

尤红,周泓,杨红,等. 2013. 云南倒春寒天气过程的分析研究. 气象, 39(6): 738-748.

# 云南倒春寒天气过程的分析研究<sup>\*</sup>

尤红 周泓 杨红 姜莹

云南省玉溪市气象局, 玉溪 653100

**摘要:** 利用常规观测和 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  的 6 小时再分析资料, 总结 1980—2011 年云南 15 次低温雨雪强倒春寒天气过程, 得出 500 hPa 形势高纬为两槽一脊和横槽型, 700 hPa 为典型北高南低特征。重点分析 2011 年 3 月 14—19 日和 2005 年 3 月 2—6 日不同类型下两次强过程, 过程中均有昆明准静止锋增强和川滇切变线南下, 新西伯利亚冷空气南下自东北向西南侵入云南。前者地面强降温由中低层强冷平流引发, 而后者是由低层强冷平流和高层强冷平流下传共同造成。强雨雪天气对应深厚垂直上升运动或对流层中低层以下层存在强上升运动柱。孟加拉湾为水汽源地, 强高、低空急流和其垂直耦合的次级环流输送了水汽和热量。强降雪期间, 无南支槽时需要大而强的水汽通量和水汽辐合, 有南支槽配合时中低层水汽通量有迅速增加过程。低层为冷层或近地面强冷平流利于降水物冷凝成雪。过程中均有强锋生作用推动锋面南下, 锋面前进方向锋生函数零线对应低层 850 hPa  $Q$  矢量辐合线, 锋区梯度大, 能量积聚多对应降雪范围大。低层等露点线有  $\Omega$  型特征, 露点锋抬升作用触发干湿交界面上干冷、暖湿气流交汇, 露点锋和低空急流位置强度及  $Q$  矢量辐合区与云南强倒春寒降雪区有较好对应关系, 地面降温幅度与 850 hPa 锋生函数正值强度成正比。

**关键词:** 倒春寒, 川滇切变线, 昆明准静止锋, 南支槽, 对比分析

**中图分类号:** P458

**文献标识码:** A

**doi:** 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 06. 010

## Analysis on the Late Spring Coldness Processes in Yunnan

YOU Hong ZHOU Hong YANG Hong JIANG Yin

Yuxi Meteorological Office of Yunnan Province, Yuxi 653100

**Abstract:** Based on conventional data and NCEP reanalysis data ( $1^\circ \times 1^\circ$ ), 15 strong coldness processes with rain and snow in late springs in Yunnan have been summarized. The results show that the characteristics of the processes were two trough and one ridge at 500 hPa and north higher than south at 700 hPa. The two different kinds of strong coldness processes in 14—19 March 2011 and 2—6 March 2005 have been emphatically compared and analyzed. Sichuan-Yunnan shear line and Kunming quasi-stationary front came southward during the processes and Novosibirsk cold air invaded Yunnan from northeast. The main cause of severe surface cooling in the first process was strong cold advection in middle-low level and in the second process was strong cold advection in lower level and cold advection sink in higher level. The cold rain and snow weather had deep vertical upward movement or strong rising movement column in middle-low level. The Bay of Bengal was the vapor source. Strong upper level and low level jets and their secondary circulation transported water vapor and heat. While heavy snow was falling there were big and strong water vapor flux values and intensity of water vapor convergence without South Branch Trough (SBT), but there was a water vapor flux enhanced process in middle-low level with SBT. The cold layer at lower level or strong cold advection near the surface was beneficial to snowing. The convergence of warm and moist

\* 2013 年云南省预报员专项(YB201305)资助

2012 年 3 月 1 日收稿; 2012 年 11 月 19 日收修定稿

第一作者: 尤红, 主要从事短期天气预报和预测方法研究. Email: youhyn71@sina.com

southwest airflow which was ahead of the trough or westerly jet on low level and strong cold air strengthened frontogenesis. Ahead of moving front, zero line of frontogenesis function was corresponding to  $Q$ -vector convergence line at 850 hPa. The greater horizontal gradient of instability energy was, the more energy accumulated, which means the bigger snowfall ranges were. The isodrosotherm had the  $\Omega$  characteristic at lower level. Uplifting role of the dew point front triggered dry cold air and warm wet air convergent on wet/dry interface. The top of the  $\Omega$  isodrosotherm dense zone, the dew point front and location of lower level jet,  $Q$ -vector convergence zone had good correlations with snow areas in Yunnan, the magnitude of surface cooling was proportional to the intensity of positive frontogenesis function at 850 hPa.

**Key words:** coldness in the late spring, Sichuan-Yunnan shear line, Kunming quasi-stationary front, south branch trough, comparative analysis

## 引 言

倒春寒(秦剑,1997;段旭等,1997)是指云南春季 2—4 月已明显回暖时出现的强冷空气过程,以持续低温为主要特征,是云南主要的灾害性天气之一。根据其影响时产生的天气现象可分为低温连阴雨、晴天低温重霜冻和阴雨之后突然转晴的重霜冻三种。尤其是范围大、持续时间长、降温幅度大、气温低并伴有降雪的混合型强倒春寒会带来强冷害、冻害和寒害,严重影响云南农业生产,造成重大的经济损失。

云南倒春寒过程与北方强冷空气和川滇切变线活动密切相关,许美玲等(2011)总结出北方冷空气南下影响云南有东北、偏东和西北三种路径,且绝大多数自东向西移动。近年来气象学者对强倒春寒和低温雨雪天气过程个例进行多方面的研究(郑建萌等,2001;尤红等,2006;覃志年等,2010;吴古会等,2012),如郑建萌等(2001)详细讨论了云南倒春寒的发生与乌拉尔山高压脊、西伯利亚横槽转竖和南支槽的关系;尤红等(2006)对滇缅高压脊、昆明准静止锋和川滇切变线环流形势下,有强雪雨的强倒春寒过程形成和持续的物理条件进行深入分析,发现沿滇缅高压外围强西北气流下传的高层强冷平流和低层东风迴流共同加强昆明准静止锋西进,与低层来自孟加拉湾较强的西南暖湿气流交汇是形成云南大范围强降雪的原因。以上研究成果提高了预报员对云南强倒春寒灾害性天气的认识。在此基础上,利用常规观测和 NCEP  $1^\circ \times 1^\circ$  的 6 小时再分析资料,对 1980—2011 年间云南 15 次以低温阴雨为主的强倒春寒天气过程进行分析总结,得出有降雪天气伴随的云南强倒春寒的主要天气形势分布特征,重点

对不同环流背景下的两次云南强降雨雪倒春寒天气过程进行诊断,对比这两次过程的环流形势和热力、动力学等物理量场特征、水汽条件及相应雨雪区分布和降温幅度的差别,探讨诱发云南大范围雨雪天气强倒春寒天气的雨雪分界线、降温幅度和雨雪强度等的预报着眼点和相应的驱动因子,深入认识影响云南倒春寒典型天气形势和各物理量配置与雨雪分布的关系,力求为今后云南倒春寒灾害性天气过程中把握雨雪和温度预报时提供更多的参考依据。

## 1 倒春寒天气概况

1980—2011 年期间云南共出现 15 次以低温阴雨为主的强倒春寒天气过程,其中 20 世纪 80 年代 3 次,90 年代 2 次,2000—2011 年出现 10 次,可见 2000 年至今倒春寒出现的频率大,占统计年限中总数的三分之二,且出现时间最多的是在 3 月。15 次强倒春寒过程中云南中部出现降雪共有 8 次,有 14 次倒春寒过程中对流层中低层对应南支槽东移活动,无南支槽配置的典型过程仅有 2005 年 3 月 2—6 日一次。

2011 年 3 月 14—19 日云南出现了当年入春之后降温幅度最大、气温最低、持续时间长,伴有大范围降雪、强降水、雷暴等灾害天气的强冷空气过程(以下简称过程 I)。过程中:云南中部、东部 6 个市(地、州)共 25 个台站从 14 日 20 时至 17 日 14 时间出现降雪,局地大到暴雪,雨雪分界线位于西畴、屏边、个旧、通海、易门、嵩明、会泽、昭通到威信一线(图 1a),16 日为明显降雪时段,15 日云南中部、南部伴有雷暴,15—17 日云南南部连续 3 天普降中雨和大雨,出现 28 站次大雨,区域累计雨量达 30~88 mm,其中文山州过程平均降水量达 68.9 mm。

滇东北至滇西南 15—17 日为强降温时段(图 1b), 15—16 日影响区域( $22^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $102^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$ )日平均气温普降  $7\sim 12^{\circ}\text{C}$ , 最高气温降  $7\sim 18^{\circ}\text{C}$ , 最低气温降  $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 。过程极端气温分别出现在太华山, 最低日平均气温  $-0.4^{\circ}\text{C}$ (16 日)、最低气温  $-2.9^{\circ}\text{C}$ (15 日)以及马龙最高气温  $1.3^{\circ}\text{C}$ (15 日)。日平均气温、最低气温连续 3 天在  $5^{\circ}\text{C}$  以下。

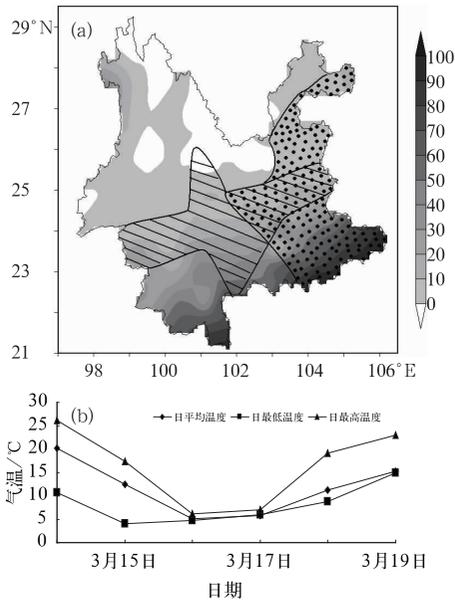


图 1 2011 年 3 月 14—19 日云南强倒春寒天气实况(a)影响区平均气温变化图(b, 单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

(图中阴影为降水区, 斜线为雷暴区, 圆点为降雪区)

Fig. 1 The superimposed weather charts (a) and the mean temperature changes (b, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) of coldness process in Yunnan in the late spring from 14 to 19 March 2011 (Shaded for precipitation areas, oblique lines for thunderstorm areas, dots for snow areas)

2005 年 3 月 2—6 日, 云南出现了当年入春之后降温幅度最大、气温最低、持续时间最长、并伴有大范围降雪(雨)天气的强冷空气过程(以下简称过程 II), 全省近 70% 的气象台站最低气温达到倒春寒标准, 其中约 38% 台站出现强倒春寒, 有 11 个市(地、州)共 63 个台站从 2 日 14 时至 5 日 08 时出现降雪, 局地大到暴雪, 雨雪分界线位于屏边、新平、大理到剑川一线(图略), 部分县、市出现雪灾。以云南中部的玉溪市为例, 除元江外其余 8 个县(区)的平均日平均气温连续 3 天降幅达  $3\sim 5^{\circ}\text{C}$ , 其中 3 月 4

日出现了  $3^{\circ}\text{C}$  最低日平均气温; 平均日最低气温连续 3 天降幅达  $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ , 其中 3 月 4 日出现了  $0.8^{\circ}\text{C}$  最低平均日最低气温; 下属各县(区)均出现明显降雪, 尤其是属热带气候的元江县中北部山区也降了雪。

此两次倒春寒是 1980 年后强度强、过程持续时间在 5 天以上, 且均出现在 2000 年后 3 月的雪灾最重过程, 过程 I 降温强度强于过程 II, 但降雪范围却小于过程 II。两次强倒春寒天气过程给云南农业造成较大影响, 云南中部和东部出现雪灾, 部份地区的小春作物、花卉和滇南海拔稍高的橡胶等热带作物遭受严重的冷害、冻害和寒害, 特别是部分区域的露天烤烟育苗受重创, 造成 6 个州(市)、18 个县(市)以上最多达 11 州(市)遭受重低温雨雪灾害。

## 2 倒春寒环流形势

倒春寒就是春季强冷空气活动过程, 是在有利的大尺度环流背景下产生的, 本文将影响到哀牢山以北以东的倒春寒过程定义为一次全省性过程。对 1980—2011 年期间云南 15 次低温阴雨为主的强倒春寒天气发生前天气形势进行分析, 归纳总结出云南阴雨倒春寒主要环流形势特征。

### 2.1 500 hPa 环流特征

西风带中长波槽脊调整在倒春寒过程中起着主导作用, 统计分析表明, 云南伴有强降雨雪的倒春寒分两类天气形势。

(1) 两槽一脊型: 中高纬为两槽一脊, 脊区在  $80^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  间, 东西两侧各有一低槽, 东部低槽常有一  $36^{\circ}\text{C}$  或更低的冷中心与低槽配合, 等温线与等高线大多有较大交角。此型下中低纬度青藏高原到孟加拉湾有明显南支槽活动或青藏高原上多小波动快速东南移, 图 2a 就是属于此类形势的 2000 年 2 月 26—27 日、2004 年 2 月 4 日、2007 年 2 月 1 日、2011 年 3 月 14—19 日 4 次有强降雨过程的合成。

(2) 横槽型: 32 年中共出现 1 次, 欧亚中高纬脊区宽广, 横跨  $60^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$  间, 脊区影响到低纬  $15^{\circ}\text{N}$  附近, 巴尔喀什湖上空有闭合高中心, 横槽在  $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$ 、 $85^{\circ}\sim 130^{\circ}\text{E}$  区间, 横槽内存在较强温度冷中心, 横槽逐步南压或转成竖槽活动期间, 致使西伯利亚地区堆积的冷空气沿高压脊前西北气流向南爆发影响云南。此型下中低层滇缅间为高压脊, 云南及

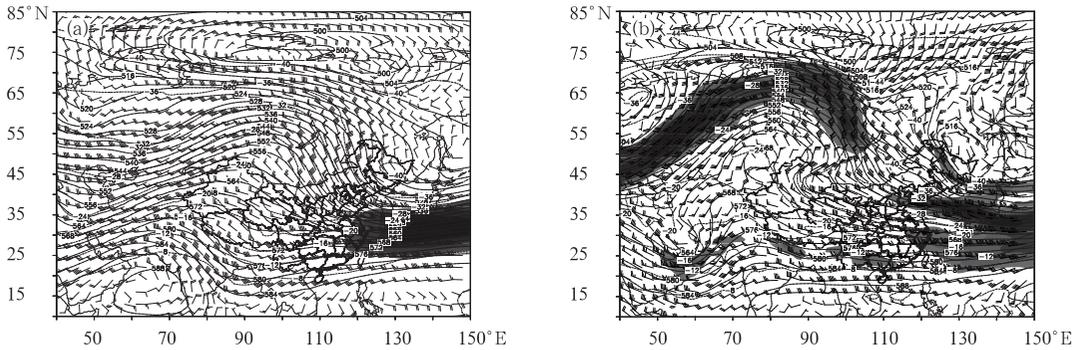


图2 两槽一脊形势平均(a)和2005年3月2日08时(b)500 hPa形势图

Fig.2 The 500 hPa mean synoptic chart of two troughs and one ridge (a) and the 500 hPa synoptic chart at 08:00 BT 2 March 2005 (b)

其上游为偏西或西北气流,如2005年3月2—6日过程(图2b)就属于横槽型。

## 2.2 700 hPa 环流特征

从15次强倒春寒过程开始前700 hPa温压场分布看,高度场大多是北高南低的形势,高原东部到川滇间有切变线和低涡活动。强冷高压在青藏高原中北部到南疆一带,高度值在312 dagpm以上,多数过程会出现316 dagpm闭合中心,最强时有320 dagpm闭合冷高中心,冷高控制区高度值明显高于川滇切变前部昆明、蒙自和普洱探空站的平均高度值。锋区一般在川滇切变线附近,致使强冷高压推动切变线和低涡南下影响云南。

## 3 两次过程主要影响系统特征对比分析

### 3.1 500 hPa 环流特征

500 hPa上强倒春寒过程I属于两槽一脊型,乌拉尔山至贝加尔湖间为强高压脊,我国东北部至新疆为一横槽,其后部有 $-44^{\circ}\text{C}$ 闭合中心的强冷温度槽,槽后等温线与等高线交角接近 $90^{\circ}$ ,冷平流很强;副热带高压(以下简称副高)584 dagpm线在南海上空少动,南北走向南支槽在 $90^{\circ}\text{E}$ 附近;高空槽东南移,槽后偏北风影响到青藏高原,南支槽加深于3月15日08时转为东北—西南走向和中高纬高空强横槽叠加,槽底伸至 $10^{\circ}\text{N}$ 附近,孟加拉湾到云南上空为一支强西南暖湿气流控制;16日两槽东

南移后,强冷、暖气流在云南省上空交汇,引发强降雨雪天气。

过程II开始前,500 hPa在 $95^{\circ}\text{E}$ 低纬度附近无南支槽,缅甸至云南受高压脊控制,云南上空维持一支西北气流,乌拉尔山至巴尔喀什湖为较强高压脊;过程发生和维持的2—4日期间,该脊增强并向东北方向伸展到贝加尔湖上空,高压脊的经向度加大,脊线呈西北—东南走向,贝加尔湖东南部横槽逐步转竖,致使西伯利亚地区堆积的冷空气沿高压脊前西北气流向南爆发影响云南。本次强倒春寒天气过程属于横槽型。

### 3.2 700 hPa 环流特征

700 hPa上过程I和II开始前,巴尔喀什湖或青藏高原到贝加尔湖上空为长波脊,新疆至青藏高原中北部有闭合316 dagpm冷高压环流对应,四川东部、南部建立低涡和东—西向切变线,切变线附近有强锋区,温度梯度达 $12\sim 16^{\circ}\text{C}$ 间,过程发生和维持期间,冷高压最强可达324 dagpm,高度场北高南低推动川滇切变线西段快速南下转为西北—东南向自北向南影响云南,大部地区气温剧烈下降。可见两次过程均属于北高南低的典型形势,只是过程I中有南支槽东移。

### 3.3 地面形势特征

过程I和II开始前,昆明准静止锋维持在滇黔间,新西伯利亚冷高压中心加强,冷高压中心至少达1050 hPa以上,冷高压前部为持续强偏东风,冷空气以偏北或西北路径南下,使准静止锋增强为冷锋

从云南东北部向西南方向推进, 锋后 24 小时有  $-13^{\circ}\text{C}$ 、 $+12\text{ hPa}$  以上的负变温、正变压中心, 强冷空气南下造成云南强倒春寒天气。

## 4 高低空急流对比

过程 I 发生前, 云南省大部地区 700 hPa 风速较弱, 切变线南下后, 副高稳定少动, 南支槽东移致使其间等高线梯度加大, 中南半岛至云南上空暖湿气流加强北抬, 低空急流主体在中南半岛中北部至华南中西部上空, 云南省中东部到黔桂间建立一支较强低空急流带, 急流带中伴有尺度较小的大于  $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  的强风速中心(图 3a)。低空急流加强北抬为云南输送了充沛水汽和大量能量。相应 200 hPa 上云南北部、四川到江淮间一直维持一条强西风高空急流, 急流最强时闭合中心达到  $50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 过程中云南中南部处于高空急流的右侧。由于地转偏差作用, 高空急流入口区右侧质量辐散, 则在垂直于高空急流入口区右侧、低空急流左侧的云南中部垂直剖面上, 形成一个反热力次级环流, 垂直反环流低层的西南气流不断将低空急流南侧的潮湿不稳定空气从急流之下的边界层向北输送, 同时进入低空急流北部上空的垂直反环流的上升支中, 为强雷雨天气的产生提供了丰富的水汽来源保障。

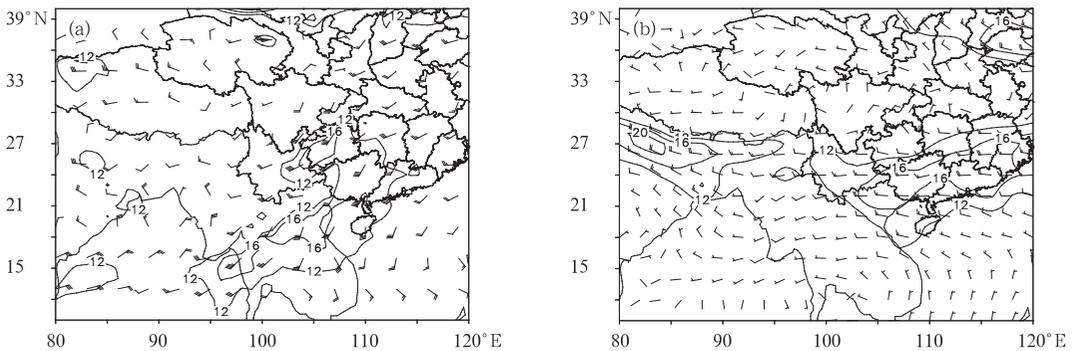


图 3 2011 年 3 月 17 日 20 时(a)和 2005 年 3 月 2 日 08 时(b)  
700 hPa 风场及全风速(单位:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

Fig. 3 The 700 hPa wind fields and total wind velocity at 20:00 BT 17 March 2011 (a)  
and at 08:00 BT 2 March 2005 (b) (unit:  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )

过程 II 发生和维持期间无南支槽配合, 印度半岛北部、云南到华南上空为一支强西风急流带, 有闭合  $20\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  强中心, 云南上空为  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  以上的低空西风急流区控制中(图 3b), 滇西上空急流轴呈南北走向, 云南除滇西、滇西南在急流轴右侧外, 其余均处于急流左侧, 急流左侧存在风速辐合, 利于低空急流带中的水汽和能量在此处辐合上升。高空 200 hPa 上强西风高空急流轴明显偏北, 主体在  $30^{\circ}\text{N}$  的青藏高原南侧边缘到江南中部一线, 江南上空有大于  $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的强大风速中心, 3 日 08 时云南北部、川西南部出现大于  $60\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  的强大风速中心, 云南中南部一直在高空急流右侧, 滇北和滇南风速差值达到  $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。可见过程 II 中高、低急流强度和垂直耦合反环流均比过程 I 强, 急流对水汽、热量输送作用强, 虽中低层无南支低槽配合, 但雨雪天气范围明显大于过程 I。

## 5 热力、动力场差异

### 5.1 热力特征对比分析

温度平流是反映热力分布特征和决定某地温度变化的主要因子之一, 对其分析主要考虑平流的冷暖性质和强度。图 4a 是过程 I 影响区域 ( $22^{\circ}\sim 26^{\circ}\text{N}$ 、 $102^{\circ}\sim 106^{\circ}\text{E}$ , 下同) 平均温度平流时间垂直剖面图, 从图中可看出, 强倒春寒过程 I 爆发前近地层是弱暖平流区; 发生和维持期间 700 hPa 以下层有一支强冷平流入侵, 15—16 日期间  $900\sim 800\text{ hPa}$  层间出现强  $-16\times 10^{-5}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$  的闭合冷平流中心, 低层入侵强冷平流是造成地面日平均气温和最低气温达最低的主要原因, 相应温度平流零线顶部接近 500 hPa, 中低层冷层厚度大利于降水物冷凝成雪,

16 日 600 hPa 以下层均为冷层,相应过程中 16 日降雪最明显。16 日后低层冷平流减弱,500~300 hPa 层间的暖平流向下延伸,到 17 日相应的温度平流零线到达 800 hPa 附近,700 hPa 以上层又转为暖平流区, $4 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  线最低伸至 700 hPa 附近,

暖平流强度增强,强暖湿气流沿低层弱冷空气垫向上爬升,影响区域上空温度上升,降水相态改变,有利于降水以及雷暴等强对流天气的产生。当整个近地层被弱暖平流控制时,气温开始回升,强倒春寒过程结束。

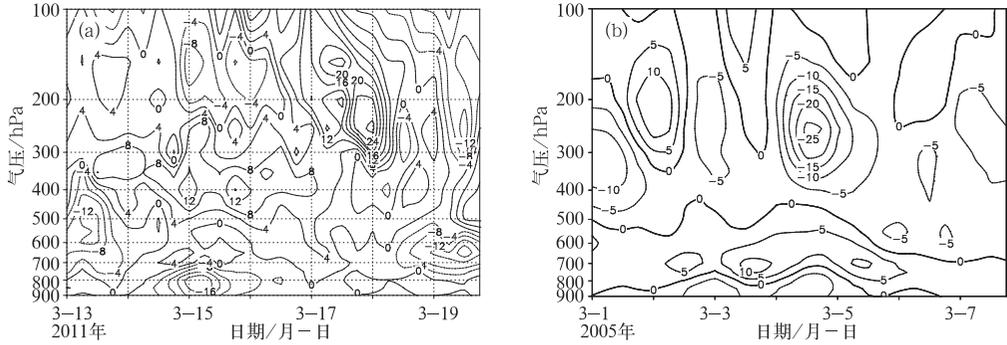


图 4 2011 年 3 月 14—19 日(a)和 2005 年 3 月 1—7 日(b)倒春寒影响区域平均温度平流的时间垂直剖面(单位: $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 4 The vertical sections of mean temperature advection in influence areas of coldness in the late spring from 14 to 19 March 2011 (a) and from 1 to 7 March 2005 (b) (unit:  $10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$ )

图 4b 是倒春寒过程 II 中 3 月 1—7 日影响区域 ( $22^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}, 99^{\circ} \sim 104^{\circ} \text{E}$ , 下同) 的平均温度平流时间垂直剖面图,从图中可看出,3 月 2—5 日强倒春寒影响主要时段内,800 hPa 以下层一直为冷平流,3—4 日分别出现  $-5 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  的闭合中心,中心顶部在 850 hPa 附近。800~500 hPa 之间为  $(5 \sim 10) \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  较强暖平流,700 hPa 附近有 2 个  $10 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  中心。暖平流造成上升运动,即暖湿气流沿近地层冷空气垫向上爬升,利于降雪(雨)产生。500 hPa 以上层是冷平流,4—5 日高层冷平流加强 250 hPa 上出现  $-25 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  强冷平

流中心。6—7 日,高层强冷平流向中低层扩展到 700 hPa, 600~500 hPa 间有两个闭合的  $-5 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  中心,700 hPa 以上层为下沉运动区。高层强冷平流经下沉运动扩展到中低层,加强了近地层冷高压势力,同时对低温阴雨雪倒春寒的持续起了重要作用。之后中层强暖平流向低层流动控制整个近地层,气温回升,过程结束。

### 5.2 动力场差异分析

两次倒春寒过程影响区域的平均散度时间垂直剖面上可见,倒春寒过程 I (图 5a) 开始前,600 hPa

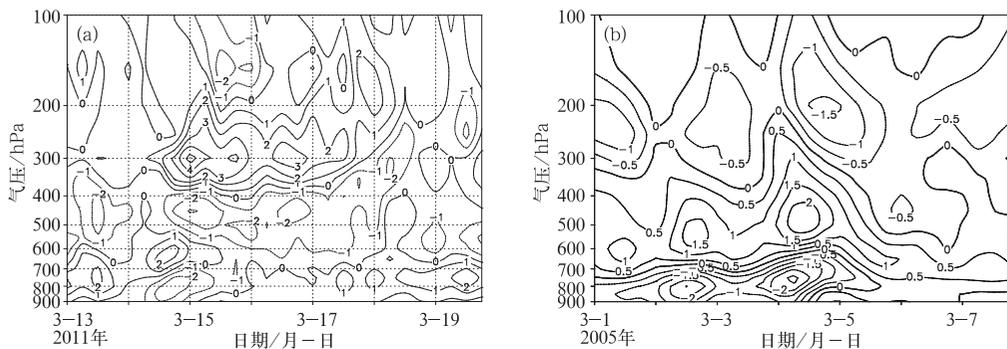


图 5 2011 年 3 月 13—19 日(a)和 2005 年 3 月 1—7 日(b)倒春寒影响区平均散度(单位: $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )时间垂直剖面  
Fig. 5 The vertical sections of mean divergence in influence areas of coldness in the late spring from 13 to 19 March 2011 (a) and from 1 to 7 March 2005 (b) (unit:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

以下层为辐散区,对流层中层为辐合区;爆发时近地层出现弱辐合,负散度迅速增强向更高层伸展,700 hPa 以下层间出现强度  $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  负散度中心,15 日负散度区向高层抬升和对流层中层负散度区打通,15—16 日期间近地面至 400 hPa 之间均处于负散度区,说明中低层辐合上升运动增强;14—18 日期间对流层高层 400~200 hPa 层间对应为正散度区,数值更大的强正散度闭合中心叠加于下层负散度闭合中心之上,高空辐散大于中低层辐合的强抽吸作用,加剧影响区域上空的垂直上升运动,为强雨雪天气提供了强动力保障。17 日后对流层中层、高层的辐合、辐散减弱,低层出现弱的正散度中心,近地层出现辐散下沉运动,下沉增温作用使气温升高,低温雨雪(雨)天气结束。

过程 II (图 5b) 开始前,750 hPa 以下层为弱辐合区;发生和维持期间,2 日开始辐合逐渐增强并向更高层伸展,5 日辐合区顶部接近 600 hPa,在 800 hPa 附近分别出现了两个  $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的辐合中心,表明低层辐合上升运动为增强过程,增强的辐合上升运动使 750 hPa 以下层的气温下降;1—5 日,650~300 hPa 层为辐散区,2 日开始辐散区增强向高层伸展,4 日到达 200 hPa,4—5 日在 500 hPa 附近有  $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的辐散中心,中高层辐散下沉运动从弱到强变化与低空辐合上升运动强弱变化一致,反映倒春寒地区上空冷暖空气垂直对流运动的增强及伴随的降雪(雨)量从小到大的变化过程。垂直方向上的辐合上升运动高度柱明显小于过程 I,但低层辐合中心强度强且中心所在位置更低;5 日凌晨,低层辐合迅速减弱,近地面出现弱辐散,随后中层强辐散向低层传递与地面向上伸展的弱辐散合

并,6 日 500 hPa 以下层为正散度区,辐散下沉气流导致 500 hPa 以下层的气温升高,低温阴雪(雨)天气结束。

两次过程影响区域的平均垂直速度时间垂直剖面分布对应了上述的散度场差异。图 6a 显示,过程 I 爆发时,250 hPa 以下层为上升运动区,两个强中心分别出现在中低层 800~700 hPa 之间和 550~300 hPa 之间,值分别为  $-0.25$  和  $-0.5 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ;16 日后 500~300 hPa 之间保持中心  $-0.4 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  的强垂直上升运动区,而中低层转为弱的下沉运动,说明中低层有强冷空气入侵,出现持续降温和明显降雪;17 日白天中高层的上升运动区向下扩展至近地面,整层为上升运动,上升运动的加强,致使低空暖湿气流不断抬升、凝结,降水出现增幅。之后中低层下沉运动开始增强,并迅速增强至  $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  且向中高层发展,600 hPa 上出现  $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  中心,随着整层转为下沉运动,过程结束。图 6b 显示,过程 II 发生和维持期间,500 hPa 以下层为上升运动区,垂直速度有两个中心分别出现在 2 和 4 日晚上,中心位于 700~500 hPa 之间,两中心极值各为  $-0.35$  和  $-0.45 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 。4 日上升运动区向上伸展到 300 hPa 附近,垂直上升运动柱虽然较浅薄,但中低层持续强上升运动,致使低空暖湿气流不断抬升,是大范围的雪雨天气动力条件。4 日晚开始 800 hPa 以下低层出现下沉运动,高层强下沉运动中心迅速增强至  $0.2 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  并向中低层发展,600 hPa 上出现  $0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  下沉运动,近地层上升运动区消失后,整层都为下沉运动,雪雨天气结束,气温逐渐回升。

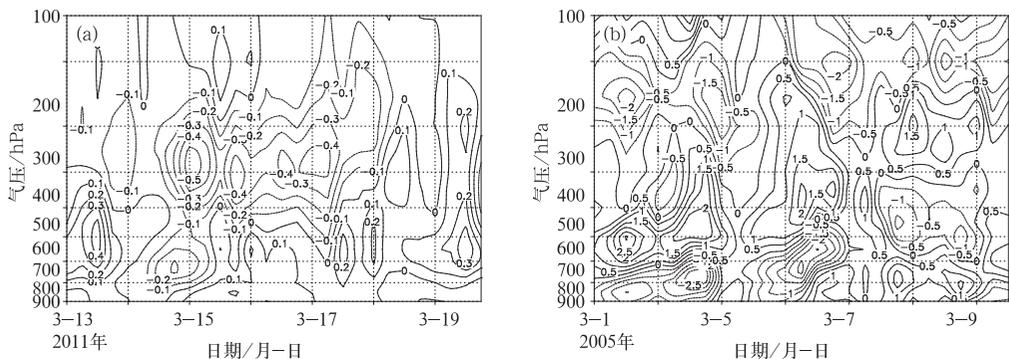


图 6 2011 年 3 月 13—19 日(a)和 2005 年 3 月 1—7 日(b)倒春寒影响区平均垂直速度(单位:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )的时间垂直剖面

Fig. 6 The vertical sections of mean vertical velocity in influence areas of coldness in the late spring from 13 to 19 March 2011 (a) and from 1 to 7 March 2005 (b) (unit:  $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

## 6 水汽条件对比分析

水汽通量表征水汽的来源,水汽通量散度则表征水汽的辐合和辐散。分析两次过程各层的水汽通量和通量散度随时间的变化发现,过程 I 爆发前 850 hPa 孟加拉湾至缅甸南部为水汽通量大值区,通过西南气流将水汽向云南输送,滇南水汽通量由  $0.2 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  增加至  $0.6 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,滇东南受强冷高压南下其前沿东南气流影响,水汽通量开始增加,14 日 20 时两股气流在云南辐合,相应滇东北低层均为强水汽辐合中心,850 hPa 上有  $-5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$  强中心,云南大部水汽辐合从 500~400 hPa 由较弱到强,300 hPa 为  $0.4 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$  的水汽辐散区。到 15 日 14 时全省水汽通量增大至  $0.4 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  以上,加之 700 和 500 hPa 南支槽东移,中南半岛 SW—NE 向水汽通量大值带向北扩展,受南支槽前西南急流影响,云南对流层中层水汽通量值继续增加,滇中出现  $0.6 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  中心,期间中低层水汽辐合中心逐渐西移至滇中,400 hPa 层出现  $-1.5 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$  的辐合中心;16 日 500 hPa 滇南边缘水汽通量保持  $0.6 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,500~400hPa 孟加拉湾至滇南出现一条西南—东北向强水汽辐合带,相应 300 hPa 辐散区也增强至  $0.4 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。中低层水汽通量增加、大的通量值和强的水汽辐合为 16 日全省出现大范围的强雨雪天气提供了充沛的水汽。17 日后冷高压进一步东南移,850 hPa 转为东北气流,云南水汽通量降低。对流层中层水汽通量大值带随着南支槽东移而东移,滇南边缘水汽通量逐渐由  $0.8 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$  减小到  $0.1 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,18 日 08 时中低层的辐合强度逐渐减弱,滇南长时间维持较高的水汽通量和水汽辐合是该地连续 3 天强降水的水汽保障。分析可见过程 I 对流层中层的水汽来源于孟加拉湾,中低层水汽通量不断增加、持续的大通量值以及强的水汽辐合保证了强雨雪所需的丰富水汽。

过程 II 发生和维持期间,850 hPa 上孟加拉湾至缅甸西南部、西藏东南部到滇西和滇东南分别有 3 个水汽通量中心,其中缅甸西南部的最大,中心值达  $7 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。揭示了孟加拉湾是水

汽源地,西南气流将水汽源源不断地运送至云南雪(雨)区上空;而滇东南的较强水汽通量则是通过东南风向西北方向输送;700 hPa 上从孟加拉湾经缅甸北部到云南大部有一西北—东南走向的水汽通量大值区,最大值中心位于缅甸北部,极值达  $9.5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,水汽沿偏西气流向东输送,过哀牢山后向东偏南方向进入滇东和滇东南。500 hPa 青藏高原东部至广西有与 700 hPa 走向一致的水汽通量大值区,最大值为  $4 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ ,中心分别在保山和曲靖南部,比低层的极值明显偏小,表明水汽主要分布在 700 hPa 以下层。850 hPa 上西藏东南部到四川、云南有一个强西北—东南向的水汽辐合区,西藏东南部、滇西北部分别有一个中心值达  $-25 \times 10^{-8}$  和  $-20 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$  的强水汽辐合中心,云南值为  $(-15 \sim -5) \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。700 hPa 滇西南转为  $10 \times 10^{-8} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1}$  较强的水汽辐散区,云南其他大部地区为弱水汽辐合区。可见云南强降雪(雨)区中的水汽主要由 700 hPa 以下层强辐合和对流层低层由孟加拉湾经缅甸北部向云南输送的丰富水汽提供。

## 7 不稳定条件以及抬升系统对比

### 7.1 层结不稳定条件对比

不同高度层的假相当位温差可以代表大气层的稳定性状况,通常用  $\theta_{se, 500 \text{ hPa}} - \theta_{se, 850 \text{ hPa}}$  的大小来表示(图略)。两次过程中发生之前,云南省中西部具有不稳定能量,缅甸至滇南为  $-8 \text{ K}$  以上较强位势不稳定区,  $20 \text{ K}$  以上的强位势稳定中心在川东南,滇东北或贵州上空,西北—东南向的强能量锋区在滇东部到云贵交界处之间,该能量锋西进影响云南大部时,诱发位势不稳定能量释放产生强雨雪天气。过程 II 云南西南部位势不稳定大于过程 I,层结稳定的冷气团过程 II 略弱于过程 I,等  $\theta_{se, 500 \text{ hPa}} - \theta_{se, 850 \text{ hPa}}$  梯度和密集程度相当。

### 7.2 抬升系统对比

等假相当位温线密集程度表征能量锋区的强弱,图 7 是两次过程 800 hPa 沿  $24^\circ \text{N}$  的等假相当位温时间垂直剖面图。过程 I (图 7a) 强倒春寒爆发前,纬向上云南的  $\theta_{se}$  在  $328 \sim 332 \text{ K}$  之间,东西部值

相差小,15日夜间104°E以东出现 $\theta_{se}$ 密集区,300 K的 $\theta_{se}$ 强冷气团由东部入侵,等 $\theta_{se}$ 线密集。过程II(图7b)强倒春寒发生前,纬向上云南的 $\theta_{se}$ 在320~328 K,2日夜间104°E以东出现 $\theta_{se}$ 密集区,300 K的 $\theta_{se}$ 强冷气团由东部入侵,3—4日锋面维持在102°~103°E之间少动,5日午后冷气团加强到296 K推动锋区迅速西进到98°E附近。过程中锋区维持强

梯度,锋面两侧 $\theta_{se}$ 相差均在20 K左右。槽前西南暖湿气流或低空强西风急流与锋后强冷空气交汇,强烈的冷暖气流汇合使得锋生加强,锋生强迫暖湿气流上升,锋区附近产生明显雪雨天气。过程II冷气团强度强、锋面坡度大,西推速度较慢,降雪范围更大。

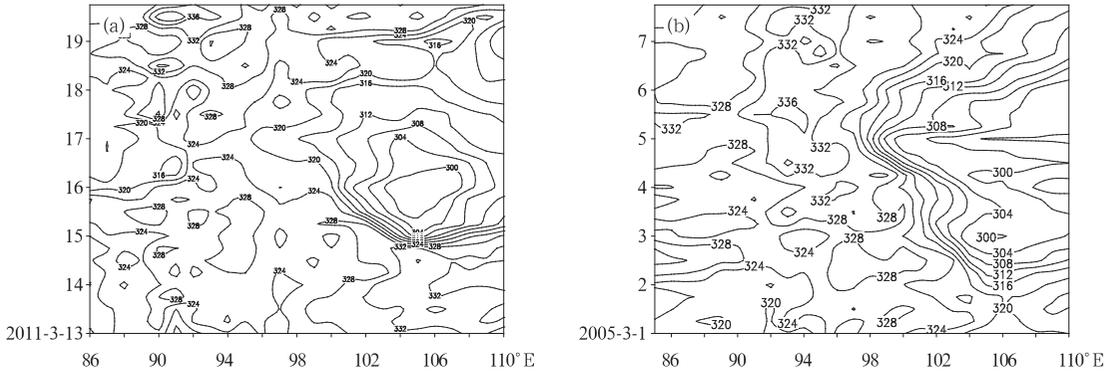


图7 过程I(a)和II(b)800 hPa假相当位温(单位:K)沿24°N的时间垂直剖面图

Fig. 7 The vertical sections of potential pseudo-equivalent temperature along 24°N at 800 hPa during first process (a) and second process (b)

有关研究表明(赵桂香,2007),低层露点锋能够引起强对流天气的产生。分析两次过程中850 hPa露点分布(图8)演变特征发现:过程I强雨雪天气开始前,云南中、南为正露点高区,等露点线呈 $\Omega$ 型, $\Omega$ 型中间轴对应为高温、高湿线在云南东部呈南北走向,滇东南露点值大于12°C且正处于该中间轴线附近,滇东北为负露点区, $\Omega$ 型头部露点锋在云南中部、东部上空,南北露点差达8°C以上,降雪区位于滇中及滇东上空 $\Omega$ 型头部强干湿交界面附近。过

程II开始前,云南中西部为大于6°C的高露点区,滇西北、西南分别有12°C中心,等露点线呈现两个相连的弱 $\Omega$ 型,两个 $\Omega$ 型头部等露点线相对密集区对应的露点锋在滇南和滇西北上空,强干湿交界面在哀牢山上空,雪线与等露点锋较为一致。低层露点锋抬升作用触发干湿交界面上干冷与暖湿气流交汇, $\Omega$ 型头部等露点线密集带和露点锋位置与云南强倒春寒中的降雪区有较好对应关系。

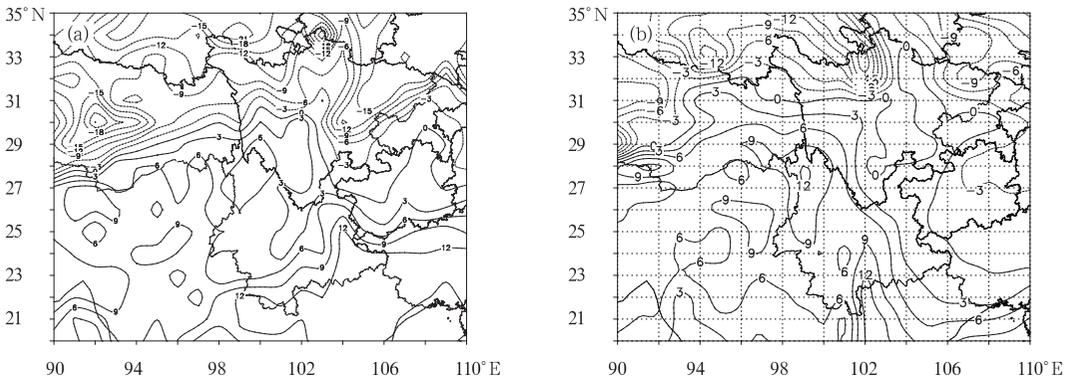


图8 2011年3月15日02时(a)和2005年3月3日02时(b)850 hPa露点图(单位:°C)

Fig. 8 The dew points at 850 hPa at 02:00 BT 15 March 2011 (a) and at 02:00 BT 3 March 2005 (b) (unit: °C)

### 7.3 锋生对比

锋生是指密度不连续面的形成过程,加大温度水平梯度,致使锋面附近天气现象加强(朱乾根等, 2007)。计算两次过程每天4个时次的700和850 hPa锋生函数,分析表明两次强降雨雪倒春寒过程中低层均存在明显锋生过程。过程I中在14—16日期间有一锋生函数正值带从滇东北、贵州西部向云南西南移动过程,过程开始前,850 hPa上滇东北有

值为 $2 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-3}$ 的闭合强中心,正值带西南移动过程中减弱,15日08时(图9a)滇东南有一闭合中心,后迅速增强于14时在滇南出现过程中最强的 $2.5 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-3}$ 闭合中心,之后到17日减弱西移。700 hPa锋生作用明显偏弱,锋生函数正值区有随高度增加向西北方向倾斜特征。强锋生作用期间倒春寒影响区域700 hPa以下层有一支强冷平流入侵。

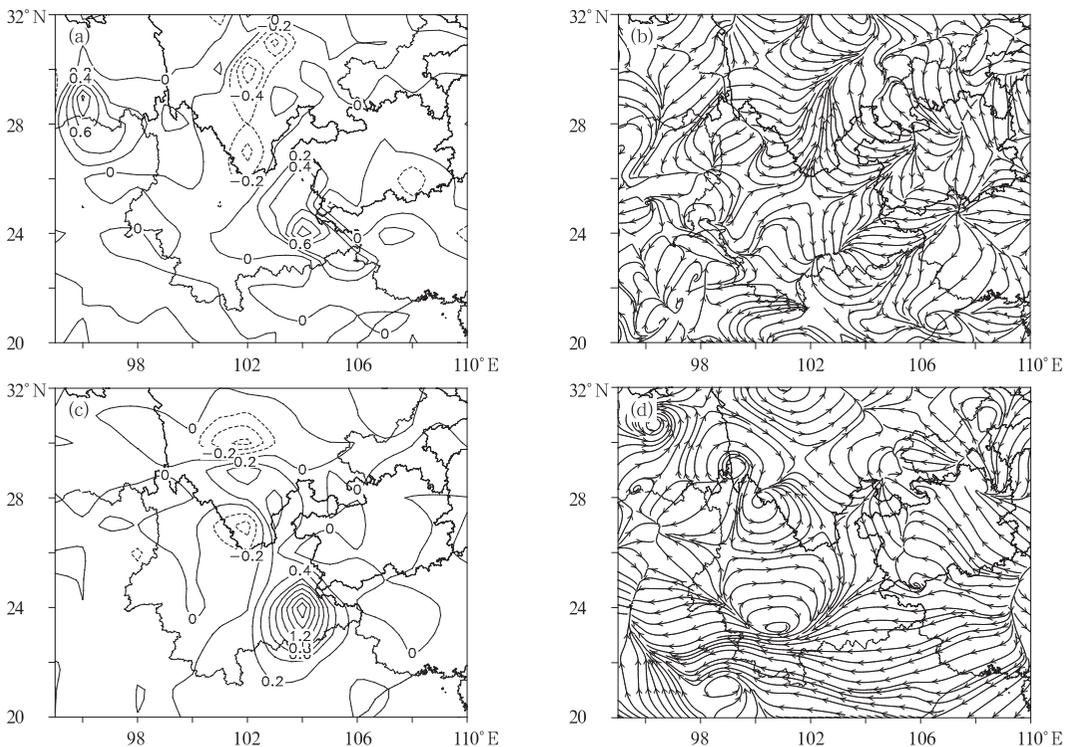


图9 2011年3月15日08时和2005年3月2日14时850 hPa锋生函数

[(a)和(c);单位: $10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-3}$ ]和 $Q$ 矢量(b)和(d)图

Fig. 9 The distribution of frontogenetical function [(a), (c); unit:  $\text{K} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-3}$ ] and  $Q$ -vector (b), (d) at 850 hPa at 08:00 BT 15 March 2011 and at 14:00 BT 2 March 2005

过程II中在2—6日整个影响时间段内有强锋生作用伴随,过程开始前,850 hPa上成都平原到贵州西部一线有正锋生函数带,与昆明准静止锋位置一致。之后正值区缓慢向西南移动并迅速增强,2日02时贵州西北出现 $0.9 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-3}$ 的强中心,2日14时滇东南出现 $1.6 \times 10^{-13} \text{ K} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s}^{-3}$ 的过程最强中心(图9c),随后西北—东南向的正锋生函数带继续向西南移动,4日14时到5日又是个增强过程,其余时段为减弱过程。700 hPa也有上述变化特征。锋生函数正区也随高度增加向

西北方向倾斜。相应锋生作用最强时段中对应应有两次锋面增强西南移。过程中锋生作用期间倒春寒影响区域800~500 hPa为较强暖平流活动,500 hPa以上层是冷平流。

张兴旺(1998)指出湿 $Q$ 矢量与次级环流有良好的对应关系,特别是低纬度地区,湿 $Q$ 矢量与降水落区存在较好的配置关系。跟踪相应的 $Q$ 矢量变化特征,发现 $Q$ 矢量辐合线和强正负值中心交界的零线位置较为一致,表明强锋生作用产生时,锋面前进方向锋生函数零线对应有低层850 hPa $Q$ 矢量

辐合线(图 9b 和 9d)。过程 II 中低层最强锋生函数正值小于过程 I, 相应地面降温强度略弱, 但较强的锋生持续时间明显偏长, 相应  $Q$  矢量场上, 过程 II 中 2—4 日大部时段云南中部到西南部均为  $Q$  矢量辐合区, 相应地面出现大范围雪雨; 过程 I 中 3 月 15 日出现明显辐合在云南南部上空, 滇中部、南部 16—17 日再次有较大范围  $Q$  矢量辐合, 相应强降水主体在滇南、滇中上空。辐合线与锋生函数零线位置对应略差于过程 II, 且辐合偏弱。可见锋生强降温强,  $Q$  矢量辐合强雪雨强。

## 8 小 结

通过对 1980—2011 年间云南 15 次低温阴雨强倒春寒天气过程进行分析总结, 得出有降雪天气伴随的云南强倒春寒的主要天气形势特征, 重点对不同环背景下两次有强雪雨天气的云南强倒春寒天气过程进行对比分析, 得到相应影响天气背景下, 云南出现强雪雨的环流形势和热力、动力学等物理量场特征、水汽条件以及驱动因子还有降雪区和降温幅度预报着眼点等结论。

(1) 云南有雪雨强倒春寒天气 500 hPa 形势特征主要为两槽一脊和横槽型, 中低纬度分别有、无南支槽对应两种情况。700hPa 上川滇切变线前后高度场为典型的北高南低特征,

(2) 倒春寒过程 I 属两槽一脊型, 过程 II 是横槽型。两次过程中, 均有昆明静止锋增强为冷锋和中低层切变线南下, 新西伯利亚冷空气南下自东北向西南侵入云南, 700~500 hPa 层有暖湿气流沿近地层冷平流的冷空气垫爬升产生雨雪的动力条件。前者地面强降温由中低层强冷平流引发, 而后者是由低层强冷平流和高层强冷平流下传共同造成。

(3) 雨雪天气出现与垂直上升运动密切相关, 垂直上升运动深厚或是对流层中低层以下层存在强上升运动柱且中心达  $0.35 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$  以上时, 出现强雨雪天气的可能就越大。强高、低空急流和垂直方向耦合的次级环流为两次过程输送了水汽和热量。低空急流位置和强度影响其对水汽、热量的输送程度和雨雪天气位置、强度。

(4) 来自孟加拉湾对流层中低层特别是 500 hPa

以下层丰富水汽经由缅甸到云南上空的输送和云南上空低层强烈水汽辐合是保障强倒春寒出现强雪雨天气的重要水汽条件, 无南支槽情况时水汽通量值和水汽辐合强度要大而强, 上游 700 hPa 上水汽通量极值要大于  $9 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$ 。南支槽配合时强降雪区中低层有水汽通量迅速增加过程。600 hPa 以下层为冷层或 800 hPa 以下层一直为小于  $-5 \times 10^{-5} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$  的冷平流区, 利于降水物冷凝成雪。

(5) 槽前西南暖湿气流或低空强西风急流与能量锋后强冷空气交汇使锋生加强, 锋生强迫暖湿气流上升, 锋区附近产生明显雨雪天气。强锋生作用推动锋面南下, 锋面前进方向锋生函数零线对应应有低层 850 hPa  $Q$  矢量辐合线, 过程强雪雨落区与  $Q$  矢量辐合区对应, 过程中地面降温幅度与 850hPa 锋生函数强正值成正比。

(6) 能量锋水平梯度越大, 能量积聚越多、锋面坡度大, 西推速度较慢, 降雪范围更大。两次过程中低层等露点线有  $\Omega$  型特征, 露点锋抬升作用触发干湿交界面上干冷与暖湿气流交汇明显,  $\Omega$  头部等露点线密集带和露点锋位置与云南强倒春寒中的降雪区有较好对应关系。

## 参考文献

- 段旭, 王恒康, 董谢琼. 1997. 云南春季低温标准的研究. 云南短期预测系统的研究(1997 年论文集), 云南省气象局.
- 秦剑, 琚建华, 解明恩. 1997. 低纬高原天气气候. 北京, 气象出版社, 107-112.
- 覃志年, 钟利华, 刘莉红, 等. 2010. 2008 年初广西异常低温雨雪冰冻天气影响因子分析. 气象, 36(10): 14-20.
- 吴古会, 彭芳, 崔庭, 等. 2012. 2011 年冬季贵州低温雨雪冰冻天气的成因分析. 气象, 38(3): 291-299.
- 许美玲, 段旭, 杞明辉, 等. 2011. 云南省天气预报员手册. 北京, 气象出版社, 179.
- 尤红, 曹中和, 郭文华, 等. 2006. 昆明准静止锋下的云南强倒春寒天气分析. 气象, 32(3): 56-62.
- 张兴旺. 1998. 湿  $Q$  矢量表达式及其应用. 气象, 24(8): 3-7.
- 赵桂香. 2007. 一次回流与倒槽共同作用产生的暴雪天气分析. 气象, 33(11): 41-48.
- 郑建萌, 段旭. 2001. 云南春季低温的诊断分析. 气象, 27(5): 35-37.
- 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 2007. 天气学原理和方法. 北京: 气象出版社, 94-102.