

李来芳, 刘屹岷, 卜昌郁. 2011. 热源异常对2008年初中国南方低温雨雪天气的影响 [J]. 气候与环境研究, 16 (2): 126-136. Li Laifang, Liu Yimin, Bo Changyu. 2011. Impacts of diabatic heating anomalies on an extreme snow event over South China in January 2008 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (2): 126-136.

## 热源异常对2008年初中国南方低温雨雪天气的影响

李来芳<sup>1,2</sup> 刘屹岷<sup>1</sup> 卜昌郁<sup>3</sup>

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 兰州大学物理学院, 兰州 730000

**摘要** 利用资料诊断和全球大气原始方程模式 (Intermediate General Circulation Model, IGCM), 研究了2008年1月中国南方地区出现罕见的持续性雨雪事件的成因。结果表明, 2008年1月大气非绝热加热场的主要异常出现在热带海洋、青藏高原及中亚地区以及北大西洋。用全球异常热源强迫 IGCM 得到的对流层中低层环流场异常和再分析资料结果十分接近, 说明非绝热加热异常和该事件密切相关。分区试验的结果显示青藏高原以及中亚地区的加热异常是导致此次事件的主要原因, 中高纬度北大西洋上的海温异常也有一定贡献。前者在中国南方产生了中低层的异常南风气流和贡献率约为95%的异常垂直上升运动, 加强了向中国南方的水汽输送; 后者加强了北大西洋涛动正位相, 能导致12%的垂直运动异常和相对于观测偏弱的环流异常。另一方面, 虽然赤道中部太平洋 La Niña 事件对应的热汇有利于此次事件的发生, 但是热带太平洋 La Niña 型海温分布的综合效应对此次事件的贡献为负, 贡献率约为-27%。

**关键词** 中国南方持续性雨雪天气 非绝热加热 青藏高原和中亚地区热源异常 大气环流异常

**文章编号** 1006-9585 (2011) 02-0126-11 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

### Impacts of Diabatic Heating Anomalies on an Extreme Snow Event over South China in January 2008

LI Laifang<sup>1,2</sup>, LIU Yimin<sup>1</sup>, and BO Changyu<sup>3</sup>

1 *State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *School of Physics, Lanzhou University, Lanzhou 730000*

**Abstract** An extreme event, an unusual snowstorm happening in South China in January 2008, is studied with observational data analysis and numerical modeling experiments. It is found that diabatic heating was centered in the tropical oceans, Central Asia, the Tibetan Plateau, and the North Atlantic Ocean. The results from the numerical experiments demonstrate that global diabatic heating anomalies are responsible for this extreme event. A series of numerical experiments are further designed to identify the key areas where the diabatic heating anomalies occur. The results indicate that the diabatic heating anomalies in Central Asia and the Tibetan Plateau could account for the ex-

**收稿日期** 2009-07-13 收到, 2010-12-13 收到修定稿

**资助项目** 中国科学院知识创新工程重要方向项目 KZCX2-YW-Q11-01, 国家自然科学基金项目 40925015、40821092、40810059005

**作者简介** 李来芳, 女, 硕士, 从事气候动力学研究。E-mail: laifang.li@duke.edu

**通讯作者** 刘屹岷, E-mail: lym@lasg.iap.ac.cn

tre heavy snow event. Such anomalies generate anomalous air mass rising as well as southerly winds over South China. These features facilitate the water vapor transportation and result in the heavy rain and snow. Meanwhile, an anomalous heating in the North Atlantic enhances the positive phase of the North Atlantic Oscillation, which could contribute to the occurrence of this unusual snow event. On the contrary, a La Niña event happening over the same period, strengthening the heat source in the western Pacific and the heat sink in the eastern and central Pacific, is more likely to counteract the ascent and suppress the rain and snow over South China.

**Key words** severe rain and snow weather over South China, diabatic heating, anomalous diabatic heating in the Tibetan Plateau and Central Asia, atmospheric circulation anomaly

## 1 引言

2008 年 1 月 10 日至 2 月 2 日, 中国南方 19 个省市遭受罕见低温雨雪冰冻天气。此次灾害天气经历 4 个过程, 范围广、强度大、持续时间长又适逢春运, 给我国国民经济造成了重大的损失(赵琳娜等, 2008)。因此对于本次冬季低温雨雪冰冻事件成因的研究和分析具有重要的科学和现实意义。

王遵娅等(2008)指出, 2008 年 1 月中国南方的最大连续低温日数、最大连续降雪量和最大连续冰冻日数等综合指标表明其强度为 50 年一遇、甚至百年一遇。此次事件的发生对应于多个大气环流系统的异常和配合: 中高纬度乌拉尔山阻高长期稳定存在为冷空气的爆发提供了有利条件, 西太平洋副热带高压偏北偏西以及南支槽的偏强为持续性雨雪天气提供了有利的水汽条件(李崇银等, 2008)。

对于此次灾害事件的气候背景场, 已有很多研究试图通过诊断分析和数值模拟来探讨其异常的成因。张庆云等(2008)研究了 La Niña 背景下南方多雪和少雪年的环流特征, 指出 2008 年 1 月亚洲中高纬的异常环流形式可能和自 2007 年 8 月就在赤道太平洋形成的 La Niña 事件有关。Wen et al. (2009) 比较了中东急流、副热带高压强度和位置、ENSO 在中国南方冬季温度和降水中的作用, 认为中东急流异常偏强是导致 2008 年 1 月中国南方低温多雨的主要原因, 并指出中东急流的作用主要体现在加强高纬度的阻塞系统和低纬度的南支槽前的水汽输送。王东海等(2008)分析了北极涛动(Arctic Oscillation, AO)在这次天气过程中的作用, 认为北极涛动的异常活跃

有利于行星尺度波动的稳定维持。宗海峰等(2008)通过数值模拟指出黑潮海区和中高纬度北大西洋的异常增暖有利于西太平洋副高异常偏北和高纬度阻塞高压的稳定维持。Bao et al. (2009)的数值试验表明, 前期青藏高原异常偏暖有利于中国南方低温多雨以及对流层低层逆温结构的形成。纪立人等(2008)针对此次雨雪事件的后两个过程中 Rossby 波能量传播进行了研究, 认为上游 Rossby 波能量频散是青藏高原—孟加拉湾气压槽加深的主要原因。

上述这些研究分别讨论了某个因子在这次极端异常事件中的作用, 也从另一方面启示我们这次持续的大范围雨雪事件可能是多个因子共同作用的结果。这些因子的相对重要性如何? 它们又是通过影响哪些环流系统来为这次极端事件提供有利的条件? 大气是靠非绝热加热驱动的热机。非绝热加热异常通过大气各种形式能量之间的调整从而影响大气环流形势(Lorenz, 1955)。Gill (1980) 提出热带地区非绝热加热驱动大气环流的简单模型, 并讨论了热带大气运动对关于赤道对称和非对称热源的响应。Buchmann and Buja (1995) 通过分析 NCAR-CCM 模式结果发现, 在离开赤道热源的西北和西南的热带外地区出现异常下沉运动。2008 年 1 月, 全球大气非绝热加热的主要异常集中在热带大洋、高原和中亚地区以及大西洋。这些区域的非绝热加热异常是否会对中国南方地区的冬季降水产生影响?

本文试图通过诊断分析和数值试验探讨大气非绝热加热异常对 2008 年 1 月中国南方地区持续低温雨雪冰冻天气的可能影响, 并讨论哪些区域的非绝热加热异常可能是这次极端事件的主要原因, 与该加热异常相对应的物理过程是什么, 以及这些区域的非绝热加热异常是如何为这次低温

雨雪事件提供有利条件的。

## 2 资料 and 模式

本文资料诊断部分所用的位势高度场和风场资料为日本 25 年再分析资料 (JRA-25) 的月平均资料 (Onogi et al., 2007), 空间分辨率为  $1.25^\circ$  (纬度)  $\times 1.25^\circ$  (经度), 时间长度为 1979~2008 年。大气非绝热加热率资料采用 NCEP\_2 再分析资料 (Kanamitsu et al., 2002)。其中大气非绝热加热率包括 3 种 6 个分量: 凝结潜热 (深对流、浅对流、大尺度凝结潜热)、感热和辐射 (长波辐射、短波辐射)。单位空气柱的总非绝热加热率为从大气柱底层 ( $\sigma=0.995$ ) 到顶层 ( $\sigma=0.004$ ) 的垂直积分:

$$H = \frac{c_p p_s}{g} \int_{0.004}^{0.995} Q(\sigma) d\sigma, \quad (1)$$

其中,  $H$  为单位面积大气柱总非绝热加热率,  $c_p$  为比定压热容,  $p_s$  为表面气压,  $g$  为重力加速度,  $Q$  为单层大气非绝热加热率。

图 1a 为 NCEP\_2 再分析资料 1 月气候平均单位面积大气柱总非绝热加热。在热带地区, 西太平洋暖池、印度洋和大西洋西部都是加热中心, 这些地区降水的凝结潜热释放是非绝热加热的主要来源 (L'Ecuyer et al., 2005)。通过计算全球降水气候计划 (Global Precipitation Climatology Project, GPCP) (Huffman et al., 1997) 1 月降水分布 (图略), 发现热带地区降水最大值中心与上述加热中心有很好的对应关系。另外, 北半球陆地上空大气为冷源, 而南半球陆地则是热源。同时, 北半球副热带海洋上的西边界流在冬季向大气输送大量热量, 因此该区域的非绝热加热以正加热占主导 (Hsiung, 1985)。

异常场上 (图 1b), 再分析资料结果反映出在不同地区异常热源和影响该区域非绝热加热的物理过程有较好的对应关系。2008 年 1 月, 大气非绝热加热异常的高值区主要集中于热带大洋。La Niña 事件引起了赤道太平洋上雨带的移动。与之相对应, 西太平洋热源和中东太平洋热汇同时加强。在赤道中东太平洋的非绝热加热负异常达到  $-200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。中高纬度大洋上, 主要的异常中心位于中高纬度北大西洋, 在以  $60^\circ\text{N}$  为中心的

整个中高纬度北大西洋海盆存在较为一致的非绝热加热正异常, 约  $150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在陆地上的非绝热加热异常主要位于中亚和青藏高原的南沿地区。该区域地气温差显著的正异常 (图略) 导致了感热通量异常偏大, 因此非绝热加热为正异常。其中, 里海地区为非绝热加热正异常的中心。但其量值和海洋相比要小, 约为  $100 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。以上分析表明 NCEP\_2 加热率资料合理地反映了实际大气中非绝热加热空间分布的主要特征。

本文所用的数值模式为全球大气原始方程模式 (Intermediate Global Climate Model, IGCM) (Hoskins and Simmons, 1975; Hoskins and Rodwell, 1995; Rodwell and Hoskins, 1995, 1996; Liu et al., 2007), 其空间分辨率为水平 42 波 (T42) 截断垂直 15 层 (L15)。该模式为原始方程模式, 只有动力框架没有物理过程, 但在保持初始环流恒定的恢复项, 否则几天后系统将被摩擦耗散掉。因而无外强迫的数值积分过程中环流保持不变, 但用非绝热加热作为外源来强迫模式, 环流的变化即是其对热源的响应 (Hoskins and Rodwell, 1995; Rodwell and Hoskins, 1995)。利用热源和地形强迫, 该模式已被用来研究亚洲季风和副高的形成 (Hoskins and Rodwell, 1995), 越赤道气流的形成 (Rodwell and Hoskins, 1995), 南亚高压形成和准双周振荡的机制 (Liu et al., 2007) 等。积分所用初始场同上述文献, 为模式所附带的欧洲中心 1979~1993 年气候平均资料, 本文试验用的是 1 月气候平均。用 NCEP\_2 非绝热加热异常强迫模式, 每天积分 48 步, 积分 20 d。模式结果与初始场的差异反映了大气环流对大气非绝热加热异常的直接响应。

## 3 全球非绝热加热的影响——全球加热数值试验

非绝热加热异常通过改变大气斜压性使大气有效位能和动能发生转化和调整, 从而改变大气环流。为了考查非绝热加热异常在 2008 年 1 月中国南方雨雪事件形成中的作用, 本文设计了一系列数值试验。

用 2008 年 1 月全球非绝热加热异常强迫

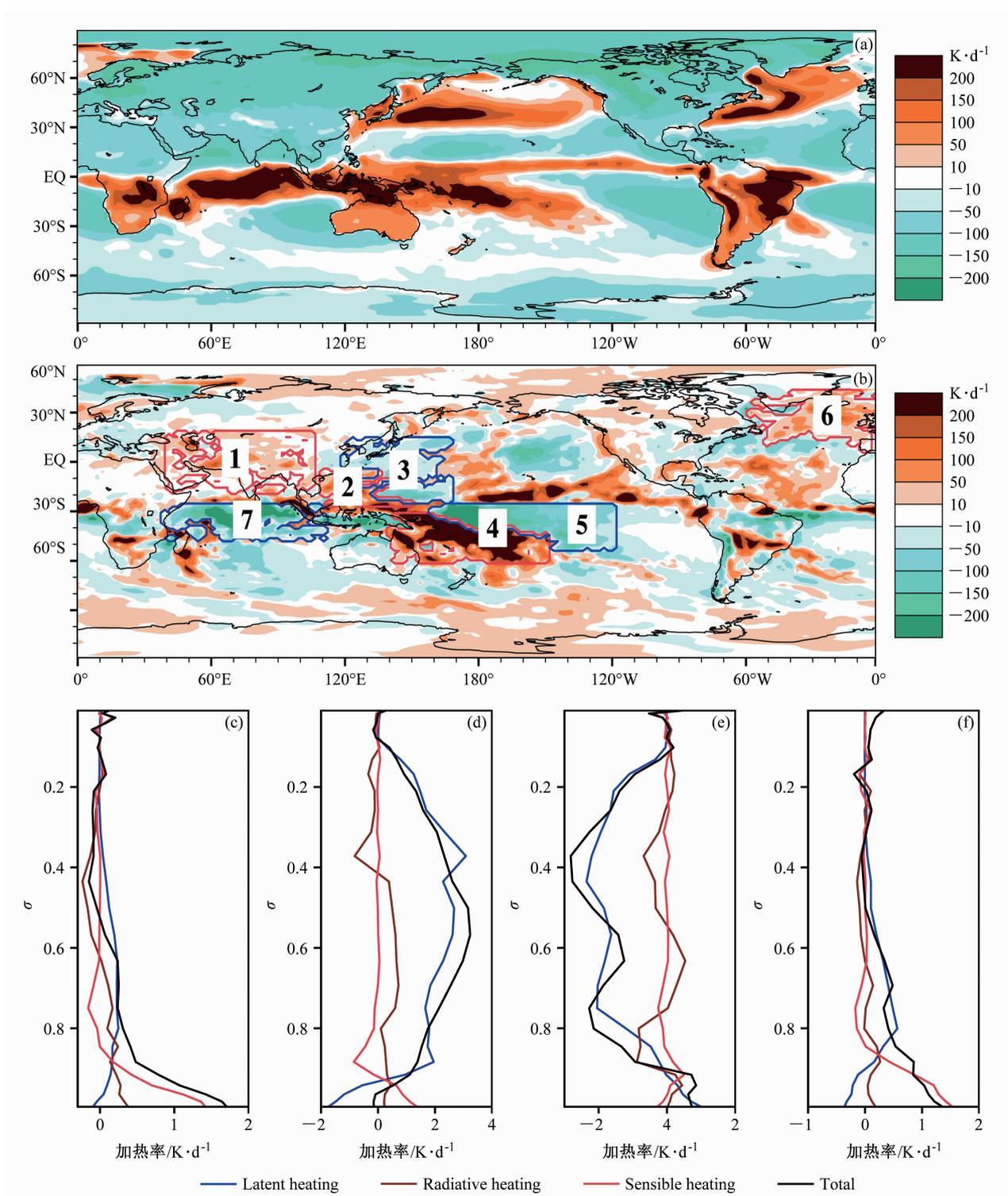


图 1 气柱垂直积分总非绝热加热率 (a) 1 月气候平均、(b) 1 月异常场 (数字表示分区试验的序号); 区域平均总非绝热加热及其分量垂直廓线: (c) 试验 1 中青藏高原和中亚地区, (d) 试验 4 中位于西太平洋的正加热区, (e) 试验 4 中位于赤道中东太平洋的负加热区和 (f) 试验 6 中高纬度北大西洋地区

Fig. 1 Vertical integrated diabatic heating for (a) monthly mean and (b) anomaly (the numbers represent the heating domains in each numerical experiment) in Jan 2008, and vertical heating profiles in  $\sigma$ -coordinates averaged over (c) the Tibetan Plateau and Central Asia for Experiment 1, (d) positive heating over the western Pacific for Experiment 4, (e) negative heating over middle and eastern Pacific for Experiment 4, and (f) high latitudes over North Atlantic for Experiment 6

IGCM 模式, 本节分别进行了不考虑非线性平流作用的线性试验和考虑平流作用的非线性试验。从 500 hPa 垂直运动的响应可以看出, 在低纬地区, 正的非绝热加热异常对应于异常上升运动, 而负的非绝热加热异常对应于下沉运动。对照 JRA-25 的结果, 线性试验和非线性试验在低纬都能很好地模拟出垂直运动的情况 (图 2), 即在低纬, 垂直运动异常是对非绝热加热异常的直接线性响应。而在副热带和中纬地区, 虽然线性试验能模拟出位于中国南方暴雪区的异常垂直上升运动, 但是其强度远远大于 JRA-25 的结果, 因此线性试验在定量上不能很好地反映非绝热加热对大气环流的影响程度 (图 2a 和 2c)。与之相对, 非线性试验的模拟不仅反映出上升运动异常的中心位置, 而且在定量上也与 JRA-25 相近 (图 2b 和 2c)。对比线性试验, 非线性试验更好地模拟了 2008 年 1 月的异常垂直运动。由此可见, 在冬季副热带和中高纬度非线性平流项的作用不可忽略。

从非线性试验给出的异常环流场看, 在 200 hPa 上, 模式模拟出了中心位于东海的反气旋以及从西太平洋到南海的东风异常, 但高原西部的气旋环流偏弱, 只达到高原北部 (图 3a 和 3b)。500 hPa 上, 虽然模式模拟的东亚大槽比实际观测偏强 (图 3c 和 3d), 但中国东部的反气旋式异常环流和里海地区的气旋环流异常与观测结果在强度和中心位置上都较为接近。850 hPa 上, 模式模拟出了在中国东海的异常的反气旋中心以及中国南方的南风异常气流。对于 1 月降水而言, 从南海到华北的南风异常是中国南方地区降水偏多的一个重要环流特征 (张自银等, 2008)。同时在低纬模式模拟出了南支槽的加深 (图 3e 和 3f), 因而孟加拉湾经中南半岛到中国南海西南气流异常强盛, 为持续性降水提供了有利的水汽输送条件 (何溪澄等, 2006; 纪立人等, 2008; 李崇银等, 2008)。

总体而言, 模式基本合理地模拟了与 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻事件相似的异常环流形势, 尤其是中纬度的中低层环流。也就是说 2008 年 1 月持续的非绝热加热异常引发了异常大气环流, 进而形成了 2008 年年初中国南方低温雨雪冰冻事件。

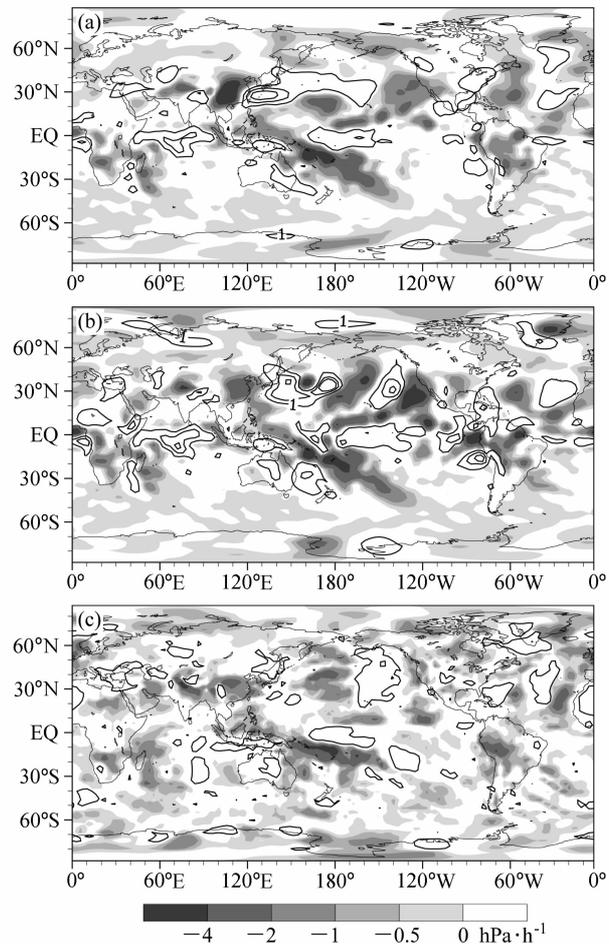


图 2 (a) 线性试验、(b) 非线性试验模拟的和 (c) 来自再分析资料 JRA-25 的 2008 年 1 月 500 hPa 垂直运动  $\omega$  异常。等值线表示  $\omega \geq 0$  (下沉), 阴影为  $\omega < 0$  (上升)

Fig. 2 500-hPa vertical velocity anomaly in Jan 2008 from (a) linear experiment, (b) non-linear experiment, and (c) JRA-25 reanalysis data. Isolines denote  $\omega \geq 0$  and the shadows denote  $\omega < 0$

#### 4 非绝热加热异常的分区试验

从上述全球非绝热加热异常强迫试验的结果看, 非绝热加热的异常对 2008 年 1 月的南方低温雨雪冰冻事件的发生有重要影响。但哪些区域的非绝热加热异常是产生这次事件的主要因素? 根据 2008 年 1 月全球非绝热加热几个主要的异常中心 (图 1b 所示), 设计 7 组分区试验 (见表 1)。其中在第 1 组试验中, 仅在青藏高原和中亚地区非绝热加热异常, 而全球的其他地区非绝热加热异常为 0。第 2 组试验中选取黑潮海区的非绝热加热负异常。第 3 组试验中取中国南海。第 4 组试

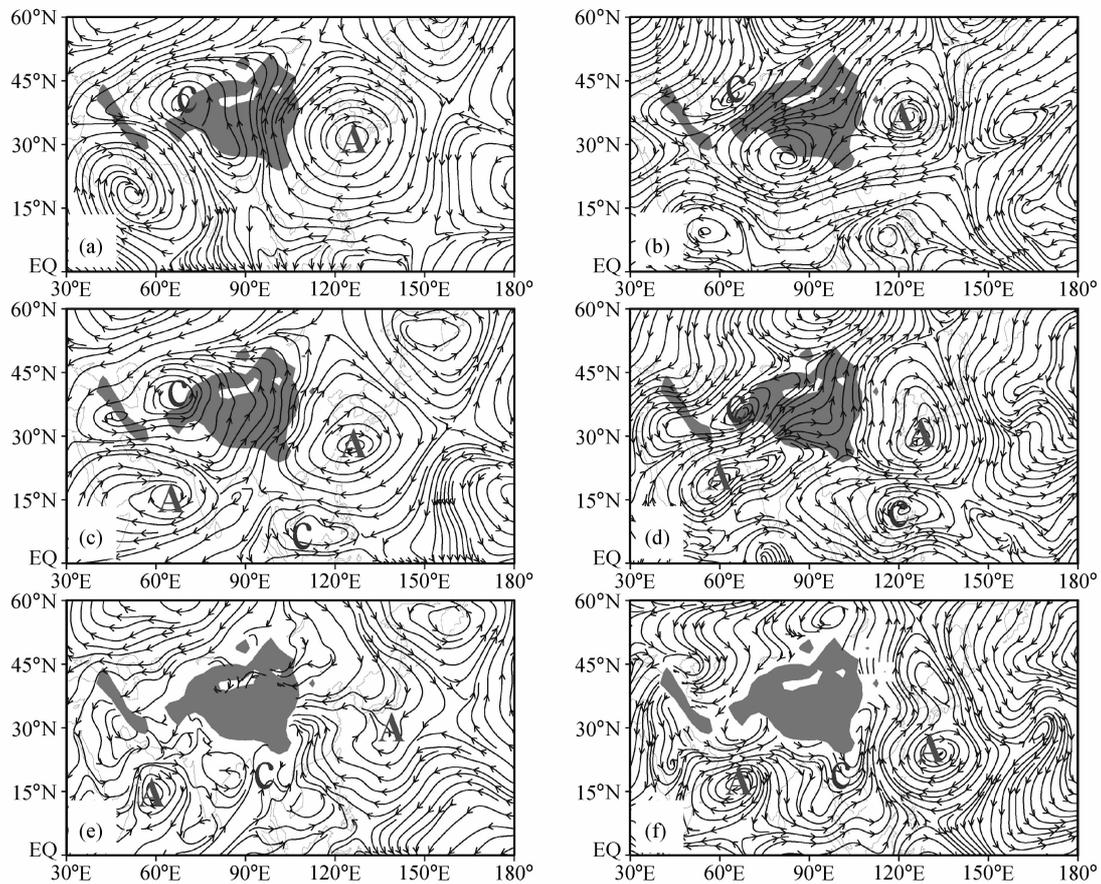


图 3 2008 年 1 月 (a, b) 200 hPa、(c, d) 500 hPa、(e, f) 850 hPa 东亚地区大气环流异常。左列来自再分析资料 JRA-25，右列为非线性模式模拟；阴影表示地形高度超过 1500 m，A 和 C 分别代表异常反气旋和气旋中心

Fig. 3 Atmospheric circulation anomalies over East Asia in Jan 2008 at (a, b) 200 hPa, (c, d) 500 hPa, and (e, f) 850 hPa. Left panels are from JRA-25, right panels are from nonlinear experiment; shadings denote elevations greater than 1500 m, A and C represent abnormal anticyclonic and cyclonic circulation, respectively

验为 La Niña 现象试验，包括了赤道中部太平洋异常冷却及其西南侧位于西太平洋的异常加热区。第 5 组为第 4 组中仅与 La Niña 相联系的赤道中部太平洋异常冷却试验。第 6 组为中高纬度北大西洋试验。第 7 组为印度洋试验。

表 1 分区试验设计方案  
Table 1 Experiment design

编号	热源位置	热源性质
1	青藏高原和中亚	热源
2	南海	热源
3	黑潮海区	冷源
4	赤道太平洋	暖池区热源，赤道中东部冷源
5	赤道中部太平洋	冷源
6	中高纬北大西洋	热源
7	印度洋	冷源

#### 4.1 高原及中亚地区非绝热加热异常试验的结果

高原和中亚地区非绝热加热在水平方向的异常中心位于里海和高原的南沿（图 1b）。非绝热加热各个分量在垂直方向上的分布（图 1c）特征是总非绝热加热异常的最大值位于对流层低层，且从地面到  $\sigma=0.6$  层快速减小。这表明非绝热加热的各个分量中感热加热异常是主导因素。这和该区域 2008 年冬季陆面温度正异常（图略）有关（Bao et al., 2009）。

从试验 1 的环流形势看（图 4a 和 4b），在中低层大气环流呈现相当正压状态。中国南方地区为异常南风气流控制，而中国东海为一个异常的反气旋环流中心，表明副高异常偏北。模式模拟的 500 hPa 西太副高异常偏北（图 4a），而高原及中亚地区为异常气旋式环流，这些和观测结果接

近。在 850 hPa 上 (图 4b), 高原及中亚地区为异常气旋式环流, 而中国南方雨雪区为异常反气旋式环流。王同美等 (2008) 研究表明, 冬季由于高原的动力作用, 以高原为中心形成了南侧气旋和北侧反气旋的“偶极子”环流型。2008 年 1 月, 低层异常感热加热在高原地区形成了围绕高原的异常气旋环流。该异常环流叠加在高原南侧气候平均的气旋环流之上, 加强了孟加拉湾地区的印缅槽, 因而从孟加拉湾至中南半岛到南海的西南气流增强, 为降水提供了有利的水汽条件。上述结果和 Zhao and Chen (2001) 根据冬季青藏高原热源强度进行合成分析得到的环流形势相近, 也与 Bao et al. (2009) 关于高原增暖对 2008 年雨雪冰冻事件的模拟一致。

非绝热加热异常同时加强了南方地区低层气流的辐合 (图 4b), 因而在南方暴雪区强迫出异

常上升运动, 该异常的中心位于东海, 并且中心强度比实际情况偏强 (图 5a)。通过对南方雨雪区 ( $20^{\circ}\text{N}\sim 35^{\circ}\text{N}$ ,  $105^{\circ}\text{E}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ) 的垂直运动异常做区域平均得到, 高原及中亚地区的非绝热加热异常产生的垂直运动异常占全球试验产生的垂直运动异常 (图 2b) 的 95%。也就是说, 高原及中亚地区非绝热加热异常是中国南方地区产生有利垂直运动条件的关键条件。

#### 4.2 中高纬度北大西洋非绝热加热异常试验的结果

中高纬度北大西洋非绝热加热异常的空间分布在水平方向上表现为全海盆量值较为一致的非绝热加热正异常 (图 1b)。非绝热加热各个分量在垂直方向上的分布 (图 1f) 特征是总非绝热加热异常在对流层低层最大, 其中感热加热正异常占主导, 表明该地区的非绝热加热异常与 2007/2008 年冬季北大西洋海温偏高密切相关 (宗海峰

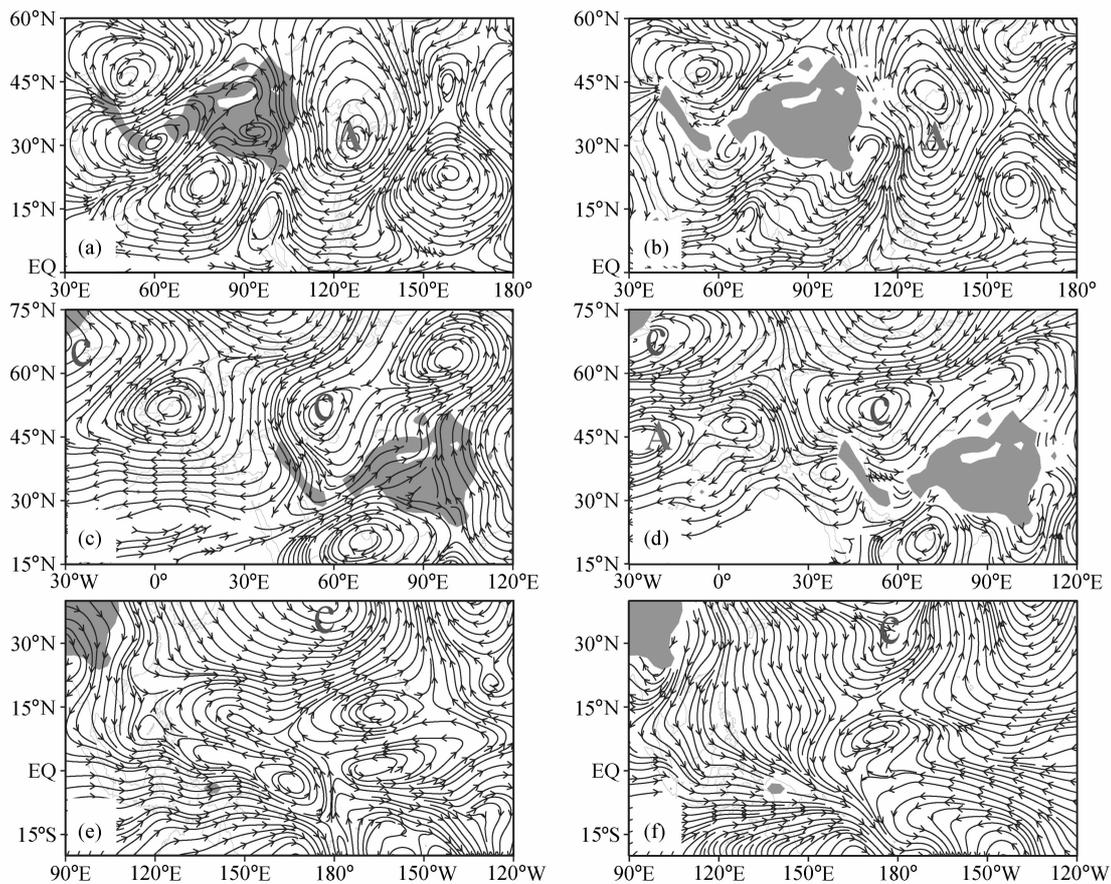


图 4 IGCM 模拟的环流异常 (a、b) 试验 1、(c、d) 试验 6 和 (e、f) 试验 4。左列和右列分别为 500 hPa 和 850 hPa, 阴影表示地形高度超过 1500 m

Fig. 4 Simulated atmospheric circulation anomalies; (a, b) Experiment 1, (c, d) Experiment 6, and (e, f) Experiment 4. Left and right panels are 500 hPa and 800 hPa, respectively; shadings denote the elevation above 1500 m

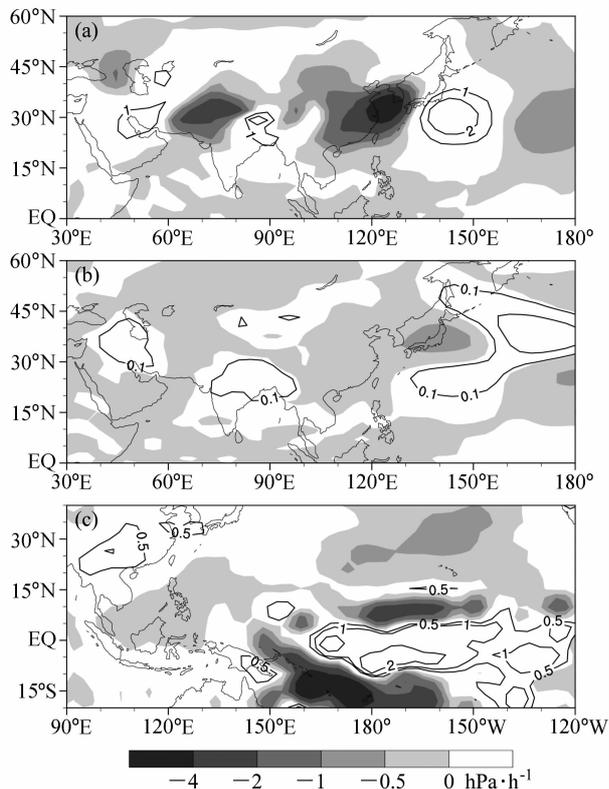


图 5 模拟的 500 hPa 垂直运动异常: (a) 试验 1; (b) 试验 6; (c) 试验 4。等值线表示异常下沉运动, 阴影表示异常上升运动

Fig. 5 Simulated vertical velocity anomalies at 500 hPa: (a) Experiment 1; (b) Experiment 6; (c) Experiment 4. The isolines denote abnormal descent and the shadings denote the abnormal ascent, respectively

等, 2008)。随着高度增加, 总非绝热加热异常逐渐减小。从  $\sigma=0.8$  开始, 潜热加热异常超过感热而成为总非绝热加热异常的主要因素, 这与 GPCP 反映的该地区正的降水异常相符合 (图略)。

中高纬度北大西洋非绝热加热异常试验模拟的海平面气压表现为北大西洋冰岛低压、气旋环流和亚速尔高压同时加强 (图略)。根据北大西洋涛动 (North Atlantic Oscillation, NAO) 的定义 (Walker, 1923; 武炳义和黄荣辉, 1999), 中高纬度北大西洋非绝热加热正异常加强了 NAO 正位相。850 hPa 上, 冰岛地区产生了气旋式异常环流并在  $45^{\circ}\text{N}$  形成了异常反气旋环流。以  $60^{\circ}\text{N}$  为中心, 大西洋上空西风加强。上述异常环流与宗海峰等 (2008) 的研究结果一致。另外, 里海地区形成了气旋式异常环流。该气旋式环流的中心

位置比观测结果略微偏北, 强度稍弱。宇婧婧 (2009) 和宇婧婧等 (2011) 通过诊断分析和数值试验发现, 当大西洋上  $50^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{N}$  处西风异常加强时, 会通过遥相关在其下游的高原以东地区产生异常高压, 该异常高压加强了太平洋的水汽输送, 因而长江中下游地区降水偏多。2008 年 1 月北大西洋非绝热加热异常试验得到的中国南方雨雪区的环流特征与上述结果类似。高原东侧, 太平洋上出现异常高压和反气旋环流。位于该反气旋环流西侧的中国南方雨雪区盛行异常南风气流, 但南风异常的值比观测要小 (图 4c 和 4d)。

垂直运动场上, 中高纬度北大西洋非绝热加热异常在中国南方雨雪区以及日本地区强迫出异常的上升运动, 但其中心位于日本 (图 5b)。通过对南方雨雪区的垂直运动做区域平均得出, 中高纬度北大西洋非绝热加热异常产生的垂直运动异常占全球试验产生的垂直运动异常的 12%。因此, 中高纬度北大西洋非绝热加热异常产生的异常垂直和水平环流有利于 2008 年 1 月中国南方低温雨雪冰冻事件的产生, 但其影响小于高原和中亚地区非绝热加热异常的影响。

#### 4.3 La Niña 现象引起的热带太平洋热源异常的试验结果

从 2007 年 8 月开始, 赤道中东太平洋海温就出现了  $0.5^{\circ}\text{C}$  的负异常, 一个中等强度的 La Niña 事件开始形成, 随后海温继续降低。2008 年 1 月, 赤道中东太平洋海温距平 (Sea Surface Temperature Anomaly, SSTA) 达到  $-1.5^{\circ}\text{C}$ , La Niña 事件发展成熟 (高辉等, 2008)。与热带地区此次 ENSO 事件的冷位相对应, 非绝热加热异常在热带西太平洋为异常加热而在热带中东部太平洋表现为显著的冷却 (图 1b)。热带地区 La Niña 型 SSTA 分布导致热带地区降水的空间分布发生变化, 对流层中潜热加热的变化是总非绝热加热异常的主要因素 (Nigam et al., 2000; Chan and Nigam, 2009) (图 1d 和 1e)。

La Niña 现象的冷海温引起的赤道中部太平洋异常冷却 (试验 5) 加强了南支槽前的西南气流并且在南方地区产生了异常上升运动 (图略)。但如果综合考虑热带太平洋的非绝热加热异常 (试验 4), 由于暖池区的异常加热在中国南方地区产生了异常下沉运动并且其强度大于中部太平洋冷海

温引起的上升运动, 则 La Niña 现象的总效应并不利于此次天气事件的发生和维持。试验得到的水平和垂直环流异常与典型 La Niña 年的环流形势相似。赤道地区盛行异常东风气流。模式模拟的东亚大槽向南加深, 加强了槽后的北风气流, 因而中国南方地区为异常北风所控制, 有利于高纬干冷空气的入侵 (图 4e 和 4f)。根据李崇银等 (2008) 与陶诗言和张庆云 (1998) 通过诊断分析得到的 ENSO 事件对中国南方冬季降水和冬季风环流的影响, 这种环流形势不利于在中国南方地区出现大范围的雨雪天气。

La Niña 现象导致的非绝热加热异常在东亚地区强迫出异常下沉运动, 且中心位于我国西南地区 (图 5c)。南方雨雪区区域平均的垂直运动异常表明, 2008 年 1 月热带太平洋非绝热加热异常对南方地区雨雪事件的贡献率为  $-27\%$ , 不利于水汽的上升凝结和雨雪天气的发生。

## 5 总结与讨论

2008 年 1 月东亚地区环流场出现不同于气候态的较大异常, 主要表现为东中国海的相当正压的反气旋式异常环流和中国南方的南风异常。而这些异常的出现和大气能量的调整有密不可分的联系。本文通过诊断分析和数值模拟分析了 2008 年 1 月大气非绝热加热异常对中国南方长时间低温雨雪冰冻天气的可能影响, 得到以下主要结论:

(1) 2008 年 1 月东亚地区大气环流出现显著异常, 在中国南方地区中低层均存在南风异常和反气旋式异常环流, 有利于冬季风降水的水汽输送。大气非绝热加热异常的高值区主要位于热带大洋、高原和中亚地区以及中高纬度北大西洋。

(2) IGCM 模式合理地模拟了和此次低温雨雪冰冻事件相对应的异常大气环流形势。虽然模式对高纬度尤其是高层的大气环流模拟存在一定偏差, 但总体而言模式较好地模拟了影响此次事件的中低层主要环流特征。这说明非绝热加热异常可以产生导致中国南方异常降水的有利环流条件。对比线性模式结果, 在中纬度地区, 非线性平流作用在冬季十分重要。

(3) 分区试验的结果表明, 中亚地区和高原地区由于正的感热加热导致的非绝热加热异常是

造成中国南方水平和垂直环流异常的主要因素。从水平运动看, 在 850 hPa 和 500 hPa, 中国南方暴雪区位于反气旋异常环流的西侧, 因此为南风异常所控制。该南风异常加强了中南半岛到中国南方的转向气流, 有利于水汽向南方暴雪区的输送。从垂直运动上看, 中国南方暴雪区存在异常上升运动, 模拟的垂直速度异常值和观测值接近。异常上升运动为大尺度降水提供了有利的水汽凝结条件。

(4) 受 La Niña 现象影响, 热带太平洋产生了西太平洋非绝热加热正异常而中东部负异常的空间分布形态。模拟结果显示, 单独的赤道中东部地区的异常冷却导致的大气环流异常能为中国南方地区的雨雪天气提供有利的条件。但综合考虑整个热带太平洋的非绝热加热异常, 则 La Niña 现象并不利于此次天气事件的发生。La Niña 现象引发了南方地区的异常北风和下沉气流, 对此次事件为负贡献。

(5) 在北大西洋上空, 非绝热加热异常加强了 NAO 正位相。在中国南方地区环流的响应为异常南风气流和垂直上升运动。模式模拟的环流比观测要弱, 说明中高纬度北大西洋非绝热加热正异常能在较弱的程度上为 2008 年 1 月中国南方暴雪提供有利的环流条件。实际大气中, NAO 正位相还能通过环流异常增加青藏高原西部的降水和凝结潜热释放 (宇婧婧等, 2011)。

本文通过 IGCM 模式讨论了 2008 年 1 月大气非绝热加热在中国南方地区低温雨雪事件中的作用。模式合理模拟了中低层的环流, 但对高层环流尤其是高纬度地区环流的模拟还存在一定的偏差。文中主要强调了南风气流在水汽输送中的作用。而非绝热加热对高纬度冷空气活动的影响还需要进一步讨论, 以更完整地分析大气非绝热对此次事件的影响。

## 参考文献 (References)

- Bao Q, Yang J, Liu Y, et al. 2009. Roles of anomalous Tibetan Plateau warming on the severe 2008 winter storm in central-southern China [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 138: 2375 - 2384.
- Buchmann J, Buja L E. 1995. The dynamical basis of regional vertical motion fields surrounding localized tropical heating [J]. *J. Climate*, 8: 1217 - 1233.

- Chan S, Nigam S. 2009. Residual diagnosis of diabatic heating from ERA-40 and NCEP reanalysis: Intercomparisons with TRMM [J]. *J. Climate*, 22: 414–428.
- 高辉, 陈丽娟, 贾小龙, 等. 2008. 2008 年 1 月我国大范围低温雨雪冰冻灾害分析 II. 成因分析 [J]. *气象*, 34 (4): 101–106.
- Gao Hui, Chen Lijuan, Jia Xiaolong, et al. 2008. Analysis of the severe cold surge, ice-snow and frozen disasters in South China during January 2008. II. Possible climate causes [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 34 (4): 101–106.
- Gill A E. 1980. Some simple solution for heat-induced tropical circulation [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 106: 447–462.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海, 等. 2006. 中国南方地区冬季风降水异常的分析 [J]. *气象学报*, 64 (5): 594–604. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2006. An analysis on anomalous precipitation in Southern China during winter monsoons [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (5): 594–604.
- Hoskins B J, Simmons A. 1975. A multi-layer model and the semi-implicit method [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 101: 637–655.
- Hoskins B J, Rodwell M J. 1995. A model of the Asian summer monsoon. Part I: The global scale [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52: 1329–1340.
- Hsiung J. 1985. Estimates of global oceanic meridional heat transport [J]. *J. Phys. Oceanogr.*, 15: 1405–1413.
- Huffman G J, Adler R F, Arkin P, et al. 1997. The global precipitation climatology project (GPCP) combined precipitation dataset [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 5–20.
- 纪立人, 布和朝鲁, 施宁, 等. 2008. 2008 年初我国南方雨雪低温天气的中期过程分析 III: 青藏高原—孟加拉湾气压槽 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 446–458. Ji Liren, Bueh Cholaw, Shi Ning, et al. 2008. On the medium-range process of the rainy, snowy and cold weather of South China in early 2008. Part III: Pressure trough over the Tibetan Plateau/Bay of Bengal [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (4): 446–458.
- Kanamitsu M, Ebisuzaki W, Woollen J, et al. 2002. NCEP-DOE AMIP-II Reanalysis (R-2) [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83: 1631–1643.
- L'Ecuyer T S, Masunaga H, Kummerow C D. 2005. Variability in the characteristics of precipitation systems in the tropical Pacific. Part II: Implications for atmospheric heating [J]. *J. Climate*, 19: 1388–1405.
- 李崇银, 杨辉, 顾薇. 2008. 中国南方雨雪冰冻异常天气原因的分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (2): 113–122. Li Chongyin, Yang Hui, Gu Wei. 2008. Cause of severe weather with cold air, freezing rain and snow over South China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 13 (2): 113–122.
- Liu Y M, Hoskins B, Blackburn M. 2007. Impact of Tibetan orography and heating on the summer flow over Asia [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85B: 1–19.
- Lorenz E N. 1955. Available potential energy and the maintenance of the general circulation [J]. *Tellus*, 7: 157–167.
- Nigam S, Chung C, DeWeaver E. 2000. ENSO diabatic heating in ECMWF and NCEP reanalyses, and NCAR CCM3 simulation [J]. *J. Climate*, 13: 3152–3171.
- Onogi K, Tsutsui J, Koide H, et al. 2007. The JRA-25 reanalysis [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 85: 369–432.
- Rodwell M J, Hoskins B J. 1995. A model of the Asian summer monsoon. Part II: Cross-equatorial flow and PV behavior [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52: 1341–1356.
- Rodwell M J, Hoskins B J. 1996. Monsoons and the dynamics of deserts [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 122: 1385–1404.
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. *大气科学*, 22 (4): 399–406. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 22 (4): 399–406.
- Walker G T. 1923. Correlation in seasonal variations of weather. VIII: A preliminary study of world weather [J]. *Mem. India Meteor. Dept.*, 24: 275–310.
- 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.
- 王同美, 吴国雄, 万日金. 2008. 青藏高原的热力和动力作用对亚洲季风区环流的影响 [J]. *高原气象*, 27 (1): 1–9. Wang Tongmei, Wu Guoxiong, Wan Rijin. 2008. Influence of the mechanical and thermal forcing of Tibetan Plateau on the circulation of the Asian summer monsoon area [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 27 (1): 1–9.
- 王遵娅, 张强, 陈裕, 等. 2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻灾害的气候特征 [J]. *气候变化研究进展*, 4 (2): 63–67. Wang Zunya, Zhang Qiang, Chen Yu, et al. 2008. Characters of meteorological disasters caused by the extreme synoptic process in early 2008 over China [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 4 (2): 63–67.
- Wen M, Yang S, Kumar A, et al. 2009. An analysis of the large-scale climate anomalies associated with the snowstorm affecting China in January 2008 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 137: 1111–1131.
- 武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚季风 [J]. *大气科学*, 23 (6): 641–651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (6): 641–651.
- 宇婧婧, 刘屹岷, 吴国雄. 2011. 冬季青藏高原上空热状况的分析——II 年际变化 [J]. *气象学报*, 69 (1): 48–57. Yu Jingjing, Liu Yimin, Wu Guoxiong. 2011. Analysis of the diabatic heating

- characteristic of atmosphere over Tibetan Plateau in winter—II Interannual variation [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 69 (1): 48–57.
- 宇婧婧. 2009. 冬季青藏高原热状况及其与北半球大气环流的联系 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文, 120pp. Yu Jingjing. 2009. Relationship between atmospheric circulation in Northern Hemisphere and the thermal condition of Tibetan Plateau in winter [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, 120pp.
- 张庆云, 宣守丽, 彭京备. 2008. La Niña 年冬季亚洲中高纬度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.
- 张自银, 龚道溢, 郭栋, 等. 2008. 我国南方冬季异常低温和异常降水事件分析 [J]. *地理学报*, 63 (9): 899–912. Zhang Ziyin, Gong Daoyi, Guo Dong, et al. 2008. Anomalous winter temperature and precipitation events in Southern China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 63 (9): 899–912.
- 赵琳娜, 马青云, 杨贵名, 等. 2008. 2008 年初我国低温雨雪冰冻对重点行业的影响及致灾成因分析 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 556–566. Zhao Linna, Ma Qingyun, Yang Guiming, et al. 2008. Disasters and its impact of a sever snow storm and freezing rain over southern China in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 556–566.
- Zhao P, Chen L X. 2001. Interannual variability of atmospheric heat source/sink over the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and its relation to circulation [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 18 (1): 106–116.
- 宗海峰, 张庆云, 布和朝鲁, 等. 2008. 黑潮和北大西洋海温异常在 2008 年 1 月我国南方雪灾中的可能作用的数值模拟 [J]. *气候与环境研究*, 13 (4): 491–499. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Bueh Cholaw, et al. 2008. Numerical simulation of possible impacts of Kuroshio and North Atlantic sea surface temperature anomalies on the South China snow disaster in January 2008 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 13 (4): 491–499.