

2008 年雪灾过程高原上游关键区水汽输送机制及其前兆性“强信号”特征^{* 1}

施晓晖¹ 徐祥德¹ 程兴宏²
SHI Xiaohui¹ XU Xiangde¹ CHENG Xinghong²

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. 中国气象局国家气候中心, 北京, 100081

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

2. *National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China*

2008-07-26 收稿, 2008-09-19 改回.

Shi Xiaohui, Xu Xiangde, Cheng Xinghong. 2009. Premonitory of water vapor transport in the upstream key region over the Tibetan Plateau during the 2008 snowstorm disaster in South China. *Acta Meteorologica Sinica*, 67(3):478–487

Abstract Using NCEP/NCAR reanalysis data, observational precipitation in China and precipitable water vapor (PWV) data from GPS stations in the Tibetan Plateau and its vicinity, thermal and dynamic features and the variation and transportation of water vapor in the 2008 heavy snowstorm disaster in South China are analyzed by statistical diagnosis. Results show that during the snowstorm disaster, under the large scale background with “trough in south and ridge in north”, strong cold air caused by prevailing northerly wind in northern Asia wedged into low level atmosphere over Southeast China and formed a “cold cushion”. At the same time, warm-wet air was also transported to Southeast China by southerly wind. The vertical shear of winds from cold to warm airflows produced strong upward motion and then, the warm-wet air over the cold air wedge was driven to rise. Finally, the structure of “warm cover” and “cold cushion”, as well as corresponding vertical circulation over the converging frontal zone came into being. The water vapor supply of the 2008 snowstorm in South China mainly came from the South China Sea and the Indian Ocean. These two branches of water vapor transport channels merged in the Indo-China Peninsula and Southwest China, and then formed a strong southwest water vapor transport stream passing through Yunnan Province and the nearby. This was the important water vapor transport channel of the snowstorm disaster in the Yangtze River Valley in 2008. From our study, it is found that the water vapor observation from the GPS network serves as an important forecasting tool and provides initial information needed for the assimilation in numerical model simulations of the rainfalls in the middle and lower reaches of the Yangtze River. The water vapor convergence in Yunnan Province and its surrounding areas indicated occurrence of later precipitation in the downstream regions, i. e., the variation of PWV in the upstream key region of water vapor transport can be used as a premonitory signal of the snowstorm disaster. It can also be seen that Yunnan Province is the most important key region for the southwest water vapor transport.

Key words Snowstorm disaster, Thermal and dynamic features, Water vapor transport, Precipitable water vapor, Premonitory signal

摘 要 利用 NCEP/NCAR 再分析资料、中国气象台站降水量资料、青藏高原及周边地区 GPS 水汽观测站网大气可降水量资料, 采用统计诊断方法, 分析了 2008 年中国南方雨雪冰冻灾害期间 4 次暴雪过程的动力、热力特征, 水汽变化及其输送特征。研究表明, 灾害发生期间, 中国北方中低层大气盛行偏北气流, 使较强的偏北冷空气“楔入”中国东南部低层大气, 构成低层“冷垫”, 同时偏南暖湿气流源源不断地将大量水汽输送到中国东南部, 冷暖气流交汇及其垂直切变导致强烈的上升运

* 资助课题: 中国气象科学研究院基本科研业务费专项资金重点项目(2008Z006)、灾害天气国家重点实验室自主研究项目(2008LASWZ104)和中日政府间 JICA 渠道技术合作项目“中日气象灾害合作研究中心”。

作者简介: 施晓晖, 主要从事天气气候学研究。E-mail: sxh@cams.cma.gov.cn

动,构成了“冷垫”上空的“暖盖”及“南槽北脊”反位相环流汇合锋区的垂直环流结构。反位相环流的偏南水汽主要来自南海和印度洋,两者在中南半岛和中国西南地区合并,构成经过云南及周边关键区的强西南水汽流,形成了长江流域特大雪灾发生的关键水汽通道。研究结果亦证实高原及周边地区 JICA 项目 GPS 水汽监测网信息可为中国长江中下游地区暴雪的发生提供具有预报实用意义的重要分析工具及数值模式同化初始信息源。云南及周边区域水汽含量的多少对下游地区后期降水的发生具有一定的指示意义,即水汽输送上游关键区大气可降水量的变化可作为此次南方雨雪冰冻灾害期间降水发生的“前兆性”信号,而云南则是西南水汽输送通道中尤为重要的关键区域。

关键词 雪灾,动力、热力特征,水汽输送,大气可降水量,“前兆性”强信号

中图法分类号 P456.7

1 引言

东亚冬季风是北半球冬季大气环流的一个重要组成部分,也是对中国冬季气候影响最直接的一个环流系统。最近很多的诊断和数值模拟研究(徐建军等,1999;Wang,2001;李巧萍等,2005;施晓晖等,2007)揭示了20世纪80年代以后东亚冬季风强度的减弱趋势,与此对应,中国连续出现“暖冬”,冷空气活动总体上也出现了减少趋势(王遵娅等,2005;钱维宏等,2007;Li, et al,2007)。国内外的不同学者已经针对影响中国冬季气候的因子进行了大量研究,发现北极涛动(Wu, et al,2002;龚道溢等,2003;Gong, et al,2004;陈文等,2006)、ENSO(陶诗言等,1998;龚道溢等,1999;何溪澄等,2007)、西伯利亚高压(Qian, et al,2001;龚道溢等,2002)、西太平洋遥相关型(李勇等,2007)、东亚中纬度西风急流(Yang, et al,2002;毛睿等,2007)等均对中国冬季气温和降水具有较大的影响。黄荣辉等(2007)则认为冬季北半球定常波的活动亦在东亚冬季风的变化中起着很重要的作用。

2008年1月中旬至2月初,受冷暖空气共同影响,中国发生了持续低温雨雪冰冻灾害,其中河南、湖北、安徽、江苏、湖南和江西西北部、浙江北部出现大到暴雪;湖南、贵州、安徽南部和江西等地出现冻雨或冰冻天气。总的来看,此次气象灾害具有范围广、强度大、持续时间长、影响重等特点;很多地区为50年一遇、部分地区达到百年一遇标准,属历史罕见。灾害给湖南、湖北、安徽、江西、广西、贵州等20个省(市、区)造成重大损失,特别是对交通运输、能源供应、电力传输、通讯设施、农业及人民群众生活造成了严重影响,据民政部统计,受灾人口达1亿多人,直接经济损失达到1千多亿元。因此,对本次极端灾害天气过程进行深入分析是十分必要的。

国内对暴雪的研究始于20世纪70年代末,王

文辉等(1979)对内蒙古“77.10”特大暴雪过程进行了天气学分析,提出了北方暴雪过程“南槽北脊”反位相锋生概念模型;随后,王建忠等(1995)进一步讨论了湿对称不稳定在华北“86.11”暴雪形成中的可能作用;宫德吉等(2001)研究了低空急流与内蒙古大(暴)雪过程的关系,认为低空偏南急流对于该地区的暴雪过程起着重要作用;另外还有一些学者对发生在青藏高原的暴雪过程进行了诊断和数值模拟工作(邓远平等,2000;张小玲等,2000a,2000b;王文等,2002)。近年来,也有一些研究工作是对中国南方中低纬度地区一些特大降雪个例进行了分析,例如朱爱民等(1994)对江淮一次大范围降雪过程的锋生次级环流进行过深入分析;杨柳等(2006)则利用非静力中尺度MM5数值模式对2003年2月江淮地区暴雪过程进行了数值模拟。但对于中国南方中低纬度地区而言,目前有关降雪的研究仍然较少,还是一个比较薄弱的环节,对引起中国南方地区冬季降水异常的物理因子及其相互关系的认识还远远不够。

众所周知,水汽是降水形成的一个重要条件。从20世纪50年代开始,国内外的很多学者就开展了对于亚洲季风区内水汽输送问题的一系列研究,并取得了丰硕的成果(徐淑英,1958;陆渝蓉等,1983;Chen, et al,1988;黄荣辉等,1998),徐祥德等(2002,2003)的研究指出了夏季青藏高原及周边地区是中国东部区域内长江流域梅雨带西边界重要的水汽“转运站”,尤其长江流域夏季涝年水汽输送主要来自南海、印度洋地区,并经高原“转向”,呈远距离水汽输送特征。最近,何溪澄等(2006)通过典型年份的对比分析,发现水汽输送的明显年际变化是造成冬季南方降水出现明显差异的一个关键因子。但总体来说,针对中国冬季水汽输送变化特征及其对降水影响等方面的研究还比较少。

基于以上认识,本文将对2008年中国南方雨雪

冰冻灾害期间的动力、热力特征,水汽变化及其输送特征进行分析,重点采用中日政府间技术合作 JICA (Japan International Cooperation Agency) 渠道项目“中日合作气象灾害合作研究中心”(以下简称 JICA 项目)在青藏高原及其东部周边地区建立的 GPS 水汽观测站网获取的大气可降水量资料及中国区域的气象站点地面降水资料,探讨“上游”地区水汽变化特征,并寻找长江中下游地区冬季降水的可能水汽“前兆性”信号。

2 JICA 项目高原天气系统“上游区域水汽观测网布局”及其他资料

考虑到高原及其东部周边地区作为长江中下游地区“天气系统上游强信号区”的特殊地位,中国气

象科学研究院承担的 JICA 项目在青藏高原及其东部周边地区建立了新一代气象综合观测网,填补了高原及周边地区综合观测数据的空白。目前 JICA 项目已完成了 GPS 水汽观测站、边界层(PBL)观测站和自动气象站(AWS)等各项建设工程(站点分布如图 1 所示)。其中 2006 年 1 月到 2007 年 9 月完成了 JICA 项目 24 台 GPS 水汽观测站的建设工程,分别建于西藏、云南、四川、广西、贵州、重庆,现已成功实现了业务运行。

在 2008 年的中国南方雨雪冰冻灾害过程中, JICA 项目高原及周边 GPS 水汽观测网进行了连续观测,并利用 GAMIT 软件进行实时解算,获取了 1 h 一次的高分辨率大气可降水量资料。本文使用的其他资料还有:NCEP/NCAR 再分析资料,包括位

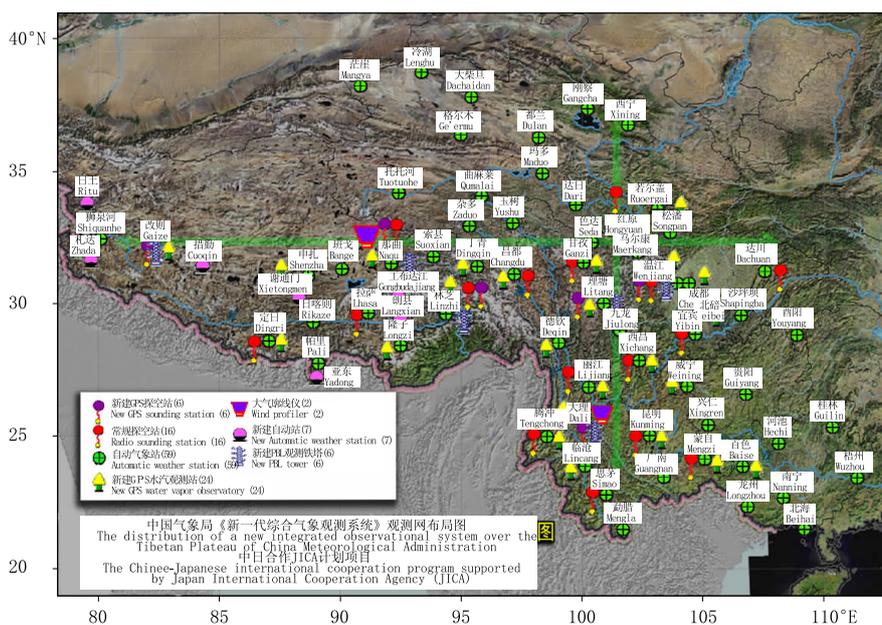


图 1 青藏高原及周边新一代气象综合监测网的站点分布

Fig. 1 Stations of the new integrated system in the Tibetan Plateau and its vicinity

势高度,纬向、经向风速以及比湿,其空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$,时间分辨率为 6 h;中国气象局提供的中国 2519 个气象站点的降水观测资料,时间分辨率也为 6 h。考虑到 4 次降雪过程发生的时间(1 月 10—16 日,18—22 日,25—29 日,1 月 31 日至 2 月 2 日),本文研究使用的资料时间长度统一为 2008 年 1 月 8 日 08 时—2008 年 2 月 2 日 20 时(本文所用时间均为北京时)。

3 雪灾过程大尺度汇合气流锋生效应

图 2 为 2008 年 1 月 10 日 02 时—2 月 2 日 20 时(6 h 1 次)NCEP/NCAR 再分析 500 hPa 位势高度距平(相对于该时段平均值)经验正交分解(EOF)第 1 特征向量的空间分布(图 2a,方差贡献为 41.3%)及其对应时间系数的变化(图 2b)。图 2a 反映了 2008 年中国南方雨雪冰冻灾害发生期间

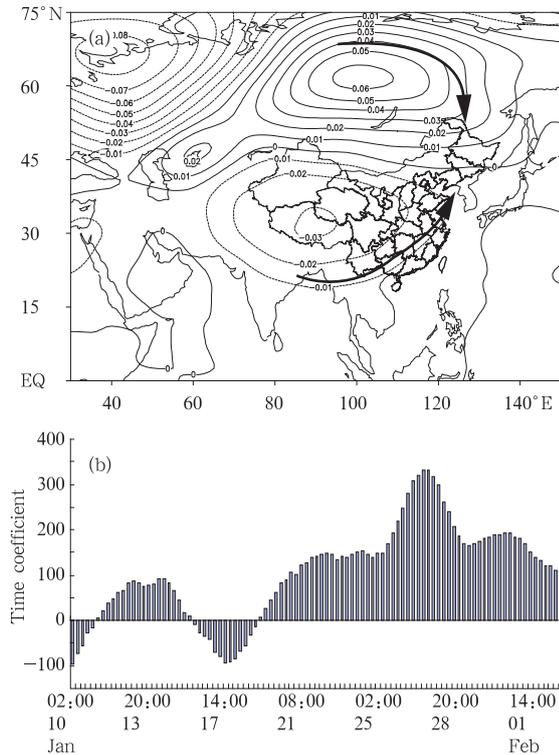


图2 2008年1月10日02时—2月2日20时NCEP/NCAR再分析500 hPa位势高度距平EOF分解的第1特征向量空间分布(a)及其时间系数的变化(b)

Fig. 2 The first EOF eigenvector for anomaly of NCEP/NCAR reanalysis geopotential height at 500 hPa (a) and its time coefficient (b) in the period of 02:00 BST 10 Jan 2008—20:00 BST 02 Feb 2008

主要的环流形势,即位势高度场“南低北高”,这意味着西伯利亚高压和南支槽强度都偏强,类似于王文辉等(1979)给出的“槽脊反位相”环流模型(图4a)。

从图2b可以看到,对应的时间系数在4次雨雪过程中均为正值,尤其第3次过程(1月25—29日)为高值。这表明4次雨雪过程发生时,中层的大气环流均为“北脊南槽”分布形势,而且第3次降雪过程发生时,这种环流形势尤为明显。综合上述空间分布和时间变化特征,500 hPa位势高度在2008年中国南方雨雪冰冻灾害期间出现的“北脊南槽”反位相环流形势将有利于北方冷空气和南方槽前暖气流在长江中下游地区一带汇合,进而导致该区域暴雪的发生,而且环流形势的变化与降水的发生在时间上也十分吻合。

由灾害期间平均的温度场与垂直环流南—北与东—西向垂直剖面图(图3a、3b)可以发现,南—北向垂直剖面上,强降雪区(图3c)上空925—700 hPa的大气中,等温线随高度的增加而向北倾斜,存在明显的逆温;而在东—西向垂直剖面图上,110°E附近低层大气存在一个冷中心(中心强度低于-1℃),其东侧925—700 hPa等压面之间的等温线随高度增加向西倾斜,同样有较强的逆温现象。即暴雪灾害发生期间,“南槽北脊”大尺度环流结构中冷空气自北向南“楔入”中国东南部地区,形成了“冷空气楔”。同时可以看到,在逆温区存在着显著的上升运

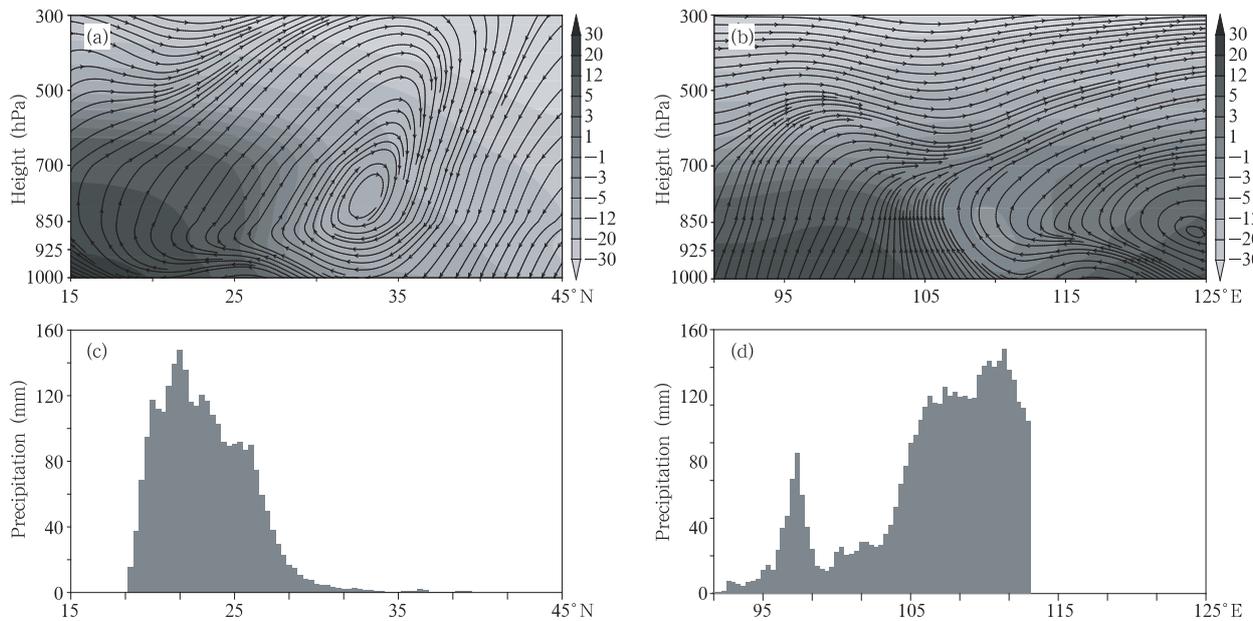


图3 2008年1月10日02时—2月2日20时平均环流(流线)、气温(彩色阴影,单位:℃)沿110°—120°E的南—北向垂直剖面(a)及降水量(c,单位:mm)和沿22.5°—32.5°N的东—西向垂直剖面(b)及降水量(d,单位:mm)

Fig. 3 The south-north vertical cross section along 110°—120°E (left panels) and the west-east vertical cross section along 22.5°—32.5°N (right panels) of mean circulation (streamline) and air temperature (color shaded, unit: °C) in (a) and (b), and corresponding mean precipitation (unit: mm) in (c) and (d)

动,即中、低层的大气环流强切变激发了暴雪系统垂直环流结构的强烈上升运动,可推动偏南气流中暖湿空气抬升。强切变激发的垂直环流圈伴随降雪过程,构成“冷垫”与“暖盖”稳定叠置降雪机制,而上述“冷空气楔”上爬升的暖湿气流亦是暴雪过程发生与维持的重要机制。因此,如何寻找暴雪过程水汽源及其强水汽输送“前兆性”信号亦是暴雪预报的关键环节之一。

从图4也可以看到,2008年中国南方雨雪冰冻灾害期间700 hPa位势高度场同样反映了低层大气明显的“北脊南槽”分布特征,与王文辉等(1979)给出的“槽脊反位相”环流模型也十分相似(见王文辉等文中图9c,1979),而且每次降雪过程均有类似的环流特征存在。其汇合输送效应的下游冷暖空气汇合区位于江淮流域,这样的环流形势同样很有利于中国南方地区暴雪灾害的发生。综合上述分析结果,可以认为冬季中低层大气出现“北脊南槽”反位相的环流形势很可能是中国东部暴雪灾害发生的一个重要天气条件。

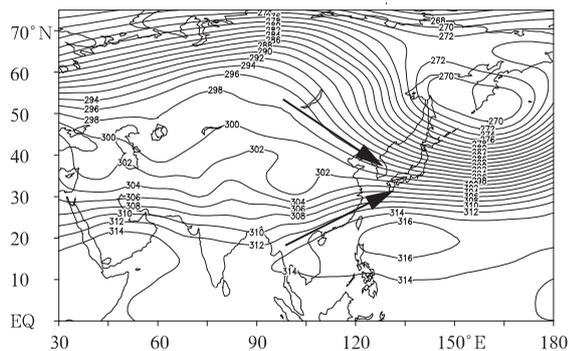


图4 2008年1月10日02时—2月2日20时平均NCEP/NCAR再分析700 hPa位势高度(单位:dagpm)

Fig. 4 NCEP/NCAR reanalysis geopotential height at 700 hPa in the period of 02:00 BST 10 Jan 2008—20:00 BST 02 Feb 2008 (units: dagpm)

4 雪灾过程的低纬水汽源及其“汇合型”水汽输送相关矢特征

在上述“南槽北脊”大尺度环流背景下,伴随南支槽活跃的偏南水汽输送形成了4次雨雪过程,从雪灾期间平均整层水汽通量空间结构特征可发现(图5),对应4次降雪过程,中国南方地区均存在着一条西南水汽输送带,此特征描述了雨雪冰冻灾害水汽源及其输送通道特征。其中第3次、第4次过

程中,这一西南水汽输送带尤为明显(图略)。这与图2“南槽北脊”反位相结构中南支槽活跃的环流系统及其时空演变十分吻合,同时也表明强西南水汽输送通道可能是2008年1月中国南方雨雪冰冻灾害形成的关键因素之一。

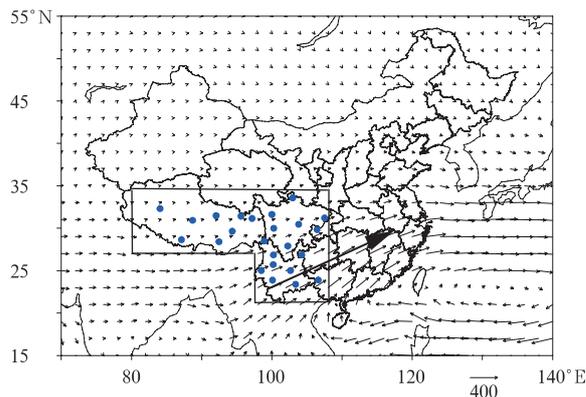


图5 2008年1月10日02时—2月2日20时中国及周边区域的平均整层水汽输送通量(单位:kg/(m·s))及JICA项目GPS水汽观测站(圆点)的分布

Fig. 5 Column water vapor transport flux averaged in the period of 02:00 BST 10 Jan 2008—20:00 BST 02 Feb 2008 (units: kg/(m. s)) and the GPS stations of JICA project (blue dots)

为了更清楚地了解此次雨雪冰冻灾害的水汽输送通道与降水量之间的相关特征,根据2008年1月10日02时—2月2日20时总降水量的分布情况(图略),选取降水量较大的中国东南部(22.5°—35°N,110°E以东)进行区域平均,得到了2008年1月10日08时—2月2日20时该区域平均的6h降水量时间序列。然后将其分别与纬向、经向整层水汽输送通量求取滞后和同期相关系数,可获取降水量序列与整层水汽输送通量的相关矢量(图6)

$$\vec{R}(x, y) = \vec{R}_{q_u}(x, y)\mathbf{i} + \vec{R}_{q_v}(x, y)\mathbf{j} \quad (1)$$

其中 \vec{R}_{q_u} 为降水量序列与整层水汽输送通量纬向分量(q_u)的相关系数, \vec{R}_{q_v} 为降水量序列与水汽输送通量经向分量(q_v)的相关系数。

由图6可以发现,中国东南部的降水量与前期整层水汽输送通量的显著相关结构主要表现为孟加拉湾—云南的西南水汽流和南海—中南半岛—中国南部的偏南水汽流,这两支水汽流在中南半岛至中国西南地区一带汇合,形成了较强的西南水汽流(蓝

色箭头),随着时间的推移,逐渐向东北方向扩展(如图中绿色虚线所示),最终影响到中国东南部的降水。还可以看到,西伯利亚—中国东北地区存在着一支显著的西北水汽相关矢量(灰色箭头),这表明南下冷空气对中国南方的降雪过程也具有重要的影响。

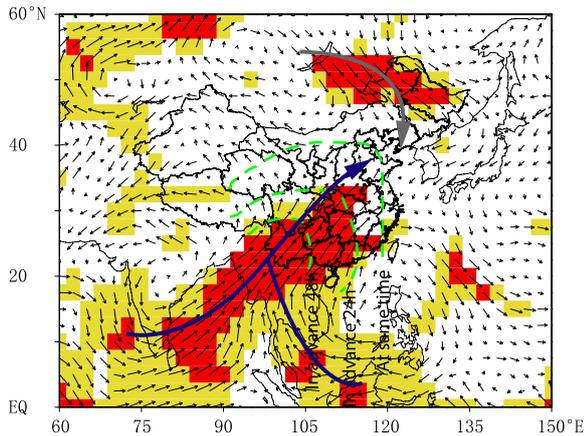


图6 2008年1月10日08时—2月2日20时中国东南部6 h降水量序列与超前24 h整层水汽输送通量的相关矢

(红色阴影表示纬向、经向分量均通过0.01显著性检验,黄色阴影表示其中一个分量通过0.01显著性检验)

Fig. 6 Correlation vectors of 6 h accumulated precipitation with 24 h earlier column water vapor transport flux in Southeast China during 08:00 BST 10 Jan 2008—20:00 BST 02 Feb 2008 (The regions with significant correlation components in both zonal and meridional directions are red shaded, while the regions with a significant correlation component in either zonal or meridional direction are yellow shaded)

上述相关矢量的分析结果进一步证实了2008年中国南方雨雪冰冻灾害期间,西南水汽输送与中国东南部降水的密切关系。同时,相关矢量的分布形势还表明,南方暖湿气流和北方冷空气的交汇是此次特大雪灾期间暴雪形成的主要原因之一,这与700、500 hPa位势高度“北高南低”的主要空间分布特征也比较吻合。

5 雪灾过程上游敏感区——高原区域水汽监测网“强信号”特征

近年来,地基全球定位系统(GPS)技术作为一种新的遥感探测技术被应用于大气水汽观测。与以往的观测手段(如探空、微波辐射计、飞机观测等)相

比,它具有成本低、精度高、时间分辨率高、能够全天候观测的优点,因此得到了广泛使用。关于大气可降水量(即大气整层水汽总量)与降水的关系问题,美国中西部进行的GPS/STORM试验首先验证了地基GPS大气可降水量在天气预报中具有潜在应用价值(Rocken, et al, 1995),随后国内外的很多研究结果都表明,大气可降水量的前期平均水平、峰值以及短时内的增加幅度、速度等因素都对降水的发生时间和强度具有影响(Sasaki, et al, 2004; Okamura, et al, 2003; 李延兴等, 2000; 曹云昌等, 2005),使用GPS大气可降水量资料对降水预报水平的提高有很大贡献(Gutman, et al, 2004; Kuo, 2006; Marcus, et al, 2007)。

从图5可以发现,2008年中国南方雨雪冰冻灾害期间,JICA项目在云南及其周边地区所布设的GPS水汽观测站点正好位于西南水汽输送通道的上游,那么其大气可降水量的变化是否对下游降水的发生具有一定的“前兆性”信号特征?这是值得进一步研究的问题。为此,本文分析了第3次降雪过程期间,云南7个GPS站点逐时大气可降水量和中国南方(35°N以南,100°E以东)平均6 h降水量的变化(图7),发现各个站点(位于云南西北部的德钦站除外)的GPS大气可降水量与中国南方平均降水量的变化均有较好的对应关系,即强降水发生之前,上游地区的大气可降水量开始明显增加;大气可降水量维持在高值时段时,下游的降水强度也相应较大,而当上游大气可降水量减少以后,下游地区的降水强度也减小。因此可以认为,水汽输送上游关键区的大气可降水量的变化可作为下游降水发生的“前兆性”信号,而云南则是西南水汽输送通道中的关键区域。

进一步选取位于水汽输送上游关键区的云南6个GPS水汽观测站(昆明、大理、丽江、腾冲、临沧、蒙自)以及四川西昌、贵州威宁和广西百色共9个站的观测资料进行区域平均,同时为了与降水资料的时间匹配,从逐时大气可降水量序列中挑选出相应时刻,得到了水汽输送上游关键区2008年1月8日08时—2月2日20时的6 h大气可降水量区域平均时间序列。然后利用平均GPS大气可降水量资料和中国各气象站点1月10日08时—2月2日20时的降水量资料,分别计算了大气可降水量与同期和后期(滞后24、48h)降水量的相关系数(图8)。

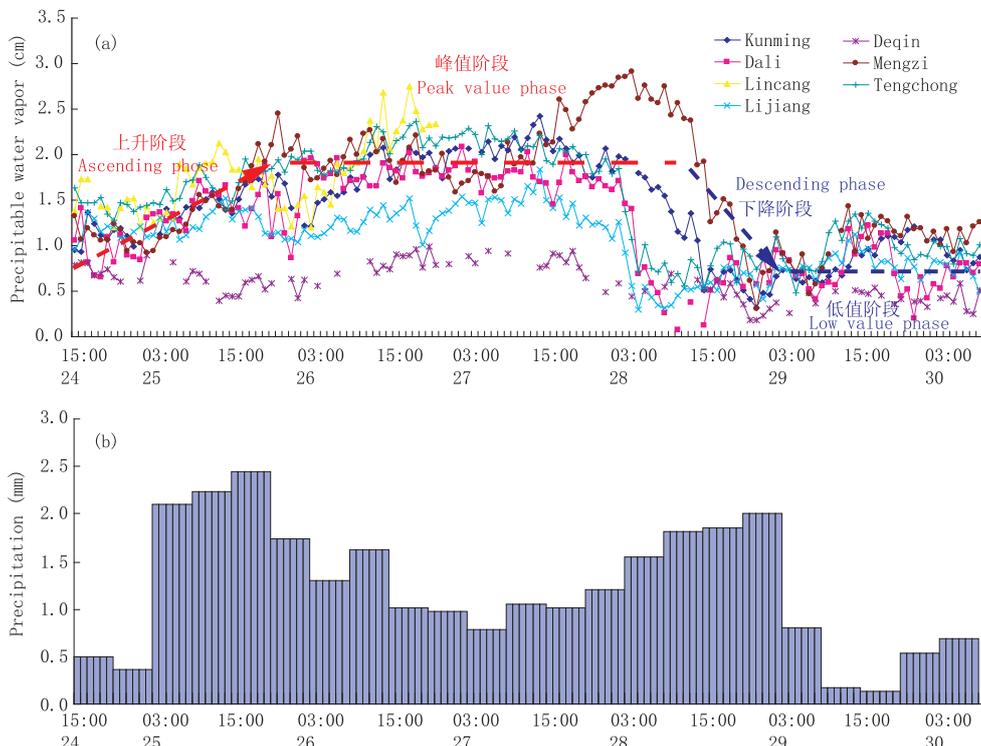


图7 2008年1月24日15时—1月30日09时云南GPS水汽观测站大气可降水量的逐时变化(a. 曲线)和2008年1月24日15时—1月30日08时中国南方平均6h降水量的时间序列(b)

Fig. 7 Hourly precipitable water vapor (PWV) from GPS observatories in Yunnan during 08:00 BST 24 Jan 2008—09:00 BST 30 Jan 2008 (a. curves) and total precipitation in every 6 h in southern China during 15:00 BST 24 Jan 2008—08:00 BST 30 Jan 2008 (b)

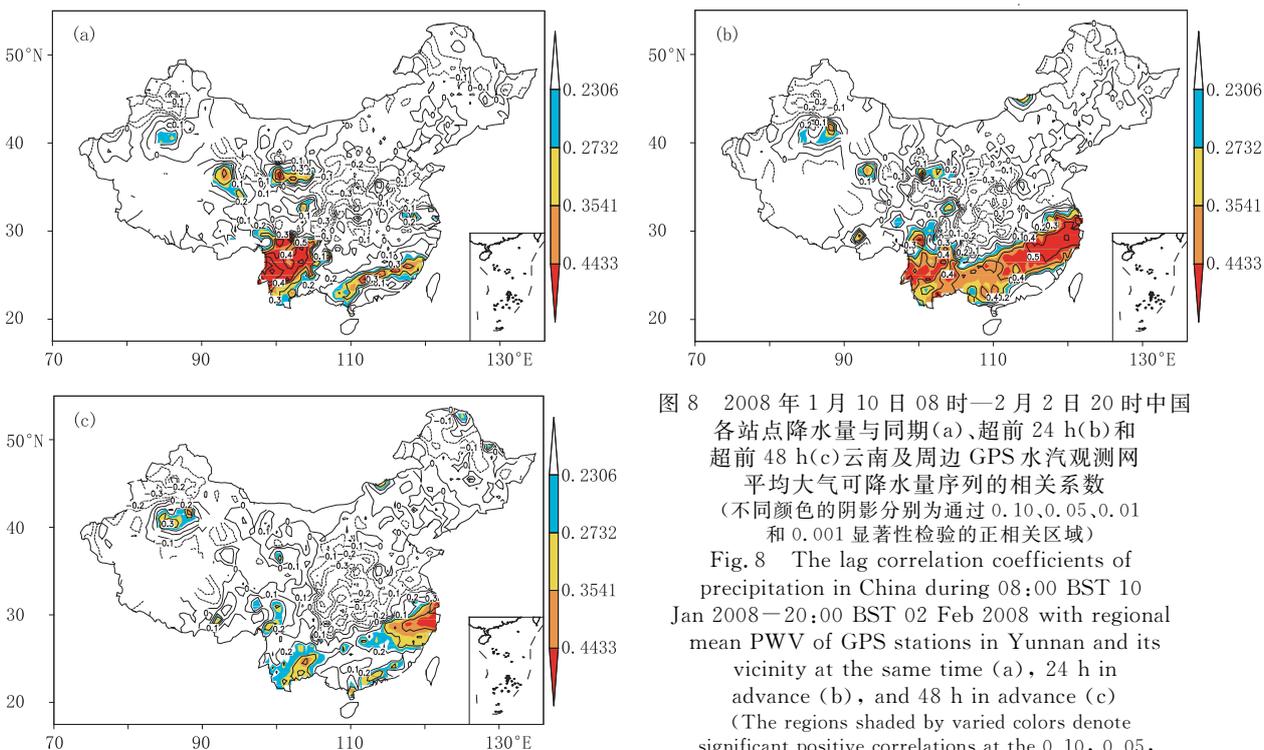


图8 2008年1月10日08时—2月2日20时中国各站点降水量与同期(a)、超前24h(b)和超前48h(c)云南及周边GPS水汽观测网平均大气可降水量序列的相关系数(不同颜色的阴影分别为通过0.10、0.05、0.01和0.001显著性检验的正相关区域)

Fig. 8 The lag correlation coefficients of precipitation in China during 08:00 BST 10 Jan 2008—20:00 BST 02 Feb 2008 with regional mean PWV of GPS stations in Yunnan and its vicinity at the same time (a), 24 h in advance (b), and 48 h in advance (c) (The regions shaded by varied colors denote significant positive correlations at the 0.10, 0.05, 0.01 and 0.001 significance levels, respectively)

从图 8a 可以看到 GPS 大气可降水量与同期降水的最显著正相关区位于云南及邻近地区,这表明水汽条件是当地降水强度大小的一个重要因素。由图 8b 则可发现,降水滞后 24 h 的情况下,显著正相关区从云南延伸至江淮流域,呈西南—东北带状结构,最大相关区则位于长江中下游;降水滞后 48 h 的滞后相关系数场(图 8c)则表现出更多的遥相关特征,显著正相关区位于长江下游地区。此相关系数场进一步表明,西南水汽输送上游关键区的大气可降水量的多少与后期长江流域的降水强度之间存在显著正相关关系。

云顶黑体温度(TBB)经常被用来表征对流活动的强度。一般而言,TBB 越低,对流活动越强。图 9 为云南大理前期 GPS 大气可降水量(超前 24 h)与 TBB 的相关系数。可以看到,上游关键区的水汽含量与后期中国东部 TBB 为显著的负相关,即上游关键区的大气可降水量越高,后期中国东部的对流活动越强。与图 8b 比较可以发现,图 9 中位于中国南方的负相关高值区与图 8b 中的显著正相关区十分类似,也就是说,上游大气可降水量、后期东部对流活动、后期东部降水之间具有很好的对应关系。

从中国南方降水落后于上游水汽输送关键区的 GPS 大气可降水量的滞后相关系数以及两者的同期相关系数(表 1)可以看出,上游水汽输送关键区

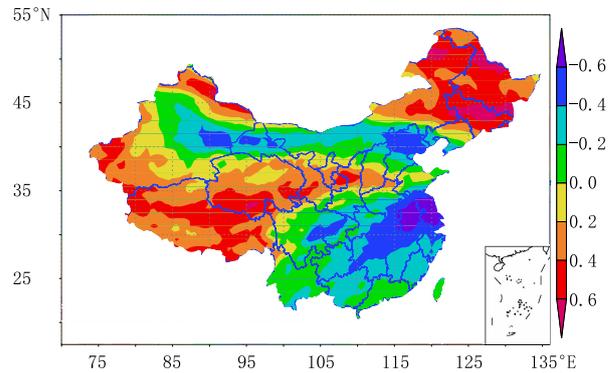


图 9 2008 年 1 月 24 日 08 时—1 月 30 日 20 时逐时云顶黑体温度与超前 24 h 云南大理 GPS 大气可降水量逐时序列的相关系数

Fig. 9 The lag correlation coefficients of TBB during 08:00 BST 24 Jan 2008—20:00 BST 30 Jan 2008 with GPS PWV 24 h in advance in Dali station, Yunnan

的 GPS 大气可降水量与中国南方降水的滞后和同期相关系数均为正相关,其中降水滞后 24 h 的相关系数最大,达到 0.6025,远远超过 0.001 的显著性检验水平;其次,降水滞后 30 h 和 18 h 的相关系数分别为 0.5525、0.5996,也都超过 0.001 的显著性检验水平。这表明云南及周边区域水汽含量的多少对下游地区后期降水的发生具有一定的指示意义,24 h 以前上游关键区大气可降水量的变化尤为重要。

表 1 2008 年 1 月 10 日 08 时—2 月 2 日 20 时中国南部平均降水量时间序列与水汽输送上游关键区平均大气可降水量时间序列的滞后相关系数

Table 1 The lag correlation coefficients between mean precipitation in southern China during 08:00 BST 10 Jan 2008—20:00 BST 2 Feb 2008 and area averaged PMV in the upstream key region of water vapor transport

滞后时间(h)	48	42	36	30	24	18	12	6	0
相关系数	0.3640	0.3699	0.4739	0.5525	0.6025	0.5996	0.4939	0.3387	0.2556

6 结论与讨论

根据本文的研究结果,暴雪发生的动力、热力过程可归纳为如下物理模型:中国北方中低层大气盛行偏北气流,使较强的冷空气“楔入”中国东南部低层大气,构成低层“冷垫”,同时偏南暖湿气流源源不断地将大量水汽输送到中国东南部,冷暖气流交汇区的垂直切变导致了强烈的上升运动,暖湿空气在“冷空气楔”上被抬升,最终形成了“冷垫”上空的“暖盖”和“南槽北脊”大尺度环流汇合锋区的垂直环流结构。暖湿空气在上升的过程中突破“暖盖”后又遇凝结而形成降水,雨滴下落过程中经过“冷垫”时被冻结,最终形成冻雨或降雪到达地面,造成了雨雪

冰冻灾害。

在“南槽北脊”反位相的大尺度环流背景下,汇合锋区的偏南水汽输送主要源自南海和印度洋,并在中南半岛和中国西南地区合并,构成经过云南及周边“上游”关键区的强西南水汽流,形成了长江流域特大雪灾发生的关键水汽通道。相关分析结果表明云南及周边区域水汽含量的多少对下游地区后期降水的发生具有一定的指示意义,即水汽输送上游关键区的大气可降水量(特别是 24 h 以前的)可作为此次南方雨雪冰冻灾害期间降水发生的“前兆性”信号,而云南则是西南水汽输送通道中尤为重要的关键区域。研究结果亦证实了 JICA 项目 GPS 水汽监测网的观测信息具有重要的实用价值,其可为雪

灾过程中长江中下游地区的降水预报提供重要的分析工具及数值模式同化初始信息源。

本文通过统计与诊断分析,证明了水汽输送“上游”关键区的水汽含量变化对下游后期的降水具有一定的“前兆性”指示意义,GPS资料同化的初步模拟试验结果也证明,将高原区域“上游关键区”的GPS水汽观测数据同化进中尺度数值模式有助于改进模式对下游降水的预报效果(其研究结果将另文详细讨论)。本文目前得到的还只是一些定性的分析结果,具体的定量预报指标和观测数据同化数值模拟试验等还需要进行更为深入的研究。

References

- Cao Y C, Fang Z Y, Xia Q. 2005. Relationship between GPS precipitable water vapor and Precipitation. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)*, 16 (1): 54-59
- Chen T C, Yen M C. 1988. The water vapor transport associated with the 30-50 day oscillation over the Asian monsoon regions during 1979 summer. *Mon Wea Rev*, 116 (10): 1983-2002
- Chen W, Kang L H. 2006. Linkage between the Arctic oscillation and winter climate over East Asia on the interannual timescale: roles of quasi-stationary planetary waves. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 30 (5): 863-870
- Deng Y P, Cheng L S, Zhang X L. 2000. Three-phase cloud explicit precipitation scheme and mesoscale numerical simulation for generated cause of the “96.1” snowstorm. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 19 (4): 401-414
- Gong D J, Li Z J. 2001. Low-level jet and heavy snow or snowstorm in Inner Mongolia. *Meteor Mon (in Chinese)*, 27 (12): 3-7
- Gong D Y, Wang S W. 1999. Influence of ENSO on the precipitation over China and global land for the last century. *Chinese Sci Bull (in Chinese)*, 44 (3): 315-320
- Gong D Y, Wang S W. 2003. Influence of Arctic Oscillation on winter climate over China. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58 (4): 559-5680
- Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. 2000. Arctic Oscillation influence on daily temperature variance in winter over China. *Chinese Sci Bull*, 49 (6): 637-642
- Gong D Y, Zhu J H, Wang S W. 2002. The influence of Siberian high on Large-scale climate over continental Asia. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 21 (1): 8-14
- Gutman S I, Sahm S R, Benjamin S G, et al. 2004. Rapid retrieval and assimilation of ground based GPS precipitable water observations at the NOAA forecast systems laboratory: Impact on weather forecasts. *J Meteor Soc Japan*, 82: 351-360
- He X C, Ding Y H, He J H, et al. 2006. An analysis on anomalous precipitation in southern China during winter monsoons. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 64 (5): 594-604
- He X C, Li Q P, Ding Y H, et al. 2007. Numerical simulation of East Asian winter monsoon with ENSO episodes using a regional climate model. *Acta Meteor Sinica (in Chinese)*, 65(1): 18-28
- Huang R H, Wei K, Chen J L. 2007. The East Asian winter monsoon anomalies in the winters of 2005 and 2006 and their relations to the quasi-stationary planetary wave activity in the Northern Hemisphere. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 31 (6): 1033-1048
- Huang R H, Zhang Z Z, Huang G, et al. 1998. Characteristics of the water vapor transport in East Asian monsoon region and its difference from that in South Asian monsoon region in summer. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 22 (4): 460-469
- Kuo Y. 2006. Assimilation of ground-based GPS data for short range precipitation forecast//Preprints, Fourth Korea-US Joint Workshop on Mesoscale Observations, Data Assimilation, and Modeling for Severe Weather, Seoul, Korea, KOSEF and NSF/OISE, 38-41
- Li Q P, Ding Y H. 2005. Multi-year simulations of East Asian winter monsoon by using regional climate model. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)*, 16 (Suppl): 30-40
- Li Q P, Ding Y H, Dong W J, et al. 2007. A numerical study on the winter monsoon and cold surge over East Asia. *Adv Atmos Sci*, 24 (4): 664-678
- Li Y, He J H, Jiang A J, et al. 2007. Circulation structure features of Western Pacific teleconnection pattern in winter and their relation with China's temperature and precipitation in winter. *Scientia Meteor Sinica (in Chinese)*, 27 (2): 119-125
- Li Y X, Xu B X, Hu X K, et al. 2000. Theory and experiment result of remote measuring for atmospheric water content and precipitable water vapor using ground-base GPS station. *Sci in China (Series A) (in Chinese)*, 30 (Suppl): 107-110
- Lu Y R, Gao G D. 1983. The mean transfer of water-vapour in the atmosphere over China. *Plateau Meteor (in Chinese)*, 2 (4): 34-38
- Mao R, Gong D Y, Fang Q M. 2007. Influence of the East Asian jet stream on winter climate in China. *J Appl Meteor Sci (in Chinese)*, 18 (2): 137-146
- Marcus S, Kim J, Chin T, et al. 2007. Influence of GPS precipitable water vapor retrievals on quantitative precipitation forecasting in Southern California. *J Appl Meteor Clim*, 46: 1828-1839
- Okamura O, Kimura F. 2003. Behavior of GPS-derived precipitable water vapor in the mountain lee after the passage of a cold front. *Geophys Res Lett*, 30: doi: 10.1029/2003GL017572
- Qian W H, Zhang H N, Zhu Y F. 2001. Interannual and interdecadal variability of East Asian Acas and theirs impact on temperature of China in winter season for the last century. *Adv Atmos Sci*, 18 (4): 511-523
- Qian W H, Zhang W W. 2007. Changes in cold wave events and warm winter in China during the last 46 years. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 31 (7): 1266-1278
- Rocken C, Hove T V, Johnson J, et al. 1995. GPS/STORM-GPS sensing of atmospheric water vapor for meteorology. *J Atmos Ocean Tech*, 1995, 12: 468-478
- Sasaki T, Wu P M, Mori S, et al. 2004. Vertical moisture transport above the mixed layer around the mountains in western Sumatra. *Geophys Res Lett*, 31: doi: 10.1029/2004GL019730
- Shi X H, Xu X D, Xie L A. 2007. Interdecadal spatial-temporal change trend of East Asian winter monsoon in recent 40 years. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 31 (4): 747-756
- Tao S Y, Zhang Q Y. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events. *Chinese J Atmos Sci (in Chinese)*, 22 (4): 399-407
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s. *Adv Atmos Sci*, 18 (3): 376-386

- Wang J Z, Ding Y H. 1995. Research on moist symmetric instability in a strong snowfall in North China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 53 (4): 451-459
- Wang W, Cheng L S. 2002. Numerical study on three-dimensional conditionally symmetric instability of “96.1” snowstorm event. *Plateau Meteor* (in Chinese), 21 (3): 225-232
- Wang W H, Xu X D. 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 Z Y, Ding Y H. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and the possible reasons. *Chinese J Atmos Sci* (in Chinese), 30 (6): 1068-1076
- Wu B Y, Wang J. 2002. Possible impacts of winter arctic oscillation on Siberian High, the East Asian winter monsoon and sea-ice extent. *Adv Atmos Sci*, 19 (2): 297-320
- Xu J J, Zhu Q G, Zhou T H. 1999. Sudden and periodic change of East Asian winter monsoon in the past century. *J Appl Meteor Sci* (in Chinese), 10 (1): 1-8
- Xu S Y. 1958. The water vapor transportation and hydrological budget in China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 29(1): 33-43
- Xu X D, Chen L S, Wang X R, et al. 2003. Moisture transport source/sink structure of the Meiyu rain belt along the Yangtze River valley. *Chinese Sci Bull* (in Chinese), 48 (21): 2288-2294
- Xu X D, Tao S Y, Wang J Z, et al. 2002. The relationship between water vapor transport features of Tibetan Plateau-monsoon “large triangle” affecting region and drought-flood abnormality of China. *Acta Meteor Sinica* (in Chinese), 60 (3): 257-266
- Yang L, Miao C S, Shou S W. 2006. Numerical simulation on a snowstorm in Changjiang-Huaihe River Basin in spring 2003. *J Nanjing Inst Meteor* (in Chinese), 29 (3): 379-384
- Yang S, Lau K M, Kim K M. 2002. Variations of the East Asian jet stream and Asian-Pacific-American winter climate anomalies. *J Climate*, 15: 306-324
- Zhang X L, Cheng L S. 2000a. Dynamic diagnose of the genesis and development for mesoscale shear line during “96.1” snowstorm I: Diagnoses of vorticity and vorticity variability. *Plateau Meteor* (in Chinese), 19 (3): 285-294
- Zhang X L, Cheng L S. 2000b. Dynamic diagnose of the genesis and development for mesoscale shear line during “96.1” snowstorm II: Diagnoses of divergence and its variability. *Plateau Meteor* (in Chinese), 19 (4): 459-466
- Zhu A M, Shou S W. 1994. Diagnosis of frontogenetical secondary circulation in a winter snowstorm event. *J Nanjing Inst Meteor* (in Chinese), 17 (2): 183-187
- 龚道溢, 王绍武. 2003. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响. *地理学报*, 58 (4): 559-568
- 龚道溢, 朱锦红, 王绍武. 2002. 西伯利亚高压对亚洲大陆的气候影响分析. *高原气象*, 21 (1): 8-14
- 宫德吉, 李彰俊. 2001. 低空急流与内蒙古的大(暴)雪. *气象*, 27 (12): 3-7
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海等. 2006. 中国南方地区冬季降水异常的分析. *气象学报*, 64 (5): 594-604
- 何溪澄, 李巧萍, 丁一汇等. 2007. ENSO 暖冷事件下东亚冬季风的区域气候模拟. *气象学报*, 65 (1): 18-28
- 黄荣辉, 魏科, 陈际龙等. 2007. 东亚 2005 年和 2006 年冬季风异常及其与准定常行星波活动的关系. *大气科学*, 31 (6): 1033-1048
- 黄荣辉, 张振洲, 黄刚等. 1998. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. *大气科学*, 22 (4): 460-469
- 李巧萍, 丁一汇. 2005. 区域气候模式对东亚冬季风多年平均特征的模拟. *应用气象学报*, 16 (增刊): 30-40
- 李延兴, 徐宝祥, 胡新康等. 2000. 用地基 GPS 观测站遥测大气含水量和可降水量的理论基础与试验结果. *中国科学(A辑)*, 30 (增刊): 107-110
- 李勇, 何金海, 姜爱军等. 2007. 冬季西太平洋遥相关型的环流结构特征及其与我国冬季气温和降水的关系. *气象科学*, 27 (2): 119-125
- 陆渝蓉, 高国栋. 1983. 中国大气中的水汽平均输送. *高原气象*, 2 (4): 34-38
- 毛睿, 龚道溢, 房巧敏. 2007. 冬季东亚中纬度西风急流对我国气候的影响. *应用气象学报*, 18 (2): 137-146
- 钱维宏, 张玮玮. 2007. 我国近 46 年来的寒潮时空变化与冬季增暖. *大气科学*, 31 (7): 1266-1278
- 施晓晖, 徐祥德, 谢立安. 2007. 近 40 年来东亚冬季风的年代际时空变化趋势. *大气科学*, 31 (4): 747-756
- 陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应. *大气科学*, 22 (4): 399-407
- 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): 451-459
- 王文, 程麟生. 2002. “9611”高原暴雪过程三维条件性对称不稳定的数值研究. *高原气象*, 21 (3): 225-232
- 王文辉, 徐德祥. 1979. 锡盟大雪过程和“77.10”暴雪分析. *气象学报*, 37 (3): 80-86
- 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因. *大气科学*, 30 (6): 1068-1076
- 徐建军, 朱乾根, 周铁汉. 1999. 近百年东亚冬季风的突变性和周期性. *应用气象学报*, 10 (1): 1-8
- 徐淑英. 1958. 我国水汽输送和水分平衡. *气象学报*, 29 (1): 33-43
- 徐祥德, 陈联寿, 王秀荣等. 2003. 长江中下游梅雨带水汽输送源汇结构. *科学通报*, 48 (21): 2288-2294
- 徐祥德, 陶诗言, 王继志等. 2002. 青藏高原一季风水汽输送“大三角扇型”影响域的特征与中国区域旱涝异常的关系. *气象学报*, 60 (3): 257-266
- 杨柳, 苗春生, 寿绍文等. 2006. 2003 年春季江淮一次暴雪过程的模拟研究. *南京气象学院学报*, 29 (3): 379-384
- 张小玲, 程麟生. 2000a. “96.11”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断I: 涡度和涡度变率诊断. *高原气象*, 19 (3): 285-294
- 张小玲, 程麟生. 2000b. “9611”暴雪期中尺度切变线发生发展的动力诊断II: 散度和散度变率诊断. *高原气象*, 19 (4): 459-466
- 朱爱民, 寿绍文. 1994. 一次冬季暴雪过程锋生次级环流的诊断分析. *南京气象学院学报*, 17 (2): 183-187

附中文参考文献

- 曹云昌, 方宗义, 夏青. 2005. GPS 遥感的大气可降水量与局地降水关系的初步分析. *应用气象学报*, 16 (1): 54-59
- 陈文, 康丽华. 2006. 北极涛动与东亚冬季气候在年代尺度上的联系: 准定常行星波的作用. *大气科学*, 30 (5): 863-870
- 邓远平, 程麟生, 张小玲. 2000. 三相云显式降水方案和“96.11”暴雪成因的中尺度数值模拟. *高原气象*, 19 (4): 401-414
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 近百年 ENSO 对全球陆地及中国降水的影响. *科学通报*, 44 (3): 315-320