步弄清。

(2) 天气与气候相辅相成,难以硬性分割。二者有区别,但又有密切联系。灾害天气常涉及多种尺度系统及其相互作用,范围较大的致洪暴雨及长时间的持续暴雨的机理和预报,仍是我们面临的难题。它们可能涉及中低纬度系统的相互作用,甚至南北半球系统的相互作用,以及季风的年际和年代际变化,ENSO、低频振荡及罗斯贝波列的影响等,这使我们要关注的问题更加复杂化。不仅要注意中尺度系统,而且应有更广阔的视野,例如中期、延伸预报的问题(钱维宏,2012)。另一个值得注意的问题是在全球气候变化的环境下,灾害天气的强度和频率会有何变化?在地区的分布上会有何变化?仅从目前掌握的资料,尚难于准确回答此问题,还应作更多的研究。

(3) 进入21世纪,随着经济的高速发展,人类对灾害天气的预报提出了更高的要求,要发展更精细的数值天气预报,真正在定时、定点、定量预报上有所突破。由于数值预报模式尚有一些不确定性,除要努力研究改进、发展新的同化系统和适用于东亚的云微物理方案等外,还应在天气动力学基础上,结合预报人员有益的经验作出正确的判断,这仍是很重要的。还要指出,冬季降水类型(雨、

雨夹雪、冻雨、雪)的预报涉及微气象学、云的微物理学、陆面与低层大气的相互作用等,是另一个难题。我国面临七大江河及其支流的洪水预报和预警任务,仅有定量的暴雨预报,仍显不够。洪水预警更寄期望于发展水文气象耦合预报模式,以延长洪水预报的预见期,而气象与水文模型的双向耦合模式更是一个重要的发展方向,难度很大,需要努力攻克。沙尘暴的预报更涉及新的起沙机制的研究与发展,而目前传统的观测网尚不能全面监测沙尘暴的发生发展,建立包含下垫面生态环境要素,大气物理化学要素的专门的沙尘网络系统是深化对沙尘暴特性认识和发展沙尘暴定量预警技术的重要基础。我国有关部门和气象工作者已为此做出很大的努力。

(4)城市气象灾害作为一个必须面对的重要课题,正越来越受到关注,内涝、雨雪、沙尘对经济和人民生活的影响,日益更为突显,必须开展更多的研究。过去对海洋气象灾害关注不够,我国有广大的海洋国土需要我们去开发建设和管理,对东海、南海等地区,甚至马六甲海峡及印度洋运输线等处灾害天气的研究急待加强。气象工作者正面临新的机遇和挑战,任重而道远。

参考文献 (References)

- Adachi S, Kimura F. 2007. A 36-year climatology of surface cyclogenesis in East Asia using high-resolution reanalysis data [J]. SOLA, 3: 113–116.
- 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 X H, Zhang F Q, Sun J H. 2011. Diurnal variations of warm-season precipitation of east the Tibetan Plateau over China [J]. Mon. Wea. Rev., 139: 2790–2810.
- 贝耐芳, 赵思雄. 2005. 一次引发台湾地区强降水的锋面及中尺度系统分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 474–491. Bei Naifang, Zhao Sixiong. 2005. Diagnosis analysis of severe heavy rainfall in Taiwan area during heavy rainfall experiment in South China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 474–491.
- 陈红, 赵思雄. 2004. 海峡两岸及邻近地区暴雨试验 (HUAMEX) 期间暴雨过程及环流特征研究 [J]. 大气科学, 28 (1): 32–47. Chen Hong, Zhao Sixiong. 2004. Heavy rainfalls in South China and related circulation during HUAMEX period [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (1): 32–47.
- 陈红, 林朝晖, 周广庆. 2004. 我国春季沙尘天气趋势的数值气候预测试验 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 182–190. Chen Hong, Lin Zhaohui, Zhou Guangqing. 2004. Experimental dynamical prediction of spring dust storm events in China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 182–190.
- 陈红, 卫捷, 孙建华, 等. 2007. 2006 年夏季主要天气系统及环流特征分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 8–19. Chen Hong, Wei Jie, Sun Jianhua, et al. 2007. The weather and its circulation in summer of 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (1): 8–19.
- 程雪玲, 曾庆存, 胡非, 等. 2007. 大气边界层强风的阵性和相干结构 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 227–243. Cheng Xueling, Zeng Qingcun, Hu Fei, et al. 2007. Gustiness and coherent structure of strong wind in the atmospheric boundary layer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 227–243.
- 丁德平, 李英. 2009. 北京地区的台风降水特征研究 [J]. 气象学报, 67 (5): 864–874. Ding Deping, Li Ying. 2009. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoons [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (5): 864–874.
- Ding T, Qian W H, Yan Z W. 2009. Changes in hot days and heat waves in China during 1961–2007 [J]. International Journal of Climatology, 30(10): 1452–1462.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 255pp. Ding Yihui. 1993. Study on the Lasting Heavy Rainfalls Over the Yangtze-Huaihe River Basin in 1991 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 255pp.
- 丁一汇, 马晓青. 2007. 2004/2005 年冬季强寒潮事件的等熵位涡分析 [J]. 气象学报, 65 (5): 695–707. Ding Yihui, Ma Xiaoping. 2007. Analysis of isentropic potential vorticity for a strong cold wave in 2004/2005 Winter [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (5): 695–707.
- 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 2005a. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 I. 2001 年 5 月印缅槽维持期间云南暴雨及其中尺度特征 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 443–459. Dong Haiping, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2005a. Study of strong heavy rainfall in low latitude plateau area in China during early summer. Part I: A case study of heavy rainfall in Yunnan under influencing of Indian-Myanmar trough [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 443–459.
- 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 2005b. 我国低纬高原地区初夏强降水天气研究 II. 2005 年 5 月云南旱涝成因的对比分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 460–473. Dong Haiping, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2005b. Study of strong heavy rainfall in low latitude plateau area in China during early summer. Part II: Comparison between circulation and climatology causing flood in May 2001 and drought in May 2005 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 460–473.
- 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 2007a. 低纬高原地区一次强降水过程的中尺度雨团数值模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (5): 1159–1173. Dong Haiping, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2007a. A numerical simulation study of mesoscale rainy-cluster producing heavy rainfall in lower latitude plateau during early summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (5): 1159–1173.
- 董海萍, 赵思雄, 曾庆存. 2007b. 低纬高原地形对强降水过程影响的数值试验研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 381–396. Dong Haiping, Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2007b. A numerical simulation of topography on heavy rainfall in lower latitude plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 381–396.

- Dong H P, Zhao S X, Zeng Q C. 2007. The study of influencing systems and moisture budget in a heavy rainfall in low latitude plateau in china during early summer [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (3): 485–502.
- 董佩明, 赵思雄. 2004a. 梅雨锋两类中尺度低压 (扰动) 及其暴雨的数值研究 [J]. *气候与环境研究*, 9 (4): 641–657. Dong Peiming, Zhao Sixiong. 2004a. A numerical study of two kinds of mesoscale low (disturbance) on Meiyu front and associated heavy rainfall [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 9 (4): 641–657.
- 董佩明, 赵思雄. 2004b. 引发梅雨锋暴雨的频发型中尺度低压 (扰动) 的诊断研究 [J]. *大气科学*, 28 (6): 876–891. Dong Peiming, Zhao Sixiong. 2004b. A diagnostic study of mesoscale lows (disturbances) on Meiyu Front and associated heavy rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (6): 876–891.
- 董佩明, 钟科, 赵思雄. 2006. 区域初始分析误差对梅雨锋中尺度低压数值预报的影响 [J]. *气候与环境研究*, 11 (5): 245–261. Dong Peiming, Zhong Ke, Zhao Sixiong. 2006. Impact of regional uncertainties of the initial state upon numerical forecast of mesoscale low on Meiyu front [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (5): 245–261.
- 董啸, 周顺武, 胡中明, 等. 2010. 近 50 年来东北地区暴雪时空分布特征 [J]. *气象*, 36 (12): 74–79. Dong Xiao, Zhou Shunwu, Hu Zhongming, et al. 2010. Characteristics of spatial and temporal variation of heavy snowfall in Northeast China in recent 50 years [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 36 (12): 74–79.
- Dulam J, Shinoda M. 2011. Intensity of a dust storm in Mongolia during 29–31 March 2007 [J]. *SOLA*, 7A: 29–31.
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2010a. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究 [J]. *气象学报*, 69 (4): 581–600. Fu Shenming, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2010a. A study of the impacts of the eastward propagation of convective cloud systems over the Tibetan Plateau on the rainfall of the Yangtze-Huai River basin [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 69 (4): 581–600.
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2010b. 一类低涡切变型华南前汛期致洪暴雨的分析研究 [J]. *大气科学*, 34 (2): 235–252. Fu Shenming, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2010b. One kind of vortex causing heavy rainfall during pre-rainy season in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 235–252.
- Fu S M, Sun J H, Zhao S X, et al. 2010. The impact of the eastward propagation of convective systems over the Tibetan Plateau on the southwest vortex formation in summer [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 3 (1): 51–57.
- Fu S M, Sun J H, Zhao S X, et al. 2011a. The energy budget of a southwest vortex with heavy rainfall over South China [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 28 (3): 709–724.
- Fu S M, Li W L, Sun J H, et al. 2011b. A budget analysis of a long-lived tropical mesoscale vortex over Hainan in October 2010 [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 114 (1–2): 51–65.
- 傅慎明, 于翥, 王东海, 等. 2012a. 2010 年梅雨期两类东移中尺度涡旋的对比研究 [J]. *中国科学*, 42 (8): 1282–1300. Fu Shenming, Yu Fei, Wang Donghai, et al. 2012a. A comparison of the two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the mei-yu period of 2010 [J]. *Science China Earth Sciences (in Chinese)*, 42 (8): 1282–1300.
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2012b. 2004 年冬季风期间一次强寒潮过程的能量收支研究 [J]. *气候与环境研究*, 17 (5): 549–562. Fu Shenming, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2012b. Energy budget of a cold surge process during the winter monsoon period of 2004 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (5): 549–562.
- Fu S M, Yu F, Wang D H, et al. 2012. A comparison of two kinds of eastward-moving mesoscale vortices during the Mei-yu period of 2010 [J]. *Science China Earth Sciences*, doi: 10.1007/s11430-012-4420-5.
- Fu S M, Sun J H. 2012. Circulation and eddy kinetic energy budget analyses on the evolution of a Northeast China Cold Vortex (NCCV) in May 2010 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 90 (4): 553–573.
- Gao S T, Cao J. 2007. Physical basis of generalized potential temperature and its application to cyclone tracks in nonuniformly saturated atmosphere [J]. *J. Geophys. Res.*, 112: D18101, doi:10.1029/2007JD008701.
- Gao S T, Ran L K. 2009. Diagnosis of wave activity in a heavy-rainfall event [J]. *J. Geophys. Res.*, 114: D08119, doi: 10.1029/2008JD010172.
- Gao S Z, Meng Z Z, Zhang F Q, et al. 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with severe tropical storm Bilis (2006) after its landfall [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137 (6): 1881–1897.
- Geng B. 2008. Some statistical characteristics of meiyu/baiu frontal depressions [J]. *SOLA*, 4: 137–140.
- 龚晓雪, 赵思雄. 2007. 麦莎台风登陆后能量过程与水汽供应的诊断研究 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 437–452. Gong Xiaoxue, Zhao Sixiong. 2007. Diagnosis on energy budget and moisture supply of Matsa after landfall [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (3): 437–452.
- Hao Shifeng, Cui Xiaopeng, Pan Jinsong, et al. 2009. A dynamical interpretation of the wind field in tropical cyclones [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 15(2): 210–216.
- 黄翠银, 沈新勇, 孙建华, 等. 2008. 一次由海岸锋引发山东半岛暴雪过程的研究 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 567–583. Huang Cuiyin, Shen Xinyong, Sun Jianhua, et al. 2008. Analysis of coastal front heavy snowfall in Shandong Peninsula [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 567–583.
- 黄立文, 吴国雄, 字如聪. 2005. 中尺度海—气相互作用对台风暴雨过程的影响 [J]. *气象学报*, 63 (4): 455–468. Huang Liwen, Wu Guoxiong, Yu Rucong. 2005. The effects of mesoscale air–sea interaction on heavy rain in two typhoon processes [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 63 (4): 455–468.
- 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.
- 矫梅燕, 姚学祥, 周兵, 等. 2004. 2003 年淮河水大天气分析与研究 [M]. 北京: 气象出版社, 215pp. Jiao Meiyuan, Yao Xuexiang, Zhou Bing, et al. 2004. Study on Weather Related with Floods in Huaihe River Basin in 2003 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 215pp.
- 矫梅燕, 赵琳娜, 卢晶晶, 等. 2007. 沙尘天气定量分级方法研究与应用 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 350–357. Jiao Meiyuan, Zhao Linna, Lu

- Jingjing, et al. 2007. Quantitative classification of Northeast Asian dust weather and its applications [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 350–357.
- Juneng L, Tangang F T, Reason C J C. 2007. Numerical case study of an extreme rainfall event during 9–11 December 2004 over the east coast of Peninsular Malaysia [J]. Meteor. Atmos. Phys., 98 (1–2): 81–98.
- 孔期, Rasul G, 赵思雄. 2005. 一次引发南亚大暴雨的季风低压结构、涡度与水汽收支分析 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 526–542. Kong Qi, Rasul G, Zhao Sixiong. 2005. Study of the structure, vortex budget and moisture supply of a monsoon depression producing heavy rainfall in South Asia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 526–542.
- Kong Q, Zhao S X. 2010. Heavy rainfall caused by interactions between monsoon depression and middle-latitude systems in Australia: A case study [J]. Meteor. Atmos. Phys., 106 (3–4): 205–226.
- 孔期, 郑永光, 陈春艳. 2011. 乌鲁木齐 7·17 暴雨的天气尺度与中尺度特征 [J]. 应用气象学报, 22 (1): 12–22. Kong Qi, Zheng Yongguang, Chen Chunyan. 2011. Synoptic scale and mesoscale characteristics of 7·17 Urumqi heavy rainfall in 2007 [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 22 (1): 12–22.
- 郎咸梅, 王会军, 周广庆. 2003. 我国 2003 年冬季气候特征与 2004 年春季沙尘气候形势的实时预测初步报告 [J]. 气候与环境研究, 8 (4): 381–386. Lang Xianmei, Wang Huijun, Zhou Guangqing. 2003. Real-time prediction of the climate feature for 2003 winter and dust climate for 2004 spring over China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (4): 381–386.
- 李博, 赵思雄. 2009. 2007 年入梅期由横槽与低涡切变引发淮河流域强降水的诊断研究 [J]. 大气科学, 33 (6): 1148–1164. Li Bo, Zhao Sixiong. 2009. A study of heavy rainfall resulting from transversal trough and shear line-low vortex in the Huaihe River during the Meiyu onset of 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (6): 1148–1164.
- 李博, 赵思雄, 陆汉城, 等. 2008. 综合多级相似预报技术在暴雨短期预报中的检验 [J]. 应用气象学报, 19 (3): 307–314. Li Bo, Zhao Sixiong, Lu Hancheng, et al. 2008. Test of the synthetical multilevel analog forecast technology in short-term rainstorm prediction [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 19 (3): 307–314.
- Li B, Liu L P, Zhao S X. 2011. The possible mechanism of a type of vortex heavy rainfall during the pre-rainy season in South China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4 (5): 247–252.
- 李崇银, 顾薇. 2010. 2008 年 1 月乌拉尔阻塞高压异常活动的分析研究 [J]. 大气科学, 34 (5): 865–874. Li Chongyin, Gu Wei. 2010. An analyzing study of the anomalous activity of blocking high over the Ural Mountains in January 2008 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (5): 865–874.
- Li J, Zhao S X, Yu F. 2010. Analysis of a Beijing heavy snowfall related to an inverted trough in November 2009 [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 3 (3): 127–131.
- 李晓岚, 张宏升. 2012. 2010 年春季北京地区强沙尘暴过程的微气象学特征 [J]. 气候与环境研究, 17 (4): 400–408. Li Xiaolan, Zhang Hongsheng. 2012. Micrometeorological characteristics during severe dust storms in spring of the Beijing Area in 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 400–408.
- Li X Z, Wen Z P, Zhou W, et al. 2012. Atmospheric water vapor transport associated with two decadal rainfall shifts over East China [J]. Journal of Meteorological Society of Japan. 90 (5): 587–602.
- 李英, 王继志, 陈联寿, 等. 2007. 台风麦莎 (Matsa) 的波状降水特征研究 [J]. 科学通报, 52 (3): 344–353. Li Ying, Wang Jizhi, Chen Lianshou, et al. 2007. A study on wave characteristics of rainfall associated with Tropical cyclone “Matsa” [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (3): 344–353.
- 梁建宇, 孙建华. 2012. 2009 年 6 月一次飑线过程灾害性大风的形成机制 [J]. 大气科学, 36 (2): 316–336. Liang Jianyu, Sun Jianhua. 2012. The formation mechanism of damaging surface wind in squall line in June 2009 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 316–336.
- 刘宁微, 齐琳琳, 韩江文. 2009. 北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析 [J]. 大气科学, 33 (2): 275–284. Liu Ningwei, Qi Linlin, Han Jiangwen. 2009. The analyses of an unusual snowstorm caused by the northbound vortex over Liaoning Province in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 275–284.
- 路秀娟, 钟青, 陈涛. 2010. 局地强对流系统发展多样性的个例研究 [J]. 气候与环境研究, 15 (2): 129–140. Lu Xiujian, Zhong Qing, Chen Tao. 2010. A case study of diversity in the evolution of a local severe convective system [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (2): 129–140.
- 骆承政, 乐嘉祥. 1996. 中国大洪水 [M]. 北京: 中国书店, 434pp. Luo Chengzheng, Le Jiaxiang. 1996. The Floods in China [M] (in Chinese). Beijing: China Bookstore, 434pp.
- 孟庆涛, 孙建华, 乔枫雪. 2009. 20 世纪 90 年代以来东北暴雨过程特征分析 [J]. 气候与环境研究, 14 (6): 596–612. Meng Qingtao, Sun Jianhua, Qiao Fengxue. 2009. Characteristics of heavy rainfall in Northeast China since the 1990s [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 14 (6): 596–612.
- 孟昭华. 1999. 中国灾荒史记 [M]. 北京: 中国社会科学出版社, 980pp. Meng Zhaozhua. 1990. Historical Records of Nature Disasters in China [M] (in Chinese). Beijing: China Society Press, 980pp.
- 慕建利, 王建捷, 李泽椿. 2008. 2005 年 6 月华南特大连续性暴雨的环境条件和中尺度扰动分析 [J]. 气象学报, 66 (3): 437–451. Mu Jianli, Wang Jianjie, Li Zechun. 2008. A study of environment and mesoscale convective systems of continuous heavy rainfall in the South of China in June 2005 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (3): 437–451.
- 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 Xiujie, 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.
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 464–474. Peng Jingbei, Zhang Qingyun, Bueh Cholaw. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan–Chongqing region in 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 464–474.
- 齐琳琳, 赵思雄. 2003. 利用非常规观测资料对上海特大暴雨过程的模拟研究 [J]. 气候和环境研究, 8 (4): 417–435. Qi Linlin, Zhao Sixiong.

2003. A numerical simulation of the heavy rainfall in Shanghai using non-conventional observational data [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 8 (4): 417–435.
- Qi L L, Zhao S X. 2003. Mesoscale analysis and simulation of heavy rainfall in Shanghai urban area by using non-conventional data [J]. *Chinese Science Bulletin*, 48 (S2): 36–43.
- 齐琳琳, 赵思雄. 2004. 一次热带低压引发上海特大暴雨过程的中尺度系统分析 [J]. *大气科学*, 28 (2): 256–269. Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2004. An analysis of mesoscale features of heavy rainfall in Shanghai on 5–6 August 2001 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 28 (2): 256–269.
- 齐琳琳, 孙建华, 连樱, 等. 2006. 热带气旋“蒲公英”两次登陆过程的灾害与结构特征 [J]. *气候与环境研究*, 11 (4): 499–513. Qi Linlin, Sun Jianhua, Lian Ying, et al. 2006. The analysis on the structures of Typhoon “Mindule” during its twice landing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (4): 499–513.
- Qi L L, Sun J H. 2006. Application of ATOVS microwave radiance assimilation to rainfall prediction in summer 2004 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 23 (5): 815–830.
- 齐琳琳, 王晓丹, 宁应惠, 等. 2010. 耦合模式在局地辐射雾三维数值模拟研究中的应用 [J]. *气候与环境研究*, 15 (1): 53–63. Qi Linlin, Wang Xiaodan, Ning Yinghui, et al. 2010. Application of a coupled model in numerical simulation of local radiative fogs [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 15 (1): 53–63.
- 钱莉, 杨永龙, 王荣喆. 2011. 河西走廊“2010. 4. 24”黑风成因分析 [J]. *高原气象*, 30 (6): 1653–1660. Qian Li, Yang Yonglong, Wang Rongzhe. 2011. Analysis on black storm cause in Hexi Corridor on 24 April 2010 [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 30 (6): 1653–1660.
- 钱婷婷, 王迎春, 郑社芳. 2005. 造成北京连续高温的河套高压结构分析 [J]. *应用气象学报*, 16 (2): 167–173. Qian Tingting, Wang Yingchun, Zheng Zhifang. 2005. A case study of the structure of the Hetao high which caused long-lasting hot weather in Beijing. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 16 (2): 167–173.
- 钱维宏. 2012. 中期-延伸期天气预报原理 [M]. 科学出版社, 1–410. Qian Weihong. 2012. Principle of Medium to Extended Range Weather Forecasts [M] (in Chinese), Beijing: Scientific Press, 1–410.
- 乔枫雪, 赵思雄, 孙建华. 2007. 一次引发暴雨的东北低涡的涡度和水汽收支分析 [J]. *气候与环境研究*, 12 (3): 397–412. Qiao Fengxue, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2007. Study of the vorticity and moisture budget of a northeast vortex producing heavy rainfall [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (3): 397–412.
- 曲晓波, 张涛, 刘鑫华, 等. 2010. 舟曲“8. 8”特大山洪泥石流灾害气象成因分析 [J]. *气象*, 36 (10): 102–105. Qu Xiaobo, Zhang Tao, Liu Xinhua, et al. 2010. Analysis on the meteorological causes for the 8 August 2010 massive mudslide in Zhouqu, Gansu Province [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 36 (10): 102–105.
- Rasul G, Chaudhry Q Z, Zhao S X, et al. 2005. A diagnostic study of heavy rainfall in Karachi due to merging of a mesoscale low and a diffused tropical depression during South Asian Summer Monsoon [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 22 (3): 375–391.
- Shao Y. 2000. Physics and Modelling of Wind Erosion [M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 139–1421.
- Shao Y. 2001. A model for mineral dust emission [J]. *J. Geophys. Res.*, 106 (D17): 20239–20254.
- 石广玉, 赵思雄. 2003. 沙尘暴研究中的若干科学问题 [J]. *大气科学*, 27 (4): 591–606. Shi Guangyu, Zhao Sixiong. 2003. Several scientific issues of studies on the dust storms [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 27 (4): 591–606.
- 史军, 丁一汇, 崔林丽. 2009. 华东极端高温气候特征及成因分析 [J]. *大气科学*, 33 (2): 347–358. Shi Jun, Ding Yihui, Cui Linli. 2009. Climatic characteristics of extreme maximum temperature in East China and its causes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (2): 347–358.
- 孙继松. 2005. 北京地区夏季边界层急流的基本特征及形成机理研究 [J]. *大气科学*, 29 (3): 445–452. Sun Jisong. 2005. A study of the basic features and mechanism of boundary layer jet in Beijing Area [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 29 (3): 445–452.
- 孙继松, 杨波. 2008. 地形与城市环流共同作用下的 β 中尺度暴雨 [J]. *大气科学*, 32 (6): 1352–1364. Sun Jisong, Yang Bo. 2008. Meso- β scale torrential rain affected by topography and the urban circulation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (6): 1352–1364.
- 孙建华, 陈红, 赵思雄, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气 II. 模拟试验和机理分析 [J]. *气候与环境研究*, 4 (4): 334–345. Sun Jianhua, Chen Hong, Zhao Sixiong, et al. 1999. A study on the severe hot weather in Beijing and North China. Part II. Simulation and analysis [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 4 (4): 334–345.
- 孙建华, 赵思雄. 2003. 华北地区“12·7”降雪过程的数值模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 8 (4): 387–401. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2003. A numerical simulation of snowfall in North China on 7 December 2001 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 8 (4): 387–401.
- 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2003. 一个适用于我国北方的沙尘暴天气数值预测系统及其应用试验 [J]. *气候与环境研究*, 8 (2): 125–142. Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2003. An integrated numerical modeling system of dust storm suitable to North China and its applications [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 8 (2): 125–142.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年 6 月 20–24 日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析 [J]. *气象学报*, 62 (4): 423–438. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. An analysis on MCSs in Meiyu Front during 20–24 June 2002 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 62 (4): 423–438.
- 孙建华, 张小玲, 卫捷, 等. 2005. 20 世纪 90 年代华北大雨过程特征的分析研究 [J]. *气候与环境研究*, 10 (3): 492–506. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Wei Jie, et al. 2005a. A study on severe heavy rainfall in North China during the 1990s [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 10 (3): 492–506.
- Sun J H, Zhao S X, Zhang X L. 2005. An analysis of a meso- β systems in the Meiyu front using a intensive observation data during CHANGES 2002 [J]. *Advances of Atmospheric Sciences*, 22 (2): 278–289.
- 孙建华, 齐琳琳, 赵思雄. 2006a. 9608 号台风登陆北上引发北方特大暴雨的中尺度对流系统研究 [J]. *气象学报*, 64 (1): 57–71. Sun Jianhua, Qi Linlin, Zhao Sixiong. 2006a. A study on mesoscale convective systems of the severe heavy rainfall in North China by “9608” typhoon [J]. *Acta*

- Meteorologica Sinica (in Chinese), 64 (1): 57–71.
- 孙建华, 周海光, 赵思雄. 2006b. 2003 年 7 月 4–5 日淮河流域大暴雨中尺度对流系统的观测分析 [J]. 大气科学, 30 (6): 1103–1118. Sun Jianhua, Zhou Haiguang, Zhao Sixiong. 2006b. An observational study of mesoscale convective systems producing severe heavy rainfall in the Huaihe River basin during 3–4 July 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1103–1118.
- Sun J H, Zhao L N. 2006. An integrated dust storm prediction system suitable for East Asia and its simulations results [J]. Global and Planetary Change, 52 (1–4): 71–87.
- 孙建华, 赵琳娜, 赵思雄. 2007. 2006 年春季一次引起华北地区强沉降的沙尘暴过程的模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 339–349. Sun Jianhua, Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2007. Numerical simulation on a dust storm producing strong deposition over North China in the spring of 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 339–349.
- 孙建华, 赵思雄. 2008a. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气静止锋与层结构分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (3): 368–384. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2008a. Quasi-stationary front and stratification structure of the freezing rain and snow storm over Southern China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (3): 368–384.
- 孙建华, 赵思雄. 2008b. 2008 年初南方雨雪冰冻灾害天气的大气层结和地面特征的数值模拟 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 510–519. Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2008b. Numerical simulation on stratification and surface features of freezing rain and snow storm over Southern China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 510–519.
- Sun J H, Zhao L N. 2008. Numerical simulation of two East Asian dust storms in spring 2006 [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 33 (12): 1892–1911.
- Sun J H, Zhao S X. 2010. The impact of multi-scale weather systems on freezing rain and snow storms over Southern China [J]. Wea. Forecasting, 25 (2): 388–407.
- Sun J H, Zhao S X, Xu G K, et al. 2010. Study on a mesoscale convective vortex causing heavy rainy rainfall during the Mei-yu season in 2003 [J]. Advances of Atmospheric Sciences, 27 (5): 1195–1209.
- 孙建华, 卫捷, 赵思雄, 等. 2011. 2009 年夏季异常天气及其环流分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 209–220. Sun Jianhua, Wei Jie, Zhao Sixiong. 2011. The abnormal weather and its circulation in summer of 2009 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 209–220.
- 孙建华, 黄翠银. 2011. 山东半岛一次暴雪过程的海岸锋三维结构特征 [J]. 大气科学, 35 (1): 1–15. Sun Jianhua, Huang Cuiyin. 2011. The three-dimensional structure of coastal front producing heavy snow over the Shandong Peninsula [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (1): 1–15.
- Sun J H, Zhang F Q. 2012. Impacts of mountain-plains solenoid on diurnal variations of rainfalls along the Mei-yu front over the East China Plains [J]. Mon. Wea. Rev., 140: 379–397.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2011. 我国极端高温时间的年代际变化及其与大气环流的联系 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 199–208, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2011.02.0. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2011. Decadal variability of the extreme hot event in China and its association with atmospheric circulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 199–208.
- 孙晶, 楼小凤, 胡志晋, 等. 2007. 梅雨期暴雨个例模拟及其中小尺度结构特征分析研究 [J]. 大气科学, 31 (1): 1–18. Sun Jing, Lou Xiaofeng, Hu Zhijin, et al. 2007. A numerical simulation on torrential rain during the Meiyu period and analysis of mesoscale and microscale structure of convective systems [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31(1): 1–18.
- 孙晶, 楼小凤, 史月琴. 2011. 不同微物理方案对一次梅雨锋暴雨过程模拟的影响 [J]. 气象学报, 69 (5): 799–809. Sun Jing, Lou Xiaofeng, Shi Yueqin. 2011. The effects of different microphysical schemes on the simulation of a meiyu front heavy rainfall [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 69 (5): 799–809.
- 孙永刚, 孟雪峰, 赵毅勇, 等. 2011. 内蒙古一次强沙尘暴过程综合观测分析 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 742–752. Sun Yonggang, Meng Xuefeng, Zhao Yiyong, et al. 2011. Composite observations and analysis of a severe dust storm in Inner Mongolia [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 742–752.
- 谈哲敏, 赵思雄. 2010. 我国南方 β 中尺度强对流系统结构与机理研究 [M]. 北京: 气象出版社, 327pp. Tan Zhemmin, Zhao Sixiong. 2010. Study on Structure and Mechanism of Meso- β -scale Convective Systems in South China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 317pp.
- 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.
- 陶诗言. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 225pp. Tao Shiyan. 1980. Heavy Rain in China [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 225pp.
- 陶诗言, 卫捷. 2008. 2008 年 1 月我国南方严重冰雪灾害过程分析 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 337–350. Tao Shiyan, Wei Jie. 2008. Severe snow and freezing-rain in January 2008 in the Southern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 337–350.
- 陶诗言, 赵思雄, 周晓平, 等. 2003. 天气学和天气预报的研究进展 [J]. 大气科学, 27 (4): 451–467. Tao Shiyan, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. The research progress of the synoptic meteorology and synoptic forecast [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 451–467.
- 陶祖钰, 郑永光, 张小玲. 2008. 2008 年初冰雪灾害和华南准静止锋 [J]. 气象学报, 66 (5): 850–854. Tao Zuyun, Zheng Yongguang, Zhang Xiaoling. 2008. China Southern China quasistationary front during ice-snow disaster of January 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 850–854.
- Tochimoto E, Kawano T. 2012. Development process of Baiu frontal depressions [J]. SOLA, 8: 9–12.
- 王东海, 柳崇健, 刘英, 等. 2008. 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻天气特征及其天气动力学成因的初步分析 [J]. 气象学报, 66 (3): 405–422. Wang Donghai, Liu Chongjian, Liu Ying, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (3): 405–422.
- 王东海, 夏茹娣, 刘英. 2011. 2008 年华南前汛期致洪暴雨特征及其对比

- 分析 [J]. 气象学报, 69 (1): 137–148. Wang Donghai, Xia Rudi, Liu Ying. 2011. A preliminary study of the flood causing rainstorm during the first rainy season in South China in 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (1): 137–148.
- 汪君. 2012. 中国地区洪涝滑坡灾害监测和动力数值预报系统的研制 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 166pp. Wang Jun. 2012. A real time monitoring and dynamical forecasting system for floods and landslides in China [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 166pp.
- 王丽娟, 赵琳娜, 寿绍文, 等. 2011. 2009 年 4 月北方一次强沙尘暴过程的特征分析和数值模拟 [J]. 气象, 37 (3): 309–317. Wang Lijuan, Zhao Linna, Shou Shaowen, et al. 2011. Observation and numerical simulation analysis of the severe sand storm over Northern China in April of 2009 [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), 37 (3): 309–317.
- 王自发, 庞成明, 朱江, 等. 2008. 大气环境数值模拟研究新进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 987–9953. Wang Zifa, Pang Chengming, Zhu Jiang, et al. 2008. IAP progress in atmospheric environment modeling research [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 32 (4): 987–995.
- Wangwongchai A, Zhao S X, Zeng Q C. 2005. A case study on a strong tropical disturbance and record heavy rainfall in Hat Yai, Thailand during the winter monsoon [J]. *Advances of Atmospheric Sciences*, 22(3): 436–450.
- Wangwongchai A, Zhao S X, Zeng Q C. 2010. An analysis of Typhoon “Chuntao” in June 2004 with focus on impact on Thailand [J]. *Advances of Atmospheric Sciences*, 27 (1): 14–32.
- 卫捷, 孙建华. 2007. 华北地区夏季高温闷热天气特征的分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 453–463. Wei Jie, Sun Jianhua. 2007. The analysis of summer heat wave and sultry weather in north China [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (3): 453–463.
- 卫捷, 陈红, 孙建华, 等. 2007. 2006 年夏季中国的异常气候——中国科学院大气物理研究所短期气候预测检验 [J]. 气候与环境研究, 12 (1): 1–7. Wei Jie, Chen Hong, Sun Jianhua, et al. 2007. The analysis of anomalous climate in Eastern China in summer 2006—verification of seasonal climate predictions of the Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (1): 1–7.
- 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.
- 夏茹娣, 赵思雄, 孙建华. 2006. 一类华南锋前暖区暴雨 β 中尺度系统环境特征的分析研究 [J]. 大气科学, 30 (5): 988–1008. Xia Rudi, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2006. A study of circumstances of Meso- β -scale systems of strong heavy rainfall in warm sector ahead of fronts in South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 30(5): 988–1008.
- 夏茹娣, 赵思雄. 2009. 2005 年 6 月广东锋前暖区暴雨 β 中尺度系统特征的诊断与模拟研究 [J]. 大气科学, 33 (3): 468–488. Xia Rudi, Zhao Sixiong. 2009. Diagnosis and modeling of meso- β -scale systems of heavy rainfall in warm sector ahead of front in South China (middle part of Guangdong province) in June 2005 [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (3): 468–488.
- Xia R D, Fu S M, Wang D H. 2012. On the vorticity and energy budgets of the cold vortex in Northeast China: A case study [J]. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 118 (1–2): 53–64.
- 谢庄, 崔继良, 刘海涛, 等. 1999. 华北和北京的酷暑天气 I. 历史概况及个例分析 [J]. 气候与环境研究, 4 (4): 323–333. Xie Zhuang, Cui Jiliang and Liu Haitao, et al. 1999. A study on the severe hot weather in Beijing and North China. Part I—Statistics and synoptic case study [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 4 (4): 323–333.
- 谢庄, 崔继良, 陈大刚, 等. 2006. 北京城市热岛效应的昼夜变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 69–75. Xie Zhuang, Cui Jiliang, Chen Dagang, et al. 2006. The annual, seasonal and monthly characteristics of diurnal variation of urban heat island intensity in Beijing [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 11 (1): 69–75.
- 谢作威, 布和朝鲁. 2012. 东北冷涡低频活动特征及背景环流 [J]. 气象学报, 70 (4): 704–716. Xie Zuowei, Bueh Cholaw. 2012. Low frequency characteristics of northeast China cold vortex and its background circulation pattern [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 70 (4): 704–716.
- 徐广阔, 赵思雄, 王业桂, 等. 2007. 2003 年汛期淮河流域降水的集合预测试验研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (4): 481–488. Xu Guangkuo, Zhao Sixiong, Wang Yegui, et al. 2007. Experiment of ensemble forecast of heavy rainfall in the Huaihe River during rainy season of 2003 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (4): 481–488.
- 杨贵名, 孔期, 毛冬艳, 等. 2008. 2008 年初“低温雨雪冰冻”灾害天气的持续性原因分析 [J]. 气象学报, 66 (5): 836–849. Yang Guiming, Kong Qi, Mao Dongyan, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008 [J]. *Acta Meteorologica Sinica*(in Chinese), 66 (5): 836–849.
- 杨辉, 李崇银. 2005. 2003 年夏季中国江南异常高温的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (1): 80–85. Yang Hui, Li Chongyin. 2005. Diagnostic study of serious high temperature over South China in 2003 summer [J]. *Climatic and Environmental Research*(in Chinese), 10 (1): 80–85.
- 杨辉, 宋洁, 晏红明, 等. 2012. 2009/2010 年冬季云南严重干旱的原因分析 [J]. 气候与环境研究, 17 (3): 315–326. Yang Hui, Song Jie, Yan Hongming, et al. 2012. Cause of the severe drought in Yunnan Province during winter of 2009 to 2010 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 17 (3): 315–326.
- 叶晨, 王建捷, 张文龙. 2011. 北京 2009 年“1101”暴雪的形成机制 [J]. 应用气象学报, 22 (4): 398–410. Ye Chen, Wang Jianjie, Zhang Wenlong. 2011. Formation mechanism of the snowstorm over Beijing in early winter of 2009 [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 22 (4): 398–410.
- 叶成志, 李昀英. 2011. 热带气旋“碧利斯”与南海季风相互作用的强水汽特征数值研究 [J]. 气象学报, 69 (3): 496–507. Ye Chengzhi, Li Yunying. 2011. A numerical study of the characteristics of strong moisture transport as a result of the interaction of tropical storm Bilis with the South China Sea monsoon [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (3): 496–507.
- 叶笃正, 丑纪范, 刘纪远, 等. 2000. 关于我国华北沙尘天气的成因与治理对策 [J]. 地理学报, 67 (5): 513–521. Ye Duzheng, Chou Jifan, Liu Jiyuan, et al. 2000. Causes of sand-stormy weather in Northern China and control measures [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 67 (5):

- 513–521.
- 于翥. 2012. 多梅年暴雨中尺度涡旋特征及发展移动机理研究 [D]. 中国科学院大气物理研究所博士学位论文, 125pp. Yu Fei. 2012a. Study on characteristics and development mechanisms of meso-scale vortex with heavy rainfall in rich Meiyu years [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 125pp.
- 于翥, 赵思雄. 2013. 一次少梅年武汉地区局地强降水尺度系统特征的分析 [J]. 气候与环境研究, 18 (1): 1–11. Yu Fei, Zhao Sixiong. 2013. Mesoscale analysis of heavy rainfall causing Wuhan flooding during poor Meiyu season 2009 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 1–11.
- 袁美英, 李泽椿, 张小玲. 2010. 东北地区一次短时大暴雨 β 中尺度对流系统分析 [J]. 气象学报, 68 (1): 125–136. Yuan Meiyang, Li Zechun, Zhang Xiaoling. 2010. Analysis of a mesoscale convective system during a brief torrential rain event in Northeast China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 68 (1): 125–136.
- 臧增亮, 何亿强, 赵思雄. 2008. 地表动量通量对一次华南前汛期降水影响的数值模拟 [J]. 高原气象, 27 (4): 976–985. Zang Zengliang, He Yiqiang, Zhao Sixiong. 2008. Numerical simulation of the effect of surface momentum flux on a frontal precipitation during pre-rainy season of South China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (4): 976–985.
- 曾庆存, 程雪玲, 胡非. 2007. 大气边界层非常定下沉急流和阵风的起沙机理 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 244–250. Zeng Qingcun, Cheng Xueling, Hu Fei. 2007. The mechanism of soil erosion and dust emission under the action of nonsteady strong wind with descending motion and gust wind [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 244–250.
- 曾庆存, 董超华, 彭公炳, 等. 2006. 千里黄云—东亚沙尘暴研究 [M]. 北京: 科学出版社, 228pp. Zeng Qingcun, Dong Chaohua, Peng Gongbing, et al. 2006. Gigantic Yellow Cloud-Dust Storm in East China [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 228pp.
- 张凤, 赵思雄. 2003. 梅雨锋上引发暴雨的低压动力学研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (2): 143–156. Zhang Feng, Zhao Sixiong. 2003. A dynamic study of one kind of Meiyu front lows producing heavy rainfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (2): 143–156.
- Zhang F, Zhao S X. 2004. A study of formation and development of one kind of cyclone on the Meiyu (Baiu) front [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 21 (5): 741–754.
- 张高英, 赵思雄, 孙建华. 2004. 近年来强沙尘暴天气气候特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 101–115. Zhang Gaoying, Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2004. Analysis of climatological characteristics of severe dust storms in recent years in the northern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 101–115.
- 张立生, 孙建华, 赵思雄, 等. 2007. 长江中游暖切变型暴雨的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (2): 165–180. Zhang Lisheng, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2007. A study on heavy rainfall associated with warm shear line in the middle reaches of the Yangtze River in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (2): 165–180.
- 张庆红, 韦青, 陈联寿. 2010. 登陆中国大陆台风影响力研究 [J]. 地球科学, 40 (7): 941–946. Zhang Qinghong, Wei Qing, Chen Lianshou. 2010. Impact of landfalling tropical cyclones in mainland China [J]. Science China Earth Sciences (in Chinese), 40 (7): 941–946. doi:10.1007/s11430-010-4034-8.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究——2003 年 [M]. 北京: 气象出版社, 170pp. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. 2004. Study of Anomaly Reasons of Weather and Climate in China in 2003 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 170pp.
- 张庆云, 宣守丽, 彭京备. 2008. La Niña 年冬季亚洲中高纬环流与我国南方降雪异常关系 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 385–394. Zhang Qingyun, Xuan Shouli, Peng Jingbei. 2008. Relationship between Asian circulation in the middle-high latitude and snowfall over South China during La Niña events [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 385–394.
- 张小玲, 陶诗言, 孙建华. 2010. 基于“配料”的暴雨预报 [J]. 大气科学, 34 (4): 754–766. Zhang Xiaoling, Tao Shiyang, Sun Jianhua. 2010. Ingredients-based heavy rainfall forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 754–766.
- 张元春, 孙建华, 傅慎明. 2012. 冬季引发一次华北暴雪的低涡涡度分析 [J]. 高原气象, 31 (2): 387–399. Zhang Yuanchun, Sun Jianhua, Fu Shenming. 2012. Analysis of vorticity during vortex producing snowstorm in North China in winter [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (2): 387–399.
- 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 2002. 一次引发华北和北京沙尘(暴)天气起沙机制的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 7 (3): 279–294. Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2002. Numerical simulation of dust emission in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (3): 279–294.
- 赵琳娜, 赵思雄. 2004a. 一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究 [J]. 大气科学, 28 (5): 722–735. Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2004. A diagnostic study of rapid developing cyclone in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (5): 722–735.
- 赵琳娜, 赵思雄. 2004b. 引发北方沙尘暴天气快速发展气旋的数值模拟研究 [J]. 气候与环境研究, 9 (1): 116–126. Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2004. Simulation of rapid developing cyclone associated with strong dust storm in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 9 (1): 116–126.
- 赵琳娜, 孙建华, 赵思雄. 2004. 2003 年 3 月 20 日沙尘暴天气的影响系统、起沙和输送的数值模拟 [J]. 干旱区资源与环境, 18 (1): 72–80. Zhao Linna, Sun Jianhua, Zhao Sixiong. 2004. Numerical simulation of synoptic background, sources, emissions and transport of dust storms during 20 Mar, 2002 in China [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 18 (1): 72–80.
- Zhao L N, Zhao S X. 2006. Diagnosis and simulation of a rapid developing cyclone related with severe dust storm in East Asia [J]. Global and Planetary Change, 52 (1–4): 105–120.
- 赵琳娜, 孙建华, 王超, 等. 2007. 2006 年春季最强沙尘暴过程的数值分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 309–319. Zhao Linna, Sun Jianhua, Wang Chao, et al. 2007. The numerical characteristics of a severe dust storm over North China in the spring of 2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 309–319.
- 赵庆云, 张武, 吕萍, 等. 2012. 河西走廊“2010. 04. 24”特强沙尘暴特

- 征分析 [J]. 高原气象, 31 (3): 688–696. Zhao Qingyun, Zhang Wu, Lü Ping, et al. 2012. Characteristic analysis of the severe dust event occurred in Hexi Corridor on April 24, 2012 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (3): 688–696.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 2002. 北京“12·7”降雪过程的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 7 (1): 7–21. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 2002. A study on snowfall in Beijing on 7 December 2001 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 7 (1): 7–21.
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 282pp. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on Mechanism of Meiyu Front Heavy Rainfall in Yangtze River [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 282pp.
- 赵思雄, 曾庆存. 2005. 东亚强寒潮—冷涌越过赤道并引发南半球热带气旋和强降水的个例研究 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 507–525. Zhao Sixiong, Zeng Qingcun. 2005. A study of East Asia strong cold wave-surge crossing equator and influencing the development of tropical cyclone and heavy rainfall in the Southern Hemisphere [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 507–525.
- 赵思雄, 傅慎明. 2007. 2004年9月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析 [J]. 大气科学, 31 (6): 1059–1173. Zhao Sixiong, Fu Shenming. 2007. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in eastern Sichuan Province and Chongqing in September 2004 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (6): 1059–1173.
- Zhao S X, Sun J H. 2007. Study on cut-off low pressure systems causing flood in Northeast Asia [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 96 (1–2): 159–180.
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007年淮河流域致洪暴雨及其尺度系统特征的分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (6): 713–727. Zhao Sixiong, Zhang Lisheng, Sun Jianhua. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems causing severe flood in Huaihe River basin during the summer of 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (6): 713–727.
- Zhao S X, Bei N F, Sun J H. 2007. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (4): 555–572.
- 赵思雄, 孙建华. 2008. 2008年初南方雨雪冰冻天气的环流场与多尺度特征研究 [J]. 气候与环境研究, 13 (4): 351–367. Zhao Sixiong, Sun Jianhua. 2008. Multi-scale systems and conceptual model on freezing rain and snow storm over southern China during January–February 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (4): 351–367.
- 赵思雄. 2011. 近年来江淮流域致洪暴雨特征分析 [J]. 气象与减灾研究, 34 (1): 1–5. Zhao Sixiong. 2011. Characteristic analysis of flood-causing rainstorm over Changjiang River basin in recent years [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese), 34 (1): 1–5.
- 赵宇, 崔晓鹏, 高守亭. 2011. 引发华北特大暴雨过程的中尺度对流系统结构特征研究 [J]. 大气科学, 35 (5): 945–962. Zhao Yu, Cui Xiaopeng, Gao Shouting. 2011. A study of structure of mesoscale systems producing a heavy rainfall event in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (5): 945–962.
- 赵玉春, 许小峰, 崔春光. 2012. 川西高原东坡地形对流暴雨的研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (5): 607–616. Zhao Yuchun, Xu Xiaofeng, Cui Chunguang. 2012. A study of convective rainstorms along the east slope of western Sichuan Plateau [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (5): 607–616.
- Zhong K, Dong P M, Zhao S X, et al. 2007. Adjoint-based sensitivity analysis of a mesoscale low on the Meiyu front and its implications for adaptive observation [J]. Advances of Atmospheric Sciences, 24 (3): 435–448.
- 周海光. 2008. 强热带风暴碧利斯(0604)引发的特大暴雨中尺度结构多普勒雷达资料分析 [J]. 大气科学, 32 (6): 1289–1308. Zhou Haiguang. 2008. 3D structure of the heavy rainfall caused by BILIS (0604) with Doppler radar data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (6): 1289–1308.
- 周秀骥, 薛纪善, 陶祖钰, 等. 2003. ‘98’华南暴雨科学试验研究 [M]. 北京: 气象出版社, 220pp. Zhou Xiuji, Xue Jishan, Tao Zuyu, et al. 2003. Study on Scientific Experiment of Heavy Rainfall in South China in 1998 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 220pp.
- 周玉淑, 高守亭, 邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特征分析 [J]. 大气科学, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 195–204.
- 周自江, 王锡稳, 牛若芸. 2002. 近 47 年中国沙尘暴气候特征研究 [J]. 应用气象学报, 13 (2): 193–200. Zhou Zijiang, Wang Xiwen, Niu Ruoyun. 2002. Climate characteristics of sandstorm in China in recent 47 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (2): 193–200.