

王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. 大气科学, 37 (2): 313–318, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12301. Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 313–318.

东亚季风近几十年来的主要变化特征

王会军^{1,2} 范可^{1,2,3}

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 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

摘 要 本文简要综述了关于东亚夏季风和冬季风近几十年来的主要变化特征的若干研究结果, 特别是关于其年代际变化方面。夏季风及夏季气候的主要变化特征有: 1970 年代末之后东亚夏季风的年代际时间尺度的减弱以及相应的我国夏季降水江淮流域增多而华北减少、1992 年之后我国华南夏季降水增多、1999 年之后我国长江中下游夏季降水减少而淮河流域夏季降水增多、东亚夏季风和 ENSO 之间的年际变化相关性存在不稳定性。而关于东亚冬季风与冬季气候的主要变化特征有: 1980 年代中期之后东亚冬季风及其年际变率减弱、1970 年代中期之后冬季风和 ENSO 的年际变化相关性较弱、近年来的北极秋季海冰减少对北半球冬季积雪增多有显著贡献、东北冬季积雪在 1980 年代中期以后增多。与上述变化有关的极端气候和物候都发生了多方面的变化。

关键词 东亚夏季风 东亚冬季风 年代际变化 ENSO 海冰

文章编号 1006-9895(2013)02-0313-06

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12301

Recent Changes in the East Asian Monsoon

WANG Huijun^{1,2} and FAN Ke^{1,2,3}

1 Nansen–Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Key Laboratory of Regional Climate–Environment for East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract Studies on the recent changes of the summer and winter monsoons, with priority on decadal–interdecadal scales, are reviewed briefly in this paper. The major changes in the East Asian summer monsoon (EASM) include a weakening of the EASM and a shift in precipitation patterns at the end of 1970s; an increase in South China precipitation after 1992–1993; a decrease in precipitation in the middle-and-lower reaches of the Yangtze River and an increase in precipitation in the Huaihe River valley after 1999; and instability in the relationship between the EASM and El Niño–Southern Oscillation (ENSO). The changes in the East Asian winter monsoon (EAWM) include a weakening of the EAWM and its interannual variability after the mid-1980s, an increase in winter snowfall in Northeast China after the mid-1980s, and a weakening of the EAWM–ENSO relationship after the mid-1970s. In addition, the impact of the autumn Arctic sea ice decline on the winter snow cover in the Northern Hemisphere is discussed. These changes in EASM and EAWM indicate that the extreme climate and phenology have been significantly altered.

Keywords East Asian summer monsoon, East Asian winter monsoon, Interdecadal variability, ENSO, Sea ice

收稿日期 2012-08-20, 2012-09-15 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41130103

作者简介 王会军, 男, 1964 年出生, 研究员, 主要从事气候动力学和气候预测研究。E-mail: wanghj@mail.iap.ac.cn

1 引言

东亚夏季风 (EASM) 和东亚冬季风 (EAWM) 对我国以及整个东亚地区的天气和气候有直接作用 (Tao and Chen, 1987), 一直是研究东亚大气环流和天气、气候问题的核心问题之一, 是开启东亚气候变异奥秘的一把“钥匙”。EASM 具有显著的年际变化, 从而引起我国夏季降水和气温年际波动, 经常带来酷暑、干旱、洪涝等灾害; 而 EAWM 的显著年际变化则会引起冬季严寒、暴风雪等灾害 (如, Fan, 2009; Sun et al., 2010; Wang et al., 2011; Fan, 2011; Wang et al., 2012; 王会军等, 2003)。研究表明, ENSO 以及全球不同区域海表温度 (SST) 异常 (例如, 李崇银和穆明权, 2000; 陈文, 2002; Wang et al., 2008; Wang and He, 2012a; Li and Wang, 2012)、南极涛动异常 (例如, Fan and Wang, 2004; Wang and Fan, 2005; Xue et al., 2004; Sun et al., 2008; Gao et al., 2003)、北极海冰和北极涛动异常等 (Liu et al., 2012; Wu and Wang, 2002a; Gong et al., 2001; Wang and Sun, 2009) 都对 EASM、EAWM 具有显著影响。

从气候变化和全球变暖问题着眼, EASM 和 EAWM 也是一个关键科学问题。迄今为止, 几乎所有的研究结果都显示未来全球变暖情景下 EAWM 将要减弱, 冬季风势力向北极地区退缩, 从而我国冬季气温将显著上升、北方地区都会有更多的冬季降水或者降雪, 极端暴雪事件可能会增多。而秋季北极海冰面积的大幅度减少可能会对东亚冬季气候乃至夏季气候产生重大影响, 导致北方冬季降雪增多、夏季风增强、夏季北方降水增多等等 (Liu et al., 2012)。并且, 随着全球变暖的继续, 北极海冰可能会加速融化, 导致在 21 世纪的中期或者后期出现夏秋季节北极没有海冰的“蓝色北极”状态, 从而对我国和东亚气候产生更大的影响 (Wang and Overland, 2009; Wang and Zhang, 2010; 马洁华等, 2012)。

在年际变化和全球变暖所涉及的近百年尺度的气候变化之间, 十年和几十年尺度的年代际变化问题更是十分重要, 年代际变化为年际变化提供重要背景, 也可以显著调整更长时间尺度的变化。任何关于未来气候变化的预测必须同时考虑由于自然和人为强迫而产生的几十年到百年时间尺度的长期变化和十年到几十年时间尺度的年代际变

化, 这就是为什么 IPCC 的第五次科学评估报告非常重视年代际气候变化的预测和气候近期变化的预估的原因。实际上, 国际上近些年来关于年代际气候变化的预测研究非常重视, 已经有了相当多的研究机构基于耦合气候模式, 通过建立大气和海洋等的初始化系统来对气候年代际变化进行预测研究 (如: Boer, 2000)。

鉴于年代际气候变化问题的重要性, 本文以东亚季风和东亚气候为着眼点, 概要综述关于其过去几十年来年代际时间尺度变化的若干主要特征, 试图为未来相关科学问题的研究提供一个总体背景和思考的着眼点。

2 关于 EASM 和我国夏季气候的年代际变化

2.1 关于 EASM 在 1970 年代末的减弱

关于 EASM 的年代际变化, 最为显著和受到关注的是发生于 1970 年代末的 EASM 环流由相对较强向相对较弱的年代际减弱 (Wang, 2001), 与此相连的是我国夏季降水江淮流域增多, 华北减少 (Wang, 2001)。

接下来的关键科学问题是: 什么原因导致了这次 EASM 的年代际减弱? 大体有四种观点。

首先, 一些研究认为太平洋和 (或) 印度洋海温升高是主要直接原因, 而且认为印度洋热带 SST 升高和太平洋 SST 的升高起相反的作用, 前者导致其减弱, 后者导致其增强, 两者的综合作用导致其减弱 (例如, Li et al., 2008; Fu et al., 2009; Zhou et al., 2009)。当然, 这些结论都是基于全球大气环流模式的敏感性试验的结果, 不同模式之间结果差异很大, 一些大气环流模式在给定 SST 强迫的情况下甚至也模拟不出 EASM 的减弱。所以, 这个结论仍然有很大的不确定性。另外, SST 升高本身也可能是全球变暖的结果。

第二个观点是 EASM 的减弱是全球变暖的结果 (假如进一步认为上一段中提到的 SST 升高是全球变暖的结果的话), 换言之, 由于大气中温室气体的增多而导致的全球变暖是驱动 EASM 由强变弱的主因。要证明这一点也很难, 一个前提条件是全球气候模式能够模拟出 1970 年代末的 EASM 减弱以及相应的夏季降水的变化; 另外, 模式预估的未来 EASM 应该是趋向于减弱的。这两个前提都还不能满足, 大多数的全球气候模式还不能合理地模

拟出 EASM 在 1970 年代末的减弱;更为重要的是:当前的很多全球气候模式预估的未来全球变暖背景的 EASM 是增强的。所以,这个观点也有很大的不确定性。

第三个观点是:人为排放的气溶胶的变化起到了显著作用,这个观点首先来自于 Menon 等(2002)的文章,但是他们当时考虑的气溶胶仅仅包括黑炭,而且只考虑了其直接辐射强迫作用。后来相当多的类似研究考虑了更多的气溶胶作用,也部分考虑了气溶胶的间接辐射强迫作用,但是不同的模式结果之间差异很大(Chang et al., 2009; Mahmood and Li, 2011; Mahmood and Li, 2012)。最近,王涛等(私人通讯)利用挪威的气候系统模式进行了系统性的数值模拟试验,其初步结果显示:只有考虑了所有温室气体强迫和气溶胶强迫,耦合模式才能合理地模拟出 EASM 的 1970 年代末的减弱, SST 变化本身也是这些强迫的结果。当然,这个观点也有很大的不确定性,因为不同模式结果之间的差异实在是太大了。

第四个观点认为 EASM 的减弱是气候系统本身自然振荡的结果(Jiang and Wang, 2005; Han and Wang, 2007)。此观点也存在很大的不确定性。

最有可能的事实是:温室气体和气溶胶的变化共同造就了这次 EASM 的年代际减弱。如果是这样,未来 EASM 的演变或许会持续保持较弱的状态,然后逐渐向较强状态转变。

2.2 关于夏季降水在 1990 年代的两次年代际变化

首先是华南夏季降水在 1992/93 年由偏少到偏多的年代际变化(Wu et al., 2009), Wu et al. (2009)还提出这次年代际变化主要由两个因素促成,其一,热带印度洋的 SST 升高,并导致区域低层辐合增强、高层辐散增强、上升运动加强,热带印度洋区域大气上层的辐散加强导致我国南海区域上层辐合加强,下沉运动加强,产生大气低层的异常反气旋。其二,青藏高原积雪的增加和蒙古区大气温度上升的共同作用使蒙古区域大气低层出现异常反气旋。该异常反气旋和南海区域异常反气旋的共同作用使得我国华南区域大气低层出现异常辐合运动,导致上升运动加强,水汽含量也增多,进而导致华南降水增多。

Zhu et al. (2011)发现在 1999 年之后我国长江中下游流域夏季降水开始减少,而淮河流域降水开始增多,东北地区降水减少。造成这次年代际变化

的可能原因是贝加尔湖区域气温升高,导致西风急流减弱,因而使得夏季雨带整体北移了一些。Zhu et al. (2011)通过对大气再分析资料的研究提出北太平洋年代际振荡向负位相的转变及其 SST 异常型会加强上述过程,他们的数值模拟试验也证实了这个过程。诚然如此,那么未来的夏季雨带是否会进一步北移而导致我国北方夏季降水的大面积增多呢?

2.3 关于 EASM 和 ENSO 关系的不稳定性

Wang (2002)指出 ENSO 和 EASM 并不是总存在显著相关,也并不是一直维持着正相关或者反相关,而是不稳定,有时正相关、有时反相关、有时没有显著相关。这取决于 ENSO 模态的变化以及 SST 异常型的强度和位置变化;当然,也和 EASM 及东亚大气环流的年代际变化有关。气候模式的模拟结果中也存在类似的不稳定关系(姜大膀等, 2004; Han and Wang, 2007)。另外, Wu and Wang (2002)也指出 ENSO 和 EASM 之关系在 1962~1977 年时段和 1978~1993 年时段有显著差异。由于 ENSO-EASM 关系的不稳定性, Gao et al. (2006)发现用 ENSO 作为预测因子来预测我国夏季降水的效果也是不稳定的。ENSO-EASM 关系的不稳定性是造成我国气候的季节-年际预测困难性的主要因素之一,是值得未来进一步研究的科学问题。

3 关于 EAWM 和我国冬季气候的年代际变化

3.1 关于 EAWM 在 1980 年代中期之后的减弱

Wang and He (2012a)以及贺圣平和王会军(2012)揭示 EAWM 在 1986 年开始变弱了,这是一次年代际时间尺度的减弱, EAWM 在 1948~1985 年期间显著地比 1986~2010 年期间强,在下一阶段冷空气势力总体上偏弱,使得我国冬季气温大面积升高,也使得我国东北冬半年冰封的江面在春季打开的时间提前了一周左右,而秋冬季节开始冰封的时间退后了一周左右(Wang and Sun, 2009)。Wang and He (2012a)使用的 EAWM 指数是代表东亚大槽的定义为(25°N~45°N, 110°E~145°E)范围内 500 hPa 高度场的平均值,如果使用其他定义也可以得到同样的结论(He and Wang, 2012)。最近,王会军和贺圣平(2012b)指出,随着 EAWM 的减弱,东亚沿岸的 SST 升高,为我国东北地区输送了更多的水汽,大气辐合加强、云量增多,从而

使东北冬季降雪量增多。

3.2 关于在 1980 年代中期之后 EAWM 年际变率的减弱

最近,贺圣平和王会军(2012)研究发现 EAWM 在 1986~2010 年期间的年际变率较之 1956~1980 年期间的年际变率显著地变小了,他们的研究进一步指出,1956~1980 年期间东亚冬季风的年际变率与东亚沿海(暖池)的冬季海表温度呈显著的负(正)相关关系,但是这种显著的反相关在 1986~2010 年期间被大大消弱了。这就意味着,在 1980 年代中期之后 EAWM 不能和 ENSO 这个具有大变率的模态联动,势必消弱 EAWM 的年际变率。与此同时,自 1980 年代中期以来,北极涛动对东亚冬季风的年际变率也是主要起抑制作用。上述两个因素之外,亚洲和太平洋区域冬季的海陆热力差异的年际变率也有所减弱。总之,东亚冬季风年际变率的减弱是一个特别值得关注的问题;当然,如下节介绍的, Liu et al. (2012) 的研究也指出北极海冰的减少对北半球陆地区域降雪和冷空气活动的增多也有正面的作用。

3.3 关于秋季北极海冰面积减少对北半球中高纬冬季降雪的影响

最近, Liu et al. (2012) 指出秋季北极海冰面积的减少对北半球中高纬陆地区域冬季极端温度和降雪事件具有重要影响,他们的研究表明,自从 1979 年以来北极秋季海冰减少了 29.4%,特别是过去 4 年是自有卫星观测以来的 4 个最小值,与此同时,北半球中高纬陆地区域大都出现了异常降雪和严寒天气。尽管一些学者认为北极涛动和 ENSO 异常是主要成因,但是事实上,两者均不能很好地解释过去 4 年冬季出现的持续异常降雪。Liu et al. (2012) 发现:夏季北极海冰的大范围减少以及秋冬季北极海冰的延迟恢复可以引起不同于北极涛动的冬季大气环流异常,使西风急流变得更具波浪状,导致中高纬阻塞形势出现的频率增加。另外,夏季北极海冰的大范围减少以及秋冬季北极海冰的延迟恢复使得北极存在更多的开阔水,从而将大量的局地水汽从海洋传输给大气,而且北极的变暖也使得大气可以容纳更多的水汽。

3.4 关于 EAWM-ENSO 年际变化相关性在 1970 年代中期之后的减弱

最近, Wang and He (2012a) 发现: EAWM-ENSO 的相关性在 1970 年代中期之后显著减弱了,

由前一个时段 1948~1976 年的显著反相关变成后一个时段 1977~2010 年没有显著相关,这也提供了近些年来我国冬季气候异常不能用 ENSO 很好解释的科学成因。

EAWM-ENSO 的相关性为什么会减弱了呢? Wang and He (2012a) 指出,与 ENSO 相关的海温变率在热带印度洋和西太平洋区域显著减小,而这两个区域的 SST 变率直接关系到 EAWM 的年际变率,于是 ENSO 和 EAWM 之间的相关性就被消弱了。同时, EAWM 的年际变率在后一个时段也减小了, EAWM 影响冬季气候的主要区域向北退缩、影响程度降低,也是使得 EAWM 和 ENSO 关系减弱的成因。另外, ENSO 在东亚和西北太平洋区域的信号明显向东撤和向南撤,特别是 ENSO 在东亚的信号南撤到北印度洋、亚洲和西太平洋的低纬度地区;在东北亚的信号向东南方向撤到了阿留申地区,这又促使阿留申低压和 ENSO 之间联系在后一时段得到了加强。总之, ENSO 信号的南撤、东撤以及 EAWM 势力范围的北退和消弱使得两者空间上“疏远”了,其关联也就被弱化了。

4 结语

关于东亚夏季风和冬季风年代际及以上时间尺度的变化规律和未来演变趋势的研究是一个极为重要的科学领域,对我国的实际应用价值也极其重大,特别是涉及我国气候异常和气候灾害的变化、全球变暖对我国天气和气候的影响、气候变化对我国经济和社会的影响以及如何适应的重大问题。未来若干年内都会是一个受到重点关注的科学领域。研究的重点除了要根据现代气候资料和先进的气候系统模式进行深入的过程和机理研究以外,借助于各种古气候资料所进行的机制研究和模拟研究也是十分必要的。我国也更应该把相关的古气候研究和现代气候研究更好地结合起来,为推动这个重大问题科学认识的突破发挥引领作用。

参考文献 (References)

- Boer G J. 2000. A study of atmosphere-ocean predictability on long time scales [J]. *Climate Dyn.*, 16 (6): 469-477, doi:10.1007/s0038200050340.
- Chang W Y, Liao H, Wang H J. 2009. Climate responses to direct radiative forcing of anthropogenic aerosols, tropospheric ozone, and long-lived greenhouse gases in eastern China over 1951-2000 [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26: 748-762.

- 陈文. 2002. El Niño和La Niña事件对东亚冬、夏季风循环的影响 [J]. 大气科学, 26 (5): 595–610. Chen Wen. 2002. Impacts of El Niño and La Niña on the cycle of the East Asian winter and summer monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 595–610, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2002.05.02.
- Fan K. 2009. Predicting winter surface air temperature in Northeast China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2 (1): 14–17.
- Fan K. 2011. A statistical scheme for seasonal forecasting of North China winter temperature [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4: 81–85.
- Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China [J]. Geophys. Res. Lett., 31: L10201, doi:10.1029/2004GL019465.
- Fu J J, Li S L, Luo D H. 2009. Impact of global SST on decadal shift of East Asian summer climate [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (2): 191–201.
- Gao H, Wang Y G, He J H. 2006. Weakening significance of ENSO as a predictor of summer precipitation in China [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L09807, doi:10.1029/2005GL025511.
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 28: 2073–2076.
- Han J P, Wang H J. 2007. Interdecadal variability of the East Asian summer monsoon in an AGCM [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 24 (5): 808–818.
- 贺圣平, 王会军. 2012. 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 [J]. 大气科学, 36 (3): 523–538, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11083. He Shengping, Wang Huijun. 2012. An integrated East Asian winter monsoon index and its interannual variability [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 523–538, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2011.11083.
- 姜大膀, 王会军. 2005. 20世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性 [J]. 科学通报, 50 (20): 2256–2262. Jiang Dabang, Wang Huijun. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century [J]. Chinese Science Bulletin, 50 (17): 1923–1929.
- 姜大膀, 王会军, Drange H, 等. 2004. 耦合模式长期积分中东亚夏季风与 ENSO 联系的不稳定性 [J]. 地球物理学报, 47 (5): 976–981. Jiang Dabang, Wang Huijun, Drange H, et al. 2004. Instability of the East Asian summer monsoon–ENSO relationship in a coupled global atmosphere–ocean GCM [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 47 (5): 976–981.
- 郎咸梅, 王会军, 姜大膀. 2003. 中国冬季气候可预测性的跨季度集合数值预测研究 [J]. 科学通报, 48 (15): 1700–1704. Lang Xianmei, Wang Huijun, Jiang Dabang. 2003. Extraseasonal ensemble numerical prediction of winter climate over China [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (19): 2121–2125.
- 李崇银, 穆明权. 2000. 东亚冬季风—暖池状况—ENSO循环的关系 [J]. 科学通报, 45 (7): 678–685.
- Li F, Wang H J. 2012. Predictability of the East Asian winter monsoon interannual variability as indicated by the DEMETER CGCMS [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29: 441–454.
- Li S L, Lu J, Huang G, et al. 2008. Tropical Indian Ocean basin warming and East Asian summer monsoon: A multiple AGCM study [J]. J. Climate, 21 (22): 6080–6088.
- Liu J P, Curry J A, Wang H J, et al. 2012. Impact of declining Arctic sea ice on winter snowfall [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 109 (11): 4074–4079, doi:10.1073/pnas.1114910109.
- Mahmood R, Li S L. 2011. Modeled influence of East Asian black carbon on interdecadal shifts in East China summer rainfall [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 4 (6): 349–355.
- Mahmood R, Li S L. 2012. Delay in the onset of South Asian summer monsoon induced by local black carbon in an AGCM [J]. Theoretical and Applied Climatology, doi:10.1007/s00704-012-0681-3.
- 马洁华, 王会军, 张颖. 2012. 我国未来冬季降水会增加吗? 北极夏季无海冰情景时的模拟试验 [J]. 科学通报, 57 (9): 759–764. Ma Jiahua, Wang Huijun, Zhang Ying. 2012. Will boreal winter precipitation over China increase in the future? An AGCM simulation under summer “ice-free Arctic” conditions [J]. Chinese Science Bulletin, 57: 921–926, doi:10.1007/s11434-011-4925-x.
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. Science, 297: 2250–2253.
- 孙建奇, 王会军, 袁薇. 2009. 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 [J]. 气象学报, 67 (3): 469–477. Sun Jianqi, Wang Huijun, Yuan Wei. 2009. A preliminary investigation on causes of the catastrophic snowstorm in March, 2007 in the northeastern parts of China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 469–477.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W. 2008. A possible mechanism for the co-variability of the boreal spring Antarctic Oscillation and the Yangtze River valley summer rainfall [J]. International Journal of Climatology, 29 (9): 1276–1284.
- Sun J Q, Wang H J, Yuan W, et al. 2010. Spatial–temporal features of intense snowfall events in China and their possible change [J]. J. Geophys. Res., 115: D16110, doi:10.1029/2009JD013541.
- Tao S Y, Chen L X. 1987. A review of recent research on the East Asian summer monsoon in China [M] // Chang C P, Krishnamurti T N. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 60–92.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970’s [J]. Advances in Atmospheric Science, 18: 376–386.
- Wang H J. 2002. Instability of the East Asian summer monsoon–ENSO relations [J]. Advances in Atmospheric Science, 19 (1): 1–11.
- 王会军, 郎咸梅, 周广庆, 等. 2003. 我国今冬和明春气候异常与沙尘气候形势的模式预测初步报告 [J]. 大气科学, 27 (1): 134–140. Wang Huijun, Lang Xianmei, Zhou Guangqing, et al. 2003. A preliminary report of the model prediction on the forthcoming winter and spring dust climate over China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (1): 136–144.
- Wang H J, Fan K. 2005. Central-North China precipitation as reconstructed from the Qing dynasty: Signal of the Antarctic atmospheric oscillation [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L24705, doi:10.1029/2005GL024562.
- Wang H J, Sun J Q. 2009. Variability of Northeast China river break-up date [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 26 (4): 701–706.
- Wang H J, Zhang Y. 2010. Model projections of East Asian summer climate under the ‘free Arctic’ scenario [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 3: 176–180.
- Wang H J, Yu E T, Yang S. 2011. An exceptionally heavy snowfall in

- Northeast China: Large-scale circulation anomalies and hindcast of the NCAR WRF model [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 113: 11–25, doi: 10.1007/s00703-011-0147-7.
- Wang H J, Sun J Q, Chen H P, et al. 2012. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection [J]. *Meteor. Z.*, 21 (3): 279–304, doi:10.1127/0941-2948/2012/0330.
- 王会军, 贺圣平. 2012a. ENSO 和东亚冬季风之关系在20 世纪70 年代中期之后的减弱 [J]. *科学通报*, 57 (19): 1713–1718. Wang Huijun, He Shengping. 2012a. Weakening relationship between East Asian winter monsoon and ENSO after mid-1970s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 57 (27): 3535–3540, doi:10.1007/s11434-012-5285-x.
- 王会军, 贺圣平. 2012b. 我国东北冬季降雪的年代际增多及其与冬季风减弱的关系 [J]. *科学通报*, 接收待刊. Wang Huijun, He Shengping. 2012b. The increase of snowfall in Northeast China after mid-1980s [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, in press.
- Wang L, Chen W, Huang R H. 2008. Interdecadal modulation of PDO on the impact of ENSO on the East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 35: L20702, doi:10.1029/2008GL035287.
- Wang M Y, Overland J E. 2009. A sea ice free summer Arctic within 30 years [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 36 (7): L07502.
- Wu R G, Wang B. 2002a. A contrast of the East Asian summer monsoon–ENSO relationship between 1962–77 and 1978–93 [J]. *J. Climate*, 15: 3266–3279.
- Wu B Y, Wang J. 2002b. Winter Arctic oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 1897, doi:10.1029/2002GL015373.
- Wu R G, Wen Z P, Yang S, et al. 2009. An interdecadal change in southern China summer rainfall around 1992/93 [J]. *J. Climate*, 23: 2389–2403, doi:10.1175/2009JCLI3336. 1.
- Xue F, Wang H J, He J H. 2004. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influences on East Asian summer monsoon [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 82 (4): 1173–1186.
- Zhu Y L, Wang H J, Zhou W, et al. 2011. Recent changes in the summer precipitation pattern in East China and the background circulation [J]. *Climate Dyn.*, 36 (7–8): 1463–1473.
- Zhou T J, Gong D Y, Li J, et al. 2009. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon—Recent progress and state of affairs [J]. *Meteorol. Z.*, 18 (4): 455–467.