

# Diagnosis Analysis of a Heavy Snow Caused by Inverted Trough in He-Dong of Gansu Province

Quan Xia<sup>1,2</sup>, Fangrong Wu<sup>1</sup>, Minjin Ma<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Meteorological Bureau of Baiyin, Baiyin Gansu

<sup>2</sup>College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou Gansu

Email: [xiaquan20@126.com](mailto:xiaquan20@126.com)

Received: Mar. 10<sup>th</sup>, 2015; accepted: Mar. 22<sup>nd</sup>, 2015; published: Mar. 27<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

By using the data of upper-air sounding and surface observations, an analysis was performed on heavy snow process taking place in He-Dong of Gansu province from 15 to 17 February, 2014. The results showed that this heavy snow process is a combined consequence of surface inverted trough, eastward returning current and Plateau short-wave trough; the eastward returning current provided a cooling cushion to southwest warm and wet current. In the snow process, the thermal instability condition was weaker, but there was strong dynamic instability, and the difference of wind vector in middle level was about  $21.0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . The main water vapor source of this snow process was southwest warm and wet current in front of Plateau trough; meanwhile, in lower level there was a water vapor convergence center and the returning current was moist air, so it helped vertical transport of water vapor. The positive vorticity advection and strong warm advection of 500 hPa were the direct dynamic factors that led to convergence in low level, divergence in upper level and vertical ascending motion; these factors promoted surface inverted trough's continuously development and convergence line was to strengthen. The superposed time of eastward returning current and southwest warm and wet current can be used to forecast the occurring time of this kind of snow process. There were three physics characteristics providing good indicators to snow magnitude: water vapor flux, vorticity advection and temperature advection of 500 hPa.

## Keywords

He-Dong of Gansu Province, Heavy Snow, Inverted Trough, Returning Current, Temperature Advection, Vorticity Advection

---

# 甘肃河东地区一次倒槽作用下的致灾强降雪过程诊断分析

夏 权<sup>1,2</sup>, 吴芙蓉<sup>1</sup>, 马敏劲<sup>2</sup>

<sup>1</sup>白银市气象局, 甘肃 白银

<sup>2</sup>兰州大学大气科学学院, 甘肃 兰州

Email: [xiaquan20@126.com](mailto:xiaquan20@126.com)

收稿日期: 2015年3月10日; 录用日期: 2015年3月22日; 发布日期: 2015年3月27日

## 摘 要

利用常规高空、地面观测资料及物理量场资料, 对2014年2月15~17日甘肃河东地区大到暴雪天气过程进行诊断分析, 结果表明: 此次强降雪过程是地面倒槽、东风回流与高原东移短波槽共同作用下产生的, 东风回流起到冷垫作用, 使得短波槽前暖湿气流沿冷垫爬升为强降雪的产生提供了动力抬升条件。过程中热力不稳定条件较弱, 但存在较强的动力不稳定, 中层0~6 km风矢量差为21.0 m·s<sup>-1</sup>左右。500 hPa高原短波槽前西南暖湿气流是本次强降雪过程的主要水汽来源, 同时低层东风回流湿度较高, 配合强水汽辐合中心, 有利于水汽的垂直输送。500 hPa正涡度平流和强暖平流是导致低层辐合、高层辐散和垂直上升运动的最根本动力因子, 并且促使了地面倒槽不断发展、辐合线加强。低层东风回流和中层槽前暖湿气流叠置的时间可以用来判断此类过程降雪发生的时段, 与高空槽前西南暖湿气流相对应的水汽通量强度以及高空涡度平流和温度平流强度对过程降雪量级有很好的指示意义。

## 关键词

甘肃河东, 强降雪, 倒槽, 回流, 温度平流, 涡度平流

## 1. 引言

暴雪是发生几率相对较小、预报难度大且容易出现漏报的灾害性天气。不少预报和科研人员对发生在我国不同区域的暴雪过程进行了研究[1]-[9], 取得了很多有意义的进展。倒槽和回流系统造成的暴雪在我国北方较为常见, 很多气象工作者针对此类过程进行了研究, 如赵桂香[10]分析了山西中南部一次暴雪过程, 认为倒槽前暖湿空气与北方冷空气强烈交汇, 是造成暴雪的主要原因; 周雪松等[11]用 WRF 模拟了华北一次回流暴雪过程, 得出过程中动力锋生机制发挥了重要作用, 其产生的锋面次级环流是造成这次暴雪的主要原因; 孙仲毅等[12]对河南北部一次暴雪过程进行了诊断分析, 指出低空急流、地面河套倒槽与回流形势同时强烈发展导致持续性暴雪的发生; 董林等[13]分析了 2011 年北京隆冬初雪过程, 认为东风回流具有冷湿特性, 在过程中起到冷垫作用。综合这些研究, 我们发现不同过程中东风回流的特性以及倒槽所起的作用并不相同。

甘肃冬季降雪稀少, 有关暴雪方面的研究并不多。2014 年 2 月 15~17 日在高原短波槽和地面倒槽及东风回流共同作用下出现了一次区域性大到暴雪天气过程, 这次强降雪过程各台站预报的降雪量级普遍

偏低,一方面同期气候背景下很少出现强降雪(2月历年月平均降水量仅为2~8 mm),另一方面甘肃的强降雪一般发生在南北支槽同位相叠加或大槽东移的环流背景下[14],小槽与地面倒槽形势下的强降雪并不多见,这是对降雪量级估计不足的原因。为完善本地强降雪预报的概念模型,本文采用常规地面、高空气象要素资料以及物理量场资料,从环流背景、水汽来源、不稳定条件以及动力机制等方面对此次过程进行分析诊断,并建立流型配置模型,以期了解此类天气过程的发生机理并为今后强降雪预报积累经验。

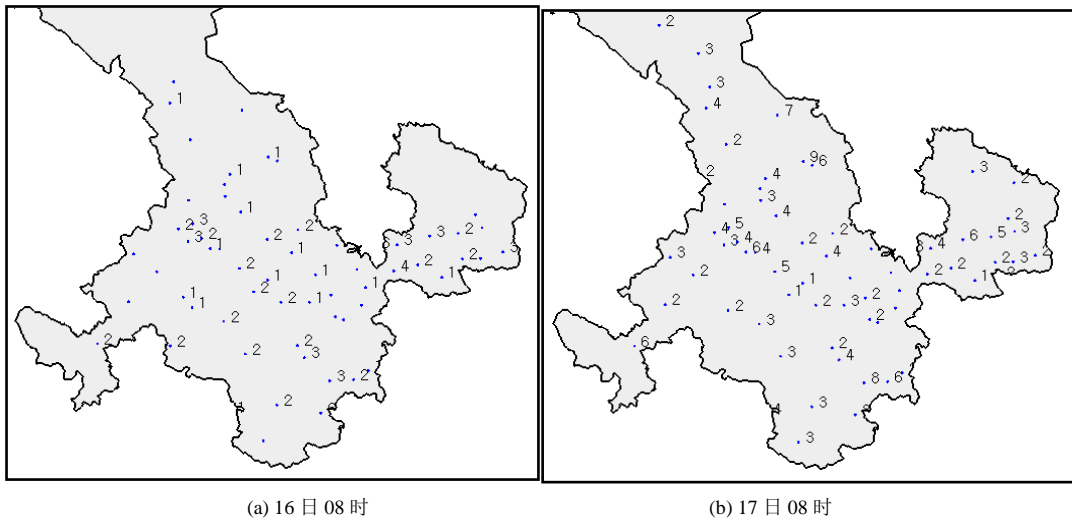
## 2. 天气实况

2014年2月15~17日甘肃河东地区普降中到大雪,部分地方出现大到暴雪。降雪从2月15日20:00前后开始,强降雪最集中的时段主要在2月16日8:00至20:00。其中,24h降雪量达到大到暴雪的站点有3个(白银、成县和康县降雪量 $\geq 7.5$  mm),最大日降雪量出现在白银(10.2 mm),达到暴雪量级( $\geq 10$  mm);大雪( $\geq 5$  mm)以上的测站有9个,分别为景泰、靖远、康乐、徽县、镇原、西峰、玛曲、东乡和渭源;有18个测站24h降雪量 $\geq 3.8$  mm,为中到大雪量级(图1)。从积雪厚度来看,陇中北部的白银、靖远积雪厚度超过10 cm,玛曲县欧拉、采日玛、齐哈玛等乡局部地方积雪厚度超过15 cm,形成严重的白灾。对于处于冬旱季的甘肃河东地区而言此次过程降雪量、降雪强度以及积雪深度均属历史罕见,降雪造成河东大部道路积雪结冰、部分高速公路关闭,公路客运严重受阻,车辆追尾等交通事故频发,对春运返程及旅游交通带来极为不利的影响,另外,由于气温骤降,导致甘南等地牲畜受灾,据统计甘南死亡各类牲畜共计1049头(只、匹),仅此项直接经济损失就达253.08万元。据不完全统计,整个过程造成的直接和间接经济损失超过亿元。

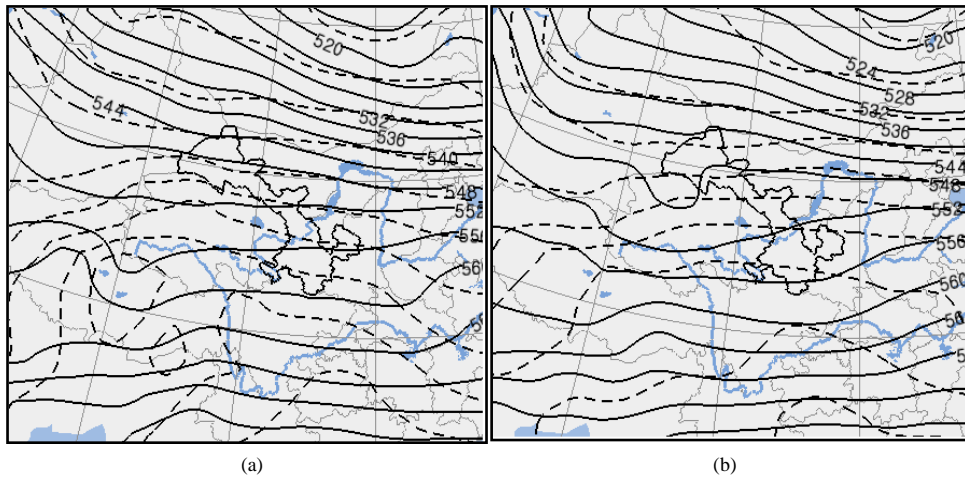
## 3. 天气形势特征

降雪过程前,500 hPa亚欧中高纬度巴尔喀什湖至鄂霍茨克海西部为宽广的低压槽区,槽后乌拉尔山脊强烈发展,脊前偏北气流引导冷空气南下,中低纬度地区以纬向环流为主,甘肃河东就处于纬向偏西气流中。15日20时500 hPa图上(图2(a)),青藏高原有短波槽生成,槽区位于西藏中东部至青海东南部,温压场呈反位相配置,槽区对应 $-10^{\circ}\text{C}$ 的暖脊中心,槽前西南风发展,同时巴尔喀什湖槽底分裂一股冷空气沿西北气流下滑至南疆盆地。16日08时(图2(b)),高原短波槽发展北抬至青海中部,北支锋区底部分裂的冷空气与之同位相叠加,槽后冷平流较强( $-22 \times 10^{-6} \text{C}\cdot\text{s}^{-1}$ ),甘肃河东地区受槽前西南气流影响,暖湿平流( $T - T_d \leq 3^{\circ}\text{C}$ )显著增强。700 hPa图上,15日20时北支锋区位于 $40^{\circ}\text{N}$ 附近,青藏高原东部川藏交界处有一低涡,低涡对应 $12^{\circ}\text{C}$ 的暖中心,低涡前部甘陕川一带为冷温度槽,湿区( $T - T_d \leq 2^{\circ}\text{C}$ )显著增强。16日08时,700 hPa甘肃河东地区转为一致的东南风,湿区进一步北抬,温度槽有所加深,说明低层东南风具有冷湿特性。降雪将近结束时,16日20时500 hPa(图略)短波槽系统已经减弱东移,河东地区转为槽后西北气流,冷平流较强;700 hPa温度槽填塞,东南气流明显减弱。500 hPa和700 hPa湿度条件均明显下降( $T - T_d \geq 4^{\circ}\text{C}$ )。

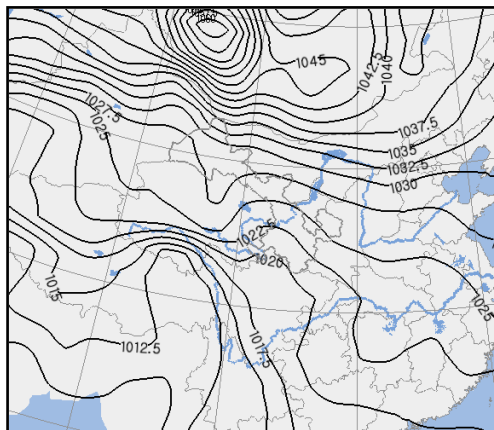
地面图上,降雪出现前期,大陆冷高压位于我国中东部,高压后部倒槽系统经四川发展到甘肃河西地区东部,河东地区处于倒槽系统中。15日20时,倒槽前部建立起一支偏东气流,引导大陆高压后部冷空气向西移动侵入甘肃河东地区,回流形势形成且偏东风影响区域开始出现降雪。16日08时(图3(a)),河东倒槽发展加深,位于倒槽以西的青海东部有冷高压东移南压,这是高空短波槽引导的西路冷空气在地面气压场的表现,倒槽前偏东风风速增加到 $4\sim 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,与其后部偏北风在甘肃陇南-定西到白银一线形成辐合,从而使甘肃河东地区倒槽系统进一步发展。16日20时,倒槽系统明显减弱。17日08时,冷高压南下,河东地区转为高压控制,降雪过程结束。



**Figure 1.** The distribution of 24 h snowfall at 08:00 BT 16 (a) and 17 (b) (unit: mm)  
**图 1.** 2014 年 2 月 16~17 日甘肃河东地区 24 h 降水量分布(单位: mm)



**Figure 2.** Synoptic charts of 500 hPa at (a) 20:00 BT 15 February 2014, (b) 08:00 BT 16 February 2014  
**图 2.** 2014 年 2 月(a)15 日 20 时和(b)16 日 08 时 500 hPa 形势场(实线: 等高线; 虚线: 等温线)



**Figure 3.** Surface weather situations at 08:00 BT 16 February 2014  
**图 3.** 2014 年 2 月 16 日 08 时地面形势图

## 4. 强降雪成因分析

### 4.1. 不稳定条件分析——单站探空资料分析

图 4(a)和图 4(b)为 2014 年 2 月 16 日 08 时(强降雪发生时)武都、榆中两站的  $T$ - $\ln p$  图。由图可知, 500 hPa 以下温度与露点非常接近, 相对湿度 $\geq 80\%$ 层的湿层深厚, 尤其是武都站 650 hPa 以下的露压线与温压线基本重合, 说明对流层中低层空气接近饱和状态。在 550 hPa 附近各物理量均表现为高值(表 1), 西南风强劲, 此时高空正受槽前西南暖湿气流影响, 温湿条件较好, 高凝结函数表明大气中可降水量充沛。从温度层结看, 600 hPa 附近两站均有逆温层存在。榆中站整层  $\gamma$  较小,  $\gamma < \gamma_s$ , 其热力性质属于绝对稳定; 武都站 700 hPa 以下温压线与湿绝热线基本重合,  $\gamma = \gamma_s$ , 说明低层为中性层结, 700 hPa 以上  $\gamma < \gamma_s$ , 层结稳定, 两探空站  $\theta_{se}$  的垂直分布也显示整层均为  $\partial\theta_{se}/\partial p < 0$  的热力稳定层结。但是大气不稳定是由热力

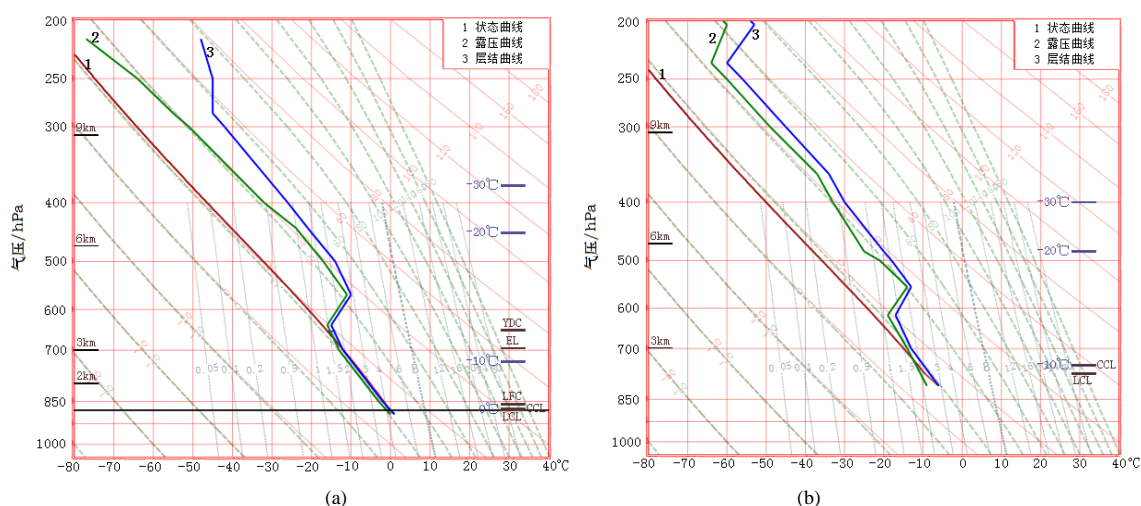


Figure 4.  $T$ - $\ln p$  profile of Wudu (a) and Yuzhong (b) in Gansu at 08:00 BT 16 February 2014

图 4. 2014 年 2 月 16 日 08 时甘肃武都(a)、榆中(b)两探空站  $T$ - $\ln p$  图

Table 1. Sounding physical quantities of Wudu and Yuzhong at 8:00 BT 16 February 2014

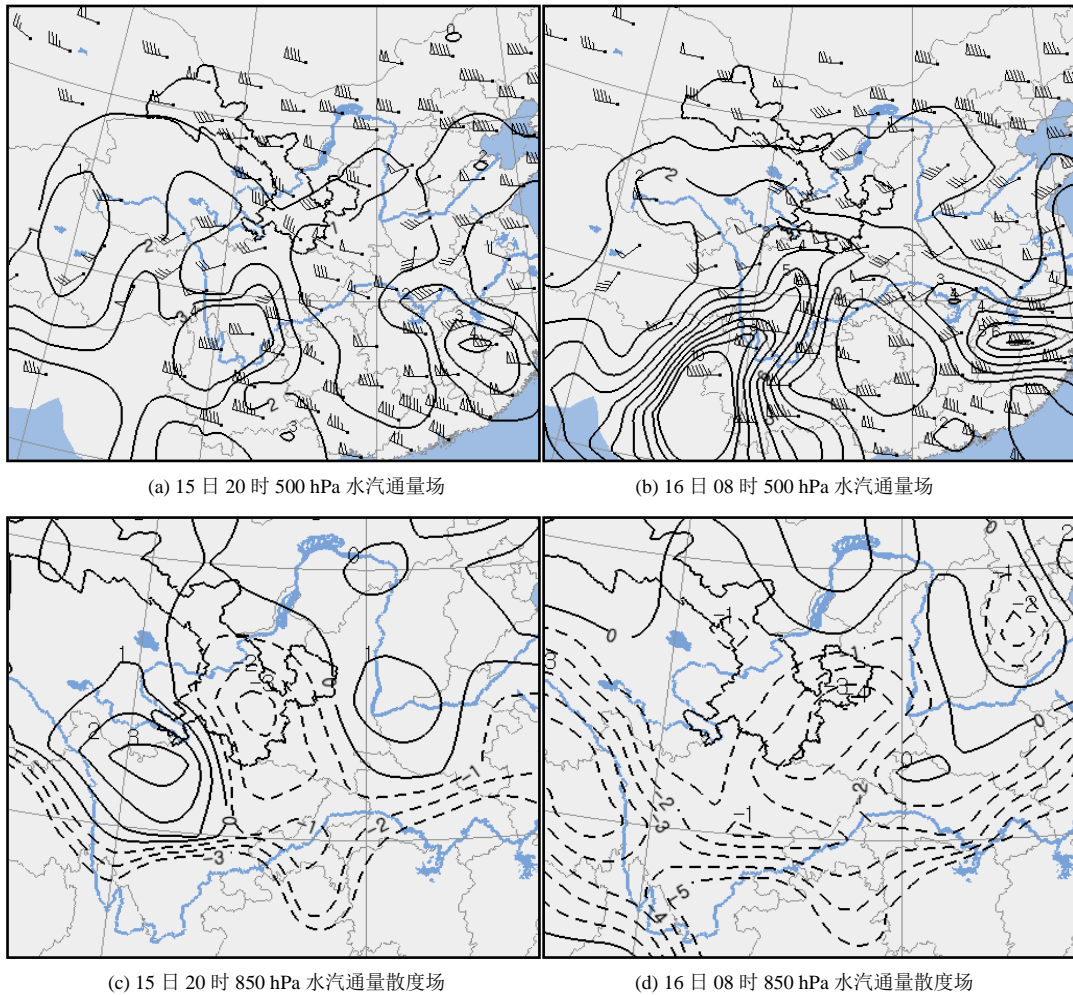
表 1. 2014 年 2 月 16 日 08 时武都、榆中探空物理量

探空站	层次/hPa	物理量参数				
		$T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_d$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	比湿 (g/kg)	饱和比湿 (g/kg)	凝结函数 (g/hPa)
武都	850	-2	-3	3.49	3.8	1.95
	700	-12	-13	1.76	1.93	1.27
	<b>560</b>	<b>-10</b>	<b>-11</b>	<b>2.61</b>	<b>2.85</b>	<b>2.29</b>
	500	-14	-17	1.7	2.25	1.75
	400	-26	-32	0.47	0.88	0.67
榆中	807	-6	-9	2.19	2.85	1.33
	616	-17	-19	1.14	1.38	0.97
	<b>553</b>	<b>-13</b>	<b>-14</b>	<b>2.04</b>	<b>2.23</b>	<b>1.86</b>
	500	-18	-21	1.16	1.55	1.22
	400	-30	-33	0.43	0.59	0.6

不稳定和动力不稳定共同决定的，以上分析只能说明此次过程热力不稳定较弱，其动力稳定性如何呢？从水平风垂直分布来看(图 4)，武都、榆中两站低层 0~3 km 风矢量差分别为 3.0 和 3.4  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ，中层 0~6 km 风矢量差分别为 20.8 和 21.0  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。研究表明[15] 0~6 km 风切变  $\geq 20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  属于强垂直风切变，本次过程低层风切变较弱，但中高层达到强垂直风切变标准。综合以上可知，这次强降雪过程发生在弱热力强动力条件下，过程发生时存在较强的动力不稳定。

#### 4.2. 水汽条件

冬季属于西北地区旱季，即便出现降雪，量级也不会太大，原因是水汽供应不足，因此降雪过程一般在水汽场上反映微弱，但本次过程相对清晰。500 hPa 水汽通量场上(图 5(a))，15 日 20 时，与高原槽相对应的槽前西南暖湿气流主要位于青藏高原东南部，西南风影响区域对应水汽通量  $\geq 2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$  的相对高值区，甘肃河东地区仍然受西北气流影响，水汽通量场上表现为  $1 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$  左右的低值区。16 日 08 时(图 5(b))，随着高原槽发展东移，槽前西南气流影响甘肃河东地区，此时水汽通量的大值带伸向该区，该区水汽通量明显上升，陇南地区达 2~3  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ ，这说明西南暖湿气流是此次降雪过程的主要水汽来源。从 850 hPa 水汽通量散度场看，15 日 20 时(图 5(c))，河东地区处于  $-3 \times 10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$



**Figure 5.** The superposition of 500 hPa vapor flux and wind field, and 850 hPa vapor flux divergence field  
**图 5.** 500 hPa 水汽通量(单位:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ )和风场叠加图以及 850 hPa 水汽通量散度场(单位:  $10^{-7} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ )

的水汽辐合中心，这在西北地区冬季属于很强的辐合值，16日08时(图5(d))，强辐合中心有所东移，但仍然影响河东地区，说明过程前和过程中该区低层始终维持较强的水汽辐合。由图3可知，武都站850 hPa水汽压  $e_a = 657$  hPa，榆中站  $e_a = 369$  hPa，低层湿度极大且接近饱和，那么较强的水汽辐合有利于水汽的垂直输送，加之中层的暖湿平流，使得降雪区整个对流层中低层都具有充沛的水汽条件和较强的水汽辐合，这对于强降雪的产生十分有利。

### 4.3. 强降雪的动力机制

一般从涡度、散度和垂直速度场上就可以直观的分析生产强天气的动力条件，本次过程500 hPa涡度场上甘肃河东地区有  $\geq 20 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  正涡度，散度场上低层辐合、高层辐散，垂直速度场上对流层中低层均处于上升运动区(图略)。为什么会产生较强的辐合、辐散以及垂直上升运动？要解释其深层原因就需要进一步揭示引发强降雪的动力机制和物理实质，为此我们引入  $\omega$  方程[16]：

$$\left( \sigma \nabla^2 + f^2 \frac{\partial^2}{\partial P^2} \right) \omega = f \frac{\partial}{\partial P} \left[ V_g \cdot \nabla (f + \zeta_g) \right] - \nabla^2 \left[ V_g \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial P} \right] - \frac{R}{c_p P} \nabla^2 \frac{dQ}{dt} \quad (1)$$

由地转风关系可知，方程右端第一项为地转涡度平流的垂直微商；由静力学关系可知，右端第二项为厚度平流(即温度平流)的拉普拉斯；再由热力学方程可知，右端第三项为非绝热加热的拉普拉斯，然而在研究短期天气问题时大多针对大尺度系统，非绝热作用对大尺度系统的局地温度变化以及垂直运动的影响几乎可以忽略，因此，我们只讨论涡度平流和温度平流这两个最关键因子的作用。

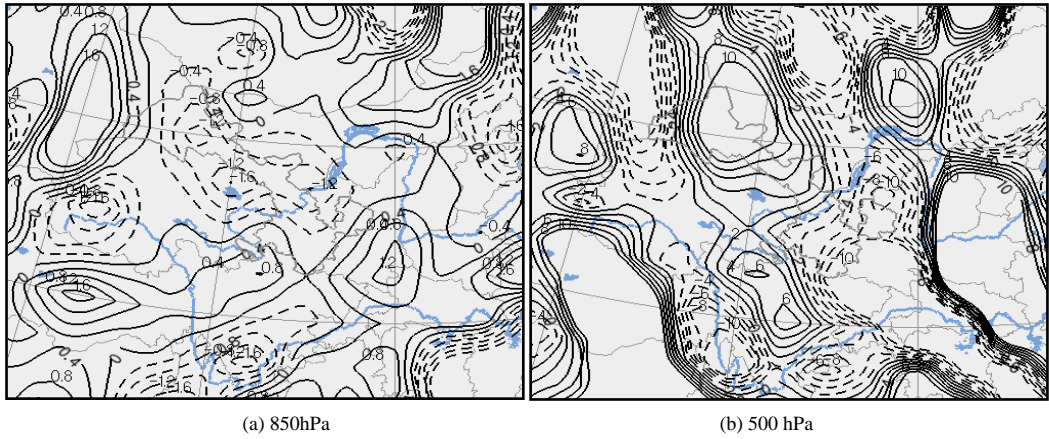
#### 4.3.1. 涡度平流 $[-V_g \cdot \nabla (f + \zeta_g)]$

根据  $\omega$  方程，式(1)左端  $f^2 \frac{\partial^2}{\partial P^2} \omega$  与等号右端涡度平流的垂直微商  $f \frac{\partial}{\partial P} [V_g \cdot \nabla (f + \zeta_g)]$  相对应，涡度平流  $[-V_g \cdot \nabla (f + \zeta_g)]$  随高度增加时， $\frac{\partial}{\partial P} [V_g \cdot \nabla (f + \zeta_g)] > 0$ ，有上升运动 ( $\omega < 0$ )。本次过程临近时，近地面为低压倒槽控制，涡度平流很小，850 hPa (图6(a)) 涡度平流并不明显 ( $|-V_g \cdot \nabla (f + \zeta_g)| < 1 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ )，而500 hPa 短波槽前正涡度平流已经逼近甘肃河东地区(图6(b))，正涡度平流中心值达到  $10 \times 10^{-10} \text{ s}^{-2}$ ，于是降雪过程中河东地区近地面至500 hPa 涡度平流随高度增加，产生上升运动。其原因是500 hPa 高空强正涡度平流使得该层气旋性涡度增加(涡度场上局地正涡度加强)，导致地转平衡破坏，气旋环流的增加必然伴随地转偏向力的增加，在地转偏向力的作用下产生辐散，为了保持质量连续，500 hPa 以下会出现补偿上升运动，从而强迫出低层的辐合，也促使地面倒槽发展加深。

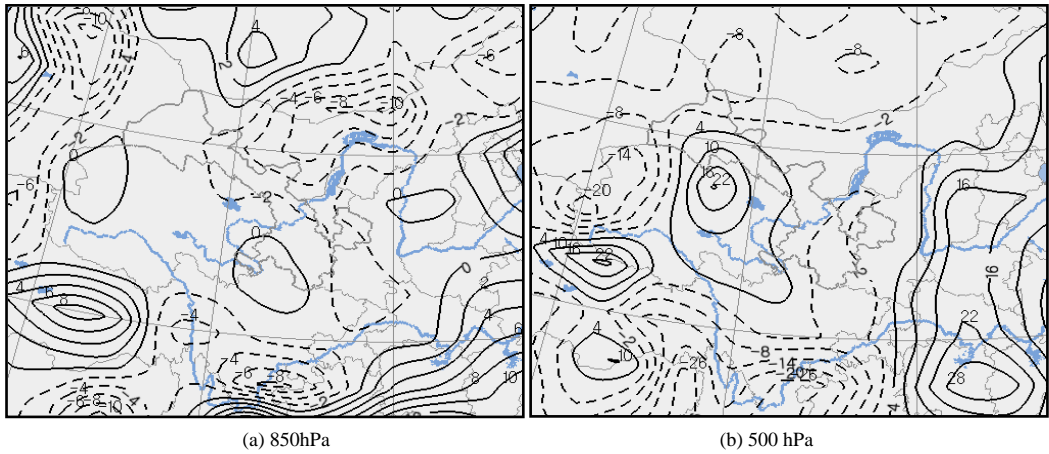
#### 4.3.2. 温度平流 $[-V_g \cdot \nabla T]$

式(1)左端  $\omega$  的拉普拉斯  $\sigma \nabla^2 \omega$  项和等号右端温度平流的拉普拉斯项  $-\nabla^2 \left[ V_g \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial P} \right]$  相对应，将静力学方程代入右端第二项可得  $-\nabla^2 \left[ V_g \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial P} \right] \propto V_g \cdot \nabla \frac{\partial \phi}{\partial P} = -\frac{R}{P} V_g \cdot \nabla T$ ，因此暖平流区 ( $-V_g \cdot \nabla T > 0$ )，有上升运动 ( $\omega < 0$ )。15日20时，850 hPa (图7(a)) 有弱的冷平流，陇东地区冷平流相对明显，达到  $-2.6 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 。500 hPa 高空短波槽槽线位于青海中部，槽前有强盛的暖平流(图7(b))，暖平流中心为  $20 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ ，随着短波槽的发展东移，暖平流中心移至甘肃河东地区，强降雪随即发生。500 hPa 强暖平流导致局地增暖，受其影响，甘肃河东地区气柱密度减小而厚度增加，上层等压面凸起，下层等压面下凹，致使温压场不平衡，在气压梯度力的作用下，上层产生水平辐散，而近地面因为质量补偿而出现降压，同时产生水平辐合(地面倒槽进一步发展，地面辐合线加强)，从而使垂直运动得到加强。

本次过程中散度场和垂直速度场上，低层辐合、高层辐散、500 hPa 以下都存在较强的垂直上升运动，



**Figure 6.** The 850 hPa (a) and 500 hPa (b) vorticity advection at 20 BT 15 February 2014 (unit:  $10^{-10} \cdot s^{-2}$ )  
**图 6.** 2014 年 2 月 15 日 20 时涡度平流(单位:  $10^{-10} \cdot s^{-2}$ )



**Figure 7.** The 850 hPa (a) and 500 hPa (b) temperature advection at 20 BT 15 February 2014 (unit:  $10^{-6} \cdot C \cdot s^{-1}$ )  
**图 7.** 2014 年 2 月 15 日 20 时温度平流(单位:  $10^{-6} \cdot C \cdot s^{-1}$ )

地面图上强降雪过程中地面倒槽不断发展、地面辐合线加强，这与以上分析的高空正涡度平流和暖平流导致辐合辐散、垂直上升运动以及促使地面气旋发展加深的关系十分吻合。强降雪发生时段与 500 hPa 正涡度平流和暖平流影响河东地区的时段基本一致，过程临近结束时(16 日 20 时)，正涡度平流中心和暖平流中心均移出甘肃(图略)，河东地区 500 hPa 高空转为负涡度平流和短波槽后冷平流，这说明 500 hPa 正涡度平流和强暖平流是导致强降雪发生的最根本动力因子。不同的是涡度平流通过破坏风压场平衡引起地转偏向力的变化而产生垂直运动，温度平流则通过破坏温压场平衡引起气压梯度力的变化而产生垂直运动。

### 5. 强降雪过程流型配置模型

从本次强降雪过程流型配置模型看(图 8)，200 hPa 上  $\geq 60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  的高空急流位于青藏高原至四川北部，甘肃河东地区处在急流出口区左前方的辐散区，有利于垂直上升运动的维持和发展。500 hPa 上高原短波槽位于青海中部，降雪区受槽前显著西南风影响且有温度脊对应， $T - T_d \leq 3^\circ\text{C}$  的显著湿区中心覆盖降雪区，暖湿气流强盛。700 hPa 上青藏高原东部有中心强度为 2980 gpm 的低涡，低涡对应  $4^\circ\text{C}$  的暖中心，在暖性低涡东侧为冷温槽，河东地区处在  $-12^\circ\text{C}$  的冷槽中心。近地面甘肃河东地区位于强烈发展的



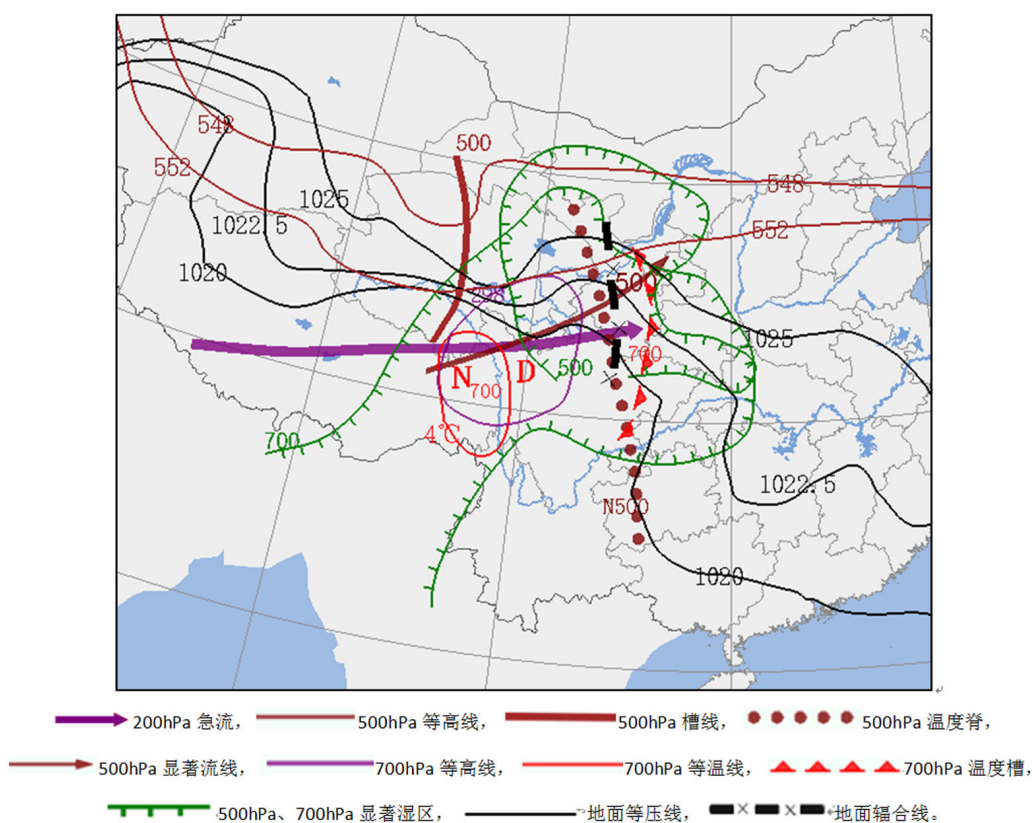


Figure 8. Flow configuration model of the heavy snowfall

图 8. 强降雪的流型配置模型

低压倒槽中心，倒槽前部、后部均为冷高压，东西两路冷空气在甘肃白银至甘南陇南一线形成西北风与偏东风的辐合，辐合线对强降雪的发生提供了动力抬升条件。总的来说，此次甘肃河东强降雪过程是由高原短波槽、地面倒槽及东风回流共同作用产生的，地面倒槽的发展加强了近地面的辐合，东风回流起到冷垫作用，高原槽前西南暖湿气流携带丰富水汽沿冷垫爬升造成强降雪的发生。

## 6. 结论与讨论

此次甘肃河东强降雪过程是地面倒槽、东风回流与高原东移短波槽共同作用下产生的，东风回流起到冷垫作用，使得短波槽前暖湿气流沿冷垫爬升，地面倒槽的发展使低层辐合增强，为强降雪的产生提供了动力抬升条件。这次过程发生在弱热力强动力条件下，也就是热力不稳定条件较弱，但存在较强的动力不稳定，中层 $0\sim 6\text{ km}$ 风矢量差为 $21.0\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右，达到强垂直风切变标准。500 hPa高原短波槽前西南暖湿气流是本次强降雪过程的主要水汽来源，同时低层空气接近饱和，配合强水汽辐合中心，有利于水汽的垂直输送。500 hPa正涡度平流和强暖平流是导致低层辐合、高层辐散和垂直上升运动的最根本动力因子，并且促使了地面倒槽不断发展、辐合线加强，可以用于预报垂直运动以及天气系统的发展。从流型配置模型看，200 hPa高空急流出口辐散区、500 hPa短波槽前显著的西南暖湿气流和温度脊、对流层中低层高湿区、700 hPa冷温度槽、地面倒槽和边界层辐合线等都是值得关注的系统，当这些系统有利配置时，容易形成充沛的水汽供应并建立较强的动力抬升机制。

从前期地面图上看，降雪过程前(14日)河东地区就有倒槽生成，但地面风场比较凌乱，东风回流尚未出现，过程临近时，地面出现一致的偏东风，东风回流显著增强，同时高空槽前暖湿气流影响降雪区，

这说明仅地面倒槽并不能产生降雪，一定要有西来槽和东风回流的结合，但地面倒槽产生的低层辐合是强降雪发生的重要动力因子。低层东风回流和槽前暖湿气流叠置的时间可以用来判断此类过程降雪发生的时段，与槽前西南暖湿气流相对应的水汽通量强度以及高空涡度平流和温度平流强度对过程降雪量级有很好的指示意义。

## 基金项目

干旱气象科学研究基金项目(IAM201209)、兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzujbky-2012-120)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 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*, **4**, 451-460.
- [2] 刘宁微, 齐琳琳, 韩江文 (2009) 北上低涡引发辽宁历史罕见暴雪天气过程的分析. *大气科学*, **2**, 275-284.
- [3] 王正旺, 苗爱梅, 庞转棠, 等 (2010) 山西中南部区域性暴雪天气诊断分析. *高原气象*, **2**, 531-538.
- [4] 苗爱梅, 贾利冬, 李智才, 等 (2011) “091111”山西特大暴雪过程的流型配置及物理量诊断分析. *高原气象*, **4**, 969-981.
- [5] 阿依夏木, 孔期, 杨贵名 (2007) 2005年11月哈密暴雪天气过程的诊断分析. *气象*, **6**, 67-74.
- [6] 孙继松, 梁丰, 陈敏, 等 (2003) 北京地区一次小雪天气过程造成路面交通严重受阻的成因分析. *大气科学*, **6**, 1057-1066.
- [7] 赵俊荣, 杨雪, 蔺喜禄, 等 (2013) 一次致灾大暴雪的多尺度系统配置及落区分析. *高原气象*, **1**, 201-210.
- [8] 孟雪峰, 孙永刚, 姜艳丰 (2012) 内蒙古东北部一次致灾大到暴雪天气分析. *气象*, **7**, 877-883.
- [9] 侯瑞钦, 张迎新, 范俊红, 等 (2011) 2009年深秋河北省特大暴雪天气成因分析. *气象*, **11**, 1352-1359.
- [10] 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*, **11**, 41-48.
- [11] 周雪松, 谈哲敏 (2008) 华北回流暴雪发展机理个例研究. *气象*, **1**, 18-26.
- [12] 孙仲毅, 王军, 靳冰凌, 等 (2010) 河南省北部一次暴雪天气过程诊断分析. *高原气象*, **5**, 1338-1344.
- [13] 董林, 符娇兰, 宗志平 (2012) 2011年隆冬北京初雪成因分析. *气象*, **8**, 913-920.
- [14] 白肇烨, 徐国昌 (1988) 中国西北天气. 气象出版社, 北京, 142-144.
- [15] 张一平, 俞小鼎, 孙景兰, 等 (2014) 2012年早春河南一次高架雷暴天气成因分析. *气象*, **1**, 48-58.
- [16] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等 (2007) 天气学原理与方法(第四版). 气象出版社, 北京, 117-122.