

气候变暖背景下降水持续性与相态变化的研究综述*

翟盘茂¹ 廖圳¹ 陈阳¹ 余荣² 袁宇锋² 陆虹³
ZHAI Panmao¹ LIAO Zhen¹ CHEN Yang¹ YU Rong² YUAN Yufeng² LU Hong³

1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京,100081

2. 南京信息工程大学大气科学学院,南京,210044

3. 广西壮族自治区气候中心,南宁,530022

1. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2. *College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China*

3. *Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China*

2017-02-22 收稿,2017-04-27 改回.

翟盘茂,廖圳,陈阳,余荣,袁宇锋,陆虹. 2017. 气候变暖背景下降水持续性与相态变化的研究综述. 气象学报, 75(4):527-538

Zhai Panmao, Liao Zhen, Chen Yang, Yu Rong, Yuan Yufeng, Lu Hong. 2017. A review on changes in precipitation persistence and phase under the background of global warming. *Acta Meteorologica Sinica*, 75(4):527-538

Abstract Persistent precipitation and precipitation in solid forms (or near 0°C precipitation) always result in disastrous flooding, snow and extreme freezing events, imposing severe impacts on people's lives, property and socio-economic development. Significant progresses have been made in understanding changes in total precipitation and precipitation extremes in China. However, there still exist some gaps in understanding climate changes in precipitation persistence and phase. This paper has reviewed recent progresses and major conclusions with a focus on the above two aspects. Major results are as follows. The trends of changes in precipitation persistence and phase are inconsistent over different regions under the global warming background. In China, persistent precipitation tends to be more frequent and intense over South China but becomes less frequent over North China. Long-duration precipitation in Southwest China tends to be shortened. Accordingly, persistent freezing events over South China display a decreasing trend. The reason for these changes is possible associated with atmospheric circulation anomalies induced by teleconnections low-frequency oscillations, ENSO events and as well as global warming. As mentioned above, this paper also proposes some related key issues such as understanding changes in the property of precipitation and mechanisms for precipitation persistency and phase, and their linkages to the global warming. Such kinds of study are expected to enhance our understanding of climatic changes in China's precipitation and improve our knowledge on changes in extreme weather and climate events in a warming world.

Key words Climate warming, Precipitation persistence, Phase change, Snow and freezing event

摘 要 持续性降水和固态降水(或近地面气温为 0°C 左右的降水)都能导致洪涝和低温雨雪冰冻等灾害性的极端事件,对人民群众生命和财产安全以及社会经济发展也会造成严重危害。目前中外围绕降水量、极端降水事件变化等已开展了大量研究,但在降水持续性和相态变化的特征及其影响机理方面的研究仍显不足。因此,围绕降水持续性和相态变化的相关研究,对近 20 余年来取得的一些重要研究进展进行回顾。研究指出,在气候变暖背景下降水持续性和相态变化的特征在全球范围

* 资助课题:国家自然科学基金面上项目(41575094,41375091 和 41565005)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(1344051601021)。

作者简介:翟盘茂,主要从事极端天气气候事件研究。E-mail: pmzhai@cma.gov.cn

内表现出了区域上的不一致性。有关降水持续性变化方面,中国南方地区持续性降水过程及其产生的降水量呈现增多趋势,但北方地区呈现减少的趋势,而西南地区长持续性降水呈下降趋势。至于降水相态变化方面,中国南方地区持续性雨雪冰冻事件在气候变暖背景下总体呈减少趋势。这些变化除了与气候变暖有关外,可能还与大气遥相关模态、低频振荡及 ENSO 事件等引起的大气环流异常有关。今后应该更多开展气候变暖背景下降水持续性和相态变化的特征、可能机理以及其与气候变暖的可能联系方面的研究,以期通过相关研究深入理解中国降水持续性与相态变化的规律、成因及其与旱涝、低温雨雪灾害等的联系,进一步加深对气候变暖背景下中国天气、气候的影响及其机理的认识。

关键词 气候变暖,降水持续性,相态变化,低温雨雪冰冻事件

中图法分类号 P426

1 引言

政府间气候变化专门委员会第五次评估报告指出(IPCC, 2013),1880—2012年,全球平均地表温度升高了 $0.85[0.65-1.06]^{\circ}\text{C}$ 。进一步针对观测较为完整可靠的时段(1901—2012年)的地表温度资料的分析也表明在全球尺度和区域尺度上地表温度呈现出了明显的升高趋势,并认为过去几十年间地表温度升高的结论具有高可信度。相比之下,有关1901年以来的降水变化的结论仍有较大的不确定性,因此,对1950年后全球陆地降水变化的结论仅有不高于中等信度的认识。与地表温度不同,降水的变化具有明显的空间上和季节上的差异,极端降水事件的变化表现得尤为明显(Donat, et al, 2013)。例如,过去半个多世纪,北美洲和中美洲的强降水事件增多(Pryor, et al, 2009);南美洲强降水事件的频率和强度增加的幅度更大(Skanski, et al, 2013);欧洲的极端降水变化存在较大的季节性差异(Toreti, et al, 2011);非洲的极端降水事件并未表现出显著的变化趋势;亚洲和大洋洲观测到极端强降水事件增多的地区多于减少的地区(Hartmann, et al, 2013)。中国1950年以后极端降水事件总体趋于增多,但区域差异明显(严中伟等, 2000; Zhai, et al, 2005; 钱维宏等, 2007; 任国玉等, 2010)。

除了降水总量和极端性以外,降水的持续时间也是衡量降水变化的一个重要指标(江志红等, 2013)。降水事件持续时间的长短本身就可以决定其致灾能力。例如,1998年夏季,长江流域持续性降水天气异常长达40 d,前后发生了两次分别长达10和6 d的持续性强降水过程,所引发的全流域洪涝灾害造成直接经济损失达2600亿元人民币,死亡超过3000人(黄荣辉等, 1998)。此外,短时强降水历时虽短,但容易造成突发灾害。如2012年7月21—22日08时,北京及周边地区遭遇61年来最强

暴雨,此次特大暴雨导致79人死亡,10660间房屋倒塌,160.2万人受灾,造成的经济损失高达116.4亿元(孙建华等, 2013)。

此外,不同相态的降水以多种方式影响着陆面环境和水循环,气候变暖与降水相态变化也有直接联系。降水的相态变化主要是液态降水向固态降水的转化,除冰雹外,大多发生在近地面气温 0°C 左右的低温条件下,常见的降水类型有冻雨、雪、雨夹雪和霰等,这几种降水类型能单独出现或者以混合形式出现,从而形成雨雪冰冻事件(Bernstein, 2000; Stewart, et al, 2015),对交通运输、基础设施、人民的生命财产以及生态系统都能造成严重的影响(Changnon, 2003; Millward, et al, 2004; Changnon, et al, 2005; Zhou, et al, 2011; Stien, et al, 2012; Stewart, et al, 2015)。近期的研究表明,过去几十年,俄罗斯北极圈内固态降水显著上升,对于渔业以及高纬度地区的交通运输业造成极大的负面影响(Bulygina, et al, 2015)。可见在气候变暖背景下,这类固态降水事件依然不容忽视。值得注意的是,固态降水不仅在北美和俄罗斯等高纬度地区易于发生(Carrière, et al, 2000; Cortinas, et al, 2004),中低纬度地区也受其影响。例如,2008年1月10日至2月初,中国南方地区遭遇了历史罕见的冰冻雨雪灾害,交通、电力等遭受重创,一亿多人生活受到严重影响,直接经济损失达1000多亿元(Sun, et al, 2010; Zhou, et al, 2011)。总的来看,相较于其他类型的极端天气异常,有关固态降水的研究还有一定的局限性,在IPCC AR5中也并未对不同相态的降水进行区分。因此,对不同类型固态降水变化特征的相关结论尚未有较为全面的评估,对其认识仍很不足(Kunkel, et al, 2013; O’Gorman, 2014)。降水的相态变化不仅是冰雪和雨水的简单转换,也涉及到大气热力、动力过程及环境条件的变化,有必要开展深入细致

的区域性研究(Harder, et al, 2013)。

本研究将对 20 世纪 90 年代以来, 中外有关降水持续性特征变化以及近地面气温为 0°C 左右降水相态变化的主要研究进行回顾, 以期从一个新的视角理解中国降水持续性与相态变化的规律、成因及其与灾害的联系, 进一步加深气候变暖对中国降水持续性结构及相态变化的影响及其机理的认识。研究结果不仅对相关研究的展开和相关预报服务提供科学依据和参考, 而且还将对中国积极应对气候变化影响, 特别是防洪抗涝、防雪抗冻、调整农作物耕作制度和保护陆地生态环境等方面提供科学支撑。

2 研究进展

2.1 降水持续性变化及可能成因

2.1.1 逐日降水持续性变化

最近, 一些研究关注到气候变暖背景下降水持续性的演变特征。Zolina 等(2010)研究表明, 1950 年以后, 欧洲大部分降水事件的持续时间延长, 同时强度增大, 导致了降水总量增多。Zolina 等(2013)进一步的研究发现, 欧洲部分地区的降水日数发生的显著“重组”现象, 具体可能表现为在总降水日数无显著变化背景下, 一些地区的降水事件的持续时长和无降水时段的持续时长同时变长, 导致当地的洪水和干旱的风险同时增大。这种变化趋势对陆地生态系统, 包括地下水工程、地表径流和洪水均可能产生重要影响。更细致的研究发现, 欧洲降水持续时长的变化还存在明显的季节性和区域性差异(Zolina, et al, 2013)。Murawski 等(2015)发现德国在降水平均强度增强的背景下, 冬、春和秋季的降水持续性呈增加趋势, 而夏季的早期持续性也在增加。Chen Y 等(2013)研究认为在 1961—2010 年, 中国持续性暴雨事件的持续时间、降水量和影响范围均趋于增大。Bai 等(2007)研究中国持续性降水事件气候变化问题时发现, 中国东、西部地区存在不同变化趋势, 中国西部大部分地区年累计持续降水日数呈轻微上升趋势, 但在华北、华中以及中国东南地区则显著减少; 至于持续性过程产生的总降水量, 华北、东北东部和西南东部呈显著减少趋势, 而青藏高原东部和东南沿海部分地区趋于增加。

持续性降水结构的变化不仅会导致洪涝, 还可能引起干旱。Caloiero 等(2015)研究发现, 意大利南部干旱持续时长在年际尺度上趋于缩短, 而在冬

季趋于延长。美国堪萨斯州的湿期呈延长趋势, 相似地, 干期趋于缩短(Anandhi, et al, 2016)。对于中国, 刘莉红等(2008)以北方最长无降水日数作为研究的切入点, 指出自 1950 年以来中国东北、华北最长持续无降水日数增多, 干旱加剧; 西北地区持续无降水日数减少, 干旱趋于减缓。Zhang 等(2011)研究了中国最长持续性降水事件的变化, 发现黄河、海河和辽河流域最长持续性降水事件的持续时间显著缩短, 所带来的降水量显著减少, 因此将增大这些地区的干旱风险。而珠海地区降水长持续性呈减弱趋势, 年总降水量及日数减少, 但短持续性降水趋于增多, 这很可能导致短时强降水发生(Zhang, et al, 2012)。Chen 等(2014a)分析发现, 中国西南地区的降水越来越多地表现为 3 d 以下的短持续性降水和单日降水, 长持续性降水在总降水中的比重显著下降, 这直接导致了西南地区在 2000 年后严重干旱频发(图 1, 依据 Chen 等(2014a)的方法计算长持续性降水(连续 3 d 以上)和短持续性降水(2 d 及以下)事件对总降水量贡献的变化, 其中有效降水定义为日降水 $\geq 1 \text{ mm}$)。这样的变化趋势在长江流域也存在, 长江流域的降水持续性趋于减弱, 对应短持续性降水在总降水中的比重增大, 这说明长江流域的降水越来越多地以短持续性降水的形式出现, 并且由其引发的短时洪水、泥石流及城市内涝等灾害将会变得更加频繁(Zhang, et al, 2014)。

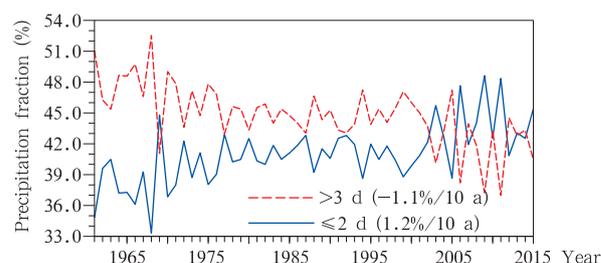


图 1 1961—2015 年中国西南地区 ($22^{\circ}\text{--}32^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{--}110^{\circ}\text{E}$) 不同持续时长降水事件对总降水量贡献的变化

(连续 3 d 以上(虚线)和不多于 2 d(实线))

Fig. 1 Temporal evolutions of percentage precipitation contributed by precipitation of different durations across Southwest China ($22^{\circ}\text{--}32^{\circ}\text{N}$, $100^{\circ}\text{--}110^{\circ}\text{E}$) during 1961–2015

(unit: %, dashed line indicates precipitation lasted longer than 3 d, and solid line is for precipitation lasted less than or equal to 2 d)

降水持续性结构的变化还常与极端降水事件紧密联系。图 2 是依据 Zolina 等(2010)的方法计算了中国西南地区(22° — 32° N, 100° — 110° E)降水持续时间、降水强度、总降水量的变化趋势。从图 2a 中可以看出,4 d 以上的持续性降水中,不同强度的降水都在减少,而越来越多的 40 mm/d 以上的强降水发生在持续时间为 2 d 的事件中,而 2 d 就带来 100 mm 左右的降水量,则可迅速致灾。图 2b 表明长持续性降水事件的平均强度在各个等级内发生的概率均降低,意味着长持续性降水事件带来的总降水量越来越少,这不利于干旱的缓解,但可减少持续性强降水引发洪涝灾害的可能性;而短持续性降水

事件的平均强度在 >20 mm/d 等级上越来越多,短持续性降水事件实际上越来越极端化。除单日降水量和降水频次外,一些研究分析了连续 5 d 内降水总量的极端性(Zhang, et al, 2012)。但这样的指数首先人为规定了可能的降水时长,即 5 d;其次,其仅考虑 5 d 的过程总量,并不保证过程中每日均有降水,更不能确定每日降水的极端性(Schmidli, et al, 2005)。单日的短时对流极端强降水和连续多日的锋面极端降水过程均可能造成 5 d 降水总量达到一定的极端性,但显然二者的成因和影响均有很大差异(Chen Y, et al, 2013)。

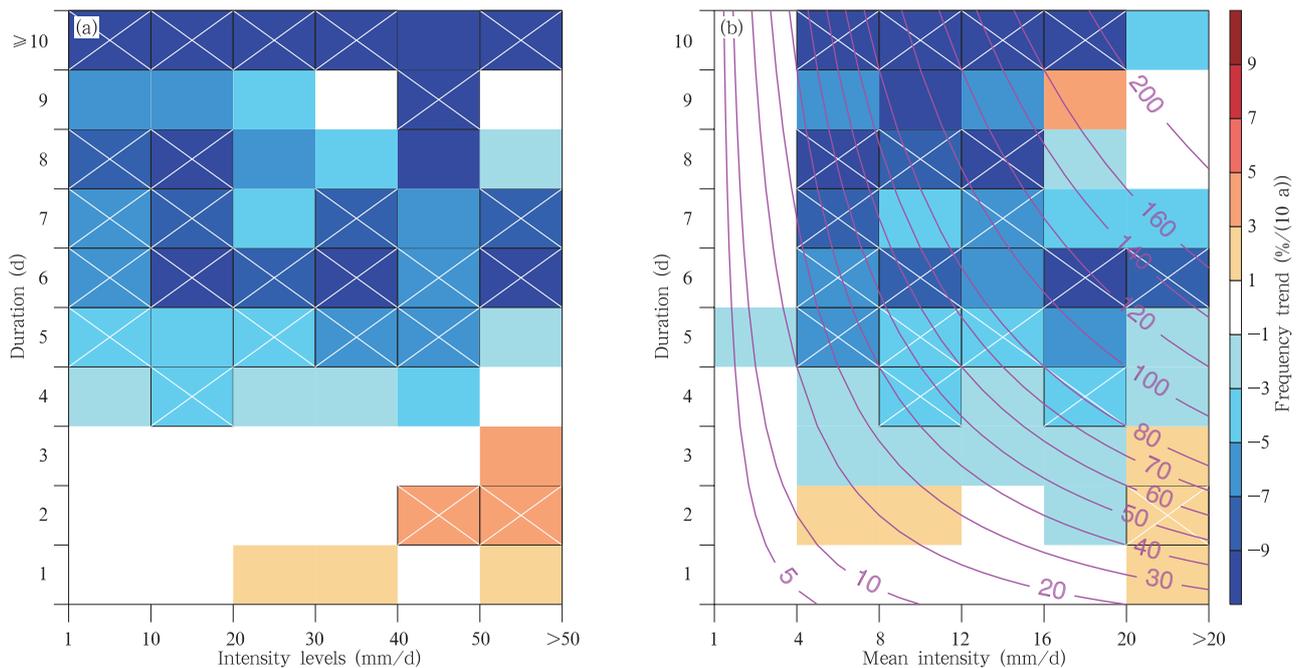


图 2 1961—2015 年中国西南地区(22° — 32° N, 100° — 110° E)

(a)不同持续时长、不同强度的降水事件频次的变化趋势,(b)不同持续时长、不同平均强度的降水事件的频次变化趋势

(紫色等值线为对应的事件总降水量;白色叉号和加粗的边框表征线性趋势通过信度为 95% 的统计检验)

Fig. 2 Precipitation trend at different intensity levels with various durations (a) and frequency trend of precipitation with various durations at different mean intensity levels (b) for Southwest China (22° — 32° N,

100° — 110° E) during 1961—2015. Crosses indicate significance at the 0.05 level

(Contours in b denote precipitation totals for events with different durations and mean intensity)

2.1.2 中国逐时降水的持续性变化

中国一些研究还关注到了小时尺度降水的持续性特征及其变化问题。根据小时尺度降水的持续性定义(Yu, et al, 2007),降水时间小于 3 h(大于 6 h)的降水过程称为短历时(持续性)降水。近些年来在中国北部地区短历时降水事件的频率降低,平

均降水强度增强,但是总体而言降水总量表现为年代际减少,这就意味着小时尺度上持续性降水呈减少趋势;而在中国南方地区,尤其是长江中下游流域,小时尺度上的持续性降水和短历时降水的频率及其降水量都显著增大(Yu, et al, 2010; Li, et al, 2011; 金炜昕等, 2015)。值得注意的是,无论在南

方还是北方,短历时降水的平均强度均有所增强。

小时尺度降水的极端事件(降水过程中某一时刻超过了小时强降水阈值)的持续性和季节特征在不同地区也各有不同(李建等, 2013)。具体表现为:沿海地区、长江流域和青藏高原东坡极端降水事件的平均持续时间较长(超过 12 h);中国北部地区持续时间较短;依据阈值判断,华南地区 4 月就可能有极端降水事件出现,而中国北方地区要到 6 月底才出现极端降水;中国大部分地区最晚极端降水发生在 8—9 月,但沿海地区、华南地区和西南地区南部的少数区域在 10 月以后仍有极端降水发生。此外,Zheng 等(2016)针对不同持续性降水事件(如 3、6、12 h 等)的逐时累计降水量阈值的研究,也揭示了小时尺度极端降水事件在长江中下游地区及华南沿海等地有着更长的持续时间。与以往不同的是,近年来极端降水与过去相比,强度更大,降水更加集中也更容易造成暴雨灾害。很多强降水发生时,其强度达到峰值时刻的时间比其从峰值时刻到结束时刻的时间短得多(Yu, et al, 2013),而且大多数的暴雨过程是属于“前期集中型”(殷水清等, 2014),即降水强度的最大值主要出现在暴雨的前期过程,类似这样的极端降水过程,有着更多的不可预测性和灾害性。

2.1.3 中国降水持续性变化的可能成因

有一些工作对持续性降水及其变化成因进行了分析。持续性降水往往与稳定的大尺度环流异常有关(Dole, et al, 1983; Higgins, et al, 1997)。有关长江流域降水持续性变化成因的研究发现,阻塞高压的稳定维持是造成持续性暴雨的重要原因,而在阻塞高压维持时段内,高、中、低层环流系统的组合性异常是造成长江流域持续性暴雨发生的决定性因素(Chen, et al, 2014b, 2014c)。基于大量历史个例对持续性暴雨的典型环流进行分型,提取其共性特征,发展并建立了“三维天气学概念模型”,即高层急流稳定维持,中层中高纬度为单阻或双阻型阻塞高压,副热带高压位于 20°N 附近,低层有强烈的水汽输送(Chen, et al, 2014b, 2015; Liu, et al, 2016; 翟盘茂等, 2016)。除了阻塞高压外,大气遥相关模态的稳定维持也能造成大气环流异常(翟盘茂等, 2013)。Chen 等(2015)通过将东亚-太平洋遥相关型(EAP)与江淮流域的持续性极端降水事件相联系,发现东亚-太平洋遥相关通过波的能量频

散促进阻塞高压发展,从而为持续性降水提供稳定的环流异常条件。通过进一步分离不同遥相关影响下的持续性强降水事件,发现仅欧亚遥相关和丝绸之路遥相关不能引发江淮地区发生持续性强降水,需与东亚-太平洋遥相关配合才行。3 支遥相关同时存在时江淮地区持续性强降水持续时间显著延长。其中,欧亚遥相关和丝绸之路遥相关的作用在于不断激发下游扰动,通过波流相互作用过程促使东亚-太平洋遥相关的三极子模态维持更久,进而延长极端降水的持续时间(翟盘茂等, 2016)。

对于华南地区的持续性降水,Wu 等(2013)发现导致华南前汛期持续性降水减少而非持续性降水增多的原因,主要是由于在华南地区静力稳定度减小的背景下,北方冷空气活动增多,南方暖湿气团减少引起。高辉等(2013)揭示了近 20 年华南夏季降水经历了由双峰型向单峰型转变的现象,并认为主要是由热带西太平洋变暖及海陆温差的季节性转换提前所导致的。刘蕾等(2014)研究认为华南持续性暴雨的发生存在两个频发时段(20 世纪 60 年代中期至 70 年代中期、20 世纪 90 年代初至 2010 年),这种持续性暴雨的变化可能与大尺度环流的年代际变化有关,因此,在做预测时应考虑不同的年代际背景场。

关于中国西南地区降水持续性变化的原因,从大范围的海温异常来看,有研究指出厄尔尼诺背景下海表面温度可以通过引起大气环流异常来影响东亚地区的降水分布,进而导致西南地区的降水持续性发生变化(Dai, 2011, 2013; Zhang, et al, 2013);从遥相关的角度可以发现,由于近 10 年来北极涛动负位相频繁发生,促使阿拉伯海上空常有气旋性异常环流,导致南支槽减弱,从而使得中国西南地区的水汽输送减弱,不利于长持续性降水的发生(Barriopedro, et al, 2012; Yang, et al, 2012)。土壤湿度与大气的相互作用也是影响长持续性降水变化的原因之一(Jaeger, et al, 2011; Wang, et al, 2011; Liu, et al, 2014)。干燥的土壤可能会减少降水总量和降水日数,并且缩短长持续性降水的时长。而当降水总量和日数减少后,又会反过来进一步加剧土壤的干旱程度,形成正反馈机制。

此外,研究还发现厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件能通过影响热带大气季节内振荡引起中国南方出现持续性降水异常(吕俊梅等, 2012)。青藏高原

大气热源对中国大陆持续性暴雨事件也可能产生影响(施晓晖等, 2015), 青藏高原前期的大气热源偏弱(强), 将导致东亚夏季风偏弱(强), 西南水汽输送亦偏弱(强), 水汽聚集在中国南(北)方, 最终使得夏季中国大陆的持续性暴雨事件偏多(少)。

2.2 降水的相态变化及可能成因

2.2.1 降水的相态变化

当近地面大气温度接近 0°C 左右时, 降水有可能以冻雨、雪、雨夹雪或霰等固态降水的形式出现。这类降水事件常与寒冷、冰冻天气紧密相关, 极易造成基础设施结冰和严重的低温雨雪冰冻灾害等。由于固态降水直接与临界温度条件有关, 因而这类降水的变化对气候变暖影响特别敏感。

国际上对于冻雨的研究起步较早, 针对冻雨的时空分布特征研究也较为全面(Gay, et al, 1993; Branick, 1997; Zerr, 1997; Stuart, et al, 1999; Cortinas, 2000; Bernstein, 2000; Changnon, et al, 2003)。这些研究主要关注北美的特定区域或者某种特定类型的固态降水, 在此基础上, Cortinas 等(2004)发现北美固态降水常在近地面气温为 0°C 左右时发生, 其年际频次的空间分布差异较大。这类降水主要发生在美国和加拿大的中东部, 其形成机理与地形、水汽以及温带气旋路径等有紧密联系。

进一步, 有研究(Førland, et al, 2003)指出挪威的北极圈地区降水在增多, 这一区域近地面气温为 0°C 左右的固态降水占年降水总量的很大部分, 同时也占冷季总降水量的绝大部分, 相对于北极圈其他地区, 该地区的固态降水事件频繁且强烈。固态降水事件正随气候变化而变化, 这些变化可能会增加自然灾害的频次和严重性。Groisman 等(2006)指出, 俄罗斯全境甚至北极地区降水强度在增大, 并且隆冬和秋季的地面水汽压也在上升(Wegmann, et al, 2015), 温度接近 0°C 左右时, 近地表水汽压上升, 降水强度增强可能导致陆面、近海基础设施结冰。对北美而言, 加拿大(Mekis, et al, 2011)和落基山脉(Nayak, et al, 2010)在过去几十年间出现了降雪减少而降雨增多的趋势。有研究(Bulygina, et al, 2015)表明, 俄罗斯大部分地区与降水相态变化相联系的冰冻事件频次呈减少趋势, 而远东地区冰冻事件的日数趋于增多, 并且俄罗斯北极圈西部地区冰冻事件的强度也在增强。值得注意的是, 固态降水的变化也存在空间分布差异, 如美

国东南部的冻雨和俄罗斯的冻毛毛雨的频次随气候变暖和冬季变短而显著减少, 然而挪威、俄罗斯西部和北美北极圈北部的冻雨却呈增多趋势(Groisman, et al, 2016)。

鉴于2008年中国南方低温雨雪冰冻灾害的巨大影响, 近10年来, 中国科学家也关注到气候变暖背景下的这种持续性低温雨雪冰冻事件, 并初步研究了其变化特点。中国北方更多关注降雪变化, 降雪变化对于农林牧渔业和交通有着重要影响, 降雪变化特征在变暖背景下存在明显的区域差异。孙秀忠等(2010)发现东北北部降雪量呈显著增多趋势, 而在东北南部降雪量则减少。相似地, 张志富等(2015)认为在新疆北部地区降雪量和降雪日数趋于增多, 达到大雪等级的降雪显著增多, 而青藏高原地区、华北和华中的降雪量和降雪日数均呈显著减少趋势。此外, 中国强降雪量和强降雪日数在东北北部、新疆、青藏高原东部均有明显增多趋势(刘玉莲等, 2013)。至于中国南方, 更关注与冻雨、雪和冰冻相联系的事件。总体看来, 中国南方地区这种低温雨雪冰冻事件在气候变暖背景下呈减少趋势(王遵娅, 2011; Qian, et al, 2014)。但也有研究认为, 在气候变暖趋缓背景下, 北极地区变暖强于中低纬度地区, 导致极地海冰快速减少, 促进北极涛动负位相、欧亚阻塞形势出现频次增多, 从而有利于极地冷空气南下影响中低纬度, 使得这种雨雪冰冻事件更加频发(Francis, et al, 2012; Cohen, et al, 2014; Kim, et al, 2014; Mori, et al, 2014; Kug, et al, 2015)。

2.2.2 中国低温雨雪冰冻事件变化的成因

关于持续性低温雨雪冰冻事件成因的研究, 有学者从大尺度环流角度出发, 认为大尺度异常环流系统(高层辐散条件下北侧存在阻塞高压, 南侧有持续的水汽输送, 西侧有东移低值扰动(南支槽), 东侧副热带高压稳定维持)相互配合和叠加能导致这类事件发生(布和朝鲁等, 2008; 丁一汇等, 2008; 杨贵明等, 2008)。而且将其与极地相联系, 发现北极涛动能通过直接影响地表气温、海平面气压或者东亚大槽从而影响中国冬季气候, 或者通过西伯利亚高压、行星尺度波间接影响中国(Gong, et al, 2001; Wu, et al, 2002; 王东海等, 2008; Wang, et al, 2010)。

从天气尺度方面来看, 天气尺度瞬变波活动对

于这类事件的发生起重要作用(Chen H S, et al, 2013)。有学者通过对2008年1月和2011年1月中国南方大范围持续低温雨雪冰冻天气过程的深入研究,给出了导致该类事件的云贵准静止锋概念模型。不同于一般锋面系统高低空垂直环流相互耦合,持续性雨雪冰冻天气过程中低层准静止锋区上空有两个垂直环流圈相互抑制。动力场上,中高层垂直环流圈的下沉支可延伸至对流层中层,一定程度上阻碍了冻雨区上空暖层的发展,抑制了低层强对流的发生。从微观气块受力上看,在总的向下的扰动气压梯度力和向上浮力相互平衡的作用下,使暖区得以稳定维持。静止锋面冷暖交汇界面附近,总存在理查森数(Ri) <1 的切变不稳定区,有利于云滴粒子增大,以及冻雨形成。此外,冬季南下冷空气和北上暖湿空气受地形阻挡作用在云贵高原东部地区汇合,形成长时间维持的云贵准静止锋及锋面中低层状云,为过冷雨滴的产生提供了良好的天气条件(Deng, et al, 2012; 高守亭等, 2014; 杜小玲等, 2014)。

通过对中高纬度地区环流发展演变特征的分析,Zong等(2014)指出有利于中国南方持续性雨雪冰冻天气出现的稳定环流形势的形成与中高纬度地区罗斯贝波列密切相关。北大西洋-欧洲波状异常环流的罗斯贝波能量向下游频散,是造成东亚地区异常环流型出现的主要原因。高空副热带急流往往表现异常,导致高空存在强辐散场,促使低层垂直运动的发展,将低层的水汽带至高层,形成雨雪冰冻天气。Zuo等(2013, 2014)从能量学和波包传播等角度揭示了中国南方冬季持续性低温雨雪冰冻事件中高空急流的异常增强机制。

此外,基于成因研究与分析,有关雨雪冰冻事件的预测、预报方法方面已取得了一定进展,并进行了相关应用,如利用大气扰动信号来预报事件或者利用粒子群-神经网络方法建立冬季冰冻雨雪预报模型等(江漫等, 2014; 陆虹等, 2015)。

3 未来研究方向

从现有进展来看,过去对降水变化及其机理研究主要集中在总降水量、降水频率和强度的变化,对降水持续性和相态变化(即液态降水向固态降水的转换)的气候变化特征揭示等方面仍然很不足。目前,针对降水持续性的变化对旱涝的分布和转变的

影响尚不能给出明确答案,对降水持续性发生变化的机理也知之甚少。同时,相较于夏季液态降水的研究,对冬季降水相态变化(特别是固态降水的变化)的认知程度也很不足(Lambert, et al, 2011; Kunkel, et al, 2013; Stewart, et al, 2015),关于极地变暖对于中低纬度极端天气气候事件的影响尚不明确(Shepherd, 2016),并且气候变暖对不同区域降水相态变化的影响及其影响机制尚有待进一步研究。为此,中国降水变化研究可以在以下几方面继续深入进行:

(1) 开展降水持续性结构变化研究。分析不同持续性降水事件的变化及其各种持续性的转化关系,进而确定降水事件是越来越持续还是越来越孤立,这样的变化是由于降水日数变化造成的还是由于不同持续时长的降水之间发生了结构重组造成。从尺度上看,除了分析年、季节尺度外,还将针对特征比较特殊的“持续性降水时期”,如江淮梅雨、华西秋雨等分析其降水持续性结构特征是否发生了变化,并关注相关降水强度的变化及其机理。在降水持续性变化与大气条件变化的可能联系方面,对于非持续性降水事件可侧重于分析其大气稳定性和局地对流条件变化,而对持续性降水过程变化则应更侧重于大尺度稳定天气系统、慢变天气过程、遥相关和年代际信号诊断。同时,关注气候变暖对持续性降水变化可能的影响。具体而言,以持续性为特征的降水结构的变化在中国存在什么样的区域一致性和差异性? 中国降水持续性结构变化对旱涝灾害的影响如何? 不同持续性降水对局地对流和大尺度环流的依赖性明显不同,造成降水持续性变化是由大尺度环流变化引起,还是与局地对流活动的变化有关? 这些变化与全球气候变暖和人类活动乃至局地气溶胶影响有无联系? 在这些方面的深入研究,将有助于了解中国不同区域降水变化成因,为预估未来降水结构变化奠定基础。

(2) 促进降水相态与冰冻事件的变化研究。分析气候背景下中国降水相态变化(特别是固态降水变化)将如何改变? 在不同区域其频次、强度、持续性的变化趋势与冬季季节变化是否会有差异? 中国哪些区域对这些变化更为敏感或者哪些区域变化更为显著? 而对于与降水相态变化相关的冰冻雨雪事件而言,其强度、持续性是如何变化,这样的变化是由于冷空气的变化主导还是暖湿气流的变化主导或

者二者共同作用下造成的?在全球变暖对中国低温雨雪冰冻事件的影响方面,可以关注造成这类事件的大尺度异常环流系统(如阻塞高压)、天气尺度锋面系统(如准静止锋)等的变化,还可以关注与异常环流形势密切相关的罗斯贝波能量频散路径的变化。而关于北极变暖对持续性低温雨雪冰冻事件的影响方面,可侧重于极区中高层定常行星波或者高空急流的变化对中低纬度地区可能的影响等,这些方面都有待进一步的研究。

(3) 改善并提高气候模式模拟和预估能力。虽然目前大多数有关降水持续性变化和相态变化的研究关注观测数据提取出的变化特征,但也有学者利用气候模式对未来与其有密切联系的低温事件变化进行模拟并归因,发现在变暖背景下,未来极端低温事件(至21世纪末)的频次虽然在减少(Räisänen, et al, 2011),但是其强度和持续性却可能增强(Kodra, et al, 2011; Pierce, et al, 2013; De Vries, et al, 2012; Gao, et al, 2015),这可能是由于大尺度环流模态的变化(如阻塞高压)所引起的。也有研究指出,考虑辐射强迫变化所导致的变化趋势与大尺度环流模态变化所导致的影响是相反的(Vavrus, et al, 2006; Gao, et al, 2015)。因而未来此类事件变化的规律和机理暂时尚未有统一的结论。当然,目前模式对变暖背景下的动力学过程(如阻塞高压,大气遥相关模态和低频模态等)的描述仍有不完善和不确定之处,使得目前模式对未来气候变化模拟效果有限(Plavcová, et al, 2016)。气候变暖似乎有利于冬季中纬度环流扰动增强,从而影响未来与降水相态变化相联系的寒潮事件的发生(Ma, et al, 2012)。因此,可以关注模式对降水持续性和相态变化的模拟,并分析模式的局限性所在,进而改善并提高模拟和预估能力。

对上述关于降水持续性和相态变化问题的回答将从一个新的视角深入理解中国降水变化规律、成因及其与旱涝灾害的联系,有利于进一步加深气候变暖对中国极端天气气候事件影响和机理的认识,提高对未来降水变化的预测预估能力。研究结果不仅对气候变化科学有重要价值,而且还将对中国采取应对气候变化和防灾减灾对策提供科学支撑。

参考文献

布和朝鲁, 纪立人, 施宁. 2008. 2008年初我国南方雨雪低温天气

的中期过程分析 I: 亚非副热带急流低频波. 气候与环境研究, 13(4): 419-433. Bueh C, Ji L R, Shi N. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part I: Low-frequency waves embedded in the Asian-African subtropical jet. Climatic Environ Res, 13(4): 419-433 (in Chinese)

丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳等. 2008. 中国南方 2008 年 1 月罕见低温雨雪冰冻灾害发生的原因及其与气候变暖的关系. 气象学报, 66(5): 808-825. Ding Y H, Wang Z Y, Song Y F, et al. 2008. Causes of the unprecedented freezing disaster in January 2008 and its possible association with the global warming. Acta Meteor Sinica, 66(5): 808-825 (in Chinese)

杜小玲, 高守亭, 彭芳. 2014. 2011 年初贵州持续低温雨雪冰冻天气成因研究. 大气科学, 38(1): 61-72. Du X L, Gao S T, Peng F. 2014. Study of the 2011 freezing rain and snow storm in Guizhou. Chinese J Atmos Sci, 38(1): 61-72 (in Chinese)

高辉, 蒋薇, 李维京. 2013. 近 20 年华南降水季节循环由双峰型向单峰型的转变. 科学通报, 58(15): 1438-1443. Gao H, Jiang W, Li W J. 2013. Transition of the annual cycle of precipitation from double-peak mode to single-peak mode in South China. Chin Sci Bull, 58(32): 3994-3999, doi: 10.1007/s11434-013-5905-0

高守亭, 张昕, 王瑾等. 2014. 贵州冻雨形成的环境场条件及其预报方法. 大气科学, 38(4): 645-655. Gao S T, Zhang X, Wang J, et al. 2014. The environmental field and ensemble forecast method for the formation of freezing rain over Guizhou Province. Chinese J Atmos Sci, 38(4): 645-655 (in Chinese)

黄荣辉, 徐子红, 王鹏飞等. 1998. 1998 年夏长江流域特大洪涝特征及其成因探讨. 气候与环境研究, 3(4): 300-313. Huang R H, Xu Y H, Wang P F, et al. 1998. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration. Climatic Environ Res, 3(4): 300-313 (in Chinese)

江漫, 于甜甜, 钱维宏. 2014. 我国南方冬季低温雨雪冰冻事件的大气扰动信号分析. 大气科学, 38(4): 813-824. Jiang M, Yu T T, Qian W H. 2014. Analysis on atmospheric anomalous signals of winter low temperature and snow-ice storms in Southern China. Chinese J Atmos Sci, 38(4): 813-824 (in Chinese)

江志红, 常奋华, 丁裕国. 2013. 基于马尔科夫链转移概率极限分布的降水过程持续性研究. 气象学报, 71(2): 286-294. Jiang Z H, Chang F H, Ding Y G. 2013. An investigation into continuous precipitation based on the Markov transition probability limit distribution. Acta Meteor Sinica, 71(2): 286-294 (in Chinese)

金炜昕, 李维京, 孙丞虎等. 2015. 夏季中国中东部不同历时降水时空分布特征. 气候与环境研究, 20(4): 465-476. Jin W X, Li W J, Sun C H, et al. 2015. Spatiotemporal characteristics of summer precipitation with different durations in central East China. Climatic Environ Res, 20(4): 465-476 (in Chinese)

李建, 宇如聪, 孙激. 2013. 从小时尺度考察中国中东部极端降水

- 的持续性和季节特征. 气象学报, 71(4): 652-659. Li J, Yu R C, Sun W. 2013. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central-eastern part of China. *Acta Meteor Sinica*, 71(4): 652-659 (in Chinese)
- 刘蕾, 孙颖, 张蓬勃. 2014. 大尺度环流的年代际变化对初夏华南持续性暴雨的影响. 气象学报, 72(4): 690-702. Liu L, Sun Y, Zhang P B. 2014. The influence of decadal change of the large-scale circulation on persistent torrential precipitation over South China in early summer. *Acta Meteor Sinica*, 72(4): 690-702 (in Chinese)
- 刘莉红, 翟盘茂, 郑祖光. 2008. 中国北方夏半年最长连续无降水日数的变化特征. 气象学报, 66(3): 474-477. Liu L H, Zhai P M, Zheng Z G. 2008. Variations in longest consecutive dry days in warm half year over Northern China. *Acta Meteor Sinica*, 66(3): 474-477 (in Chinese)
- 刘玉莲, 任国玉, 于宏敏等. 2013. 我国强降雪气候特征及其变化. 应用气象学报, 24(3): 304-313. Liu Y L, Ren G Y, Yu H M, et al. 2013. Climatic characteristics of intense snowfall in China with its variation. *J Appl Meteor Sci*, 24(3): 304-313 (in Chinese)
- 陆虹, 翟盘茂, 覃卫坚等. 2015. 低温雨雪过程的粒子群-神经网络预报模型. 应用气象学报, 26(5): 513-524. Lu H, Zhai P M, Qin W J, et al. 2015. A particle swarm optimization-neural network ensemble prediction model for persistent freezing rain and snow storm in Southern China. *J Appl Meteor Sci*, 26(5): 513-524 (in Chinese)
- 吕俊梅, 琚建华, 任菊章等. 2012. 热带大气MJO活动异常对2009~2010年云南极端干旱的影响. 中国科学: 地球科学, 42(4): 599-613. Lü J M, Ju J H, Ren J Z, et al. 2012. The influence of the Madden-Julian Oscillation activity anomalies on Yunnan's extreme drought of 2009 - 2010. *Sci China Earth Sci*, 55(1): 98-112, doi: 10.1007/s11430-011-4348-1
- 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮等. 2007. 近40年中国平均气候与极值气候变化的概述. 地球科学进展, 22(7): 673-684. Qian W H, Fu J L, Zhang W W, et al. 2007. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years. *Adv Earth Sci*, 22(7): 673-684 (in Chinese)
- 任国玉, 封国林, 严中伟. 2010. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望. 气候与环境研究, 15(4): 337-353. Ren G Y, Feng G L, Yan Z W. 2010. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China. *Climatic Environ Res*, 15(4): 337-353 (in Chinese)
- 施晓晖, 温敏. 2015. 中国持续性暴雨特征及青藏高原热源的影响. 高原气象, 34(3): 611-620. Shi X H, Wen M. 2015. Distribution and variation of persistent heavy rainfall events in China and possible impacts of heating source anomaly over Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteor*, 34(3): 611-620 (in Chinese)
- 孙建华, 赵思雄, 傅慎明等. 2013. 2012年7月21日北京特大暴雨的多尺度特征. 大气科学, 37(3): 705-718. Sun J H, Zhao S X, Fu S M, et al. 2013. Multi-Scale characteristics of record heavy rainfall over Beijing area on July 21, 2012. *Chinese J Atmos Sci*, 37(3): 705-718 (in Chinese)
- 孙秀忠, 罗勇, 张霞等. 2010. 近46年来我国降雪变化特征分析. 高原气象, 29(6): 1594-1601. Sun X Z, Luo Y, Zhang X, et al. 2010. Analysis on snowfall change characteristic of China in recent 46 Years. *Plateau Meteor*, 29(6): 1594-1601 (in Chinese)
- 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. 气象学报, 66(3): 405-422. Wang D H, Liu C J, Liu Y, et al. 2008. A preliminary analysis of features and causes of the snow storm event over the Southern China in January 2008. *Acta Meteor Sinica*, 66(3): 405-422 (in Chinese)
- 王遵娅. 2011. 中国冰冻日数的气候及变化特征分析. 大气科学, 35(3): 411-421. Wang Z Y. 2011. Climatic characters and changes of ice-freezing days in China. *Chinese J Atmos Sci*, 35(3): 411-421 (in Chinese)
- 严中伟, 杨赤. 2000. 近几十年中国极端气候变化格局. 气候与环境研究, 5(3): 267-272. Yan Z W, Yang C. 2000. Geographic patterns of extreme climate changes in China during 1951 - 1997. *Climatic Environ Res*, 5(3): 267-272 (in Chinese)
- 杨贵明, 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. 气象学报, 66(5): 837-849. Yang G M, Kong Q, Mao D Y, et al. 2008. Analysis of the long-lasting cryogenic freezing rain and snow weather in the beginning of 2008. *Acta Meteor Sinica*, 66(5): 836-849 (in Chinese)
- 殷水清, 王杨, 谢云等. 2014. 中国降雨过程时程分型特征. 水科学进展, 25(5): 617-624. Yin S Q, Wang Y, Xie Y, et al. 2014. Characteristics of intra-storm temporal pattern over China. *Adv Water Sci*, 25(5): 617-624 (in Chinese)
- 翟盘茂, 倪允琪, 陈阳. 2013. 我国持续性重大天气异常成因与预报方法研究回顾与未来展望. 地球科学进展, 28(11): 1177-1188. Zhai P M, Ni Y Q, Chen Y. 2013. Mechanism and forecasting method of persistent extreme weather events: review and prospect. *Adv Earth Sci*, 28(11): 1177-1188 (in Chinese)
- 翟盘茂, 李蕾, 周佰铨等. 2016. 江淮流域持续性极端降水及预报方法研究进展. 应用气象学报, 27(5): 631-640. Zhai P M, Li L, Zhou B Q, et al. 2016. Progress on mechanism and prediction methods for persistent extreme precipitation in the Yangtze-Huai River Valley. *J Appl Meteor Sci*, 27(5): 631-640 (in Chinese)
- 张志富, 希爽, 刘娜等. 2015. 1961—2012年中国降雪时空变化特征分析. 资源科学, 37(9): 1765-1773. Zhang Z F, Xi S, Liu N, et al. 2015. Snowfall change characteristics in China from 1961 to 2012. *Resources Sci*, 37(9): 1765-1773 (in Chinese)
- Anandhi A, Hutchinson S, Harrington J, et al. 2016. Changes in spatial and temporal trends in wet, dry, warm and cold spell length or duration indices in Kansas, USA. *Int J Climatol*, 36(12): 4085-4101
- Bai A J, Zhai P M, Liu X D. 2007. Climatology and trends of wet

- spells in China. *Theor Appl Climatol*, 88(3-4): 139-148
- Barriopedro D, Gouveia C M, Trigo R M, et al. 2012. The 2009/10 drought in China: Possible causes and impacts on vegetation. *J Hydrometeorol*, 13(4): 1251-1267
- Bernstein B C. 2000. Regional and local influences on freezing drizzle, freezing rain, and ice pellet events. *Wea Forecasting*, 15(5): 485-508
- Branick M L. 1997. A climatology of significant winter-type weather events in the contiguous United States, 1982 - 94. *Wea Forecasting*, 12(2): 193-207
- Bulygina O N, Arzhanova N M, Groisman P Y. 2015. Icing conditions over Northern Eurasia in changing climate. *Environ Res Lett*, 10(2): 025003, doi: 10.1088/1748-9326/10/2/025003
- Caloiero T, Coscarelli R, Ferrari E, et al. 2015. Analysis of dry spells in Southern Italy (Calabria). *Water*, 7(6): 3009-3023
- Carrière J M, Lainard C, Le Bot C, et al. 2000. A climatological study of surface freezing precipitation in Europe. *Meteor Appl*, 7(3): 229-238
- Changnon D, Bigley R. 2005. Fluctuations in US freezing rain days. *Climatic Change*, 69(2): 229-244
- Changnon S A. 2003. Characteristics of ice storms in the United States. *J Appl Meteor*, 42(5): 630-639
- Changnon S A, Karl T R. 2003. Temporal and spatial variations of freezing rain in the contiguous United States: 1948 - 2000. *J Appl Meteor*, 42(9): 1302-1315
- Chen H S, Liu L, Zhu Y J. 2013. Possible linkage between winter extreme low temperature events over China and synoptic-scale transient wave activity. *Sci Chin Earth Sci*, 56(7): 1266-1280
- Chen Y, Zhai P M. 2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951 - 2010. *Climate Res*, 57(2): 143-155
- Chen Y, Zhai P M. 2014a. Changing structure of wet periods across southwest China during 1961 - 2012. *Climate Res*, 61(2): 123-131
- Chen Y, Zhai P M. 2014b. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in central-eastern China. *Quart J Roy Meteor Soc*, 140(682): 1467-1478, doi: 10.1002/qj.2231
- Chen Y, Zhai P M. 2014c. Precursor circulation features for persistent extreme precipitation in central-eastern China. *Wea Forecasting*, 29(2): 226-240
- Chen Y, Zhai P M. 2015. Synoptic-scale precursors of the East Asia/Pacific teleconnection pattern responsible for persistent extreme precipitation in the Yangtze River Valley. *Quart J Roy Meteor Soc*, 141(689): 1389-1403
- Cohen J, Screen J A, Furtado J, et al. 2014. Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nat Geosci*, 7(9): 627-637
- Cortinas Jr J V. 2000. A climatology of freezing rain in the Great Lakes region of North America. *Mon Wea Rev*, 128(10): 3574-3588
- Cortinas Jr J V, Bernstein B C, Robbins C C, et al. 2004. An analysis of freezing rain, freezing drizzle, and ice pellets across the United States and Canada: 1976 - 90. *Wea Forecasting*, 19(1): 377-390
- Dai A G. 2011. Drought under global warming: A review. *Wiley Interdiscip Rev Clim Chang*, 2(1): 45-65
- Dai A G. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nat Climate Change*, 3(1): 52-58
- De Vries H, Haarsma R J, Hazeleger W. 2012. Western European cold spells in current and future climate. *Geophys Res Lett*, 39(4): L04706
- Deng D F, Gao S T, Du X L, et al. 2012. A diagnostic study of freezing rain over Guizhou, China, in January 2011. *Quart J Roy Meteor Soc*, 138(666): 1233-1244
- Dole R M, Gordon N D. 1983. Persistent anomalies of the extratropical northern hemisphere wintertime circulation: Geographical distribution and regional persistence characteristics. *Mon Wea Rev*, 111(8): 1567-1586
- Donat M G, Alexander L V, Yang H, et al. 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset. *J Geophys Res: Atmos*, 118(5): 2098-2118
- Førland E J, Hanssen-Bauer L. 2003. Past and future climate variations in the Norwegian Arctic: Overview and novel analyses. *Polar Res*, 22(2): 113-124
- Francis J A, Vavrus S J. 2012. Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophys Res Lett*, 39(6): L06801
- Gao Y, Leung L R, Lu J, et al. 2015. Persistent cold air outbreaks over North America in a warming climate. *Environ Res Lett*, 10(4): 044001
- Gay D A, Davis R E. 1993. Freezing rain and sleet climatology of the southeastern USA. *Climate Res*, 3(3): 209-220
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophys Res Lett*, 28(10): 2073-2076
- Groisman P Y, Knight R W, Karl T R. 2006. State of the Ground: Climatology and changes during the past 69 years over Northern Eurasia for a rarely used measure of snow cover and frozen land. *J Climate*, 19(19): 4933-4955
- Groisman P Y, Bulygina O N, Yin X G, et al. 2016. Recent changes in the frequency of freezing precipitation in North America and Northern Eurasia. *Environ Res Lett*, 11(4): 045007, doi: 10.1088/1748-9326/11/4/045007
- Harder P, Pomeroy J. 2013. Estimating precipitation phase using a psychrometric energy balance method. *Hydrol Process*, 27(13): 1901-1914
- Hartmann H, Andresky L. 2013. Flooding in the Indus River basin: A spatiotemporal analysis of precipitation records. *Global Planet Change*, 107: 25-35
- Higgins R W, Mo K C. 1997. Persistent North Pacific circulation a-

- nomalies and the tropical intraseasonal oscillation. *J Climate*, 10(2): 223-244
- IPCC. 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York, USA: Cambridge University Press, 1535pp
- Jaeger E, Seneviratne S. 2011. Impact of soil moisture-atmosphere coupling on European climate extremes and trends in a regional climate model. *Climate Dyn*, 36(9): 1919-1939
- Kim B M, Son S W, Min S K, et al. 2014. Weakening of the stratospheric polar vortex by Arctic sea-ice loss. *Nat Commun*, 5: 4646
- Kodra E, Steinhäuser K, Ganguly A R. 2011. Persisting cold extremes under 21st-century warming scenarios. *Geophys Res Lett*, 38(8): L08705
- Kug J S, Jeong J H, Jang Y S, et al. 2015. Two distinct influences of Arctic warming on cold winters over North America and East Asia. *Nat Geosci*, 8(10): 759-762
- Kunkel K E, Karl T R, Brooks H, et al. 2013. Monitoring and understanding trends in extreme storms: State of knowledge. *Bull Amer Meteor Soc*, 94(4): 499-514
- Lambert S, Hansen B. 2011. Simulated changes in the freezing rain climatology of North America under global warming using a coupled climate model. *Atmos Ocean*, 49(3): 289-295, doi: 10.1080/07055900.2011.607492
- Li J, Yu R C, Yuan W H, et al. 2011. Changes in duration-related characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years. *J Climate*, 24(21): 5683-5690
- Liu D, Wang G L, Mei R, et al. 2014. Impact of initial soil moisture anomalies on climate mean and extremes over Asia. *J Geophys Res Atmos*, 119(2): 529-545
- Liu R X, Sun J H, Wei J, et al. 2016. Classification of persistent heavy rainfall events over South China and associated moisture source analysis. *J Meteor Res*, 30(5): 678-693
- Ma T T, Wu Z W, Jiang Z H. 2012. How does coldwave frequency in China respond to a warming climate?. *Climate Dyn*, 39(9): 2487-2496
- Mekis E, Vincent L A. 2011. An overview of the second generation adjusted daily precipitation dataset for trend analysis in Canada. *Atmos Ocean*, 49(2): 163-177, doi: 10.1080/07055900.2011.583910
- Millward A A, Kraft C E. 2004. Physical influences of landscape on a large-extent ecological disturbance: The northeastern North American ice storm of 1998. *Landscape Ecol*, 19(1): 99-111
- Mori M, Watanabe M, Shioyama H, et al. 2014. Robust Arctic sea-ice influence on the frequent Eurasian cold winters in past decades. *Nat Geosci*, 7(12): 869-873
- Murawski A, Zimmer J, Merz B. 2015. High spatial and temporal organization of changes in precipitation over Germany for 1951 - 2006. *Int J Climatol*, 36(6): 2582-2597
- Nayak A, Marks D, Chandler D G, et al. 2010. Long-term snow, climate, and streamflow trends at the Reynolds Creek Experimental Watershed, Owyhee Mountains, Idaho, United States. *Water Resour Res*, 46: W06519, doi: 10.1029/2008WR007525
- O'Gorman P A. 2014. Contrasting responses of mean and extreme snowfall to climate change. *Nature*, 512(7515): 416-418
- Pierce D W, Das T, Cayan D R, et al. 2013. Probabilistic estimates of future changes in California temperature and precipitation using statistical and dynamical downscaling. *Climate Dyn*, 40(3-4): 839-856
- Plavcová E, Kyselý J. 2016. Overly persistent circulation in climate models contributes to overestimated frequency and duration of heat waves and cold spells. *Climate Dyn*, 46(9-10): 2805-2820
- Pryor S C, Howe J A, Kunkel K E. 2009. How spatially coherent and statistically robust are temporal changes in extreme precipitation in the contiguous USA?. *Int J Climatol*, 29(1): 31-45
- Qian X, Miao Q L, Zhai P M, et al. 2014. Cold-wet spells in mainland China during 1951 - 2011. *Nat Hazards*, 74(2): 931-946
- Räsänen J, Ylhäisi J S. 2011. Cold months in a warming climate. *Geophys Res Lett*, 38(22): L22704
- Schmidli J, Frei C. 2005. Trends of heavy precipitation and wet and dry spells in Switzerland during the 20th century. *Int J Climatol*, 25(6): 753-771
- Shepherd T G. 2016. Effects of a warming Arctic. *Science*, 353(6303): 989-990
- Skansi M D L M, Brunet M, Sigró J, et al. 2013. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global Planet Change*, 100: 295-307
- Stewart R E, Theriault J M, Henson W. 2015. On the characteristics of and processes producing winter precipitation types near 0°C. *Bull Amer Meteor Soc*, 96(4): 623-639, doi: 10.1175/BAMS-D-14-00032.1
- Stuart R A, Isaac G A. 1999. Freezing precipitation in Canada. *Atmos Ocean*, 37(1): 87-102
- Stien A, Ims R A, Albon S D, et al. 2012. Congruent responses to weather variability in high arctic herbivores. *Biol Lett*, 8(6): 1002-1005, doi: 10.1098/rsbl.2012.0764
- Sun J, Zhao S. 2010. The impacts of multi-scale weather systems on freezing rain and snowstorms over southern China. *Wea Forecasting*, 25(2): 388-407
- Toreti A, Fioravanti G, Perconti W, et al. 2011. Annual and seasonal precipitation over Italy from 1961 to 2006. *Int J Climatol*, 29(13): 1976-1987
- Vavrus S, Walsh J E, Chapman W L, et al. 2006. The behavior of extreme cold air outbreaks under greenhouse warming. *Int J Climatol*, 26(9): 1133-1147
- Wang A H, Lettenmaier D P, Sheffield J. 2011. Soil moisture

- drought in China, 1950–2006. *J Climate*, 24(13): 3257-3271
- Wang L., Chen W. 2010. Downward Arctic Oscillation signal associated with moderate weak stratospheric polar vortex and the cold December 2009. *Geophys Res Lett*, 37: L09707, doi: 10.1029/2010GL042659
- Wegmann M., Orsolini Y., Vázquez M., et al. 2015. Arctic moisture source for Eurasian snow cover variations in autumn. *Environ Res Lett*, 10(5): 054015
- Wu B Y., Wang J. 2002. Winter arctic oscillation, Siberian high and east Asian winter monsoon. *Geophys Res Lett*, 29(19): 3-1-4, doi: 10.1029/2002GL015373
- Wu H., Zhai P M. 2013. Changes in persistent and non-persistent flood season precipitation over South China during 1961–2010. *Acta Meteor Sinica*, 27(6): 788-798, doi: 10.1007/s13351-013-0613-x
- Yang J., Gong D Y., Wang W S., et al. 2012. Extreme drought event of 2009/2010 over southwestern China. *Meteor Atmos Phys*, 115(3-4): 173-184
- Yu R C., Xu Y P., Zhou T J., et al. 2007. Relation between rainfall duration and diurnal variation in the warm season precipitation over central eastern China. *Geophys Res Lett*, 34(13): L13703, doi: 10.1029/2007GL030315
- Yu R C., Li J., Yuan W., et al. 2010. Changes in characteristics of late-summer precipitation over eastern China in the past 40 years revealed by hourly precipitation data. *J Climate*, 23(12): 3390-3396, doi: 10.1175/2010JCLI3454.1
- Yu R C., Yuan W H., Li J. 2013. The asymmetry of rainfall process. *Chinese Sci Bull*, 58(16): 1850-1856
- Zerr R J. 1997. Freezing rain: An observational and theoretical study. *J Appl Meteor*, 36(12): 1647-1661
- Zhai P M., Zhang X B., Wan H., et al. 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. *J Climate*, 18(7): 1096-1108
- Zhang Q., Singh V P., Li J F., et al. 2011. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China. *J Geophys Res: Atmos*, 116(D23): D23106, doi: 10.1029/2011JD016088
- Zhang Q., Singh V P., Peng J T., et al. 2012. Spatial-temporal changes of precipitation structure across the Pearl River basin, China. *J Hydrol*, 440-441: 113-122
- Zhang Q., Peng J T., Xu C Y., et al. 2014. Spatiotemporal variations of precipitation regimes across Yangtze River Basin, China. *Theor Appl Climatol*, 115(3-4): 703-712
- Zhang W J., Jin F F., Zhao J X., et al. 2013. The possible influence of a nonconventional El Niño on the severe autumn drought of 2009 in Southwest China. *J Climate*, 26(21): 8392-8405
- Zheng Y G., Xue M., Li B., et al. 2016. Spatial characteristics of extreme rainfall over China with hourly through 24-hour accumulation periods based on national-level hourly rain gauge data. *Adv Atmos Sci*, 33(11): 1218-1232
- Zhou B Z., Gu L H., Ding Y H., et al. 2011. The great 2008 Chinese ice storm: Its socioeconomic-ecological impact and sustainability lessons learned. *Bull Amer Meteor Soc*, 92(1): 47-60
- Zolina O., Simmer C., Gulev S K., et al. 2010. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls. *Geophys Res Lett*, 37(6): L06704, doi: 10.1029/2010GL042468
- Zolina O., Simmer C., Belyaev K., et al. 2013. Changes in the duration of European wet and dry spells during the last 60 years. *J Climate*, 26(6): 2022-2047
- Zong H F., Bueh C., Ji L R. 2014. Wintertime extreme precipitation event over southern China and its typical circulation features. *Chinese Sci Bull*, 59(10): 1036-1044
- Zuo Q J., Gao S T., Lü D R. 2013. The propagation of wave packets and its relationship with the subtropical jet over Southern China in January 2008. *Adv Atmos Sci*, 30(1): 67-76
- Zuo Q J., Gao S T., Lü D R. 2014. The effect of the subtropical jet on the rainfall over Southern China in January 2008. *Adv Atmos Sci*, 31(3): 543-550