0577-6619/2009/67(3)-0469-77 *Acta Meteorologica Sinica* 气象学报

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*

孙建奇[1] 王会军[1] 袁 薇[2]
SUN Jianqi[1] WANG Huijun[1] YUAN Wei[2]

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. 中国气象局培训中心，北京，100081
1. *Nansen-Zhu International Research Centre (NZC), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029, *China*
2. *China Meteorological Administration Training Centre, Beijing* 100081, *China*
2009-01-15 投稿，2009-03-18 改回.

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. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(3):469－477

Abstract A snowstorm deposited record-breaking snowfall over the northeastern parts of China on March 3－5, 2007, resulting in severe disasters and heavy losses. The objective of this study is to explore the possible mechanism responsible for this extreme event by analyzing the atmospheric circulation anomalies prior to and during the event. The results show that there had been persistent strong anomalous Arctic Oscillations, Antarctic Oscillations, Eurasian teleconnection pattern, and North Pacific Oscillations in about two weeks before the event. Those anomalous atmospheric circulations stimulated the strong anomalous southerlies along the east coastal regions of China, which persistently transferred the warm and wet air to the northeastern areas of China, thus raising the moisture content and air temperature there and providing proper warm and wet conditions for the occurrence of the extreme snowstorm event. When the atmospheric general circulation changed in early March, the strong cold air from the high latitudes met the warm air over the northeastern China, resulting in a remarkably cold front and associated strong snowfall and low temperature in that region.

The results of this study imply that the anomalous atmospheric circulation and the cumulative moisture condition in the forecast region in the early stage should be fully considered, which is helpful to the improvement of rainfall forecast, especially the heavy rainfall forecast.
Key words Snowstorm, Catastrophic weather, Teleconnection, Weather forecast

摘 要 2007 年 3 月 3—5 日，中国东部北方地区发生了近 50 年来历史同期最强的一次暴风雪事件，给该地造成了严重的灾害和损失。通过分析这次暴风雪事件发生前期和同期的大尺度大气环流异常，探讨形成这次极端天气的可能物理机制。研究结果表明，在这次暴风雪事件发生的前两周中，存在持续异常的北极涛动、南极涛动、欧亚型遥相关以及北太平洋涛动等大气模态。这些异常环流在中国东部沿岸地区引起了强劲的偏南风，由此给中国东部北方地区源源不断地输送暖湿空气，使得该地的水汽含量和气温不断升高，为这次暴风雪事件的发生准备了良好的暖空气条件。当 3 月初大气环流发生调整，极地冷空气南下时，强劲的冷、暖空气交汇于中国东部北方地区，从而在该地形成了强大的冷锋系统，最终导致了这次强暴风雪事件的发生。研究结果表明，在预报与降水相关的天气时，必须考虑事发前期异常大气环流的信息，关注预报区域前期水汽的积累状况，这对于提高降水预报、特别是强降水预报的水平有着重要的意义。
关键词 暴风雪，灾害性天气，遥相关，天气预报
中图法分类号 P426.63^{+}4

---

* 资助课题：国家重点基础研究发展计划(2009CB421406)，中国科学院创新项目(KZCXZ-YW-Q03-3)，国家自然科学基金(40631005，90711004)，中国科学院知识创新工程大气物理研究所青年人才领域前沿项目(IAP07412)。
作者简介：孙建奇，主要从事东亚气候变化及极端天气气候事件的研究。E-mail：sunjq@mail.iap.ac.cn

1 引 言

中国是一个气象灾害频发的国家之一。像干旱、洪涝、高温、沙尘暴、冷害、台风、暴风雪等这些天气、气候极端事件直接造成人员的伤亡,威胁到人类赖以生存的生态环境,严重地影响和制约着社会和经济的发展。因此,极端天气、气候事件引起来自社会各界越来越多的关注,也吸引着气象、海洋以及相关领域科学家们对这些重要而紧迫的科学问题加以研究(陈联寿等,1979;李翠金,1996;翟盘茂等,1997;王式功等,2000;黄荣辉等,2002;Gao, et al,2002;高学杰等,2003;周自江等,2003;王小玲等,2004;张庆云等,2003;孙建奇等,2006)。

对于冬、春季而言,影响中国北方地区的最重要的一个极端天气灾害就是暴风雪。2007 年 3 月 3—5 日,中国东部北方地区出现了近 50 年来历史同期最严重的一次暴风雪和强降温天气。辽宁、山东、河北、黑龙江、内蒙古、吉林、北京和天津等 8 省区市不同程度遭受了雪灾和风暴潮灾害。据统计,这次暴风雪事件共造成 432.1 万人受灾,死亡 17 人(辽宁 14 人,山东 3 人),失踪 7 人,紧急转移安置 10.2 万人;农作物受灾 3.65×10^4 hm^2;倒塌房屋 0.6 万间,损坏房屋 1.6 万间;因灾死亡牲畜 20.7 万头(只),直接经济损失 61.7 亿元;灾区交通、通讯、电力设施受损严重,给灾区人民群众的生产、生活造成严重影响(http://www.sohu.com; http://www.cma.gov.cn; http://www.gov.cn)。那么是什么原因造成如此严重的一次暴雪事件呢?这是本文探讨的核心问题。

关于暴风雪的研究国内外已有一定的工作基础。前期的研究主要从诊断观测资料(王文辉等,1979;Frederick,1986;Moors, et al,1988;王建中等,1995;胡中明等,2005;张腾飞等,2006)和数值模拟(王文等,2000;Zhang, et al,2002)两方面对全球和中国不同地区所发生的一些典型暴风雪个例的成因进行探讨。这些工作关注了极端天气事件发生时局地的天气形势以及动力和热力等条件,明确了锋生强迫和条件对称不稳定等在暴风雪形成中的重要作用。春季强暴风雪过程较为罕见,但其影响极大、灾害损失严重,之前对此的研究并不多。加之个例之间差异甚大,所以春季强暴风雪成因和过程研究显得极为重要。本文主要着眼于事件发生前期大尺度环流异常的主要特征及其变化,分析 2007 年 3 月 3—5 日中国东部北方地区近 50 年来历史同期最强的一次暴风雪事件的天气过程,以期为暴风雪等相关极端天气的短期预报提供参考。

采用的资料是美国国家环境预报中心和美国国家大气科学研究中心(NCEP/NCAR)的再分析日平均和月平均资料(Kalnay, et al,1996),探空资料来自于中国气象局。

2 2007 年 2 月大气环流背景场的特征

为更好地揭示这次暴风雪的成因,首先来考察该事件发生前期大气环流背景场的特征。图 1 为 2007 年 2 月 1000 hPa 异常位势高度场的分布形势(文中所有的异常场均是相对于 1968—1996 年平均的气候态场而言)。如图所示,2 月北半球的高纬度极区为强的位势高度正异常区,而中纬度地区则为一个纬向对称的(除东北太平洋地区)负异常带所控制。对照 Thompson 等(2000)的工作,可知这种北半球中高纬度"跷跷板"式的分布模态即为负位相的北极涛动模态。Gong 等(2001)以及 Wu 等(2002)的研究指出,北极涛动可以影响到西伯利亚高压和东亚冬季风,进而对中国北部地区的天气、气候变化产生显著的作用。此外,在南半球中高纬度地区还存在一个极地负异常、中纬度正异常的"跷跷板"式异常分布模态,这种异常分布模态为正位相的南极涛动模态。Fan 等(2004)以及范可等(2006)的研究指出春季南极涛动的变化可以显著地影响到欧亚大陆—北太平洋地区的气候异常:正位相的南极涛动有利于阿留申低压和西伯利亚高压的减弱。这样,在上述异常大气环流模态的影响下,2月的西伯利

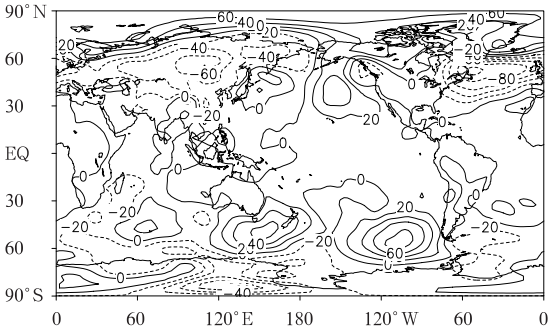

图 1 2007 年 2 月 1000 hPa 异常位势高度的分布(单位:gpm)

Fig. 1 Anomalous geopotential height (gpm) at 1000 hPa in February 2007

亚高压显著偏弱(图 1),由此在亚洲大陆东部沿胺形成了一个强的偏南风带(图 2)。这支暖湿的偏南风给中国东部及北部地区带来了大量的水汽和暖平流,使得上述地区温度偏高、湿度偏大(图 2)。与 1000 hPa类似,500 hPa异常位势高度在北半球也主要表现为负位相的北极涛动模态,在南半球主要表现为正位相的南极涛动模态(图略)。

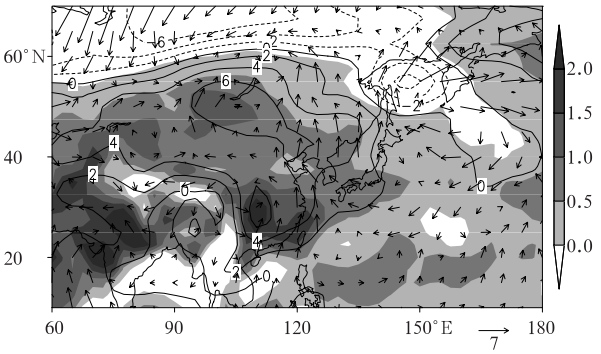

图 2 2007 年 2 月 1000 hPa 异常风场(矢量,单位:m/s),异常温度场(等值线,单位:℃)和异常绝对湿度场(阴影,单位:g/kg)

Fig. 2 Anomalous winds (vectors, m/s), air temperature (contours, ℃), and specific humidity (shadings, g/kg) at 1000 hPa in February 2007

由此可知,在这次极端天气发生之前,全球大气环流存在明显异常。持续异常的大气环流模态使得中国东部北方地区在 2 月暖空气活跃、水汽充沛。这样,到 3 月初大气环流发生调整、高纬度强大冷空气南侵时,冷暖空气交汇于中国东部北方地区,从而触发了这次极端天气事件。

3 强降温和暴风雪事件的天气过程特征分析

从 2007 年 2 月 19 日到 3 月 5 日每 3 天平均的 1000 hPa 异常位势高度场随时间的演变过程(图 3)可见,在 2007 年 2 月 19—21 日,北极极区为一个强

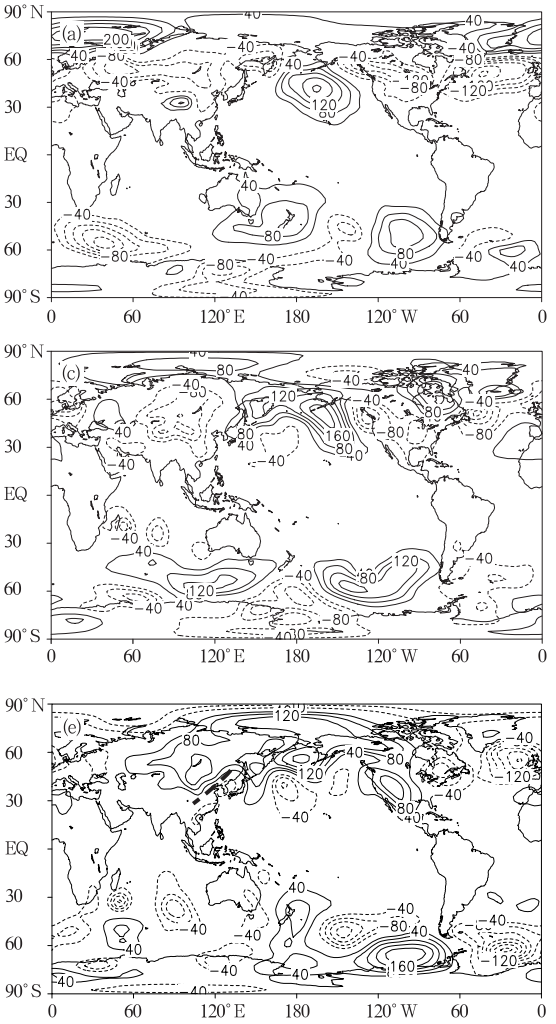

图 3 2007 年 2 月 19 日到 3 月 5 日每 3 天平均的 1000 hPa 异常位势高度场(单位:gpm)

(a. 2 月 19—21 日,b. 2 月 22—24 日,C. 2 月 25—27 日,d. 2 月 28—3 月 2 日,e. 3 月 3—5 日;图 e 中粗虚线代表地面锋线)

Fig. 3 Three-day averages of anomalous geopotential height (gpm) at 1000 hPa from February 19 to March 5, 2007

(a. February 19—21, b. February 22—24, c. February 25—27, d. February 28—March 2, e. March 3—5; The bold dashed line in e indicates the surface front)

的正异常中心,而在北半球的中纬度地区则围绕极区存在一个强的负异常带(图 3a),表明此时北半球中高纬度地区处于强大的负位相北极涛动的控制之下。这样,欧亚大陆中部的异常气旋性环流在亚洲大陆东部沿岸和欧亚大陆中纬度地区形成异常偏南风(图 4a),给这些地区带来暖湿的空气,从而使该地气温偏高同时湿度增大(图 5a)。相反,欧亚大陆高纬度地区则由于受到极地反气旋性环流所形成的偏北风影响,气温明显偏低(图 5a)。此外,在北太平洋中部地区还存在一个强的正异常位势高度中心(图 3a),表明此时的北太平洋地区为正位相的北太平洋涛动模态所控制。

随着时间的推移,欧亚大陆中部的异常气旋性环流向其下游东部地区移动,中心位于欧洲大陆以北的异常反气旋性环流南伸切断了其南部的负异常带,从而在欧亚大陆上形成了欧亚型遥相关模态的雏形(图 3b)。受此影响,日本上空的异常反气旋性环流开始建立,从而诱使北太平洋中部的异常反气旋性环流西伸。在此异常大气环流的影响下,中国东部沿岸的偏南风及其对中国东部北方地区的暖湿空气输送继续维持。而在日本北部及其以北地区的鄂霍次克海附近,由于受该地两侧东高西低的异常位势高度分布的影响,产生了一个强劲的南风中心(图 4b)。到 25—27 日时,欧亚型遥相关模态发展成熟(图 3c),亚洲大陆中部的异常气旋性环流和日本—北太平洋地区的异常反气旋性环流在中国东部北方地区形成一条东高西低的高梯度位势高度带,这样中国东部北方地区的偏南风得到加强(图 4c),从而促使该地的温度和绝对湿度进一步增加(图 5c)。

除了北半球的大气环流异常,我们还应该关注南半球的大气环流异常,因为南半球大气环流的变化对于中国气候变化的影响也十分重要(薛峰等,2003; Xue, et al, 2004)。在这段时期,南极涛动一直处于强的正位相。而已有研究表明,正位相的南

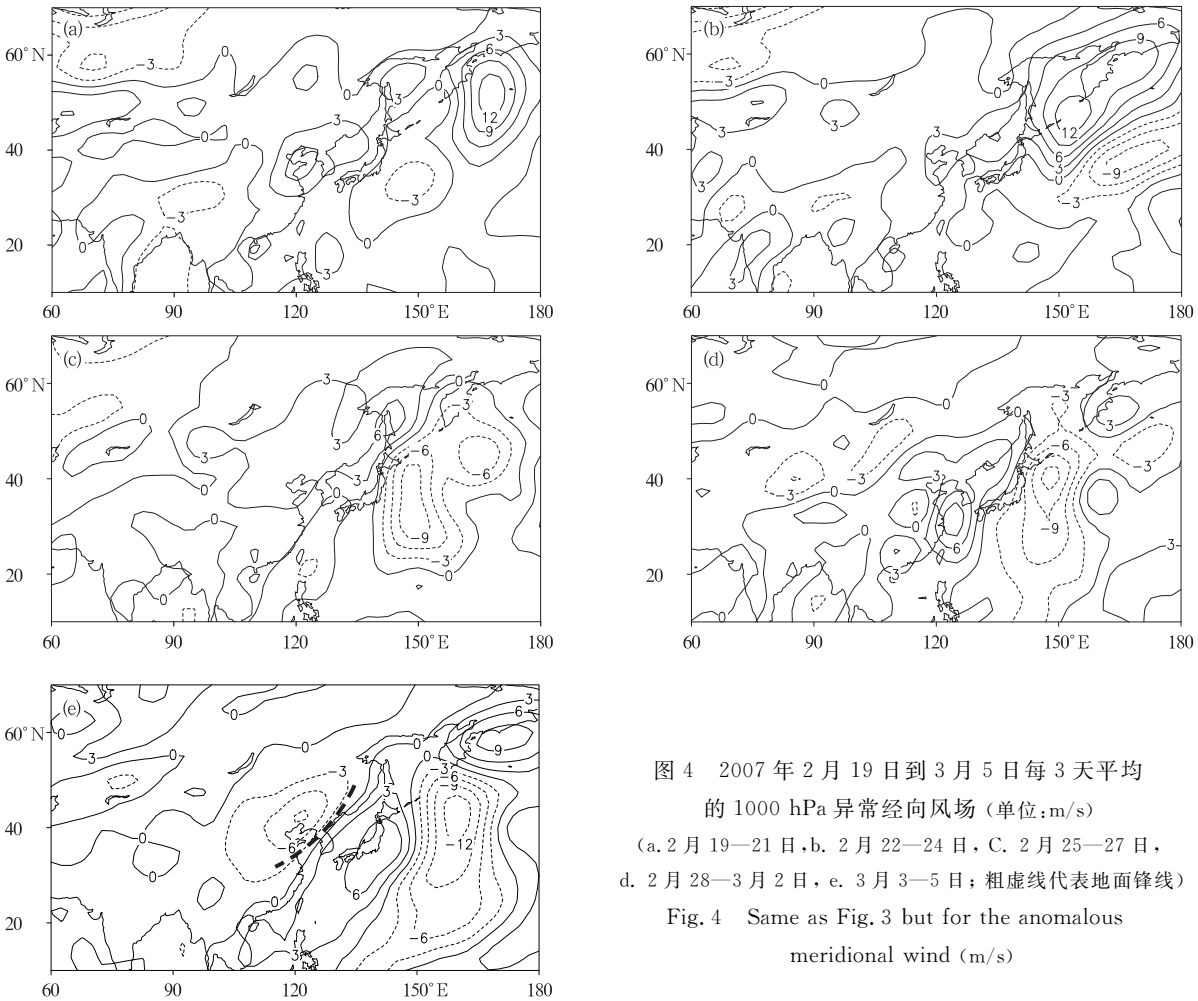

图 4 2007 年 2 月 19 日到 3 月 5 日每 3 天平均的 1000 hPa 异常经向风场(单位:m/s)
(a. 2 月 19—21 日,b. 2 月 22—24 日,C. 2 月 25—27 日,d. 2 月 28—3 月 2 日,e. 3 月 3—5 日;粗虚线代表地面锋线)
Fig. 4 Same as Fig. 3 but for the anomalous meridional wind (m/s)

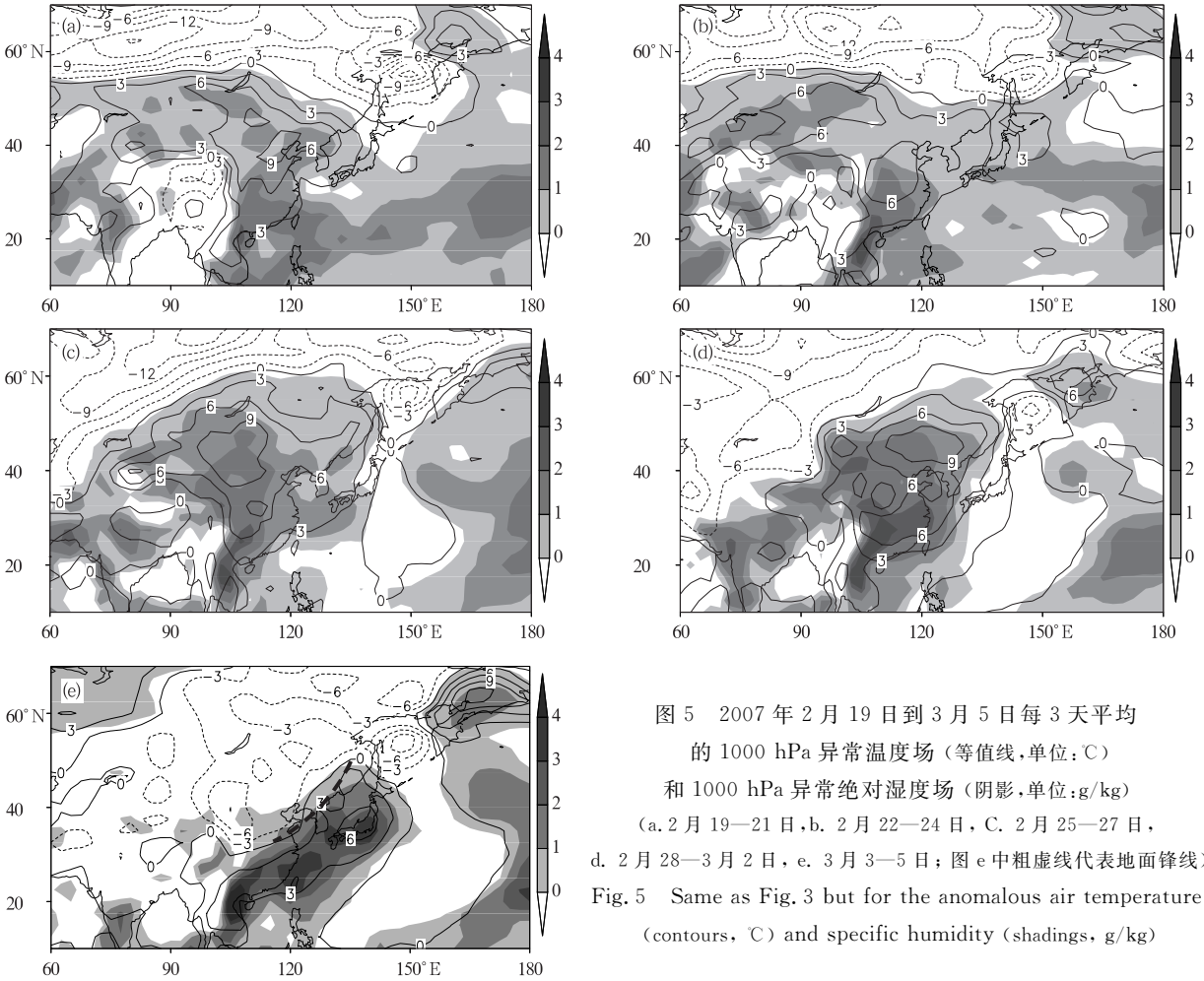

图 5 2007 年 2 月 19 日到 3 月 5 日每 3 天平均的 1000 hPa 异常温度场(等值线,单位:℃)和 1000 hPa 异常绝对湿度场(阴影,单位:g/kg)(a. 2 月 19—21 日,b. 2 月 22—24 日,C. 2 月 25—27 日,d. 2 月 28—3 月 2 日,e. 3 月 3—5 日;图 e 中粗虚线代表地面锋线)

Fig. 5 Same as Fig. 3 but for the anomalous air temperature (contours, ℃) and specific humidity (shadings, g/kg)

极涛动有利于西伯利亚高压和阿留申低压的减弱(Fan,et al,2004;范可等,2006),表现在异常场上就是西伯利亚地区位势高度的降低和北太平洋中北部地区位势高度的增加,这与图 3a、3b 和 3c 的大气环流形势相一致,所以南极涛动对东亚—北太平洋地区的这种东高西低的异常位势高度分布形势也可能起着一定的加强作用。

随后,欧亚大陆上空的欧亚型遥相关模态继续沿大圆路径向其下游方向移动。但是由于受到北太平洋地区持续较强的异常反气旋性环流的阻挡,亚洲大陆中部的异常气旋性环流偏转向南,移动到中国南部地区上空,由此亚洲大陆东部沿岸的东高西低的高梯度位势高度带也相应南移到中国南部沿海地区(图 3d),相应地中国东部沿岸地区的南风中心位置也南移至中国东部沿岸南部地区(图 4d)。而该异常气旋性环流上游地区的异常反气旋性环流则东移与日本—北太平洋地区的异常反气旋性环流打通连成一片,在亚洲大陆中北部地区形成一个强大的反气旋性环流区(图 3d)。这表明此时西伯利亚高压得到加强,并开始引导极地冷空气南侵,由此在中国的西面和北面地区形成异常偏北风(图 4d)。在上述大气环流的影响下,中国北方地区的高气温区也随之东移,温度异常的 0 线位置由贝加尔湖以西地区(图 5c)移动到贝加尔湖以东地区(图 5d)。而位于中国东部沿海地区强的南风此时还继续着对该地及其以北地区的暖湿空气输送,因此,中国东部地区的温度和水汽含量还在继续增加(图 5d)。

与低空天气系统的演变相对应,高空大气环流也发生了明显的变化(图 6)。在 2 月 19—21 日时,北半球欧亚大陆上空的 500 hPa 位势高度场比较平直(图 6a),表明此时高空大气环流主要为纬向型,高空槽活动较少;到 2 月 22—24 日时,在欧洲大陆上空形成一个西南—东北向的高空槽(图 6b),随着时间的推移,该槽自西向东沿西风带往下游方向移

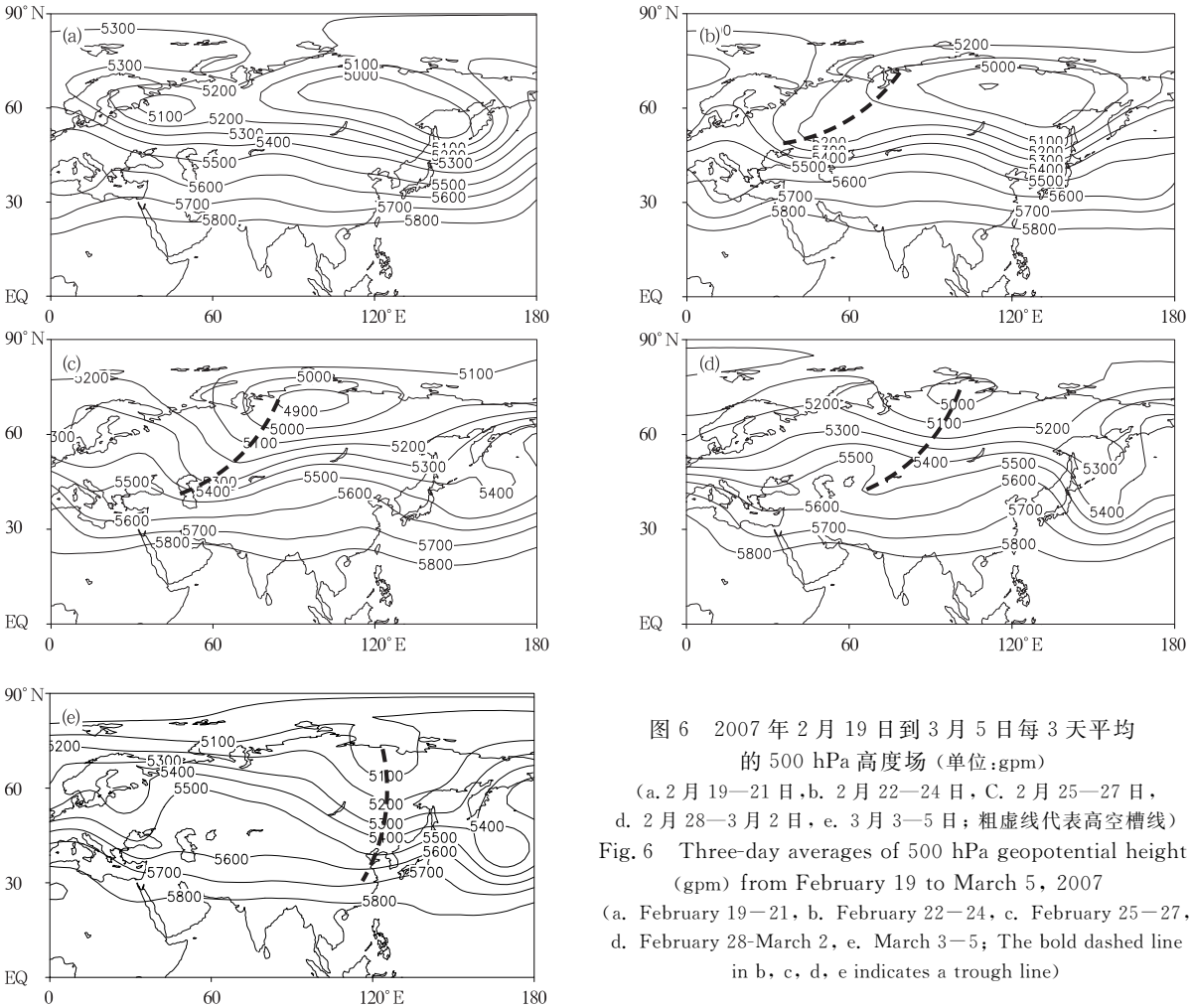

图 6 2007 年 2 月 19 日到 3 月 5 日每 3 天平均的 500 hPa 高度场（单位:gpm）
（a. 2 月 19—21 日,b. 2 月 22—24 日, C. 2 月 25—27 日, d. 2 月 28—3 月 2 日, e. 3 月 3—5 日;粗虚线代表高空槽线）
Fig. 6 Three-day averages of 500 hPa geopotential height (gpm) from February 19 to March 5, 2007
(a. February 19－21, b. February 22－24, c. February 25－27, d. February 28-March 2, e. March 3－5; The bold dashed line in b, c, d, e indicates a trough line)

动并逐步增强。到 3 月 3—5 日时,该槽移动到东西伯利亚上空(图 6e)。一般而言,强大的高空槽后为负涡度平流区,所以高空槽后必有负涡度的增加,在地转偏向力的作用下将产生辐合,从而使地面增压。而在高空槽前由于正涡度平流的影响,使得地面减压。这样,到 3 月 3—5 日时,位于高空槽后的西伯利亚高压地区的异常反气旋性环流得到进一步的发展和加强(图 3e),从而使亚洲东部地区处于其强大的偏北风的控制之下(图 4e),给该地带来强劲的冷空气(图 5e);而在高空槽前的朝鲜半岛附近由于高空槽前地面减压的原因出现了一个异常气旋性环流(图 3e)。这样,一个东北—西南走向的强大冷锋在这两个地面系统之间形成。冷锋的西北部为冷空气所控制,气温偏低;其东南部为暖空气所控制,气温偏高。强劲冷暖空气交汇在中国东部北方地区,造成该地的大雪、降温天气。随着降雪的形成,中国东部地区空气中的水汽含量降低,因而该地的绝对湿度到 3 月 3—5 日时变得很小(图 5e)。

这就是形成中国东部北方地区这次暴风雪和强降温事件的天气过程。可以看到这次极端天气事件的形成与全球大气环流具有密切的联系,是对流层高、低层系统共同作用的结果。

4 强降温和暴风雪事件的局地发展条件分析

选取关键灾区探空资料相对比较齐全的沈阳、大连作为代表站,利用探空资料进一步考察暴风雪事件的局地发展条件。

地面观测显示这两个站点的强降雪主要发生在 3 月 4 日(图略),在主要降水发生前的 3 月 2—3 日,沈阳地区对流层的温度曲线相对比较平直,温度相对较高且随时间的变化不大,表明此时沈阳地区处于相对稳定的暖气团中(图 7)。在湿度方面,除

了对流层中上层比较干以外,该地其他层次的水汽还比较充足。对照风场,可以判定这一干层可能与高空槽后的偏北气流南下的冷空气入侵有关。这样,对流层上、下层间的湿度梯度加强了该地的层结不稳定,当有某种触发机制发生时,将在该地产生强的上升运动。从 4 日 00 时开始,沈阳地区对流层低层的偏北风开始增强,随即温度随时间也急剧降低,表明偏北强冷空气已抵达沈阳地区,这时大气整层较湿,沈阳地区出现降水。这次强降水一直持续到 5 日 00 时左右结束。之后,沈阳地区的相度湿度大大降低,同时由于冷空气的作用温度也相较之前的 3 月 2—3 日偏低。大连地区的探空演变基本与沈阳一致,表明有利于形成这次强降雪发生的环境条件在比较大的区域都存在。

从沈阳和大连两个站点探空资料的演变可以看到,在强降水出现的 4 日,这两地都有一股较强的偏北风出现,同时伴有强降温,说明这次冷空气的南侵有可能是触发这次强降雪事件的机制。同时还应注意到在 3 月 2—5 日,沈阳和大连两站对流层低层均没有出现较强的偏南风水汽输送,说明这次强降水的主要水汽来源可能是事发前期该地积累的大量水汽,这一点可以从上一节大尺度环流的分析中得到证实。所以,前期水汽的积累对于强降水的形成有着重要的意义。

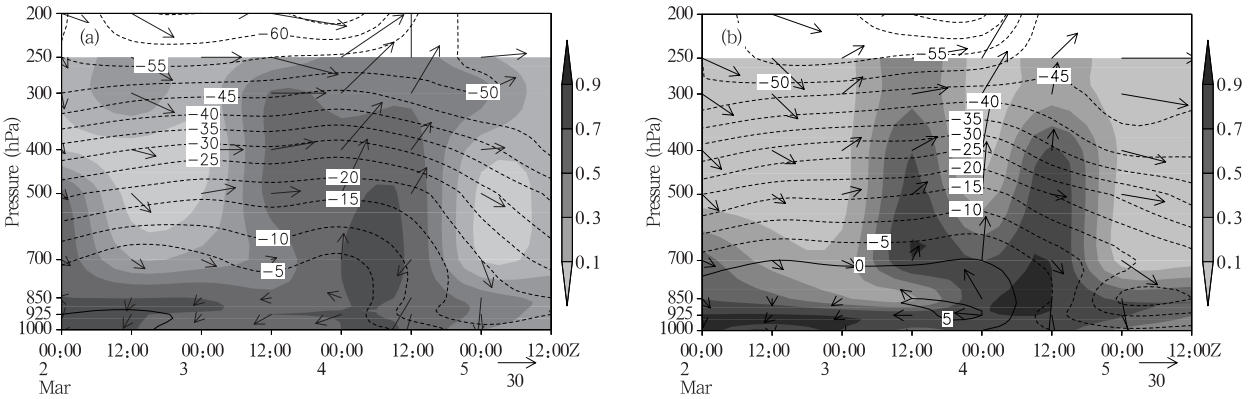

图 7 2007 年 3 月 2—5 日探空风(矢量,单位:m/s)、相对湿度(阴影)和温度(虚线,单位:℃)(a. 沈阳,b. 大连)

Fig. 7 Height-time cross sections of wind (vectors, m/s), relative humidity (shadings, %), and temperature (dash lines, ℃) at (a) Shenyang and (b) Dalian from March 2 to 5, 2007

5 讨论与结论

气温的变化一般取决于冷暖平流的变化。当某地有冷平流路经时,该地的气温将会降低;相反,当有暖平流路经时,该地的气温将会升高。对于中国东部北方地区的这次降温事件而言也是如此(图 8a),在西伯利亚高压增强前,中国东部北方地区为暖湿的偏南风所控制,从而温度偏高;而当西伯利亚高压加强时,高纬度的冷空气开始南下,中国东部北方地区的气温迅速降低,等西伯利亚高压进一步加强、这次极端事件发生时,中国东部北方地区的气温达到最低。

较之气温的变化,降水的形成则相对复杂得多。高空低槽和冷空气的活动是造成中国北方地区春季降水的重要原因,是锋面系统发展的重要动力条件。3 月 3—5 日这次强暴风雪事件就对应着深厚的高空槽和强大的冷空气活动。但是,有冷空气活动和高空槽扰动并不一定能够形成像这次这样强的暴风雪事件。降水的形成还需要一个重要条件就是水汽,水汽的多寡是形成降水和决定降水量大小的一个重要因素。如果只有冷空气和高空槽的活动,水汽含量特别低,则可能只形成寒潮降温天气;如果有冷空气和高空槽的活动,而且水汽也达到一定的含量,则可能会形成寒潮降温和小的降水;如果有冷空气和高空槽活动,而且水汽含量也非常充沛,则可能会形成降温和大的降水。

此次极端天气之所以造成中国东部北方地区近 50 年来历史同期最严重的一次暴风雪事件,重要的原因之一就是在于这次强暴风雪事件形成之前持续异常的大气环流源源不断地给中国东部北方地区输送了大量水汽,使得该地在这次暴风雪事件发生之前就水汽充沛(图8b)。在3月1日之前中国东部

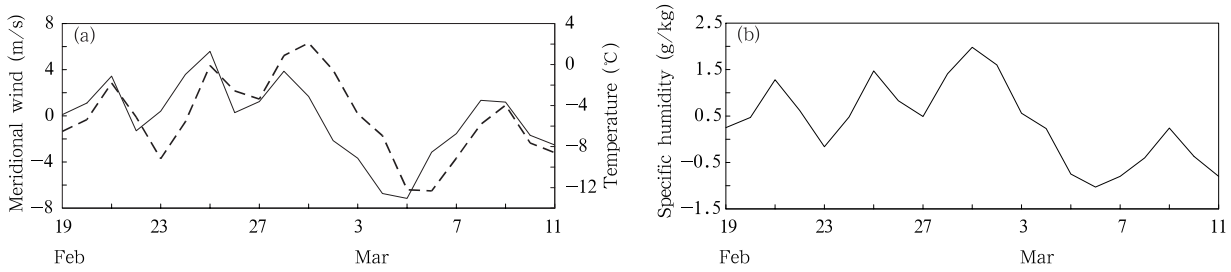

图 8 区域平均(40°—50°N,115°—135°E)的 2007 年 2 月 19 日到 3 月 11 日的(a)1000 hPa 经向风(实线,单位:m/s)和温度(虚线,单位:℃)以及(b)1000 hPa 异常绝对湿度场(单位:g/kg)

Fig. 8 Daily variations of regionally averaged (40°—50°N, 115°—135°E) (a) 1000 hPa meridional wind (solid line, m/s) and air temperature (dash line, ℃) and (b) 1000 hPa anomalous specific humidity (g/kg) from February 19 to March 11, 2007

北方地区为南风所控制(图 8a),受此影响该地的水汽含量明显高于多年平均值。到 3 月 1—2 日时,中国东部北方地区的水汽含量已达 4.0 g/kg,比多年平均值(约为 2.0 g/kg)多 1 倍左右,该地的水汽含量已十分充沛。这样,当大气环流调整、极地冷空气南下时,冷暖空气交汇于中国东部北方地区从而形成了强大的冷锋系统,并最终造成了这次破纪录的强暴风雪事件。而在这次极端事件之后的 3 月 9—12 日,中国东部北方地区又经历了一次降雪和降温事件。虽然这次降雪事件也伴随有强大的高空槽和冷空气活动,但是它的降雪幅度明显地小于 3 月 3—5 日的降雪。究其原因主要在于 9—11 日的这次降雪之前中国东部北方地区没有持续的水汽输送和积累。从图 8b 可见,3 月 5—9 日,中国东部北方地区的水汽含量明显小于多年平均值,水汽含量还不到 3 月 1—2 日的一半,所以水汽条件的差别导致了这两次极端天气降雪量的差别。

这次极端天气事件的发生提醒我们加强灾害预防及评估工作极为必要。对极端降水预报而言,不但要关注临近的高低空环流的变化,还要关注事件发生前期一段时间(1—2 周,甚至更长时间)大气环流的异常及预报地前期水汽含量的状况。关注大气环流的异常可以分析出在预报地是否可以形成锋面系统,而关注预报地水汽含量的多寡则有利于更正确地预报降水量。如果大气环流可以造成锋面系统,那么充沛的水汽则有利于形成大的降水;相反,低的水汽含量则只会形成小的降水,甚至不能形成降水,这对提高降水量异常的预报很有意义,对于防灾减灾工作具有重要的参考价值。

当然,本文是从大尺度环流异常的角度来分析这次极端降雪事件的形成。在强降水的过程中,一些中尺度天气系统具有重要的作用,它可以大大加强短时间的瞬时降水(丁一汇,1993;高守亭等,2003;赵思雄等,2004;孙建华等,2004),所以进一步分析这次暴风雪天气发生过程中的中小尺度天气系统及其演变的物理机制对于认识这次极端天气事件的形成也非常重要。

References

Chen Lianshou, Ding Yihui. 1979. An Introduction to Typhoon over the West Pacific Ocean (in Chinese). Beijing: Science Press, 491pp

Ding Yihui. 1993. Studies on the Excessively Storm Rainfall over the Yangtze-Huaihe Valley in 1991 (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 255pp

Fan K, Wang H J. 2004. Antarctic oscillation and the dust weather frequency in North China. Geophys Res Lett, 31: L10201, doi:10.1029/2004GL019465

Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Interannual variability of Antarctic Oscillation and its influence on East Asian climate during boreal winter and spring. Sci China: series D Earth Science, 49(5): 554-560

Frederick S. 1986. Frontogenesis and symmetric stability in a major New England snowstorm. Mon Wea Rev, 114(10): 1847-1862

Gao Shouting, Zhao Sixiong, Zhou Xiaoping, et al. 2003. Progress of research on sub-synoptic scale and mesoscale torrential rain systems. Chinese J Atmos Sci (in Chinese), 27(4): 618-627

Gao Xuejie, Lin Yihua, Zhao Zongci, et al. 2003. Impacts of greenhouse effect on typhoon over China as simulated by a regional climate model. J Tropical Oceanography (in Chinese), 22(4): 77-83

Gao Xuejie, Zhao Zongci, Filippo Giorgi. 2002. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. Adv Atmos Sci, 19(5): 927-942

Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2001. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. Geophys Res Lett, 28(10): 2073-2076

Hu Zhongming, Zhou Weican. 2005. Case study on the genesis of a snowstrom over the northeast region in China. J Nanjing Inst Meteor (in Chinese), 28(5): 679-684

Huang Ronghui, Zhou Liantong. 2002. Research on the characteristics, formation mechanism and prediction of severe climatic disasters in China. J Natural Disasters (in Chinese), 11: 1-9

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. Bull Amer Meteor Soc, 77: 437-471

Li Cuijin. 1996. A statistical analysis of the storm flood disasters in China. J Catastrophology (in Chinese), 11(1): 59-63

Moors J T, Blakley P D. 1988. The role of frontogenetical forcing and conditional symmetric instability in the midwest snowstorm of 30—31 January 1982. Mon Wea Rev, 116(11): 2155-2171

Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. An analysis on MCSs in Meiyu front during 20—24 June 2002. Acta Meteor Sinica (in Chinses), 62 (4): 423-438

Sun Jianqi, Wang Huijun. 2006. Regional difference of summer air temperature anomalies in Northeast China and its relationship to atmospheric general circulation and sea surface temperature. Chinese J Geophys (in Chinese), 49(3): 662-671

Thompson D W J, Wallace J M. 2000. Annular modes in the extratropical circulation, part Ⅰ: Month-to-month variability. J Climate, 13(5): 1000-1016

Wang Jianzhong, Ding Yihui. 1995. Research of moist symmetric instability in a strong snowfall in North China. Acta Meteor Sinica (in Chinses), 53(4): 451-460

Wang Shigong, Dong Guangrong. 2000. Advances in studying sand-dust storms of China. J Desert Res (in Chinese), 20(4): 349-356

Wang Wen, Cheng Linsheng. 2000. Numerical study of transversal wave instability for the "96.1" snowstorm event. Plateau Meteor (in Chinese), 19(2): 129-140

Wang Wenhui, Xu Xiangde. 1979. The heavy snow process in district Xilingele and the analysis of "77.10" snowstorm. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 37(3): 80-86

Wang Xiaoling, Zhai Panmao. 2004. The spatial and temporal variations of spring dust storms in China and its associations with surface winds and sea level pressures. Acta Meteor Sinica (in Chinses), 62 (1): 96-103

Wu B Y, Wang J. 2002. Winter Arctic Oscillation, Siberian High and East Asian Winter Monsoon. Geophys Res Lett, 29(19): 1897, doi:10.1029/2002GL015373

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 Meteor Soc Japan, 82(4): 1173-1186

Xue Feng, Wang Huijun, He Jinhai. 2003. Interannual variability of Mascarene high and Australian high and their influ ences on summer rainfall over East Asia. Chinese Sci Bull, 48(5): 492-497

Zhai Panmao, Ren Fumin. 1997. On changes of China's maxmum and minmum temperatures in the recent 40 years. Acta Meteor Sinica (in Chinses), 55 (4): 418-429

Zhang F, Snyder C, Rotunno R. 2002. Mesoscale predictability of the "Surprise" snowstorm of 24—25 January 2000. Mon Wea Rev, 130(6): 1617-1632

Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyan. 2003. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations. Climatic Environ Res (in Chinese), 8(3): 307-318

Zhang Tengfei, Lu Yabin, Zhang Jie, et al. 2006. Diagnostic analysis of a heavy snowstorm processe in lower latitude plateau of China. Plateau Meteor (in Chinese), 25(4): 696-703

Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Analysis and study on mechanism of the Meiyu front rainstorm over the Yangtze river valley (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 281pp

Zhou Zijiang, Zhang Guocai. 2003. Typical severe dust storms in northern China during 1954—2002. Chinese Sci Bull, 48(21): 2366-2370

附中文参考文献

陈联寿，丁一汇. 1979. 西太平洋台风概论. 北京：科学出版社，491pp

丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京：气象出版社，255pp

范可，王会军. 2006. 南极涛动的年际变化及其对东亚冬春季气候的影响. 中国科学(D)，4：385-391

高守亭，赵思雄，周晓平等. 2003. 次天气尺度及中尺度暴雨系统研究进展. 大气科学，27(4)：618-627

高学杰，林一骅，赵宗慈等. 2003. CO_2 增加引起的温室效应对我国沿海台风影响的数值模拟试验. 热带海洋学报，22(4)：77-83

胡中明，周伟灿. 2005. 我国东北地区暴雪形成机理的个例研究. 南京气象学院学报，28(5)：679-684

黄荣辉，周连童. 2002. 我国重大气候灾害特征、形成机理和预测研究. 自然灾害学报，11：1-9

李翠金. 1996. 中国暴雨洪涝灾害的统计分析. 灾害学，11(1)：59-63

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. 气象学报，62 (4)：423-438

孙建奇，王会军. 2006. 东北夏季气温变异的区域差异及其与大气环流和海表温度的关系. 地球物理学报，49(3)：662-671

王建中，丁一汇. 1995. 一次华北强降雪过程的湿对称不稳定性研究. 气象学报，53(4)：451-460

王式功，董光荣. 2000. 沙尘暴研究的进展. 中国沙漠，20(4)：349-356

王文，程麟生. 2000. "96.1"高原暴雪过程湿对称不稳定的数值研究. 高原气象，19(2)：129-140

王文辉，徐祥德. 1979. 锡盟大雪和"77.10"暴雪分析. 气象学报，37(3)：80-86

王小玲，翟盘茂. 2004. 中国春季沙尘天气频数的时空变化及其与地面风压场的关系. 气象学报，62 (1)：96-103

薛峰，王会军，何金海. 2003. 马斯克林高压和澳大利亚高压的年际变化及其对东亚夏季风降水的影响. 科学通报，48(3)：287-291

翟盘茂，任福民. 1997. 中国近四十年最高最低温度变化. 气象学报，55(4)：418-429

张庆云，卫捷，陶诗言. 2003. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征. 气候与环境研究，8(3)：307-318

张腾飞，鲁亚斌，张杰等. 2006. 一次低纬高原地区大到暴雪天气过程的诊断分析. 高原气象，25(4)：696-703

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. 北京：气象出版社，281pp

周自江，章国材. 2003. 中国北方的典型强沙尘暴事件(1951—2002 年). 科学通报，48(11)：1224-1228