

文章编号: 2096-1618(2017)06-0651-11

# 川西高原东部两次连续强降雪过程对比分析

武敬峰<sup>1</sup>, 刘静颖<sup>2</sup>, 张永莉<sup>3</sup>

(1. 阿坝州松潘县气象局, 四川 松潘 623300, 2. 阿坝州马尔康市气象局, 四川 马尔康 624000; 3 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225)

**摘要:**针对2016年2月21-23日和2017年2月21-22日川西高原东部连续强降雪过程进行分析,利用NCEP再分析资料、常规高空、地面、云图资料对环流背景场和物理量场分析研究,结果表明:降雪前期500 hPa为高原槽或西风槽配合有高空锋区影响,700 hPa在甘肃南部有切变南下,地面上为冷高压扩散到高原,后期为南北槽叠加形式。中低层水汽源地都在孟加拉湾,前期水汽通量强,比湿大,后期水汽通量弱,比湿小,但低层受偏东水汽通量与地形抬升关系,结合500 hPa的弱水汽辐合使降雪持续。降雪时都出现了较强的垂直上升运动,这与地形抬升有一定关系,其上升高度与降雪强度之间存在关系。降雪前期湿位涡MPV1中高层都为正值,低层为负值区,到后期低层转为弱的正值区,而MPV2则正好相反;云图上3次降雪在01-02时开始,都有云团合并加强,黑体亮温梯度明显增加时出现降雪,且小时降雪量较大。

**关键词:**气象学;高原气象学;连续性强降雪;地形强迫抬升;水汽通量;比湿;垂直速度;湿位涡

**中图分类号:**P458.1<sup>+</sup>21

**文献标志码:**A

**doi:**10.16836/j.cnki.jcuit.2017.06.014

## 0 引言

松潘县位于青藏高原东南缘,四川阿坝州东北部,是西部高原与东部盆地的过渡地带,松潘县大监站海拔2881 m,其西北部多为草原,较为寒冷,东南部则较为暖和,具有青藏高原季风气候特征。松潘县拥有草地面积1.52万平方公里,是阿坝州草原畜牧业的主要分布区域。雪灾是牧区冬春季的主要气象灾害之一。董文杰等<sup>[1]</sup>指出:到达高原东部牧区的水汽必须能够在该区域产生强烈上升运动,使水汽过饱和,发生凝结,才可以致云成雪,致雪成灾。马林等<sup>[2]</sup>指出:冬季造成高原东部牧区成灾性降雪天气的主要原因是稳定的波槽气流发展。李德友<sup>[3]</sup>指出:川西北大草原雪灾主要在乌拉尔山高脊大槽、纬向环流下,受西风槽、西北气流辐合线、高原低涡或切变、小波动发展天气系统和冷空气的共同影响下产生的。董安祥等<sup>[4]</sup>指出:高原东部大雪在降雪前期,暖湿空气发展是大降雪的重要条件之一。降雪时从500 hPa到200 hPa强烈深厚的垂直涡旋运动和湿空气斜压性强时雪量大的重要原因。陈晓刚等<sup>[5-7]</sup>通过人工神经网络、数值预报模型建立等方法对川西高原大雪预报进行研究。上述研究成果无疑丰富、提高了预报员对川西高原大雪天气的认识,然而实际预报业务中,大雪特别是高原边缘地

带的连续性大雪仍是预报难点。

2016年2月21日-23日和2017年2月21日-22日松潘县分别出现连续大雪到暴雪天气,持续时间较长,累积降雪量大,对农牧业生产、交通运输和人民生活等造成了较大影响。本文利用常规高空和地面实况资料、6 h一次NCEP再分析资料、FY\_2G卫星云图逐小时相当黑体亮度温度TBB资料,对连续强降雪发生前后大气环流特征,水汽条件、动力条件、湿位涡变化、云图变化特点进行分析,以期为今后川西高原东部连续强降雪过程的预报提供有益参考。

## 1 天气实况

2016年2月21日和23日松潘县出现大雪到暴雪天气过程,21日降雪量(图1a)达10.5 mm,积雪深度为9 cm,为暴雪,23日降雪量(图1b)为5.6 mm,达到大雪标准;19日到21日全县平均气温下降4℃~6℃。从地面气象要素逐小时变化看,降雪过程都出现在下半夜到第二天上午,降雪都持续8 h左右。

2017年2月21日和22日松潘县出现连续大雪天气,20日降雪量(图1c)为8 mm,21日降雪量(图1d)为6.9 mm;48 h内全县平均气温下降7℃~9℃。连续降雪过程都主要出现在晚上,前期温度较高,20日最高温为12℃,晚上最低气温为0.2℃,降水相态为雨夹雪,冷空气从21日开始影响,21日白天 $\Delta T_{24}$ 为-4℃,到晚上出现第二次降雪,积雪深度达5 cm。

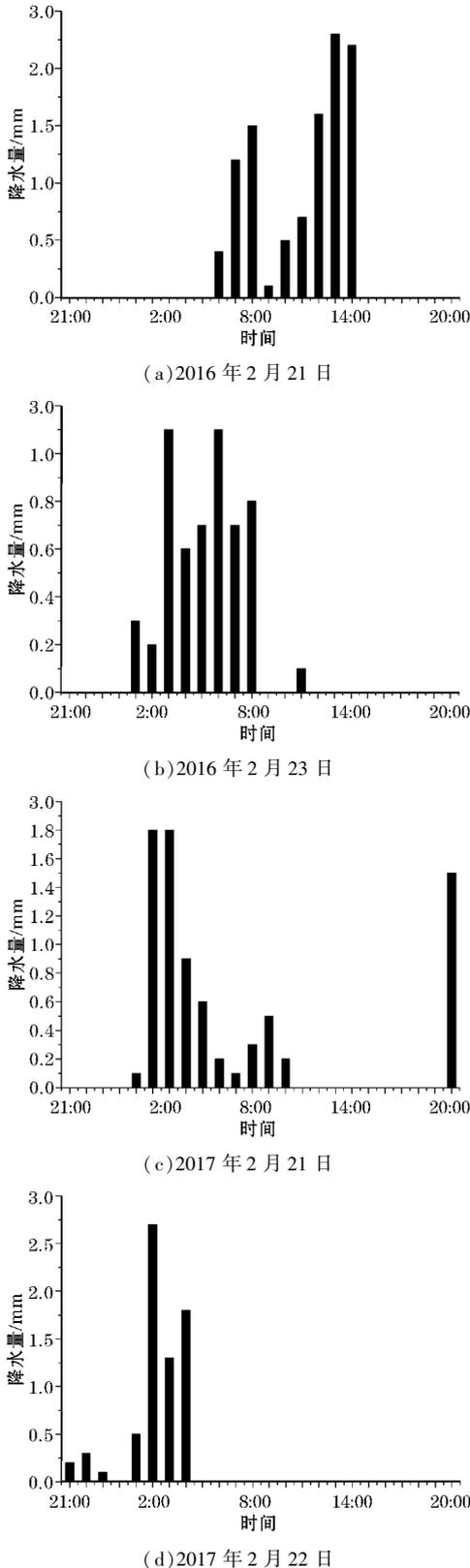


图1 2016年2月21日、23日、2017年21日、2月22日降水量

## 2 环流形势对比分析

### 2.1 高空环流形势

2016年2月19-20日,乌拉尔山阻塞高压发展,

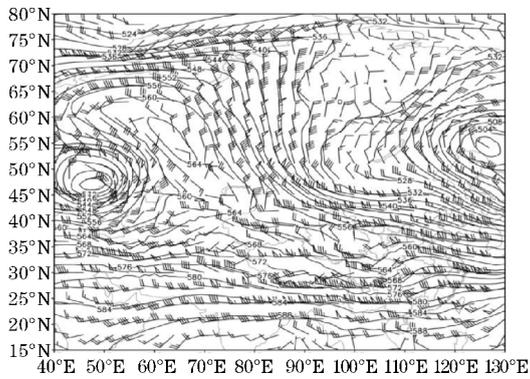
脊前偏北气流引导极地冷空气南下,到20日20时,欧亚地区形成了由乌拉尔山高压脊和贝加尔湖的横槽组成的一脊一槽形式,在横槽上有 $-40^{\circ}\text{C}$ 的冷中心,在中纬度青海到川西高原为西北气流,相配合有一高空锋区,西藏东部有高原槽发展东移。随着横槽逐渐转竖及高空锋区进一步南压,在21日08时500 hPa(图2a),有高原槽发展东移位于阿坝州上空,槽后有明显冷平流;同时700 hPa(图2b)云南到四川盆地西部维持西南气流,水汽通道较畅通,在甘肃南部地区有明显切变,切变北部受偏北气流引导,冷平流南下较快。到23日02时500 hPa(图2c),西藏到孟加拉湾南支槽加强,槽前西南气流与西风槽后西北气流形成切变。在700 hPa(图2d)上松潘县位于甘肃南部兰州小高压南部,四川盆地西南涡北部的偏东气流中,偏东风与松潘西高东低山脉形成地形抬升,有利于降水增幅。200 hPa上,松潘县前期位于急流轴上,后期位于急流轴入口区右侧,都为辐散区。

2017年2月21日02时500 hPa上(图2e),欧亚地区为两槽一脊型,在贝加尔湖以西有 $-40^{\circ}\text{C}$ 冷涡,在川西高原北部到青海东部有一西风槽,槽后有明显锋区,在西北气流引导下,高空冷平流很强,青海地区24小时变温达 $-7^{\circ}\text{C} \sim -12^{\circ}\text{C}$ ,西风槽发展东移影响高原地区。700 hPa(图2f)从云南到四川东部,有一急流输送带,将孟湾暖湿水汽向高原东部输送,同时在甘肃南部有一明显切变南下,配合有强冷平流,形成冷暖气流辐合;受500 hPa和700 hPa的温度脊影响,温度未下降到 $0^{\circ}\text{C}$ 以下,降水以雨夹雪为主。22日02时在500 hPa(图2g)西藏东部有一高原槽发展,与华北地区西风槽形成南北槽叠加形式,高原槽前暖湿气流与西风槽后干冷气流在阿坝州北部形成气流辐合。同时700 hPa上(图2h)锋区继续南压,偏北气流引导冷空气持续影响下,而盆地内偏南风较强,南北气流辐合时,有部分为偏东气流,在松潘县上空有一定的地形辐合。200 hPa上,松潘县一直位于急流入口区左侧,都为辐散区。

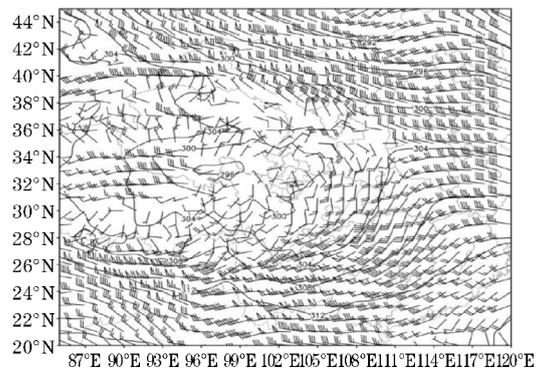
### 2.2 地面环流形势

两次过程在地面(图略)上均受到强冷空气影响,2016年2月20日都在蒙古西部有一冷高压,中心气压值达1050 hPa以上,冷高压主体移动缓慢,主要是扩散冷空气东南下影响,从20日20时开始,松潘县转为偏北风, $\Delta T_{24}$ 为 $-2^{\circ}\text{C}$ ,开始出现降温。

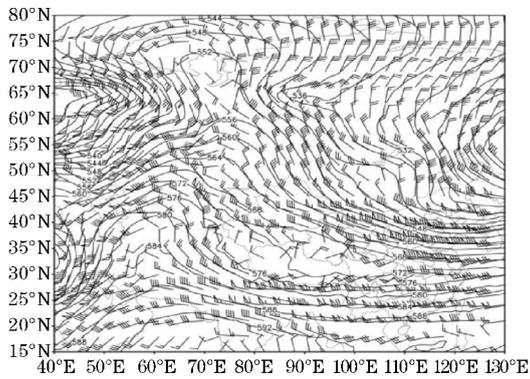
2017年2月20日,在新疆北部有一冷高压,中心气压值达1045 hPa以上,冷高压中心向东移动,受扩散冷空气东南向移动影响,在20日20时,松潘站 $\Delta T_{24}$ 为 $-2^{\circ}\text{C}$ ,冷空气开始影响。



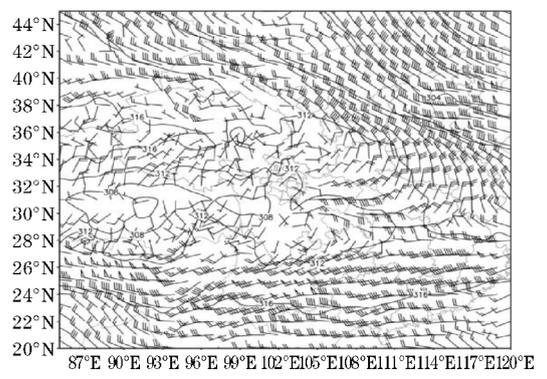
(a)2016年2月21日08时500 hPa



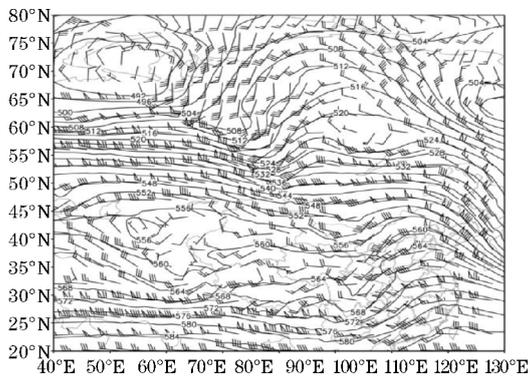
(b)2016年2月21日08时700 hPa



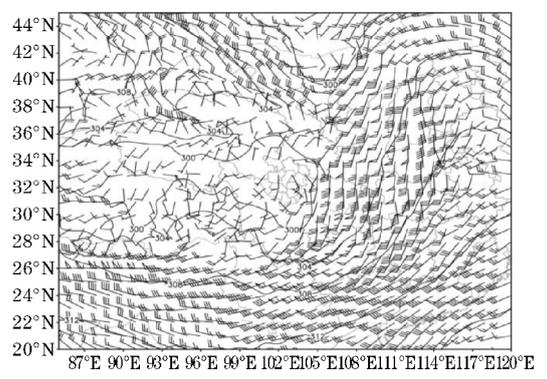
(c)2016年2月23日02时500 hPa



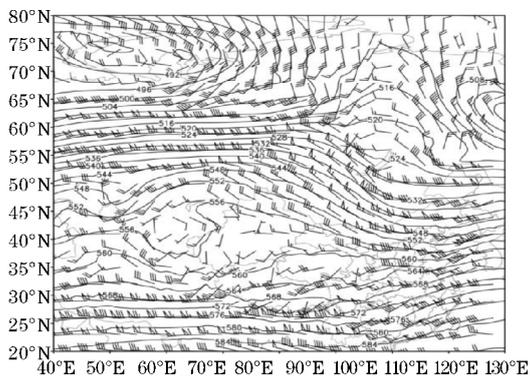
(d)2016年2月23日02时700 hPa



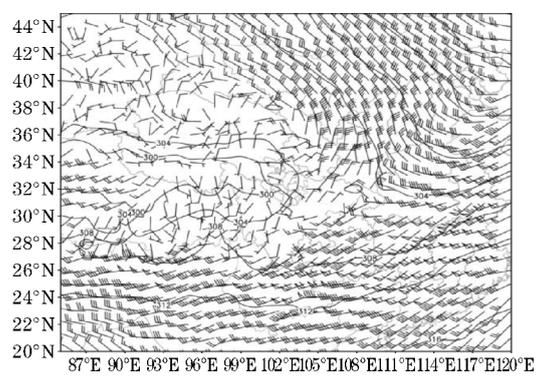
(e)2017年2月21日02时500 hPa



(f)2017年2月21日02时700 hPa



(g)2017年2月22日02时500 hPa



(h)2017年2月22日02时700 hPa

图2 2016年2月21日08时,2月23日02时,2017年2月21日02时,2月22日02时高度场和 wind 场

以上分析可以看出两次连续强降雪过程,500 hPa上前期中高纬环流形势不同,但在高原上都有高原槽或西风槽影响,并且有高空锋区相配合,700 hPa都在甘肃南部有一切变南下,配合有强冷平流,地面上冷高压主体位置和移动路径不同,但冷空气都扩散南下影响到高原,由于高低空冷暖气流交汇及动力条件配合,导致前期降雪量都偏大;后期500 hPa都为南北槽叠加形式,西藏东部高原槽发展东移,与前期槽后部的西北气流形成辐合,700 hPa上在甘肃南部的锋区进一步南压,2016年较2017年偏东气流明显,形成地形抬升,地面上则继续受冷空气扩散影响,地面气温持续下降,达到0℃附近或以下。在200 hPa上松潘县都位于急流轴或急流轴入口区右侧或出口区左侧,都为辐散区,即有高空“抽吸”作用,有利于上升运动的形成和维持,使低层西南风得到加强。

### 3 降雪条件分析

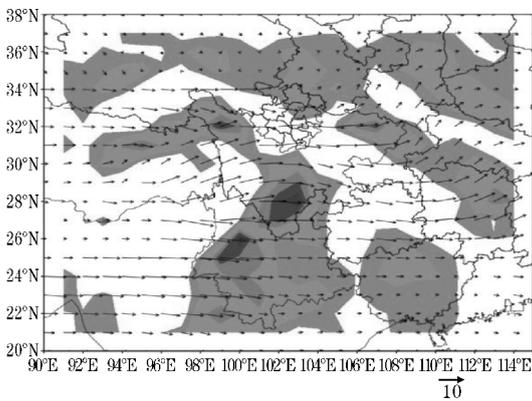
#### 3.1 水汽输送和辐合条件

水汽输送和辐合的强度决定降水量的大小。通过分析水汽通量和水汽通量散度,发现在2016年2月21日02时,在500 hPa和700 hPa上从孟加拉湾到阿坝州有一西南向水汽输送带,并且在阿坝州西南部都有

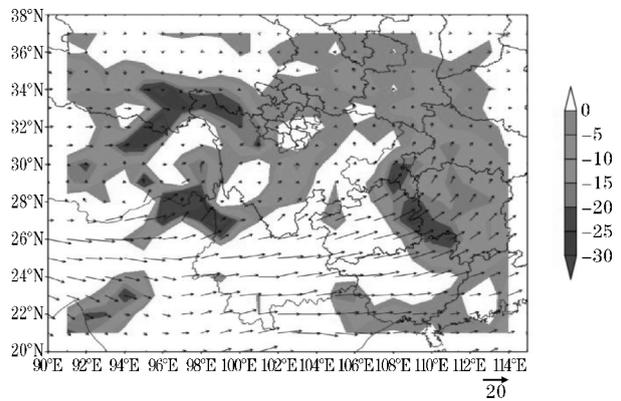
一水汽辐合区,到08时,在500 hPa(图3a)和700 hPa(图3b)上的水汽输送带维持,水汽辐合区向东北方向移动,在500 hPa上松潘县附近有一水汽辐合中心,水汽通量散度为 $-15 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,700 hPa水汽通量散度为 $-5 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。2月23日02时,500 hPa和700 hPa(图3c、d)上水汽输送带维持,但松潘附近水汽通量明显减弱,导致在500 hPa上水汽辐合强度减弱,水汽通量散度为 $-5 \sim 0 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,700 hPa为 $-5 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

2017年2月21日02时,可以看出500 hPa和700 hPa的水汽源地同样都来自孟加拉湾,在500 hPa(图3e)松潘县附近有一水汽辐合中心,辐合强度为 $-10 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,700 hPa(图3f)上松潘县附近为 $-10 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。到2月22日02时,水汽通量减弱,在500 hPa和700 hPa(图3g、3h)上水汽通量散度都为 $-5 \times 10^{-5} \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

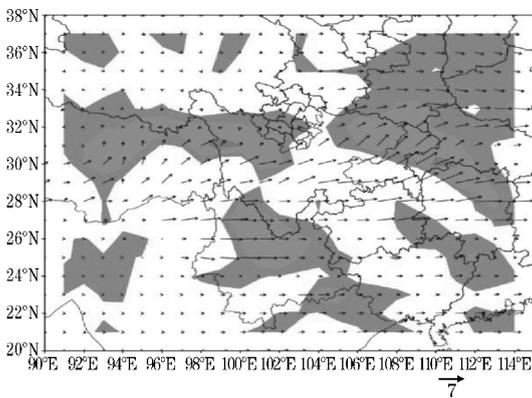
可以看出两次连续强降雪过程水汽源地都在孟加拉湾,前期500 hPa辐合强度大于700 hPa,后期水汽辐合强度减弱,但低层受偏东水汽通量与地形抬升关系,低层水汽辐合维持,配合500 hPa的弱水汽辐合使降雪持续。在500 hPa上降雪区前期2016年较2017年水汽通量和水汽辐合强度强,后期2016年水汽辐合弱于2017年,相应降雪量2016年较2017年前期偏大,后期偏少。



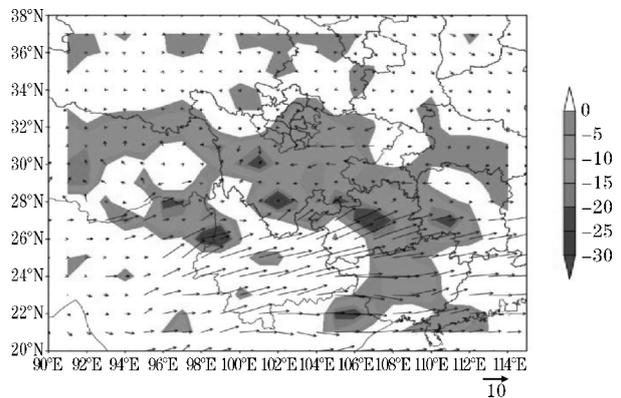
(a) 2016年2月21日08时500 hPa



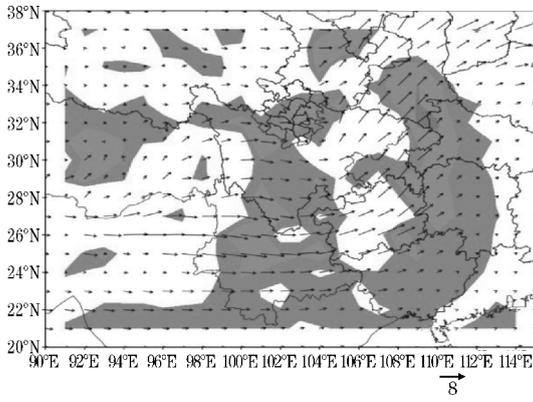
(b) 2016年2月21日08时700 hPa



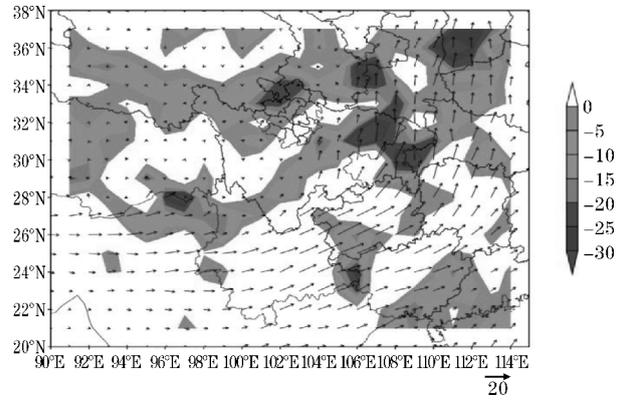
(c) 2016年2月23日02时500 hPa



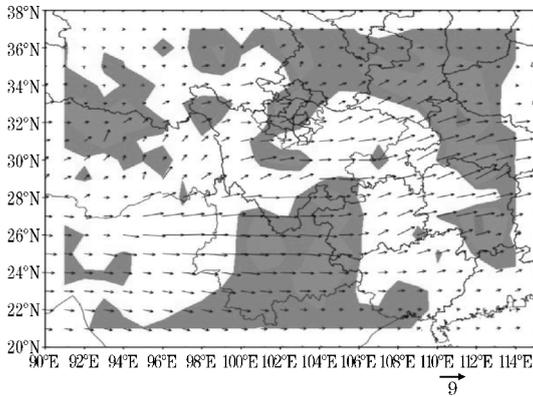
(d) 2016年2月23日02时700 hPa



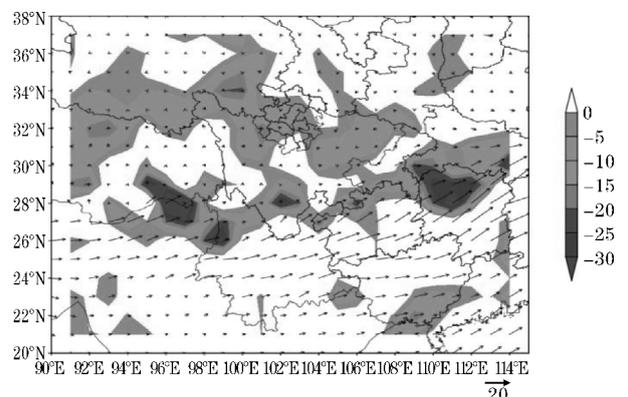
(e)2017年2月21日02时500 hPa



(f)2017年2月21日02时700 hPa



(g)2017年2月22时02时500 hPa



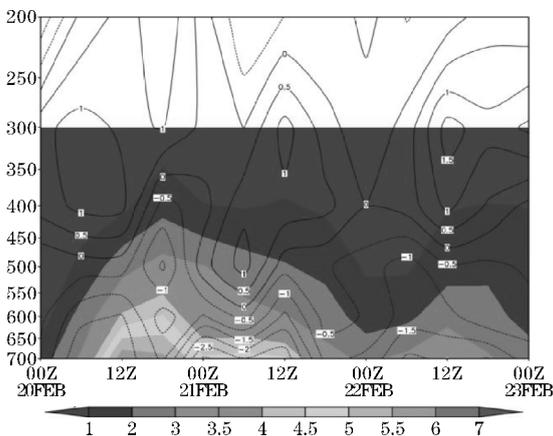
(h)2017年2月22时02时700 hPa

图3 2016年2月21日08时、2月23日02时、2017年2月21日02时、2月22日02时水汽通量和水汽通量散度

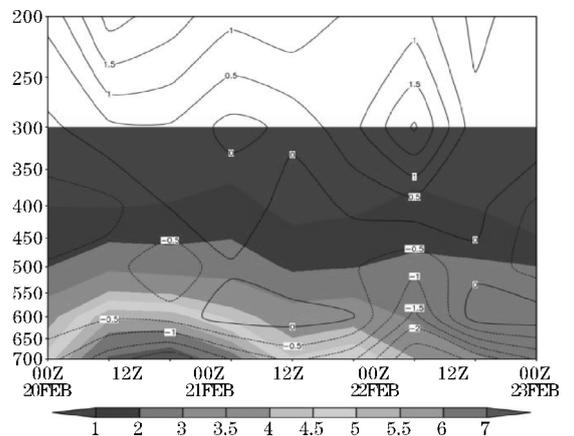
### 3.2 比湿和散度条件

对松潘县(103.6°E,32.7°N)整层比湿、散度场做时间剖面,2016年20日20时(图4a)700 hPa比湿已经增加明显,达 $5.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 厚度伸展到400 hPa左右,到21日08时 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 厚度维持,低层负散度和中高层正散度开始增加,低层出现 $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的负散度中心,500 hPa到300 hPa上有 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正散度中心,22日20时比湿为 $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 厚度伸展到450 hPa

左右,在700 hPa上散度中心为 $-2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,在300 hPa附近有 $1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正散度中心。2017年(图4b)从2月20日08时开始,在700 hPa出现明显比湿增加,达到 $7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上, $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 厚度伸展到450 hPa左右,到21日02时700 hPa比湿减小,湿层维持,负散度中心为 $-1.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,在250 hPa上有 $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正散度中心,到21日20时, $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 湿层维持在500 hPa左右,低层负散度增加明显,为 $-2.5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ ,同时在300 hPa上有 $2 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的正散度中心。



(a)2016年2月20日08时-23日08时



(b)2017年2月20日08时-22日08时

图4 2016年2月20日08时-23日08时、2017年2月20日08时-22日08时沿(103.6°E,32.7°N)比湿、散度高度-时间剖面图

可以看出两次连续强降雪过程前期在700 hPa上比湿增加都比较明显,且比湿为  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  厚度伸展到450 hPa左右,后期700 hPa比湿减小明显,但  $2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  厚度都在500 hPa以上;在降雪时,都配合有低层负散度和中高层的正散度,从700 hPa散度看,2016年前期辐合较强,后期弱,而2017年则前期辐合较弱,后期强,与降雪量较为吻合,而中高层辐散,2016年在500~300 hPa,而2017年在300 hPa附近。低层辐合,高层辐散的高低空配置有利于垂直方向抽吸作用,有利于上升运动的维持和发展,对降雪的形成极为有利。

### 3.3 垂直速度条件

垂直运动使水汽冷却凝结,使产生降雪的重要条件。对2次连续的强降雪过程经  $32.7^\circ \text{N}$  做垂直速度、

水平流场的经向垂直剖面图,2016年强降雪过程松潘县上空低层都为偏东气流,垂直速度在  $-2.5 \sim -3.5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,其中2月21日08时(图5a)垂直速度伸展高度较高,从700 hPa伸展到400 hPa;而在23日02时(图5b)垂直速度伸展高度为500 hPa,中心强度值较大。2017年强降雪(图5c,5d)在松潘县上空低层依然维持偏东气流,垂直速度在  $-1.5 \sim -2.5 \times 10^{-4} \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,伸展高度都在500 hPa左右,强度较2016年的降雪过程弱。

通过以上分析可以发现,这两次强降雪天气过程在降雪时都出现了较强的垂直上升运动,而上升运动与700 hPa偏东气流分量与地形形成抬升有一定关系,上升运动上升高度与降雪强度同样存在关系。

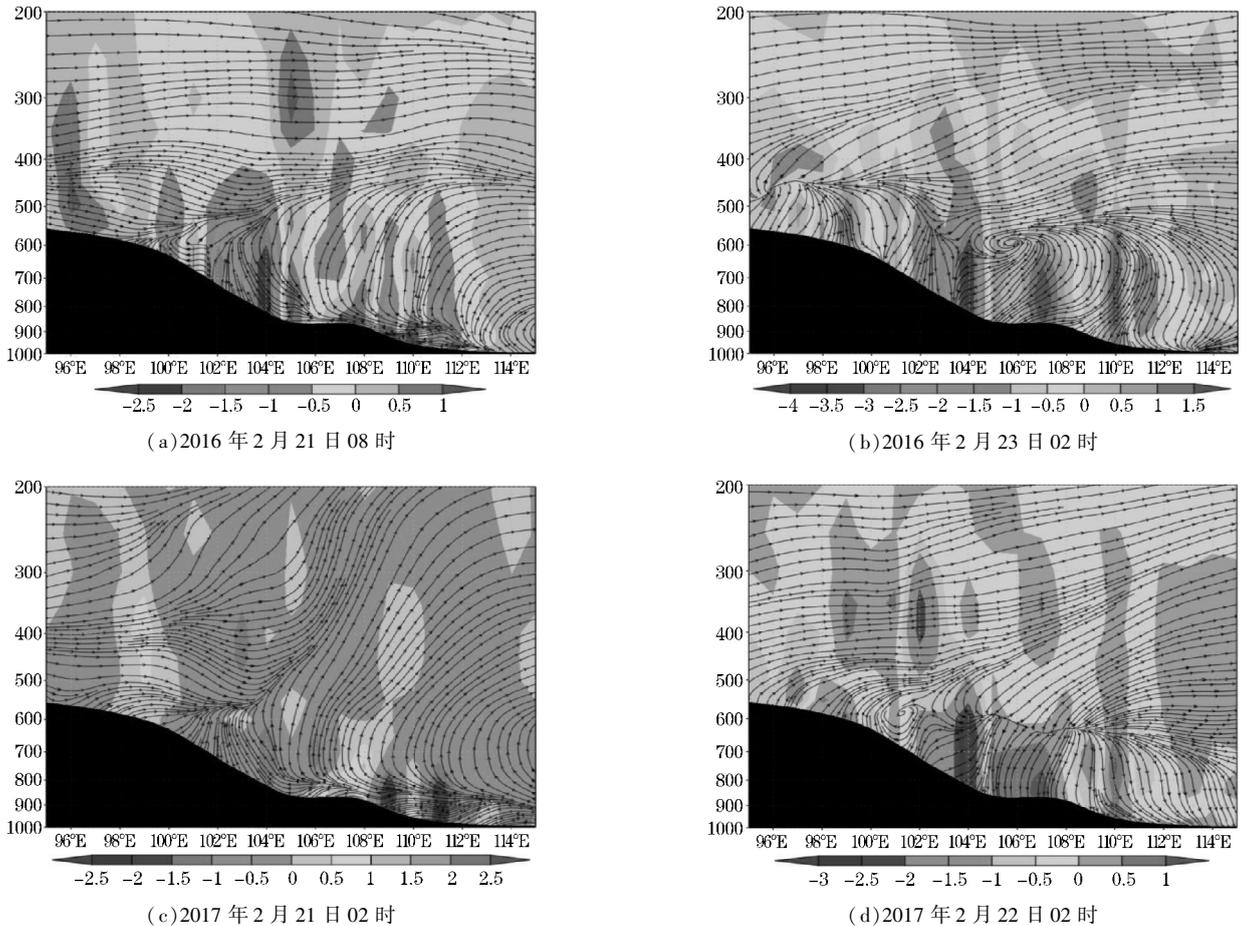


图5 2016年2月21日08时,2月23日02时,2017年2月21日02时,2月22日02时沿  $32.7^\circ \text{N}$  垂直速度、水平流场高度剖面图

### 3.4 湿位涡分析

吴国雄等<sup>[11]</sup>从严格的原始运动方程出发,把饱和大气中的水汽凝结潜热的作用引近位涡分析中,得到了等压面上湿位涡的表达式:

$$MPV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} + g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

湿位涡可分为湿正压项  $MPV1$  和湿斜压项  $MPV2$ , 即

$$MPV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \quad (2)$$

$$MPV2 = g \left( \frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

$MPV1$  为湿位涡的正压项,其值取决于空气块绝

对涡度的垂直分量与相当位温的垂直梯度的乘积。当大气为对流稳定时,  $MPV1 > 0$ ; 当大气为对流不稳定时,  $MPV1 < 0$ 。  $MPV2$  为湿位涡斜压项, 包含了湿斜压性以及风垂直切变两项, 是衡量湿斜压性和风垂直切变的综合物理量,  $MPV2$  的正负分布和大气的热力及动力性质密切相关。一般来说, 绝对涡度为正值, 当  $\partial\theta_{se}/\partial p < 0$  (对流稳定) 时, 湿正压项  $MPV1 > 0$ , 只有湿斜压项  $MPV2 < 0$  时, 垂直涡度才能得到较大增长, 此时  $MPV2$  负值越强表明大气斜压性越强; 当  $\partial\theta_{se}/\partial p > 0$  (对流不稳定) 时,  $MPV1 < 0$ , 只有湿斜压项  $MPV2 > 0$ , 垂直速度才能得到较大增长。湿位涡的单位为 PVU ( $1PVU = 10^{-6} m^2 \cdot k \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$ )。

将两次连续强降雪过程经  $103.6^\circ E$  做湿位涡正压项经向垂直剖面图可以看出, 2016年2月21日02时, 在降雪区 ( $31.6^\circ N$ ) 南侧  $30^\circ N$  低层都处于  $MPV1$  负值区, 在700 hPa以上为一正值区, 到21日08时(图6a) 低层负值区加强并上到高原,  $MPV1$  为  $-0.1$  PVU, 使降雪区处于对流不稳定区, 在700 hPa以上为  $MPV1$  正值区和对流稳定区, 且中心都在500 hPa左右, 即对流层中高层的大值位涡下传, 使得高位涡叠加在低层的负位涡之上, 对于位势不稳定能量的储存和释放十分有利, 也利于低层气旋式辐合, 到21日14时, 低层  $MPV1$  负值区和中高层  $MPV1$  正值区维持, 而降雪也在持续, 到21日20时,  $MPV1$  负值中心减弱消失, 而中高层  $MPV1$  正值区南移减弱。2月23日02时(图6b) 在高原上低层  $MPV1$  为弱的正值区, 为  $0 \sim 0.1$  PVU, 在500 hPa附近有一  $MPV1$  正值中心为  $0.5$  PVU, 到23日08时, 低层  $MPV1$  弱的正值区维持, 中高层  $MPV1$  正值区继续加强向低层倾斜南伸, 中心值增加到  $0.6$  PVU, 此时, 降雪仍在持续, 到23日14时, 低层正值加大, 中高层  $MPV1$  正值中心减小到  $0.5$  PVU, 此时降雪已结束。

2017年过程开始前, 在2月21日02时(图6c), 在低层以  $30^\circ N$  为中心覆盖到松潘县降雪区为  $MPV1$  负值区, 而在中高层在高纬地区 ( $40^\circ N$ ) 有一强  $MPV1$  正值区, 在550 hPa上中心值大于  $1.4$  PVU, 到21日08时, 低层维持, 在550 hPa上  $MPV1$  正值区南移并向低层倾斜加强, 说明高层冷空气向下入侵到低层, 导致低层气旋式辐合加强, 使降雪天气得到维持, 到21日14时, 低层  $MPV1$  负值区减弱, 在高原消失, 中高层  $MPV1$  正值区在高原上550 hPa附近生成  $-0.4$  PVU 正值中心, 降雪停止。21日20时当后期降雪开始时, 低层为  $0.1$  PVU 的  $MPV1$  正值区, 而在高原上空, 550 hPa上正值中心加强到  $0.5$  PVU, 梯度明显, 到22日02时(图6d), 低层仍然维持弱的  $MPV1$  正值区, 在550 hPa上正值中心继续加强到  $0.9$  PVU, 导致降雪持续, 到22日

08时, 550 hPa上正值中心减弱到  $0.7$  PVU, 此时降雪已结束。

从两次连续性强降雪过程沿  $103.6^\circ E$  做湿位涡斜压项经向垂直剖面图可知, 在2016年2月21日08时(图7a), 在降雪落区 ( $32.7^\circ N$ ) 700 hPa以下处于  $MPV2$  的正值区, 为  $0.1$  PVU, 以上存在一  $MPV2$  负值区, 在400 hPa上负值中心为  $-1.2$  PVU。同样在23日02时(图7b), 降雪落区低层为  $MPV2$  正值区, 为  $0.1$  PVU, 中高层为  $MPV2$  负值区, 在400 hPa上负值中心为  $-1.1$  PVU, 该形势维持到08时。在2017年连续性强降雪过程中在2月21日02时到08时(图7c), 在600 hPa有一负值中心由高纬逐步南移到松潘县上空, 中心不断向下侵入, 其中心值由  $-0.35$  PVU 增强到  $-0.55$  PVU, 而在低层为弱的负值区, 在  $-0.05 \sim 0$  PVU。到14时正值区消失, 中高层负值区维持, 中心值有所减小, 为  $-0.5$  PVU, 在20时从高纬500 hPa为  $-0.9$  PVU 负值中心向南快速移动, 到22日02时(图7d) 在松潘县上空负值中心向低层倾斜并侵入, 中心值出现在600 hPa附近为  $-0.7$  PVU, 而地面上维持  $0 \sim 0.1$  PVU 的正值区, 此时降雪量也达到最大, 到22日08时, 中高空负值中心抬升到550 hPa并向南移动, 而地面上正值区已消失, 此时降雪已结束。

综上所述: 两次连续性强降雪过程在湿位涡条件上共同特点, 一是在降雪前期  $MPV1$  在降雪区中高层都为正值, 低层为负值区, 到后期低层转为弱的正值区, 为  $0 \sim 0.2$  PVU, 而  $MPV2$  则正好相反, 在降雪区中高层为大的负值区, 低层为正值区或弱的负值区; 二是低层700 hPa及以下的  $MPV1$  负值和  $MPV2$  正值在降雪前期指示了辐合区的发展, 易产生降雪, 且低层  $MPV1$  的负值区和  $MPV2$  的正值区的分布与降雪区域有较好的对应关系, 而到后期该特征不一定出现, 但中高层  $MPV1$  正值中心和  $MPV2$  负值中心维持和加强对降雪过程持续有一定指示意义。

## 4 云图分析

通过分析 FY\_2G\_TBB 分布, 可以看出2016年2月20日晚到21日05时, 从青海到甘孜州有云系发展加强东移, 到02时云系在阿坝州上空发展明显, 并逐步向东北方向移动; 从05时开始到12时(图8a), 在北抬云系中松潘县附近有云不断加强发展, 开始有降雪出现, 降雪量为  $0.1 \sim 1.5$  mm, 高空黑体亮温值为  $-55^\circ C \sim -30^\circ C$ ; 12-14时, 有  $-50 \sim -35^\circ C$  的黑体亮温低值区从高原东移发展影响到松潘, 此时小时降雪偏大, 为  $1.6 \sim 2.3$  mm。15-20时阿坝州西南部不断

有云发展东北移影响松潘,但无降水产生。

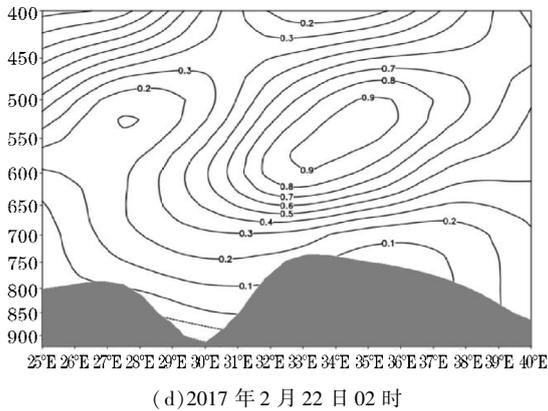
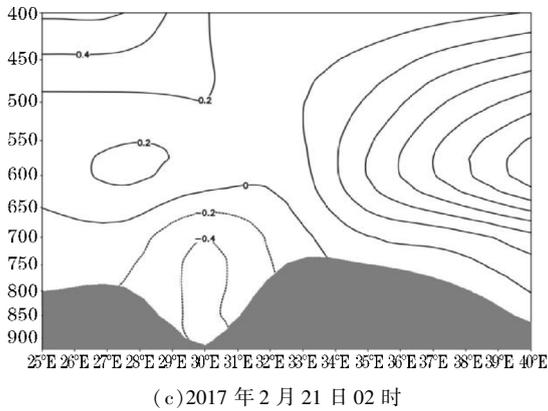
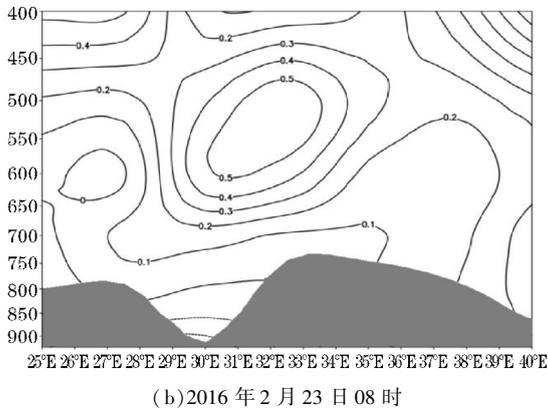
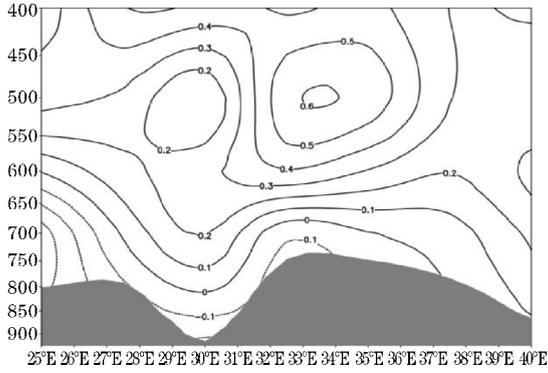


图6 2016年2月21日08时,2月23日08时,2017年2月21日02时,2月22日02时MPV1沿103.6°E经向垂直剖面图

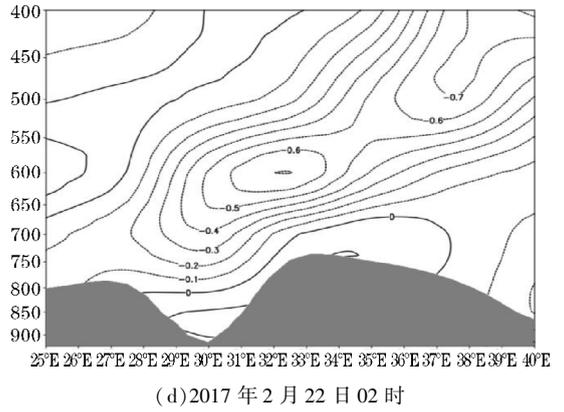
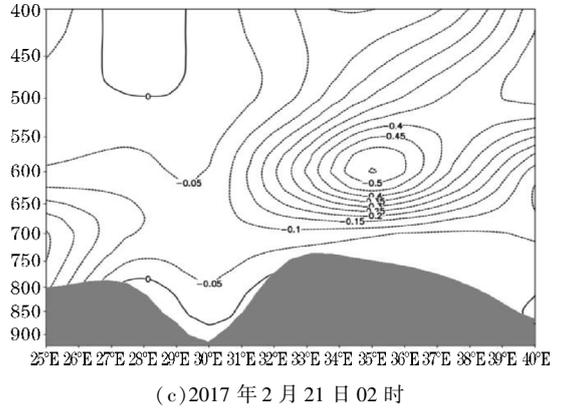
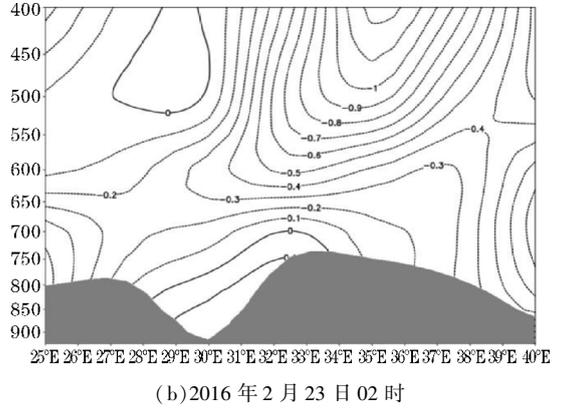
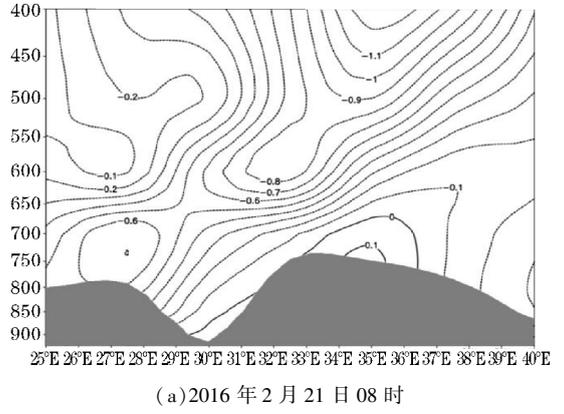


图7 2016年2月21日08时,2月23日02时,2017年2月21日02时,2月22日02时MPV2沿103.6°E经向垂直剖面图

2016年2月22日晚开始有云在川西高原逐步发展东移,到23时,在阿坝州东北部和西南部分别有两条云带逐步发展,到23日03时(图8b),云带逐步发

展加强为一条云带,而此时在松潘县从23日0时到3时,降雪量为0.2~1.1 mm,随后云带逐步北移,4时云带正好位于松潘县上空,黑体亮温为 $-50^{\circ}\text{C} \sim -35^{\circ}\text{C}$ ,但小时降雪量为0.6 mm,05时到06时云系强中心开始离开松潘,此时降雪量为1.1 mm。随后有部分低云系影响松潘,松潘降雪量为0.1~0.8 mm,到10时,随着云系北移进一步减弱使得松潘上空黑体亮温也逐步升高,降水也趋于结束。

2017年2月20日下午15时开始,在阿坝州西南部有云发展并向东北方向移动,19时开始,有分散块状云加强东北移动影响松潘县,黑体亮温为 $-55^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ ,但无降雪产生,到21日01时,块状云发展逐步合并为一强云系,01-03时(图8c)强云系主体位于松潘县上空,黑体亮温为 $-60^{\circ}\text{C} \sim -40^{\circ}\text{C}$ ,松潘县小时降雪量为1.8 mm,03时以后,随着强云系减弱向东北方移动,降雪量减小,到10时,降雪停止。

2月21日中午13时开始,同样在阿坝州西南部有云生成发展逐步向东北方向移动,17时有云团移到松潘县上空,并且阿坝州西南部不断有云快速生成加强向松潘方向移动,但松潘县无降雪产生。到23时(图8d),有块状云团位于松潘县周围,随后合并加强,快速东移,从22日0时开始降雪,在01-02时,强中心位于松潘县上空,小时降雪量达到最大,为2.7 mm,到03时,主体移出松潘,但上游继续有低云云团加强东移影响松潘县,强度为 $-50^{\circ}\text{C} \sim -35^{\circ}\text{C}$ ,降雪持续。到04时,低云云团移出松潘,降雪停止。

从这4次强降雪过程可以看出,黑体亮温值较低时,在松潘上空不一定有降雪产生,有3次过程在01-02时开始,都有云团自西南向东北方向移动,合并加强后,黑体亮温梯度明显增加,松潘开始出现降雪,且小时降雪量较大;而另外一次过程也存在亮温梯度增加后降雪开始的特征。

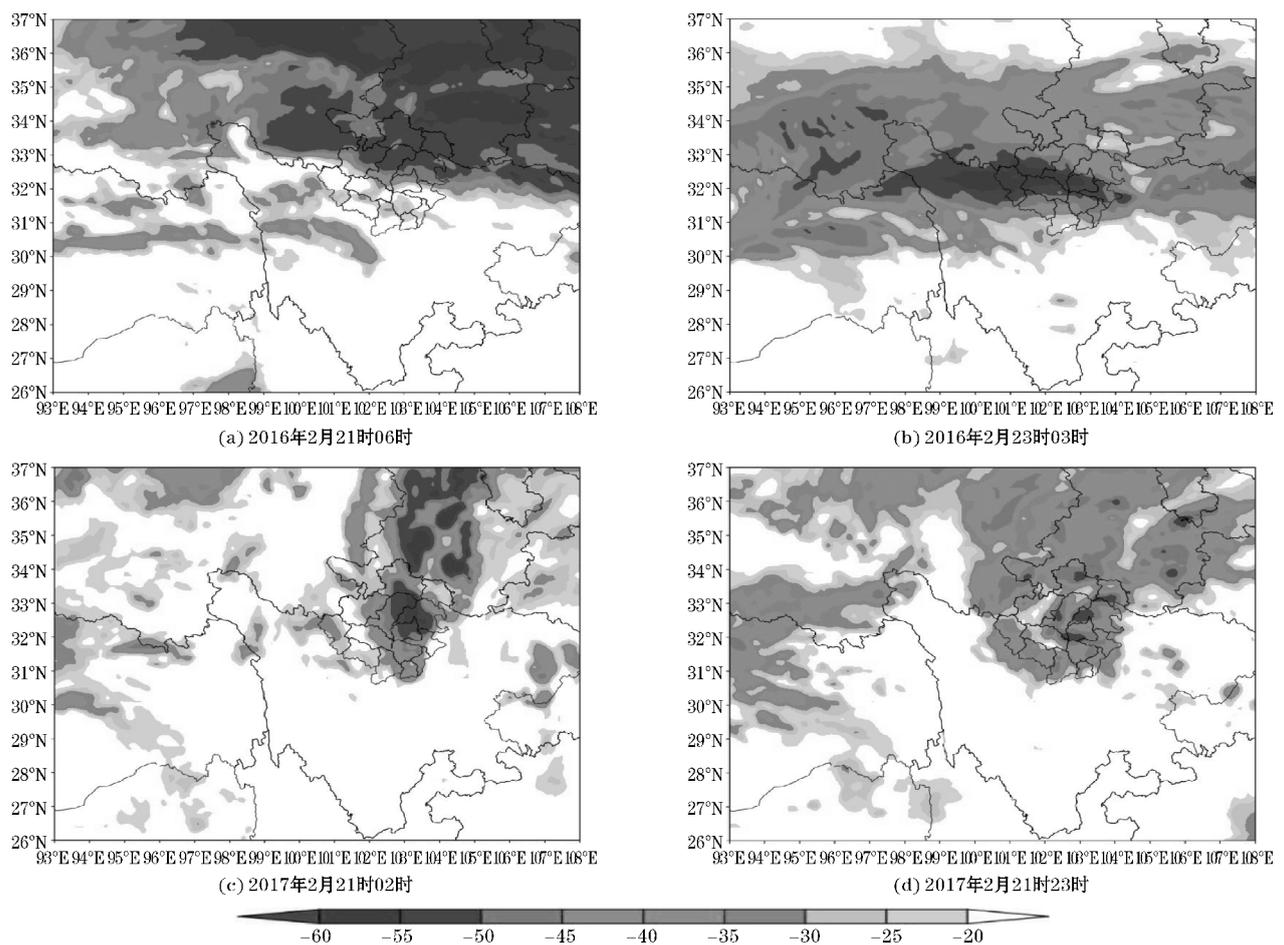


图8 2016年2月21日06时、2月23日03时、2017年2月21日02时、2月21日23时FY\_2G\_TBB(阴影,单位:°C)分布

## 5 结论

程,降雪强度大,持续时间长,主要降雪时段都在下半夜到第二天白天。

(1)500 hPa 上前期中高纬环流形势不同,但在高原上都有高原槽或西风槽影响,并且有高空锋区相配

2016年和2017年2月下旬的连续强降雪天气过

合,700 hPa都在甘肃南部有一切变南下,配合有强冷平流,地面上冷高压主体位置和移动路径不同,但冷空气都扩散南下影响到高原,由于高低空冷暖气流交汇及动力条件配合,导致前期降雪量都偏大;后期500 hPa都为南北槽叠加形式,西藏东部高原槽发展东移,与前期槽后部的西北气流形成辐合,700 hPa上在甘肃南部的锋区进一步南压,2016年较2017年偏东气流明显,形成地形抬升,地面上则继续受冷空气扩散影响,地面气温持续下降,达到0℃附近或以下。在200 hPa上松潘县都位于急流轴或急流轴入口区右侧或出口区左侧,都为辐散区,即有高空“抽吸”作用,有利于上升运动的形成和维持,使低层西南风得到加强。

(2)两次连续强降雪过程水汽源地都在孟加拉湾,前期500 hPa辐合强度大于700 hPa,后期水汽辐合强度减弱,但低层受偏东水汽通量与地形抬升关系,低层水汽辐合维持,配合500 hPa的弱水汽辐合使降雪持续。在500 hPa上降雪区前期2016年较2017年水汽通量和水汽辐合强度强,后期2016年水汽辐合弱于2017年,相应降雪量2016年较2017年前期偏大,后期偏少。在700 hPa上比湿增加都比较明显,且比湿为 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 厚度伸展到450 hPa左右,后期700 hPa比湿减小明显,但 $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 厚度都在500 hPa以上;在降雪时,都配合有低层负散度和中高层的正散度,从700 hPa散度看,2016年前期辐合强,后期弱,而2017年则前期辐合较弱,后期强,与降雪量较为吻合,而中高层辐散,2016年在500~300 hPa,而2017年在300 hPa附近。

(3)首先在降雪前期MPV1在降雪区中高层都为正值,低层为负值区,到后期低层转为弱的正值区,为0~0.2 PVU,而MPV2则正好相反;其次是低层700 hPa及以下的MPV1的负值区和MPV2的正值区的分布与降雪区域有较好的对应关系,而到后期该特征不一定出现,但中高层MPV1正值中心和MPV2负值中心维持和加强对降雪过程持续有一定指示意义。

(4)从这4次强降雪过程可以看出,黑体亮温值较低时,在松潘上空不一定有降雪产生,有3次过程在01-02时开始,都有云团自西南向东北方向移动,合并加强后,黑体亮温梯度明显增加,松潘开始出现降雪,小时降雪量较大;而另外一次过程也存在亮温梯度增加后降雪开始的特征。

## 参考文献:

- [1] 董文杰,韦志刚,范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析[J]. 高原气象,2001(4):402-406.
- [2] 马林,李锡福,张青梅,等. 青藏高原东部牧区冬季雪灾天气的形成及其预报[J]. 高原气象,2001(3):325-331.
- [3] 李德友. 川西北大草原雪灾气候特征与预报模型研究[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [4] 董安祥,罗琦,周陆生. 青藏高原东部一次大雪过程的湿位涡分析[J]. 甘肃科学学报,2001(3):43-46.
- [5] 陈晓刚,郭斌,张政. 川西高原大雪人工神经网络短期预报系统[J]. 气象,1999(8):37-39.
- [6] 青泉,张政. 阿坝牧区雪灾的短期气候预测[J]. 四川气象,1998(4):39-43.
- [7] 杨淑群,郁淑华. 应用ECMWF产品建立川西北高原牧区雪灾的中期预报方法[J]. 四川气象,1998(3):1-4.
- [8] 梁潇云,钱正安,李万元. 青藏高原东部牧区雪灾的环流型及水汽场分析[J]. 高原气象,2002(4):359-367.
- [9] 赵雅轩,梁军,石小龙,等. 2009年隆冬辽宁雨转暴雪和大雪过程对比分析[J]. 气象与环境学报,2010(5):30-35.
- [10] 周建平,孙莉莉. 2005年浙江丽水两场大雪天气过程对比分析[J]. 暴雨灾害,2007(2):163-167.
- [11] 吴国雄,蔡雅萍,唐晓菁. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报,1995,53(4):387-404.
- [12] 周陆生,李海红,汪青春. 青藏高原东部牧区大—暴雪过程及雪灾分布的基本特征[J]. 高原气象,2000(4):450-458.
- [13] KOU Si-cong, CAO Wen. Analysis on the Heavy Snow Weather Process in Benxi Area[J]. Meteorological and Environmental Research, 2011(1): 24-27.
- [14] 段安民,吴国雄,刘屹岷,等. Weather and Climate Effects of the Tibetan Plateau[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(5): 978-

- 992.
- [15] MAO Jiang-Yu. Interannual Variability of Snow Depth over the Tibetan Plateau and Its Associated Atmospheric Circulation Anomalies [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3(4): 213–218.
- [16] 王东海,柳崇健,刘英,等. A Preliminary Analysis of Features and Causes of the Snow Storm Event over the Southern Areas of China in January 2008 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2009, 23(3): 374–386.

## Comparative Analysis of two Consecutive Heavy Snowfall Processes in the Eastern Part of the Western Sichuan Plateau

WU Jing-feng<sup>1</sup>, LIU Jing-ying<sup>2</sup>, ZHANG Yong-li<sup>3</sup>

(1. Aba Songpan County Meteorological Bureau, Songpan 623300, China; 2. Barkam City Meteorological Bureau, Barkam 624000, China; 3. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract:** According to the analysis of 21-February 2016 23 and February 2017 21–22 days in eastern Sichuan Plateau continuous heavy snowfall process, analysis of the circulation background and the physical quantity field research data analysis, the conventional surface and upper data, and NCEP satellite data were used. The results show that the front of the snow is a plateau trough or a westerly trough, and it has the influence of the high-altitude front zone. The southern part of the 700 hPa is sheared southward in the south of Gansu, and the cold high pressure on the ground diffuses to the plateau, and the later is the superposition of the north and south trough. Low level moisture source in the bay of Bengal, early water vapor flux, high humidity, water vapor flux over late weak, small, but the low layer East water vapor flux and the topography, combined with water vapor convergence of 500 hPa, makes continuous snowfall. When snow falls, there is a strong vertical upward movement, which is related to the elevation of terrain, and there is a relationship between the rising height and the intensity of snowfall. The wet snow is positive vorticity in high *MPV1*, low level negative area to the late low layer to weak positive region, and *MPV2* is just the opposite. The satellite pictures of 3 snow begins at 1 to 2 o'clock, and there are clouds with enhanced snowfall TBB gradient increasing obviously, and in the hour there is a large amount of snow.

**Keywords:** meteorology; plateaumeteorology; continuous heavy snowfall; orographic forcing; vapor flux; specific humidity; vertical velocity; moist potential vorticity