

2005 年 11 月哈密暴雪天气 过程的诊断分析

阿衣夏木·尼亚孜^{1,2} 孔 期¹ 杨贵名¹

(1. 国家气象中心,北京 100081; 2. 新疆维吾尔自治区哈密地区气象局)

提 要: 2005 年 11 月 18 日凌晨至 20 日,哈密出现罕见暴雪天气过程,此次降雪强度大,范围集中,南部大,北部小。利用 NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的 6 小时分析资料和非常规观测资料,对此次哈密地区的暴雪天气过程的环流背景、影响天气系统进行了动力和热力的诊断分析,并利用 Q 矢量及螺旋度方法作了天气动力学诊断分析。结果表明:(1) 新疆西部高压脊东移发展,引导萨彦岭低涡东移南压,移入哈密地区,造成哈密暴雪天气。(2) 萨彦岭低涡是一较深厚系统,是低层辐合高层辐散的垂直上升气旋性涡柱,为暴雪发生提供了有利的动力机制。(3) 冷暖平流交汇,增强了斜压性,有助于低涡的发展加强。冷平流对锋生起到重要作用。(4) Q 矢量辐合区及螺旋度正值区与低涡有较好的对应关系,对哈密降雪的预报有一定的指示作用。

关键词: 暴雪 诊断分析 Q 矢量 螺旋度

Diagnostic Analysis of a Snowstorm Event in South Hami in November 2005

Ayi Xiamu^{1,2} Kong Qi¹ Yang Guiming¹

(1. National Meteorological Center, Beijing 100081; 2. Hami Meteorological Office, Xinjiang)

Abstract: The weather process of the snowstorm happened in Hami Xinjiang during 18—20 November 2005 and the snow was heavier in the south than that in the north. Based on NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 6h interval reanalyzed data and the non-conventional data, dynamic and thermodynamic diagnoses of the snowstorm caused by the vortex are discussed. And the methods of the Q vector and the helicity are also used to the further analysis. The results are as follows: (1) With the development and eastward movement of the ridge in the west of Xinjiang, the vortex in Sayangling moved into Hami area and caused the snowstorm. (2) This Sayanling vortex was a deeper and cyclonic

资助项目: 科技部“科研院所社会公益研究专项课题”: 不利气象条件对公路安全影响机理及对策研究项目 (2004DIB3J100)

收稿日期: 2006 年 12 月 9 日; 修定稿日期: 2007 年 4 月 16 日

system with upward motion. There was a convergence in the low levels and a divergence in the high levels. (3) The obvious temperature advection and temperature gradient can be revealed, so the baroclinicity was favorable to the intensification and development of the vortex. (4) The convergence area of the Q vector and the positive helicity area were consistent with the vortex, which can be used as an indicator in forecasting the snow in Hami.

Key Words: snowstorm diagnostic analysis Q vector helicity

引 言

暴雪和暴雨同属于我们关心的强降水过程,只不过它们分别以固态和液态两种不同的降落物形式出现,当然它们可能会涉及不同的物理过程。我国是个多暴雨的国家,对夏季暴雨有比较多的研究^[1-4],同时我们也应该加强对冬季中高纬度天气系统,尤其是降雪天气过程的研究。暴雪对于国民经济和人民生活的危害有时比暴雨更大。2005年11月18—20日,新疆哈密地区出现了罕见的暴雪过程,为50年不遇的特大暴雪,其中哈密市过程降雪31.3mm,而其年降水量仅39.1mm。这次强降雪过程主要集中在19日,使哈密城市交通、供电、供热、城市绿化、农业、畜牧业、水利工程以及人民财产造成了重大损失。

新疆地区降雪前,往往在上游地区有脊发展(或者阻塞高压),下游槽加深(或者切断低涡)。南疆产生大降雪往往配合回流东灌天气。东部小槽配合西部大槽是南疆常见的大降水模型^[5-6]。北疆冬季,暴雪几乎年年发生,其中偏北和沿天山一带是经常发生的地区^[7-8]。哈密位于新疆的东部,天山山脉从东至西横贯其中部,山南为哈密市,山北巴里坤和伊吾县,特殊的自然地理条件使得哈密既有南疆气候特点,也有北疆气候特点。哈密南部干旱少雨,北部降水充沛。而这次哈密暴雪过程也是在乌拉尔山长脊,下游有切断低涡,但其特殊性在于南部的降雪大,北部

小,南部的哈密市31.3mm,北部的巴里坤4.3mm、伊吾15.0mm。车罡等^[9]已对此次过程的环流形势进行了分析,并对数值预报产品作了诊断分析,指出暴雪是萨彦岭低涡南压进入哈密南部造成的,且低涡沿东天山西侧地势低洼处东南移进哈密南部,并没有直接翻越东天山,是南部降雪大的原因。对于新疆地区的降水天气,其重要影响系统之一就是低涡,因此有必要对该低涡造成的暴雪天气的动力热力机制等方面的特征作一研究。本文在已有研究的基础上,利用NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 的6小时分析资料和非常规观测等资料,对引发暴雪的萨彦岭低涡动力热力机制进行分析,并对此次暴雪的天气动力学特征进行诊断分析。

1 大尺度环流特征和主要影响系统

18日00时(世界时,下同)500hPa上,乌拉尔山一线为一高压脊,其前部的偏北气流引导高纬冷空气不断补充到位于萨彦岭的低涡中,低涡的冷中心达到了 -36°C 。此后高压脊东移发展,低涡不断东移南压,由此造成新疆地区降雪开始。19日00时低涡中心位于哈密的西北侧,高压脊继续向东发展,脊前为较强的东北气流,使得低涡中心继续南压,引导冷空气南下,造成哈密地区的强降雪天气。至12时(图1a)低涡沿东天山西侧东南移进哈密,没有直接翻越东天山。20日随着低涡继续东南移,降雪也随之移出哈密地区。分析此次哈密暴雪的高空环流形势发

现,高空环流的经向型加大,新疆西部的高压脊不断东移发展,脊前东北气流加大,主要影响系统——低涡东移南压移入哈密,引导冷空气东移南下,造成了哈密的暴雪天气。

云系的变化预示着天气的演变。从这一时段内云的 T_{BB} 逐时演变(图 1b)情况可以看出,影响新疆的主要是低涡云系,低涡云系东移南压,在 19 日 06 时云顶亮温降到 -50°C 以下,说明此时云系对流发展旺盛,在哈密地区降雪增强。此后低涡发展,20 日云系明显减弱,并渐渐东移出哈密地区,降雪也渐渐变小,逐渐停止。

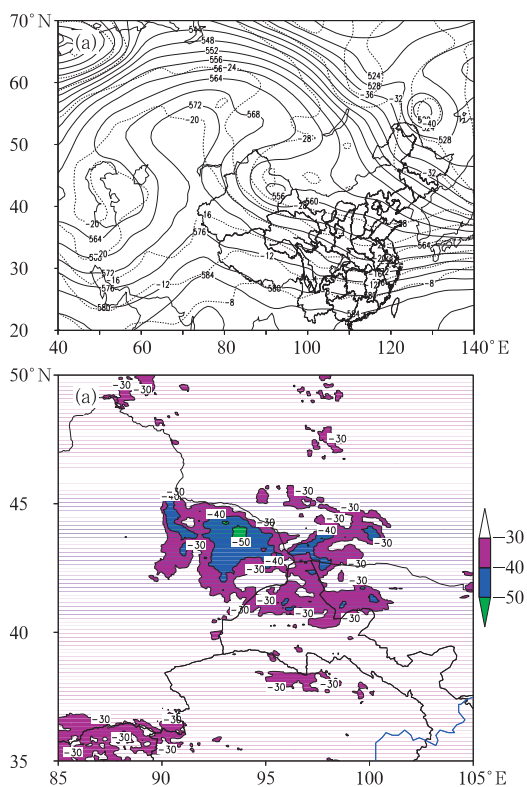


图 1 2005 年 11 月 19 日 12 时 500hPa 高度场和温度场(a)及 06 时 T_{BB} (b) 逐时演变情况

2 动力、热力诊断分析

2.1 涡度场、散度场和垂直速度场的分布特征

沿低涡中心所在纬度的涡度场纬向剖面

图(图略)可以看出,19 日 00 时低涡上空为明显的正涡度分布,正涡度区从地面一直延伸到 100hPa 高度,最强的涡度中心位于 500hPa 附近,强度为 $1.8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$,可见该低涡是一深厚系统。12 时涡度中心东移加强,且涡度区向地面伸展,涡度轴线近于垂直。同样分析沿低涡中心所在纬度的散度场和垂直环流分布(图 2a)可以发现,19 日 00 时低涡中心东部,低层辐合,高层辐散。辐散中心位于 400hPa,为 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,辐合中心位于 800hPa,为 $3 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。气旋性涡柱是一低层辐合、高层辐散的垂直上升气柱,低压内散度场的垂直结构变化不仅有利于涡旋内上空抽吸作用的加强,而且有利于上升运动的加强,为大的降雪提供了有利的条件。综上所述,垂直上升气柱与涡柱的相伴发展,揭示出该低涡的结构及其得以发展加强的一重要动力机制:即强烈的上升运动要求低层强烈辐合,而低空的辐合必然导致局地有强的正涡度出现,低层强的正涡度通过垂直上升运动输送到高空,从而使涡柱得以加强。

2.2 层结稳定度分析

在这次降雪过程中,从地面到 300hPa 大气层结都是稳定的,即使是降雪最强的时段,也出现在稳定的大气层结中。这与许多强降水过程有很大不同,对流性抬升不显著,而系统性抬升更为重要。对降雪期间比湿的垂直分布(图 2b)分析发现,暴雪发生过程中对流层中下层的大比湿区随着低涡的东移而东移。在降雪较强的 19 日 12 时,降雪区范围内从地面到 500hPa 存在一个大比湿区,中心可达到 $4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从位温和比湿的分析表明,此次暴雪天气过程发生在稳定层结的大气中,并且在等位温面下降的区域存在增湿区,这种温湿场的分布结构变化,在一定程度上削弱了大气层结的稳定性,有利于降雪的发生。综上所述,温湿场的分布为暴雪的发生提供了有利的热力机制。

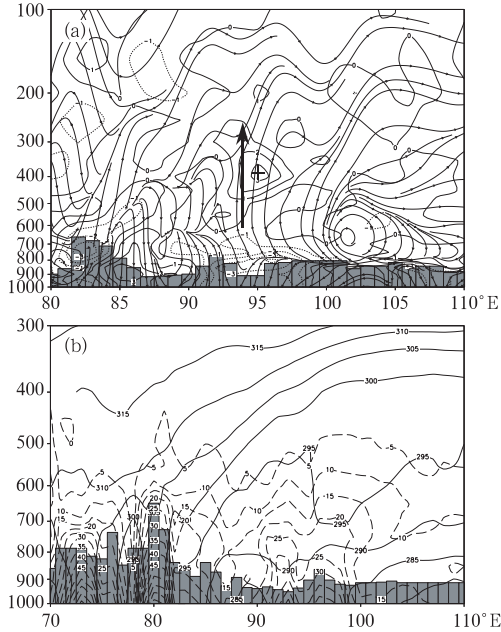


图 2 2005 年 11 月 19 日 00 时沿 44°N(a) 散度场(十为辐散区;一为辐合区,单位: 10^{-5} s^{-1}) 和 $u-\omega$ 垂直剖面图(u : 纬向风,单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$; ω : 垂直运动,单位: $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$);(b) 位温(实线, 单位:K)和比湿(虚线,单位: $10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)纬向剖面 阴影代表地形

2.3 哈密地区物理量变化

18—20 日,萨彦岭低涡东移南压,哈密出现罕见暴雪过程,大降雪集中在 19 日。分析过程中哈密所在经纬度(43°N 、 93°E)动力、热力物理量的时间-高度剖面图(图 3)可见,在此过程中哈密地区低层偏东风逐渐加大且一直处于偏南气流中,19 日偏东风加大,降雪也加大;垂直上升运动在整个过程中有下传的趋势。强降雪发生时,整层都为强烈的上升运动,但强的上升气流仍存在于中高层。随着上升气流转为下沉气流,降雪天气结束,强烈上升运动为强降雪提供了足够的动力条件;在 19 日 00 时相对湿度和比湿均有所增强,空气变潮湿,此时也对应降雪的开始和加强阶段;在整个过程中,相当位温随高度加大,始终为稳定大气层结。

3 冷暖平流及锋生函数分布

暴雪都是在冷暖空气交汇的有利条件下产生的,为了进一步了解此次过程中冷暖空气以及锋面的作用,我们还对温度平流及锋生函数作了计算。

500hPa 上 19 日 00 时有明显的冷平流中心,冷空气沿脊前偏东北气流在低涡堆积,到 12 时(图 4a)冷平流中心向东南移,且强度有所加强,冷中心位于 42°N 、 90°E ,其东南部为暖平流,可见影响系统的斜压性较强,这有利于低涡的维持和发展,并向东南方向移动。850hPa 位温分布上(图 4b)可见,东天山南侧形成了近东西向的等温线密集带,大约 5 个纬度位温变化 10K,与地面锋区相对应。说明降雪过程中,冷空气随着低涡的东南移而不断南下,与南面暖空气不断交汇,造成哈密暴雪天气。

将锋生函数表示成如下形式:

$$F_G = \frac{d}{dt} |\nabla \theta| = F_{G1} + F_{G2} + F_{G3} + F_{G4}$$

$$F_{G1} = \frac{1}{|\nabla \theta|} ((\nabla \theta) \cdot \nabla \left(\frac{d\theta}{dt} \right))$$

$$F_{G2} = -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} (\nabla \theta)^2 D$$

$$F_{G3} = -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} \left(\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right) A + 2 \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} B$$

$$F_{G4} = -\frac{1}{|\nabla \theta|} \frac{\partial \theta}{\partial p} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right)$$

其中: θ 是位温, D 是水平散度, $A = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$,

$B = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ 。严格来讲,锋生函数应包含 4 项, F_{G1} 是非绝热加热项; F_{G2} 是水平辐散项; F_{G3} 是形变项; F_{G4} 是与垂直运动有关的倾斜项。由于对非绝热加热和垂直运动的计算精度不易满足,这里仅对 850hPa 上的 F_{G2} 、 F_{G3} 作一估算。从 850hPa 逐日的锋生(F_{G2} 、 F_{G3})图上(图略)可见,19 日 12 时 F_{G2} 、

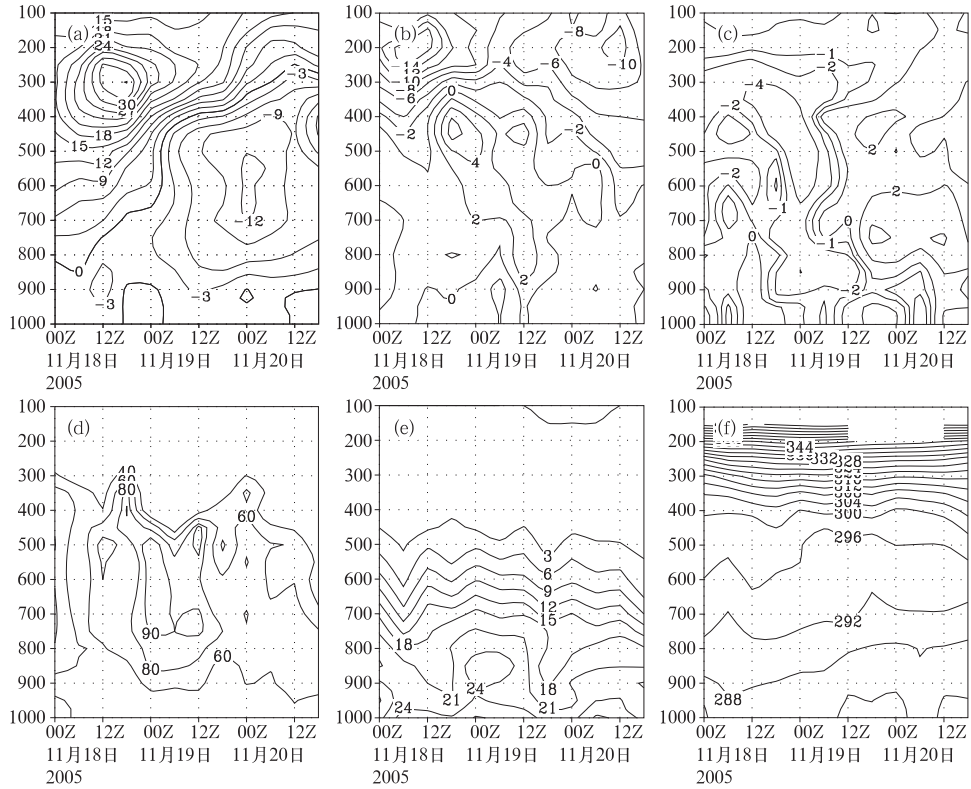


图 3 2005 年 11 月 18—20 日哈密(43°N,93°E)各物理量的时间高度剖面图。

(a) 纬向风(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (b) 经向风(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); (c) 垂直速度(单位: $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$);
(d) 相对湿度(单位: %); (e) 比湿(单位: $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); (f) 相当位温(单位: K)

F_{G3} 的正值区位置与锋区一致,也和冷平流的位置大致相符,可见该区域引起锋生的主要影响因子是冷平流的作用。在强降雪过程中的 $F_{G2} + F_{G3}$ 沿 90°E 的垂直剖面图(图 5)上可以看到,19 日 12 时地面锋区在 40°N 附近,随高度向北倾斜,并且有两个锋生区,较强的位于 850hPa ,强度达 $21 \times 10^{-10} \text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$,锋区较前期变得陡峭。从中可以清楚地看到,北部冷空气向南侵入,锋区的伸展高度较高,且在 500hPa 以下都有较强的锋区存在。 850hPa 沿 90°E 的锋生函数 F_{G2} 、 F_{G3} 之和,温度平流随时间变化图(图略)显示,18—20 日,在 40°N 附近存在明显的锋生区,与之相对应的有明显的冷平流存在。19 日 12 时锋生强度最大,这个时刻锋区发展最旺盛。而冷平流的最大值要先于锋生强度最大值,这

在预报上有明显的指示意义,也从另一个角度证实了冷空气对于锋生的加强有重要的作用。

4 水汽输送特点

从对流层低层 925hPa 的水汽通量和水汽通量散度图(图 6)上可以看出,在哈密地区对应水汽辐合区,但水汽辐合的量值比较小。一方面来自南部的暖湿水汽经四川、甘肃折向西的偏东气流,另一方面贝加尔湖南侧的偏东北气流以及来自北部的偏北气流,三股水汽在哈密地区相交汇,为暴雪提供了有利的水汽条件。此外,在暴雪发生前期,16—17 日 850hPa 平均水汽通量图(图略)上可以看到有水汽从新疆的西北部不断向低涡

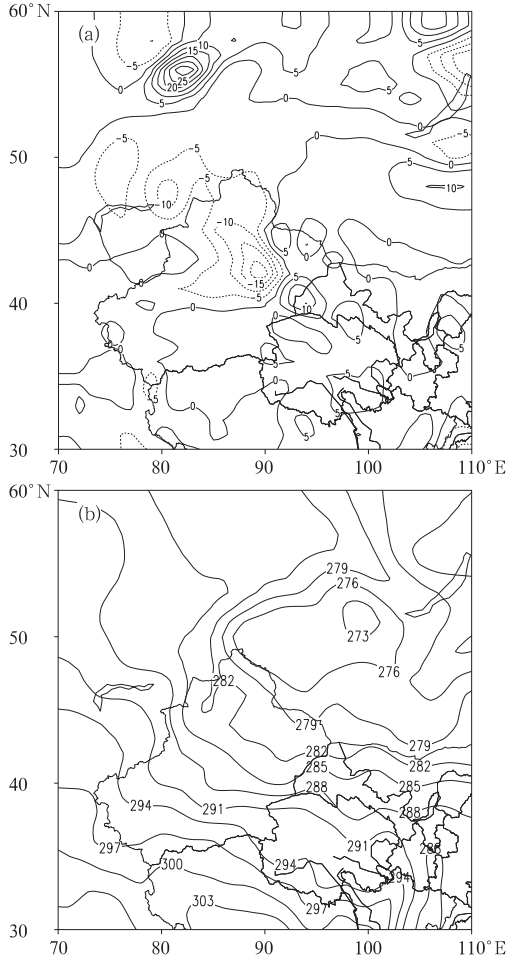


图 4 2005 年 11 月 19 日 12 时 500hPa 温度平流 (a, 单位: $10^{-4} \text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) 及 850hPa 位温 (b, 单位: K)

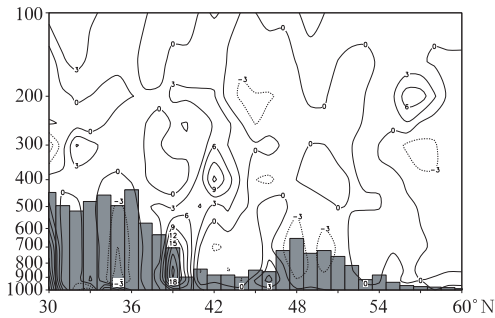


图 5 2005 年 11 月 19 日 12 时沿 90°E 的锋生函数垂直剖面图 (单位: $10^{-10} \text{K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 阴影代表地形

输送, 在低涡东移南压过程中, 其自身也携带了一部分水汽。

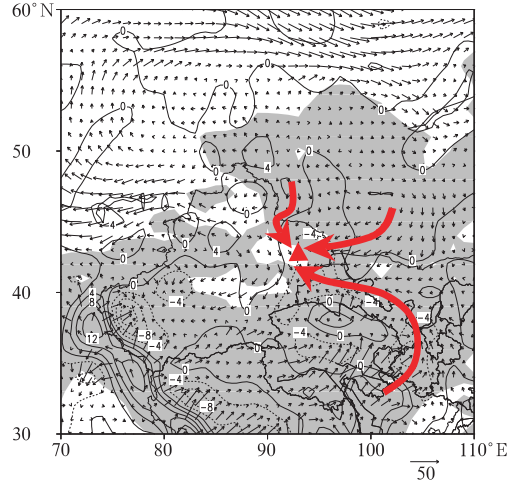


图 6 2005 年 11 月 19 日 00 时 925hPa 的水汽通量 (单位: $\text{g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 和水汽通量散度 (单位: $10^{-5} \text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1}$) 图
阴影代表地形高度大于 750km, ▲ 为哈密所在位置

为了进一步弄清暴雪过程中在哈密地区内各高度层的区域平均 ($40 \sim 45^\circ\text{N}$ 、 $90 \sim 96^\circ\text{E}$) 水汽辐合量, 我们对各高度层的平均水汽通量散度随时间演变进行了分析 (图略) 可知, 各层水汽输送量随高度的增加是减少的。很显然, 水汽的强烈辐合主要集中在对流层低层, 且在整个过程中均为水汽的辐合, 水汽辐合大值出现在大降雪前期, 为暴雪天气过程提供了有利的水汽条件。

5 Q 矢量分析

近年来, Q 矢量方法被作为一种诊断工具用于短期天气预报业务^[10-11]。这种方法不仅避免了传统 ω 方程的缺点, 而且物理意义清楚、计算简单, 适用于整个对流层。利用 Q 矢量方法可以诊断大气垂直运动, 而且 Q 矢量决定了流场和温度场热成风的个别变化, 可用来预报锋生锋消。因此对于天气诊断分析和预报有重要意义。我们采用如下的 p 坐标系下的 Q 矢量表达式进行诊断分析。

$$Q_x = f \left(\frac{\partial u_g}{\partial x} \frac{\partial v_g}{\partial p} - \frac{\partial v_g}{\partial x} \frac{\partial u_g}{\partial p} \right)$$

$$Q_y = f \left(\frac{\partial u_g}{\partial y} \frac{\partial v_g}{\partial p} - \frac{\partial v_g}{\partial y} \frac{\partial u_g}{\partial p} \right)$$

Q 矢量辐合时,对应上升运动; Q 矢量辐散时,则对应下沉运动。因此由 Q 矢量的辐合辐散场可推断出上升和下沉运动的分布。

由 19 日 12 时 700hPa 上 Q 矢量散度及风场的分布(图 7a)可以看出, Q 矢量辐合区呈近东西向带状分布,有两个辐合中心,其中一个位于哈密地区为 $-4 \times 10^{-14} \text{ hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-3}$,而在此辐合区的南北两侧分别有两个 Q 矢量辐散区,根据 Q 矢量与垂直速度的关系可知,在 700hPa 气旋环流附近为上升气流,而其南北两侧存在下沉运动,次级环流的强迫抬升作用加强了哈密地区的上升运动,有利于这一地区强降雪的发生。与同时次锋生图(图略)比较可以发现,这一 Q 矢量辐合区的走向和位置与锋区所在位置相一致。在 19 日 12 时 700hPa Q 矢量和温度场的分布图(图 7b)上,冷中心南部有等温线密集带,这一等温线密集带有 Q 矢量穿越等温线从暖区进入冷区。 Q 矢量总是指向上升区,背向下沉区,在等温线密集带北面上升运动,南面下沉运动,这说明对流层低层侧向非地转环流明显,在哈密地区上升运动增强,为暴雪的发生提供有利的条件。

由以上分析可知,非地转风造成的 Q 矢量辐合区位于气旋环流附近,反映了垂直上升运动的位置和强度。非地转风的存在对上升运动的维持具有重要意义,并且有利于低涡的发展,暴雪过程的增强。

6 垂直螺旋度变化

大气中的许多流动具有螺旋度特征,螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动的动力性质的物理量。近年来,对大气螺旋度的研究不仅揭示出螺旋度与大气流动的某些特有现象在动力学、动力学性质之间的内在联系,而且使得螺旋度成为引入天气分析和预报的重要物理量,用以反映旋转与沿旋转轴方向运动的强弱程度。

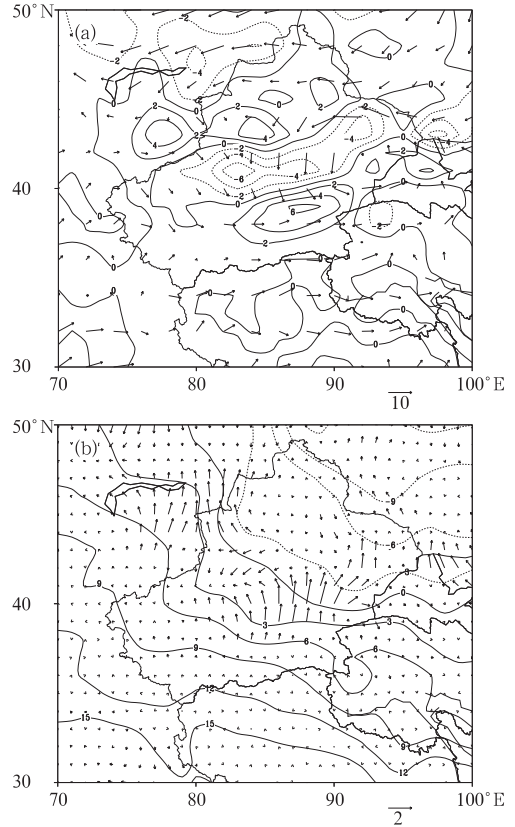


图 7 2005 年 11 月 19 日 12 时 700hPa (a) Q 矢量散度场(单位: $10^{-14} \text{ hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$)和风场(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) (b) Q 矢量(单位: $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{hPa}^{-1} \text{ s}^{-3}$)和温度场(单位: $^{\circ}\text{C}$)

定义螺旋度为风速和涡度点积的体积分,即

$$H = \iiint_{\tau} \mathbf{V} \cdot \nabla \wedge \mathbf{V} d\tau$$

p 坐标系下局地螺旋度可记为:

$$H = u \left(\frac{\partial \omega}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial p} \right) + v \left(\frac{\partial u}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial x} \right) + \omega \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$$

通常,研究中只考虑 k 方向上螺旋度的变化,且为使符合右手定则的螺旋度取为正,故定义垂直螺旋度为 $h = \left(\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) (-\omega)$,从该表达式可知,在具有较强的正涡度的气旋内,若伴有深厚的上升运动时($\omega < 0$),该气旋就具有强的正螺旋度。反之具有负螺旋度。

分析此次引发哈密暴雪的低涡内沿低涡中心涡度与螺旋度的垂直分布(图 8)可见低涡中心偏东部对流层中下部一直伴有正螺旋度,19 日 12 时强中心位于 400hPa,约为 $5 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。该物理量反映出低涡具有较强涡旋性的特征。与低层正螺旋度相对应,在对流层高层为负螺旋度,但强度较弱。另外,低涡在 850hPa 上位势高度及 500hPa 上螺旋度区域平均随时间的演变(图略)显示,18—20 日,低涡强度及螺旋度均有所增强,且增强趋势基本上一致。因此,螺旋度的大小在某种程度上可以反映低涡的强度,低涡螺旋度特性的变化对其发生发展具有一定的指示意义。

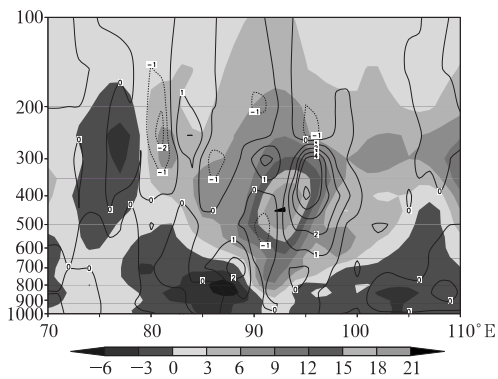


图 8 2005 年 11 月 19 日 12 时沿 42°N 低涡中心涡度(阴影)和螺旋度(实线)的垂直分布

7 结 论

(1) 此次暴雪过程主要是新疆西部的高压脊不断东移发展,脊前东北气流加大,低涡东移南压,引导冷空气南下,移经哈密地区,引发该地区的暴雪天气。

(2) 萨彦岭低涡是一个低层辐合高层辐散的垂直上升气旋性涡柱,这种垂直上升结构有利于涡旋内上空抽吸作用的加强,上升运动的增强,为大降雪提供了有利条件。

(3) 暴雪天气过程发生在稳定层结的大气中,并且在等位温面下降的区域存在增湿区,这种温湿场的变化,在一定程度上削弱了大气层结的稳定性,有利于降雪的发生。

(4) 冷空气对锋生的加强起重要作用,冷暖平流交汇增强了斜压性,有利于低涡的维持和发展,为大降雪提供了有利条件。

(5) 在哈密地区虽然水汽辐合的量值比较小但整个过程中均为水汽的辐合且主要集中在低层。水汽主要来自低涡在东移南压过程中自身携带的水汽。

(6) Q 矢量诊断表明,非地转风造成的 Q 矢量辐合区位于气旋环流附近,反映了垂直上升运动的位置和强度。非地转风的存在对上升运动的维持具有重要意义,并且有利于低涡的发展。

(7) 低涡具有较强涡旋性的特征。螺旋度的大小在某种程度上可以反映低涡的强度,低涡螺旋度特性的变化对其发生发展具有一定的指示意义。

参考文献

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨[M]. 北京: 科学出版社, 1980: 1-225.
- [2] 丁一汇. 1991 江淮流域持续性特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 1993, 1-255.
- [3] 张家宝, 邓子风. 新疆降水概论[M]. 北京: 气象出版社, 1987, 205-243.
- [4] 郑仙照, 寿绍文, 沈新勇. 一次暴雨天气过程的物理量分析[J]. 气象, 2006, 32(1): 102-106.
- [5] 江远安, 赵逸舟. 喀什地区一场大雪天气过程分析[J]. 新疆气象, 2002, 25(6), 12-13.
- [6] 张云惠, 钱文新. 南疆西部一次暴雪天气诊断分析[J]. 新疆气象, 2005, 28, 增刊: 21-23.
- [7] 王磊, 彭擎宇, 刘兰. 新疆北部一次罕见暴雪过程分析[J]. 新疆气象, 2001, 24(4): 15-17.
- [8] 蒋军. 乌鲁木齐市一次暴雪天气过程诊断分析[J]. 新疆气象, 2004, 27(3): 8-10.
- [9] 车罡, 王荣梅. 哈密南部一次罕见暴雪天气诊断分析[J]. 新疆气象, 2005, 28, 增刊: 26-28.
- [10] 白乐生. 准地转 Q 矢量分析及其在短期天气预报中的应用[J]. 气象, 1988, 14(8): 25-30.
- [11] 李加洛, 达成荣, 刘海明, 等. 青海东部一次强暴雪天气的 Q 矢量诊断分析[J]. 气象, 2003, 29(9): 8-12.
- [12] 张凤, 赵思雄. 梅雨锋上引发暴雨的低压动力学研究[J]. 气候与环境研究, 2003, 8: 143-156.