

# 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应

孙建奇<sup>①②\*</sup>, 敖娟<sup>①②③</sup>

① 中国科学院大气物理研究所, 竺可桢-南森国际研究中心, 北京 100029;

② 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029;

③ 中国科学院大学, 北京 100049

\* 联系人, E-mail: sunjq@mail.iap.ac.cn

2012-08-28 收稿, 2012-10-09 接受, 2013-02-05 网络版发表

中国科学院战略性先导科技专项(XDA05090306)和国家重点基础研究发展计划(2012CB955401)资助

**摘要** 本文主要研究了中国近 50 年来冬季(12~2 月)降水和极端降水在年代际尺度上对区域尺度增暖的响应。结果发现, 随着中国区域冬季温度的升高, 中国区域的冬季降水和极端降水均呈现出一致的增加趋势。而且伴随着气温在 20 世纪 80 年代中期的突变, 降水和极端降水也都在同时发生突变。定量分析结果显示, 中国区域冬季气温每增加 1<sup>°C</sup>, 降水和极端降水的增加百分率分别达到 9.7% 和 22.6%。该增加幅度, 明显高于全球平均水平, 说明中国区域冬季降水和极端降水对变暖的响应更加敏感, 也进一步凸现了开展降水对增暖的区域响应研究的重要性。此外, 极端降水的增幅高于非极端降水的增幅, 说明随着全球变暖中国区域冬季降水将更多以极端降水的形式出现, 这可能是近期中国多个地区冬季屡屡出现破纪录降雪事件的一个重要原因。

## 关键词

冬季降水  
极端降水  
全球变暖  
敏感性  
区域响应  
气候变化

温度和降水是影响人类社会和自然系统最主要、最直接的两个气候要素, 它们的异常变化常常伴随着高温热浪、低温寒潮、洪涝、干旱等灾害的发生, 所以, 一直以来是科学界以及社会大众关注的焦点。按照克劳修斯-克拉贝龙方程, 温度的增加应该导致水汽含量和降水的增加。卫星观测资料和再分析资料的研究结果进一步证实了全球变暖引起大气含水量增加的理论推断<sup>[1,2]</sup>。但是, 对于降水与变暖的定量关系, 目前还存在较大争议。Wentz 等人<sup>[2]</sup>的研究指出, 全球平均降水在 1987~2006 年间以与大气水汽含量相当的地表增暖速率(约 7.4%/<sup>°C</sup>)增加。这个速率明显高于耦合模式的模拟结果(约 1~3%/<sup>°C</sup>)<sup>[3]</sup>。针对观测和耦合气候模式模拟的降水对气温的不同敏感性, Lambert 等人<sup>[4]</sup>对 Wentz 等人<sup>[2]</sup>计算观测降水对温度敏感性的方法提出质疑, 提出利用回归方法更为合理, 最后得出结论: Wentz 等人<sup>[2]</sup>计算的观测降水对温度的敏感性偏高。此外, 由于模式对于观测气溶胶

及其辐射效应、云物理过程等的模拟存在问题, 模式中降水对温度的敏感性较观测要弱很多。如果扣除这些模式误差, 模式模拟的降水敏感性将与观测较为接近。由于 Wentz 等人<sup>[2]</sup>的研究只涉及到 1987~2006 年的资料, 其他一些研究因此提出质疑: 如此短的时间序列是否能够反映降水对增暖的响应程度<sup>[5]</sup>。理论上讲, 分析的时间段越长, 结果更加合理可信。但是, 如果将观测资料的时间拓展到近 50 多年(1951~2005 年), 不同资料的分析结果差异很大, 甚至相反<sup>[6]</sup>。这主要是由于不同观测资料的质量及其空间覆盖度有所不同所致。因此, 就目前而言, 从较长时间尺度准确估计全球降水对温度的敏感性还很困难。

相对于全球降水而言, 近半个世纪以来, 一些区域尺度降水观测的资料质量和覆盖度要好很多。加之, 所谓的全球变暖并不是全球一致变暖, 气候变暖的区域差异还是非常明显的<sup>[6]</sup>。因此, 从区域尺度,

**引用格式:** 孙建奇, 敖娟. 中国冬季降水和极端降水对变暖的响应. 科学通报, 2013, 58: 674-679

**英文版见:** Sun J Q, Ao J. Changes in precipitation and extreme precipitation in a warming environment in China. Chin Sci Bull, 2013, 58, doi: 10.1007/s11434-012-5542-z

去探讨降水对温度的敏感性相对来说更为可行,而且意义也十分突出.从过去几十年的变暖空间分布来看,中国区域是增暖最为剧烈的地区之一,因此本文的研究重点将主要探讨中国区域降水对该区域变暖的敏感性.

关于中国区域的降水和极端降水研究,此前已经有许多工作开展,这些工作在《气候变化国家评估报告》和一些综述文章中都被很好地进行了总结<sup>[7-9]</sup>.但是,直接探讨降水对温度的敏感性的工作还相对较少.Qian 等人<sup>[10]</sup>指出中国区域毛毛雨的显著减少可能与大尺度的增暖有关系.Zhao 等人<sup>[11]</sup>对照了 20 世纪 80~90 年代和 60~70 年代,中国南方和华北地区持续性降水发生和结束的时间,发现在相对偏暖期,中国南方持续性降水发生偏早而结束偏晚;中国北方地区持续性降水发生偏晚而结束偏早.这说明,中国区域的降水应该对变暖有所响应.鉴于全球变暖的信号在冬季最强,因此本文将从定性和定量两个角度重点分析中国区域冬季平均降水和极端降水对该区域变暖的敏感性.

## 1 数据及方法

本文研究所用的逐日气温资料是由 Li 和 Yan<sup>[12]</sup>发展的均一化的气温资料集;降水资料为中国气象信息中心提供的逐日降水资料,这两套逐日资料的分析时段为 1960~2008 年.首先对降水资料中任一年的缺测值超过该年记录 10%以及 49 年中累计缺测超过所有记录 1%的站点进行了剔除,然后利用多年平均的气候态数值再进行差补,最后与气温资料的站点求交集,共筛选了 535 个站点来分析.

本文中极端降水的识别采用的是百分位计算方法.以某一站点为例,首先对该站点 1971~2000 年间逐年冬季降水序列按照从大到小排序(无降水日剔除),然后计算每年降水序列的 95%分位值,再将这 30 年的 95%分位值进行平均得到该站点的极端降水阈值.凡是某年中降水量大于该阈值的所有冬季日数降水量之和定义为该站点该年冬季的极端降水量.凡是某年冬季所有降水日的降水总和为该站点该年冬季的降水量.

## 2 结果

在分析中国区域冬季温度与降水和极端降水的关系之前,首先了解一下这 3 个气象要素的气候态分

布及其在过去半个世纪的趋势特征.如图 1(a)所示,中国冬季气温在气候态上呈现出两极型,即基本上以从山东半岛到西南地区的一条东北-西南向斜线为界,以南气温大于零摄氏度,以北气温小于零摄氏度.中国南北两端冬季温差可以超过 40℃,可见中国气候类型十分丰富.在过去近半个世纪,与全球变暖相一致,中国区域也呈现出增暖的趋势(图 1(b)),尤其是中国北方地区增暖更加明显,相对增暖较小区位于中国西南地区.

冬季降水的大值区主要集中在我国南方地区(图 1(c)),也即图 1(a)中温度大于零摄氏度的区域,这主要是由于即使在冬季,该地区暖湿空气还是比较容易达到,从而为降水的形成准备了良好的水汽条件.相对而言,中国北方地区的冬季降水要少很多,尤其是内蒙古到新疆南部地区冬季降水量小于 10 mm.冬季中国北方地区降水偏少的一个重要原因是强大的东亚冬季风给中国北方地区带来强劲的干冷空气,严重阻止了低纬暖湿空气的北进,从而没有足够的水汽形成大量降水.冬季降水的趋势分布显示,除了中国华北和西部部分零星区域外,整个中国在过去半个世纪冬季降水都在增加,尤其是中国南方降水的增加量更大(图 1(d)).极端降水的气候态分布和趋势分布与降水的十分相似.在气候态上,极端降水的量值约为冬季总降水量的三分之一,但是从趋势变化的量值来看,极端降水和降水的变化基本相当,只略小一点.由此可以推测,过去半个世纪,在中国冬季降水的增加量中,极端降水应该占据了大部份额,这一推测在后续的工作中得到证实.

前面气候态和趋势变化的分析结果显示,随着过去半个世纪的增暖,中国区域冬季降水和极端降水均表现出增加的特点,这说明中国区域的降水与增暖之间应该具有较好的对应关系,下面的研究正是基于这一点展开.考虑到增暖是一个年代际尺度以上的问题,所以在后续分析之前,首先对所有资料作了 9 a 滑动平均,滤掉年际尺度的变化.

为了考察温度与降水的关系,采用了奇异值分解方法(SVD),该方法可以较好地反映出两个气象要素场的耦合关系.SVD 分析结果显示,中国冬季(12~2月)降水对温度的响应信号在年代际尺度上非常强.二者之间的协方差高度集中在第一模态,解释率达到 93.8%.因此,探讨中国冬季降水对变暖的敏感性,只分析第一模态已经足够.图 2 为 SVD 第一模

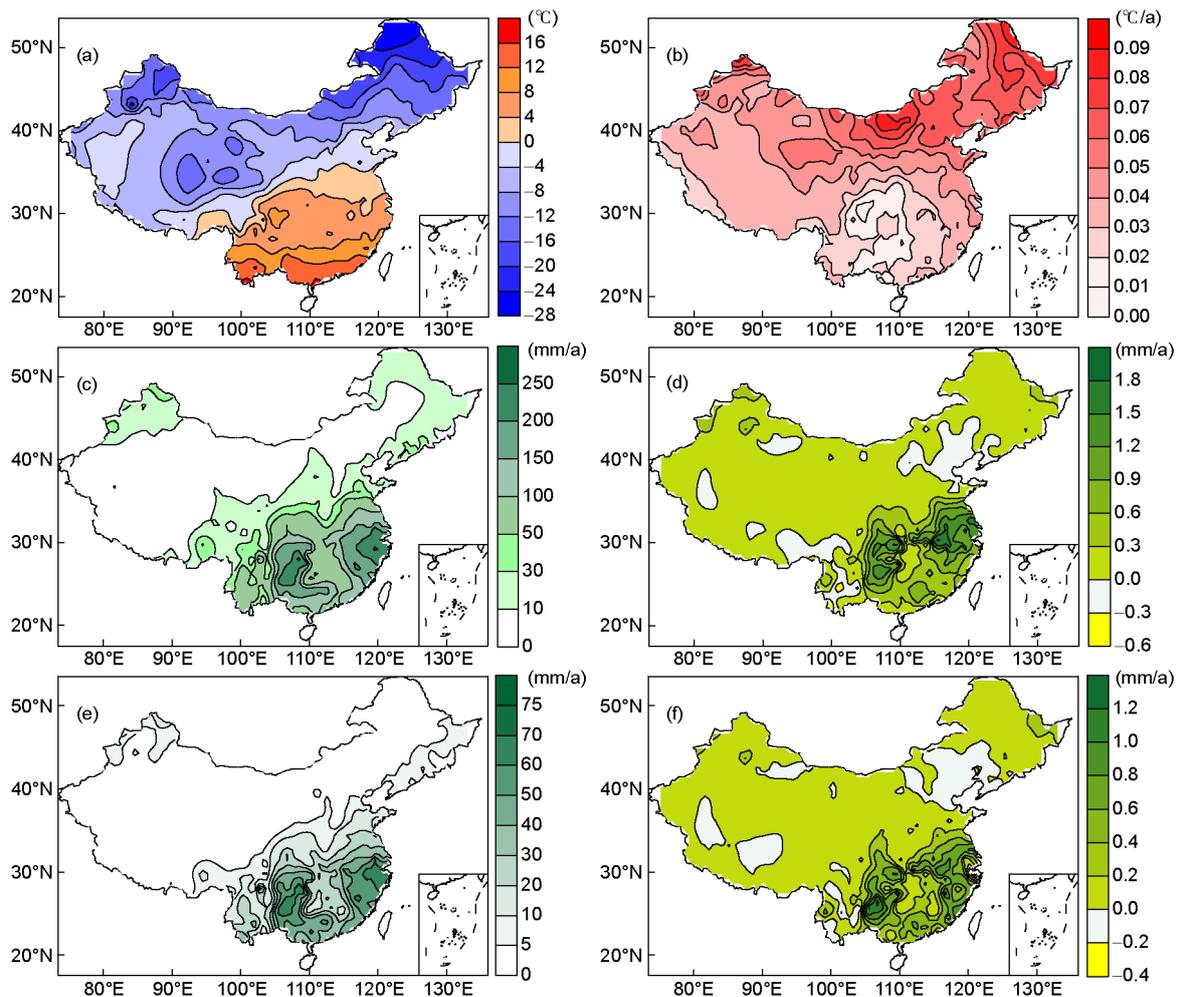


图 1 1960~2008 年平均的中国冬季气温(a)、降水(c)和极端降水(e)的气候态分布以及 1960~2008 年间中国冬季气温(b)、降水(d)和极端降水(f)的线性趋势分布

态温度和降水奇异向量场的空间分布及其时间系数。由图可以看出，温度场表现出非常好的空间一致性(图 2(a))，全区一致变暖，其中变暖的大值区主要位于中国北方地区；相对而言，南方地区的值要小一些。温度场如此的空间分布特征，与近半个多世纪来，中国区域变暖趋势的空间分布特征非常一致(图 1(b))。温度场对应的时间序列(图 2(c))，在过去 40 年表现出明显的上升趋势，并于 20 世纪 80 年代中期发生了一次明显的年代际突变，体现出了中国区域过去半个世纪的增暖趋势<sup>[13]</sup>。所以，SVD 分析中温度场的时空分布特征，很好地反映了中国冬季温度的增暖特征。这为下一步开展冬季降水对该区域增暖的响应研究奠定了科学基础。

图 2(b)为中国区域增暖对应的冬季降水变化的

空间分布图。相对于温度，冬季降水空间分布的一致性要弱一些。在中国东北南部-华北北部、西北、高原南部和西南部分区域出现了零星的负值区，但是这些负值区的量值都比较小，中国大部分区域还是表现出一致的增加特征。考虑到变暖空间尺度较大，本文主要从中国降水大范围一致变化的角度来探讨降水对温度的响应，关于上述那些零星区域的减少特征在这里不作进一步的分析。基于这一点，可以得出结论，在东亚区域增暖的背景下，中国冬季降水整体上表现出一致增加的特征，其中大值区位于南方。降水场的时间序列与温度场的时间序列在年代际尺度上变化非常一致，两者的突变时间都在 20 世纪 80 年代中期，相关系数达到 0.83。这进一步说明，中国区域的冬季降水对变暖具有很强的敏感性，随着温

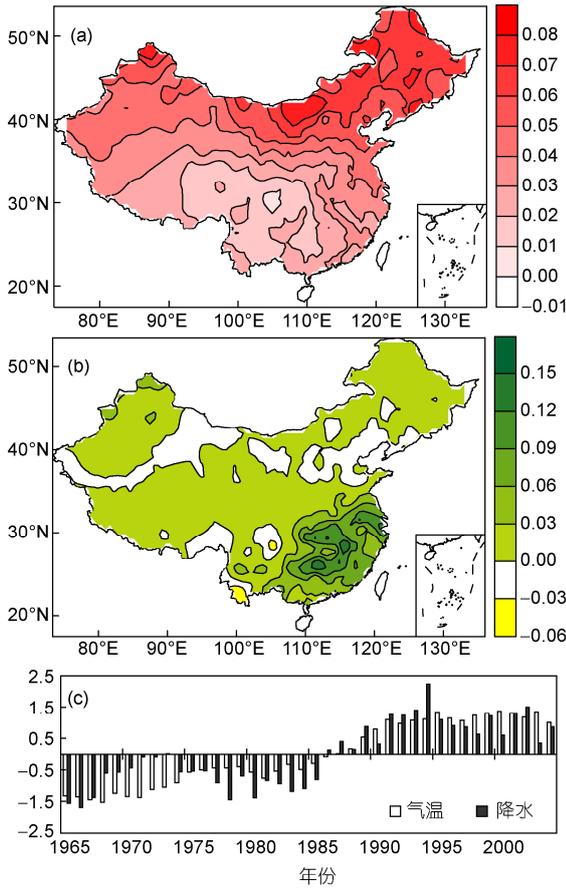


图 2 SVD 计算的冬季气温(a)和降水(b)的第一模态奇异向量场的空间分布及其对应的时间系数标准化曲线(c)

度的增加, 冬季降水显著增加.

为探讨极端降水对气温变化的敏感性, 本文利用 SVD 方法进一步考察了中国冬季气温与冬季极端降水之间的耦合关系. 由图 3(a)可以看到, SVD 第一模态的温度场的空间分布表现出与温度变化趋势相似的结果. 在过去的 40 年, 中国表现出整体一致的增暖特征, 大值区也主要分布于北方. 说明 SVD 该温度异常模态也很好地反映出了中国区域近几十年的增暖特征. 图 3(b)为极端降水的空间分布. 可以看到, 极端降水的分布与降水也比较类似, 除了东北南部-华北北部、西北、高原南部和西南等地区有一些零星的、弱的减少区域外, 中国绝大部分地区都表现出增加的特征, 这说明中国区域的极端降水对该区域的变暖具有全国一致性的响应特征. 极端降水场时间序列与气温场时间序列的变化也比平均降水的关系要好, 两者的相关系数为 0.92, 突变时间也都在 20 世纪 80 年代中期. 此外, 冬季气温和极端降水 SVD

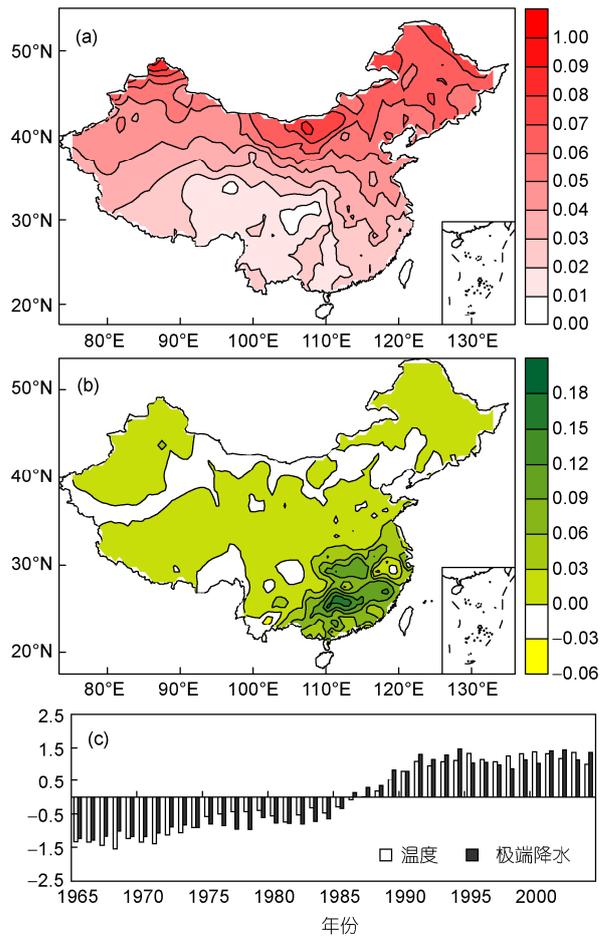


图 3 SVD 计算的冬季气温(a)和极端降水(b)的第一模态奇异向量场的空间分布及其对应的时间系数的标准化曲线(c)

第一模态的协方差解释率高达 95.4%. 这进一步说明, 东亚地区的增暖与极端降水的关系更为紧密.

SVD 的分析结果表明中国区域冬季温度和降水以及极端降水之间存在很强的耦合关系. 那么, 该地区冬季降水和极端降水对变暖敏感性到底多大呢? 为此, 本文进一步从全国平均的角度定量研究了中国区域冬季降水和极端降水与温度变化的关系. 在计算区域平均时间序列时, 首先利用 Cressman 方法将中国所有站点数据插值为  $2^{\circ} \times 2^{\circ}$  的网格数据, 然后将所有格点按照面积加权平均, 得到中国区域平均的温度、降水和极端降水序列. 表 1 为 SVD 第一模态气温场、降水场和极端降水场时间序列与中国区域平均的温度、降水和极端降水时间序列的相关系数. 可以看到, 所有相关系数都在 0.93 以上, 这表明区域平均的时间序列可以较好地反映 SVD 研究中揭示的中国区域气温、降水、极端降水在年代际尺度上的整

表1 SVD第一模态气温场、降水场和极端降水场的时间序列与中国区域平均的气温、降水和极端降水时间序列的相关系数<sup>a)</sup>

	相关系数
SVD 温度 <sub>极端降水</sub> vs 温度	1.00
SVD 温度 <sub>降水</sub> vs 温度	1.00
SVD 极端降水 vs 极端降水	0.95
SVD 降水 vs 降水	0.93

a) 表中下标中的极端降水(降水)表示利用SVD方法计算极端降水(降水)和温度关系时得到的温度时间序列。相关系数计算时段为1965~2004年

体变化特征以及它们之间的耦合关系。因此，利用中国区域平均的温度、降水和极端降水代替SVD结果来定量探讨降水和极端降水对升温的敏感性是合理可行的。图4(a)和(b)分别给出了以中国区域平均的冬季温度距平(相对于1965~2004年)与降水距平和极端降水距平分别为横纵坐标的散点图。该图可以很好地反映出温度与降水(温度与极端降水)之间的对应关系。可以看出，温度与降水以及极端降水在年代际尺度上表现出很好的线性对应关系：随着温度的增加，中国区域冬季降水和极端降水均增加，这与上面SVD的分析结果一致。

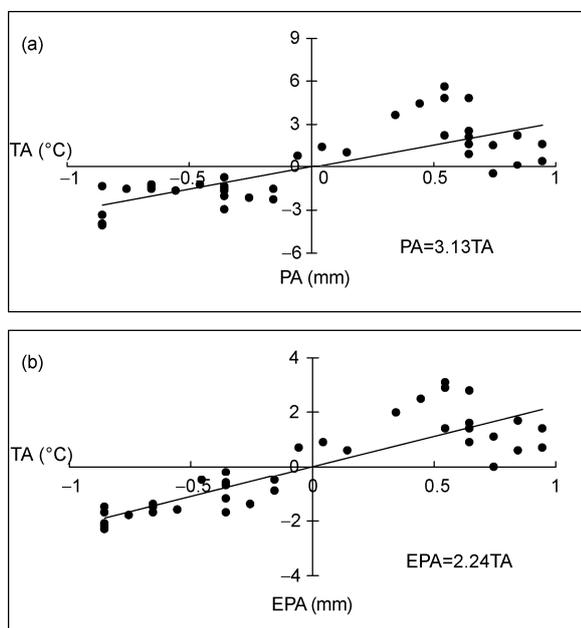


图4 (a) 以中国区域平均的冬季温度距平(TA)为横坐标(相对于1965~2004年)和降水距平(PA)为纵坐标的散点图; (b) 以中国区域平均的冬季温度距平(TA)为横坐标和极端降水距平(EPA)为纵坐标的散点图

进一步，本文利用线性拟合的方式，来诊断降水和极端降水对温度的定量敏感性。Lambert 等人<sup>[4]</sup>指出利用这种线性拟合方法来探讨降水对温度的响应更为合理。线性拟合方程见图右下角。可以看到，中国区域平均温度每增加1℃，冬季降水将增加3.1 mm，极端降水量将增加2.2 mm。如果用这些增加量除以它们各自的气候平均值(1965~2004年平均)，中国冬季降水和极端降水对升温的增加百分率分别为9.7%和22.6%。极端降水的增加量占到总降水增加量的71.6%，说明在全球变暖的背景下，中国冬季极端降水的增加率将明显大于非极端降水的增加率。这一点与近些年来，中国冬季很多地区纷纷出现破纪录的降雪事件的事实相一致<sup>[14-16]</sup>。同时，也与已有冬季降水和极端事件未来变化的预估结果相一致<sup>[17,18]</sup>。

### 3 总结及讨论

本文主要研究了过去近50年来中国冬季降水和极端降水对区域尺度冬季增暖的敏感性。结果显示，在过去50年，中国冬季降水和极端降水与温度在年代际尺度上表现出非常一致的变化特征。随着冬季变暖的加剧，中国冬季降水和极端降水也均呈现出增加的趋势，而且三者都在20世纪80年代中期发生了一次显著的年代际突变。已有研究结果显示，东亚冬季风在20世纪80年代中期发生了一次年代际突变，之后强度显著减弱<sup>[19,20]</sup>。这可能与变暖有关，因为多个耦合气候模式的模拟结果显示全球变暖背景下，东亚冬季风会偏弱<sup>[21]</sup>。而偏弱的冬季风减弱了强大干冷空气对东亚的控制，从而有利于低纬和海洋上暖湿空气的北进，因此在弱的东亚冬季风年，我国冬季降水偏多，尤其在中国南方地区更是偏多<sup>[22,23]</sup>，这与本文中变暖所对应的降水和极端降水的分布很相似。因此，变暖与中国冬季降水的关系可以通过冬季风联系起来，表明中国冬季降水和极端降水对变暖具有很强的响应。定量分析结果显示，中国冬季气温每升高1℃，冬季降水增加9.7%，极端降水增加22.6%。极端降水的增加量占总降水增加量的71.6%，表明随着气候变暖的加剧，中国区域冬季降水将更多以极端降水的形式出现。

为了对比冬季降水和极端降水对增暖的敏感性，本文还从全国平均的角度计算了夏季降水和极端降水与夏季温度变化的关系。结果显示，夏季气温升高同样对应着降水和极端降水的增加，但是增加幅度

明显低于冬季. 夏季气温每升高 1℃, 中国区域夏季降水增加 6.7%, 极端降水增加 15.4%. 由此可以看出, 中国区域温度升高对应的降水和极端降水在冷季和暖季都是增加的, 但是在增温更加显著的冷季, 降水和极端降水对于增暖的敏感性更高, 这进一步表明研究全球变暖的影响, 分季节进行可能更加全面.

中国区域降水和极端降水的增加率分别为 9.7%/a 和 22.6%/a, 这一数值明显高于已有从全球平均角度研究降水对增温响应的结果<sup>[2-4]</sup>. 造成这样差别的主要原因在于两点, 首先从全球平均角度来开展研究的工作针对的是年降水, 而本文主要关注的是冬季降水. 众所周知, 全球变暖最强的时间是冬

季, 所以如果说全球变暖对降水存在影响, 那么冬季降水对变暖的响应更大是合理的. 此外, 全球变暖并非全球一致变暖, 降水也并非全球一致变化, 因此在某些增暖区域, 降水对于温度的响应可能会强, 而在另外一些区域响应可能会弱一些, 也即不同地区降水对于增暖的响应应该是不同的. 本文研究显示, 中国区域冬季降水和极端降水是对变暖响应比较强的区域, 至少强于全球平均水平. 这一差异也进一步说明, 开展降水对变暖的区域响应更加重要, 不但要从全球尺度去探讨这一问题, 还更应该从区域尺度去研究该问题, 从而能够更为全面地理解全球变化的影响, 为气候变化的区域适应性提供科技支撑.

## 参考文献

- 1 Trenberth K E, Fasullo J, Smith L. Trends and variability in column-integrated atmospheric water vapor. *Clim Dyn*, 2005, 24: 741-758
- 2 Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring? *Science*, 2007, 317: 233-235
- 3 Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *J Clim*, 2006, 19: 5686-5699
- 4 Lambert F H, Stine A R, Krakauer N Y. How much will precipitation increase with global warming? *EOS*, 2008, 89: 193-200
- 5 Previdi M, Liepert B G. Interdecadal variability of rainfall on a warming planet. *EOS*, 2008, 89: 193-195
- 6 Trenberth K E, Jones P D, Ambenje P, et al. Observations: Surface and atmospheric climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, et al., eds. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007. 254-265
- 7 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007. 18-42
- 8 Zhai P M, Pan X H. Trends in temperature extremes during 1951-1999 in China. *Geophys Res Lett*, 2003, 30: 1913-1916
- 9 Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. Extreme climate in China: Factors, simulation and projection. *Meteor Z*, 2012, doi: 10.1127/0941-2948/2012/0330
- 10 Qian W H, Fu J L, Yan Z W. Decrease of light rain events in summer associated with a warming environment in China during 1961-2005. *Geophys Res Lett*, 2007, 34: L11705, doi: 10.1029/2007GL029631
- 11 Zhao P, Yang S, Yu R C. Long-term changes in rainfall over eastern China and large-scale atmospheric circulation associated with recent global warming. *J Clim*, 2009, 23: 1544-1562
- 12 Li Z, Yan Z W. Homogenized daily mean/maximum/minimum temperature series for China from 1960-2008. *Atmos Oceanic Sci Lett*, 2009, 2: 237-243
- 13 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近 50 年来中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63: 942-956
- 14 丁一汇, 王遵娅, 宋亚芳, 等. 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*, 2008, 66: 808-825
- 15 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2007 年 3 月中国东部北方地区一次强灾害性暴风雪事件的成因初探. *气象学报*, 2009, 67: 469-477
- 16 Wang H J, Yu E T, Yang S. An exceptionally heavy snowfall in Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model. *Meteorol Atmos Phys*, 2011, 113: 11-25
- 17 Sun J Q, Wang H J, Yuan W. Spatial-temporal features of intense snowfall events in China and their possible change. *J Geophys Res*, 2010, 115: D16110, doi: 10.1029/2009JD013541
- 18 高学杰, 石英, 张冬峰. RegCM3 对 21 世纪中国区域气候变化的高分辨率模拟. *科学通报*, 2012, 57: 374-381
- 19 王会军, 贺圣平. ENSO 和东亚季风之关系在 20 世纪 70 年代中期之后的减弱. *科学通报*, 2012, 57: 1713-1718
- 20 贺圣平, 王会军. 东亚冬季风综合指数及其表达的东亚冬季风年际变化特征. *大气科学*, 2012, 36: 523-538
- 21 Hori M E, Ueda H. Impact of global warming on the East Asian winter monsoon as revealed by nine coupled atmosphere-ocean GCMs. *Geophys Res Lett*, 2006, 33: L03713, doi: 10.1029/2005GL024961
- 22 Zhou L T. Impact of East Asian winter monsoon on rainfall over southeastern China and its dynamical process. *Int J Climatol*, 2011, 31: 677-686
- 23 王林, 冯娟. 我国冬季降水年际变化的主模态分析. *大气科学*, 2011, 35: 1105-1116