

2007年3月3—5日辽宁特大暴雪过程 物理量诊断分析

陈传雷^{1,2} 蒋大凯² 陈艳秋² 袁子鹏² 孙欣²
韩江文² 卢娟³ 才奎志² 何宝财⁴

(1. 东北大学资源与土木工程学院, 沈阳 110015; 2. 沈阳中心气象台, 沈阳 110016;
3. 辽宁省气象科技服务中心, 沈阳 110016; 4. 葫芦岛市气象台, 葫芦岛 125000)

摘要:通过对2007年3月3—5日辽宁历史罕见特大暴雪过程天气形势及物理量场分析,探讨了同期的天气形势特征及相关物理量场与暴雪落区的对应关系。结果表明:500 hPa 阶梯槽和地面江淮气旋是此次过程的主要影响系统。对流层中低层辐合、高层辐散及来自2个源地的充沛水汽在有利环流背景下汇合并被抬升是产生暴雪天气过程的主要原因。强降雪出现在850 hPa 涡度和200 hPa 散度大值区内。温度平流的强弱及冷暖过渡带位置能够较好地反映出降水的强度及落区。

关键词:特大暴雪;天气形势;影响系统;物理量;诊断分析

1 引言

2007年3月3—5日,受超强冷空气和江淮气旋的共同影响,辽宁出现了自1951年以来历史同期罕见的特大暴雪天气过程。依据“沈阳区域气象灾害评估方法”,此次暴雪天气被评估为一级暴雪灾害,属最严重级别。另据气象历史资料统计分析,此次暴雪天气过程为辽宁百年一遇。

冬季暴雪是中高纬度国家常见的一种灾害性天气现象。欧美国家暴雪研究开展的较早,Bennetts等^[1]、Emanuel^[2]提出用饱和空气中的对称不稳定来解释降水带状分布的形成。Frederick等^[3]研究认为1983年2月11—12日出现在华盛顿到波士顿的暴雪是锋生强迫的结果。

我国的暴雪灾害主要集中在东北地区和西北高原山区^[4],20世纪70年代末王文辉等^[5]对内蒙古锡盟“7710”暴雪进行过研究。目前针对降雪过程的研究主要集中在天气形势分析和数值模拟方面,对降雪过程的物理量诊断分析研究相对较少。马福全等^[6]对2003年3月2日辽宁一次暴雪天气进行了分析,结果认为此次过程主要是由700 hPa以下比较浅薄的影响系统在低层强锋区上产生波动的形势下产生的。刘宁微^[7]对2003年3月1—2日发生在辽宁的暴雪过程进行了数值模拟试验,分析和讨论

了这一过程中中尺度系统的发生、发展和结构演变特征。

本文从环流背景和天气形势特点入手,通过反映动力、热力和水汽条件的相关物理量实况场进行诊断分析,试图阐述各物理量对暴雪落区和强度的指示意义,为今后强降雪过程预报提供参考依据。

2 天气实况

2007年3月3—5日,辽宁出现了自1951年以来历史同期罕见的特大暴雪天气过程。降雪时段主要集中在3日16时至5日06时,除大连、丹东地区降暴雨外,其他12个市地的48个台站降雪量均超过10 mm,平均降雪量为35 mm,最大降雪量在鞍山为78 mm(图1a)。其中鞍山市等5个台(站)降雪量超过了50 mm,为特大暴雪量级;沈阳等27个台(站)降雪量超过了25 mm,为大暴雪量级;其余16个台(站)降雪量均超过了10 mm,为暴雪量级。据统计,鞍山、本溪、锦州、营口、辽阳、盘锦地区日降雪量均创有历史记录以来的最大值。此次降雪造成的积雪深度全省普遍超过20 cm,其中沈阳、鞍山、抚顺、本溪、辽阳、锦州积雪深度均超过30 cm,最大积雪深度在清原为44 cm(图1b)。与此同时,辽宁陆地普遍出现了平均为6—7级、阵风为8—9级的偏北大风;最大瞬时风速在旅顺口为32.9 m/s,风力达

收稿日期:2007-04-01;修订日期:2007-06-27。

作者简介:陈传雷,男,1980年生,工程师,主要从事短期天气预报工作,E-mail:ln_ccl@163.com。

到 12 级,系该站自 1951 年建站以来的风速最大值。

此次暴雪过程由于强度大、降雪集中和持续时

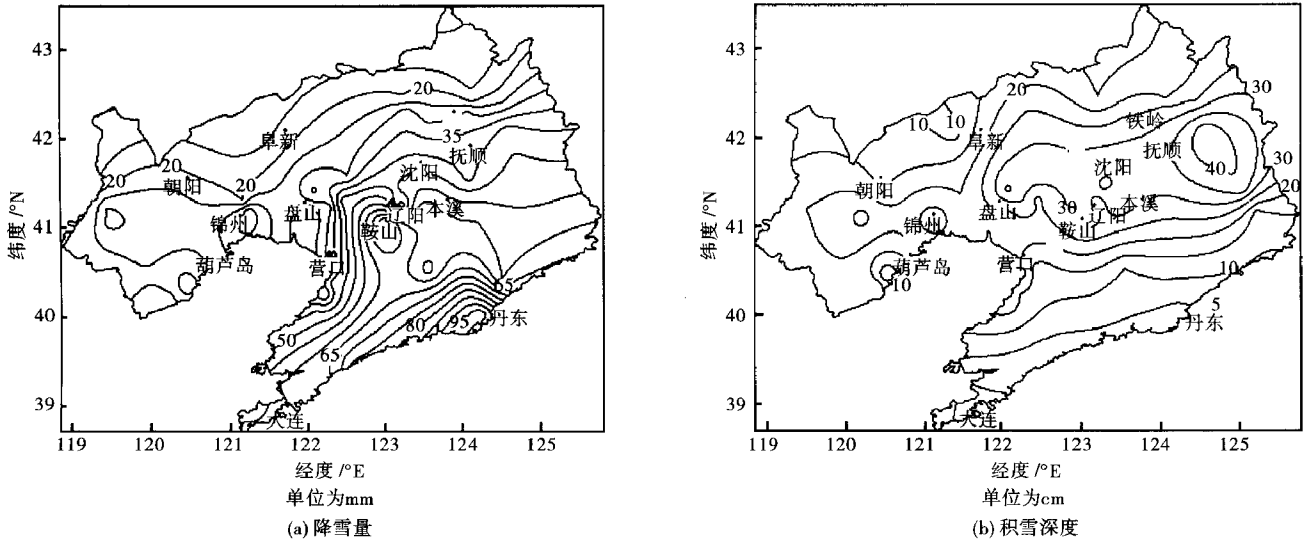


图 1 2007 年 3 月 3—5 日辽宁降雪量和积雪深度分布

间长,全省共造成 7 人死亡,经济损失约为 16.7 亿元。强降雪和大风天气使辽宁海陆空交通全面受阻,沈阳桃仙国际机场被迫关闭了 48 h,辽宁境内 11 条高速公路全线封闭,京沈和沈四等 5 条高速公路封闭了近 60 h,沈吉和锦朝等 6 条高速公路封闭了近 6 d。沈山等以沈阳为枢纽的铁路列车大量晚点停运,全省沿海所有客、货运船舶全部停航。另外,受暴风雪影响,沈阳市 90 多万名中小学生因暴风雪停课 2 d,部分公路、城市交通瘫痪和部分地区通信和电力系统受损,给全省人民的生产和生活造成了前所未有的严重影响。

3 环流形势特征

3.1 500 hPa 中层环流

2007 年 3 月 1 日 500 hPa,欧亚高纬度地区为宽平的低槽区,极地冷空气活跃。2 日乌拉尔山高压脊发展,引导极地冷空气南下并在贝加尔湖地区堆积。3 日 08 时贝加尔湖地区高空槽继续东移南下发展,同时我国河套西部到四川中部有南部高空槽东移发展,江淮流域到华北北部地区偏南—西南急流建立,南北 2 支槽形成南暖脊北冷槽型的“阶梯槽”结构^[8]。3 日 20 时主体冷空气继续南下,冷中心位于贝加尔湖东北部地区,中心强度为 $-49\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。4 日 08 时“阶梯槽”中北槽移至我国内蒙古东部到华北北部,南槽东移至华北至江淮流域,槽前偏南、西南风明显加大,高空温度梯度大值区南压并呈东北—西南向,山东半岛西南急流与辽东半岛偏南急流形成风向辐合区。5 日 08 时南槽东移至我国吉林东部至朝鲜半岛一带,北槽前部温度梯度大值区南压至黑龙江东南部,辽宁转入槽后西北气流控制,强降雪过

程结束。

3.2 850 hPa 低层环流

3 月 2 日 08 时 850 hPa,欧亚大陆分为南北两支锋区,北支锋区在贝加尔湖北部,其后部极地冷空气南下;南支锋区在我国江淮流域上游,呈东西向,锋区上有西南低涡生成。3 日北支锋区南压至 50°N ,南支锋区由东西向转为东北西南向并明显加强,西南涡发展东移,其东南部西南风连续加大并形成西南急流,西南涡东北部出现东南、偏东急流。4 日北支锋区继续南下,其前方到达蒙古东部,我国通辽、赤峰 2—4 日气温下降幅度为 $11\text{—}13\text{ }^{\circ}\text{C}$;南支锋区逐渐转为南北方向,西南涡明显东北上, 40°N 以南气温明显上升,辽宁东北南部空锋区达到最强(丹东与赤峰温差达 $19\text{ }^{\circ}\text{C}$);西南涡东部形成东南沿海—华东—山东半岛西南、偏南急流,渤海湾到辽宁中部形成 20 m/s 的东南急流,西南急流、东南急流及西南涡顶部偏东急流在辽宁上空形成强水汽辐合,强降雪落区位于急流切变处。4 日 20 时北支锋区南压至 40°N ,前期位于渤海湾地区的低涡东移至朝鲜半岛,强降雪区移至我国东北东部。5 日低涡继续东北上,主要影响黑龙江东部。

3.3 地面环流

3 月 1—2 日地面辽宁受大陆高压控制。3 日 08 时华北地区倒槽东移,南方气旋主体分裂东移,20 时在江淮流域发展形成江淮气旋,气旋顶部与华北倒槽合并加强。4 日 02 时江淮气旋移至江苏北部,中心气压为 $1\ 004\text{ hPa}$,山东海阳 Δp_3 为 -5.2 hPa ,预示未来江淮气旋将向北偏东方向发展,此时辽宁西部已出现降雪;4 日 08 时江淮气旋移至山东半岛,中心气压为 $1\ 001\text{ hPa}$, Δp_3 最大值在吉林临江为

-4.6 hPa,预示江淮气旋未来仍将向东北方向发展。同时,冷高压至蒙古国逐渐南压;气旋东侧东南风与气旋顶部东北风形成强辐合,我国辽宁各地出现暴雪天气。4日14时气旋中心移至黄海北部,中心气

压达到最强为998 hPa,此时辽宁西部降雪减小,中、东部达到最强。4日20时气旋中心移至朝鲜半岛,我国辽宁各地降雪明显减小,吉林东部降雪加大。5日08时气旋继续东北移至黑龙江东部,辽宁降雪结束。

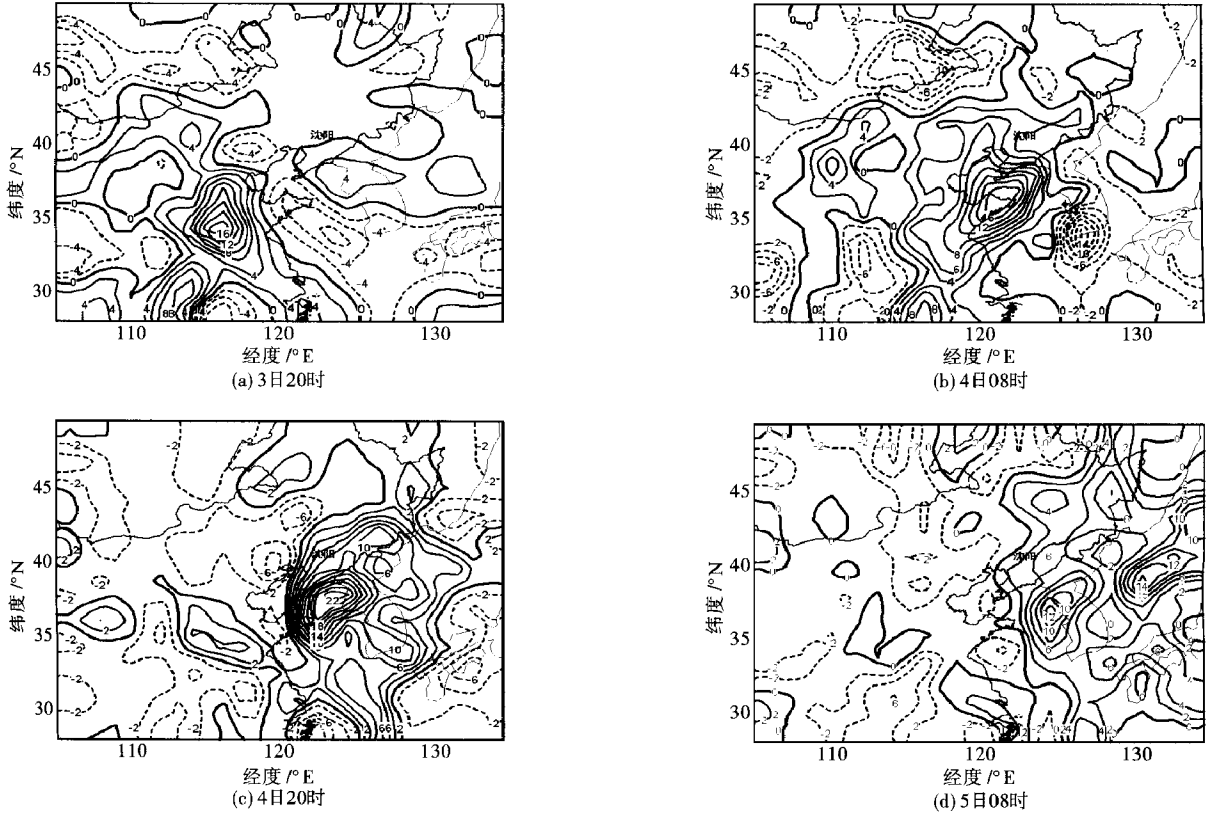


图2 2007年3月3—5日850 hPa涡度场

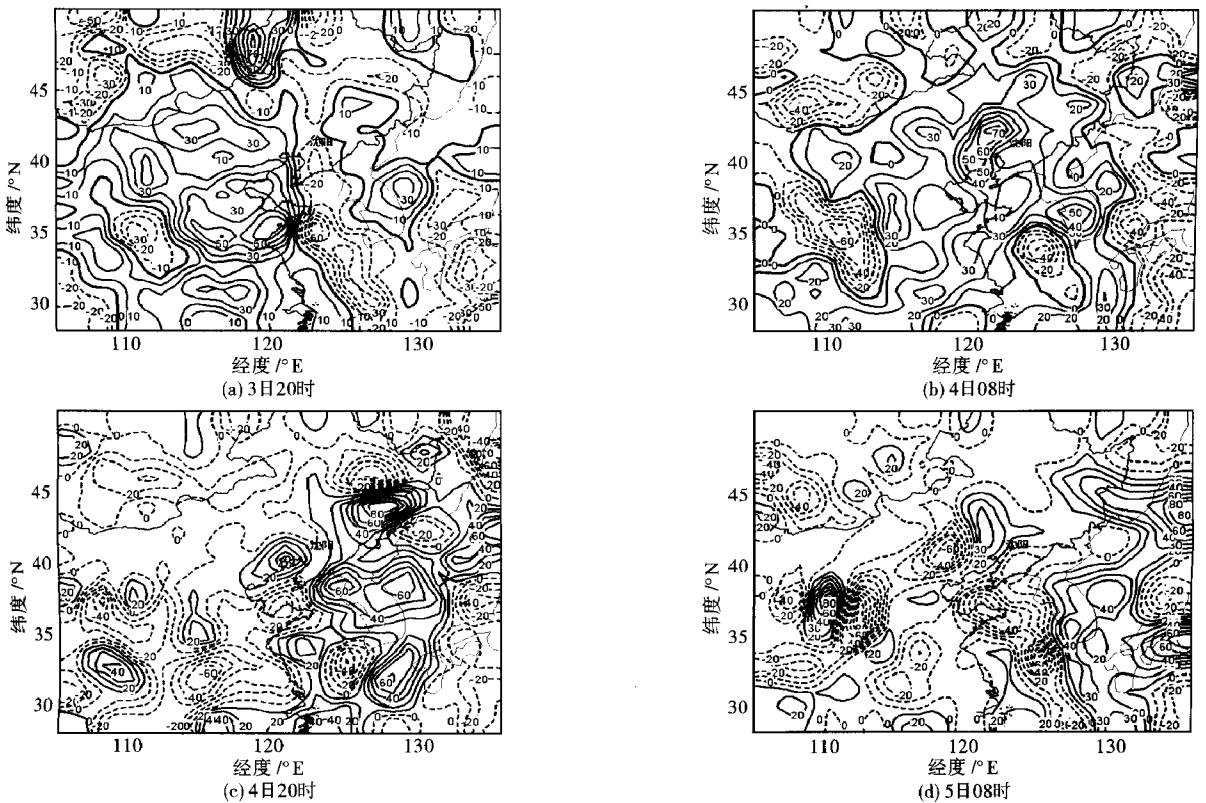


图3 2007年3月3—5日200 hPa散度场

综上所述,本次过程是极地强冷空气与江淮暖湿气流共同影响的结果。500 hPa 阶梯槽和地面江淮气旋是此次过程的主要影响系统。北方高空槽引导极地冷空气南下,南方西南涡东移北上发展,形成

超强锋区和西南、东南、偏东急流水汽辐合,超强锋区为暴雪提供了动力条件,急流为强降雪提供了充足的水汽条件。强冷、暖气团在辽宁地区交绥而产生此次强降雪过程。

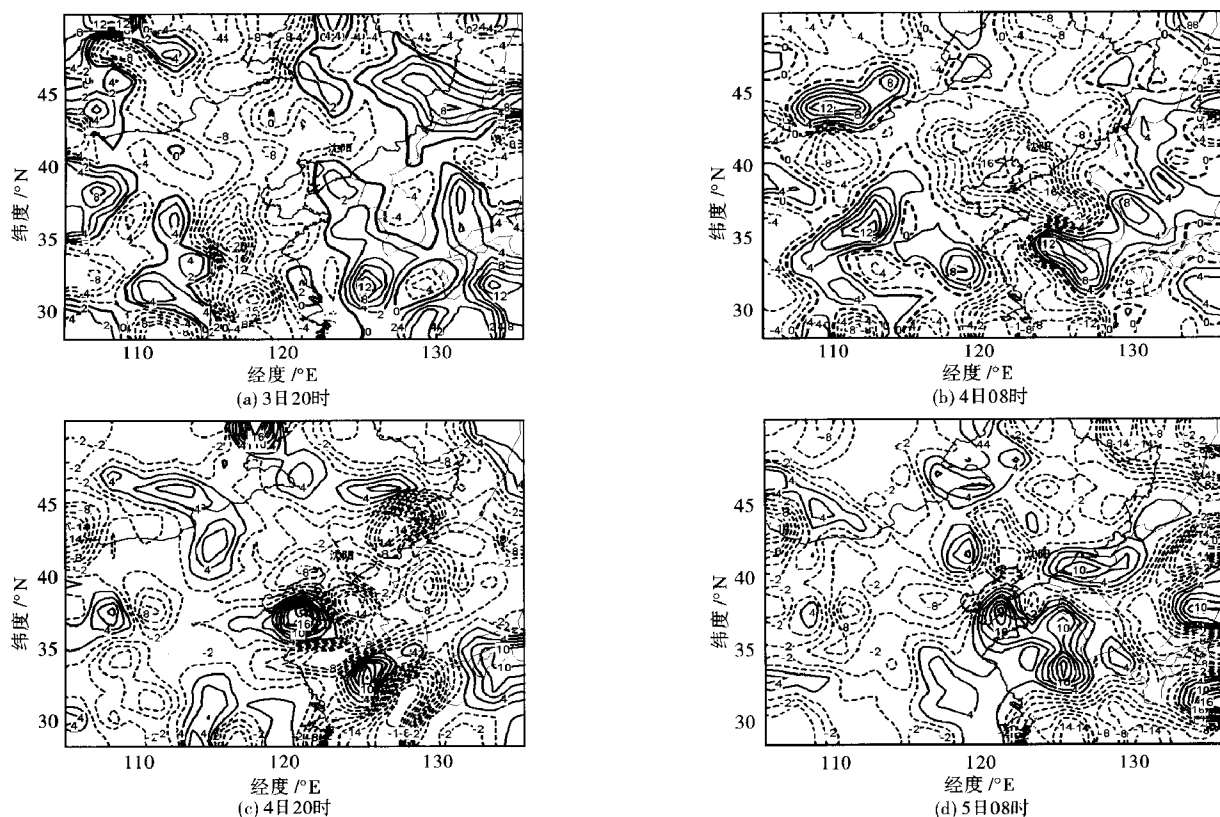


图4 2007年3月3—5日500 hPa垂直速度场

4 物理量诊断分析

4.1 动力条件特征

当大规模的水汽集中辐合时,必须有大范围深厚的上升运动抬升水汽产生才能形成强降雪,因此动力条件是产生暴雪的一个必要条件^[9-10]。高空急流的耦合、高空辐散、低层辐合、强的垂直速度及较强的位势不稳定均可产生较强的辐合上升运动^[11-12],为暴雪的产生提供动力学条件。

4.1.1 涡度场

涡度在一定程度上能反映水平辐合辐散。低层辐合、高层辐散有利于垂直运动的发展,与强降雪天气有较好的对应关系。低层涡度和高层涡度差越大,越有利于降雪系统的发展和维持。

从各时次850 hPa涡度场分布可以看出(图2),在此次过程中,低层正涡度区随着低涡自西南向东北方向移动并加强,850 hPa涡度大值区是强降雪的发生区域。

3日20时200 hPa以下,我国东北大部分地区涡度值在 $0-10 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 之间,为弱的整层下沉气流。850 hPa在河北、山东及河南交界地区存在中心

达 $16 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 的辐合中心。4日08时,850 hPa在吉林南部、辽宁经渤海湾到山东半岛南部上空为一东北西南向的正涡度区,前期850 hPa位于河北、山东及河南交界地区强涡度中心均东移北上至辽宁西南部和渤海湾地区,而此时辽宁和吉林南部在500 hPa及其上空则为负涡度区,说明上述地区中低层辐合、中高层辐散,处于强烈的上升区内,同时也预示该地区将出现强降雪。4日20时,850 hPa正涡度区继续向北移动,并在辽宁东南部和吉林东部分别形成了2个涡度中心。同时,辽宁西部地区出现了大范围的负涡度区,预示该地区的强降雪即将结束。5日08时辽宁地区的涡度强度明显减弱,等值线变为稀疏,强降雪随之结束。

4.1.2 散度场

与涡度场类似,散度能表征流体的水平辐合、辐散程度。高层散度和低层散度差越大,越有利于降雪的发展和维持。

从各时次散度场分布可以看出(图3),此次过程散度场的垂直分布具有低空辐合、高空辐散的配置形势,高空200 hPa强辐散场抽吸作用产生的强上升运动为暴雪的产生提供了动力条件。

3日20时200 hPa散度场华北经山东半岛至江淮地区为东北西南向的正散度区,散度中心区最大达 $50 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$,辽宁上空高层200 hPa为 $-20 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$ 的弱辐合。4日08时,200 hPa散度区向东北方向扩展,强中心东移北上至辽宁西部地区,中心强度显著加强到 $70 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$,同时500 hPa以下中低层的辐合也明显加强。这种低空强辐合、高空强辐散配置的建立,为此次强降雪提供了必要的动力条件。4日20时,正散度区进一步向我国东北方向移动至黑龙江中东部地区,中心强度 $80 \times 10^{-6} \text{s}^{-1}$,辽宁地区200 hPa散度明显减弱。5日08时,辽宁大部分地区出现正涡度区,降雪基本结束。

4.1.3 垂直速度场

垂直运动使大气中的能量转换得以实现,同时大气中的水汽凝结和降雪过程与上升运动有密切联系。垂直运动会引起水汽、热量、动量、涡度等的垂直输送,对天气系统的发生发展有很大的影响。

从各时次500 hPa垂直速度场分布可以看出(图4),此次过程的上升运动强烈,在强降雪时段中500 hPa始终存在强烈的上升运动,强上升运动大值区的位置及移动与暴雪过程的时空演变基本一致。此种形势场对强降雪的强度与落区的预报有较好的指示意义。

3日20时辽宁大部分地区处在弱的下沉运动区

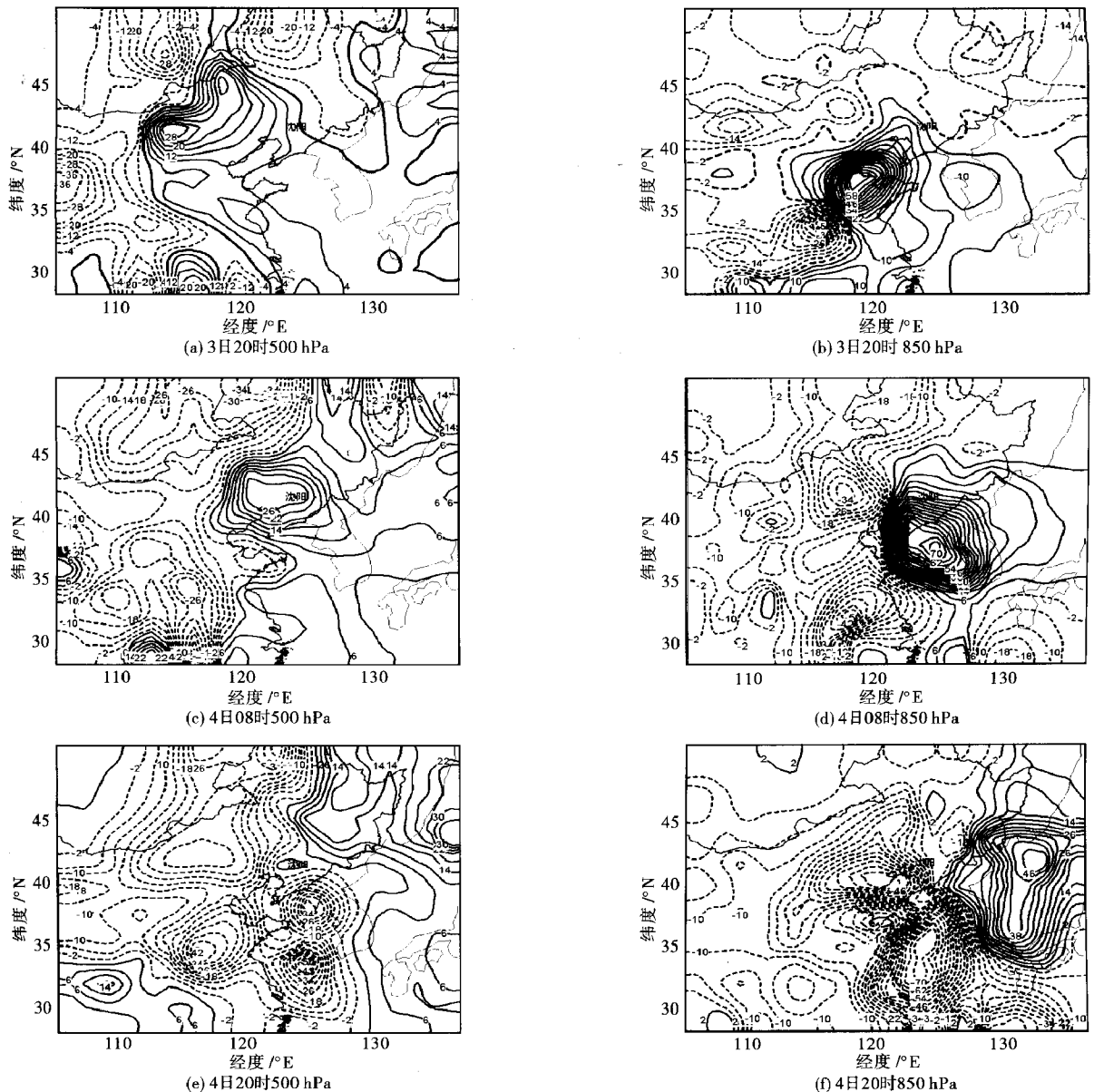


图5 2007年3月3—4日温度平流场

内,500 hPa以上由华北经山东半岛至江淮地区为南北向的上升运动区。4日08时500 hPa辽宁上空转为强上升运动区,并且在辽宁的西南部和东南部地区形成2个中心区为 $-16 \times 10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强上升

运动区。与天气实况对比后发现,中心区位置与强降雪区均有较好的对应关系。4日20时500 hPa强上升运动区向东北方向移动至黑龙江东部,辽宁上空的上升运动明显减小,同时辽宁南部地区开始出

现下沉运动区,辽宁地区的强降雪也随之结束。

4.2 热力条件特征

4.2.1 温度平流场

根据大尺度准地转运动的规律,对流层中下层的暖平流是造成大尺度降雪的重要热力因素。分析 3—4 日 500 hPa 和 850 hPa 温度平流场(图 5),从此次过程中冷暖空气的移动路径和变化来看,前期降水地区受暖平流控制,来自极地和河套地区的 2 股冷空气在降水区上游地区合并,在向低层渗透的过程中,迫使暖湿控制抬升而产生强降雪。平流的强弱及冷暖平流过渡带位置可以很好地反映出降水的性质、强度及落区。

3 日 20 时 500 hPa 的 2 股冷空气分别位于贝加尔湖南部和我国河套西部地区,850 hPa 辽宁位于暖平流中心顶部。4 日 08 时,前期 500 hPa 位于贝加尔湖南部区的冷空气开始南下至我国华北北部。通过对比 500 hPa 和 850 hPa 温度平流场可以发现,500 hPa 中层冷空气已经向低层渗透到 850 hPa,其前锋到达辽宁西部地区,暖湿空气被迫抬升。此时,辽宁西部地区处于冷暖平流过渡带中,降雪强度也达到最大,这同时也预示辽宁大部分地区将出现强降雪。4 日 20 时 850 hPa 以上辽宁大部分地区已经被冷平流控制,强降雪随之结束。

4.2.2 假相当位温

假相当位温是表征大气温度、压力、湿度的综合特征量,表示了大气的温湿特征和垂直运动。其水平分布和垂直分布与对流天气的发生发展有极大关系,也反映了大气中能量的分布。分析 3—4 日 850 hPa 假相当位温场可以看出(图 6),此次过程中的强暴雪带与假相当位温线密集带对应,低层高湿的不稳定能量与中层向下渗透的冷空气导致中低层位势不稳定的建立,从而为此次强降雪过程提供了热力条件。

3 日 20 时,辽宁及东北大部分地区处于弱的高能区内,850 hPa 能量锋区位于辽宁南部经华北南部至四川盆地一带,呈东北西南向分布。4 日 08 时,随着西南气流输送的暖湿空气的加强,各层高能区内明显向东北方向扩展,中心强度逐渐加大,850 hPa 出现了明显的高能中心,辽宁处于能量锋区的梯度区内。4 日 20 时,随着西南气流输送的暖湿空气的减弱东移和冷空气的南下加强,向北伸展的湿舌范围逐渐变窄并且东移,假相当位温线逐渐变得相对均匀,降水区上空能量锋区逐渐消失,高能区的强度逐渐减弱,能量锋区不复存在,辽宁强降雪过程结束。

4.3 水汽条件

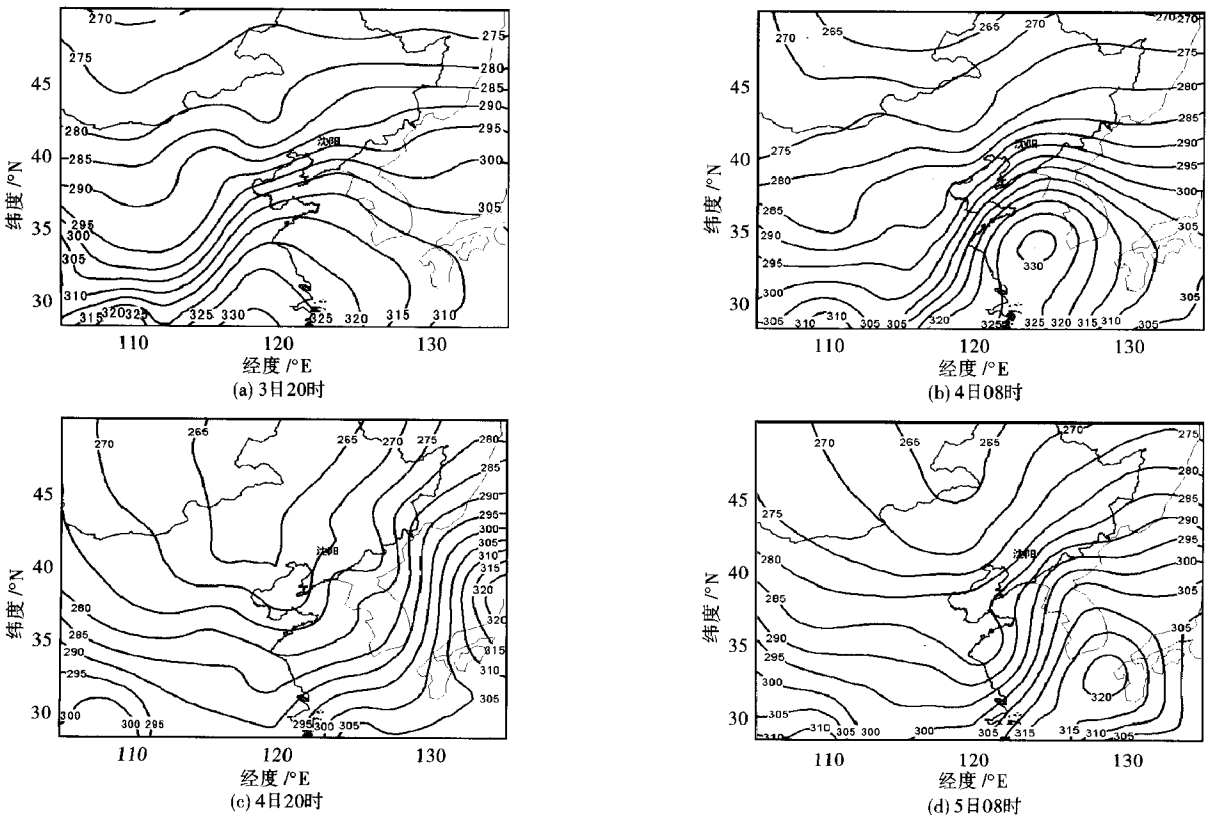


图 6 2007 年 3 月 3—5 日 850 hPa 假相当位温场

充沛的水汽输送及辐合上升是形成强降雪的必要条件。通过分析此次过程中的比湿、水汽通量及

低空急流等物理量,发现这次暴雪是在非常有利的水汽条件下产生的。

4.3.1 比湿

比湿是指单位质量湿空气实际含有的水汽质量。从各时次比湿分布可以看出(图 7),在此次过程

中,当东北地区大范围强降雪开始前,高比湿区移动过程中范围明显变窄、中心值加大。这种配置其实是一个将有限的水汽向局地集中的过程,也是产生

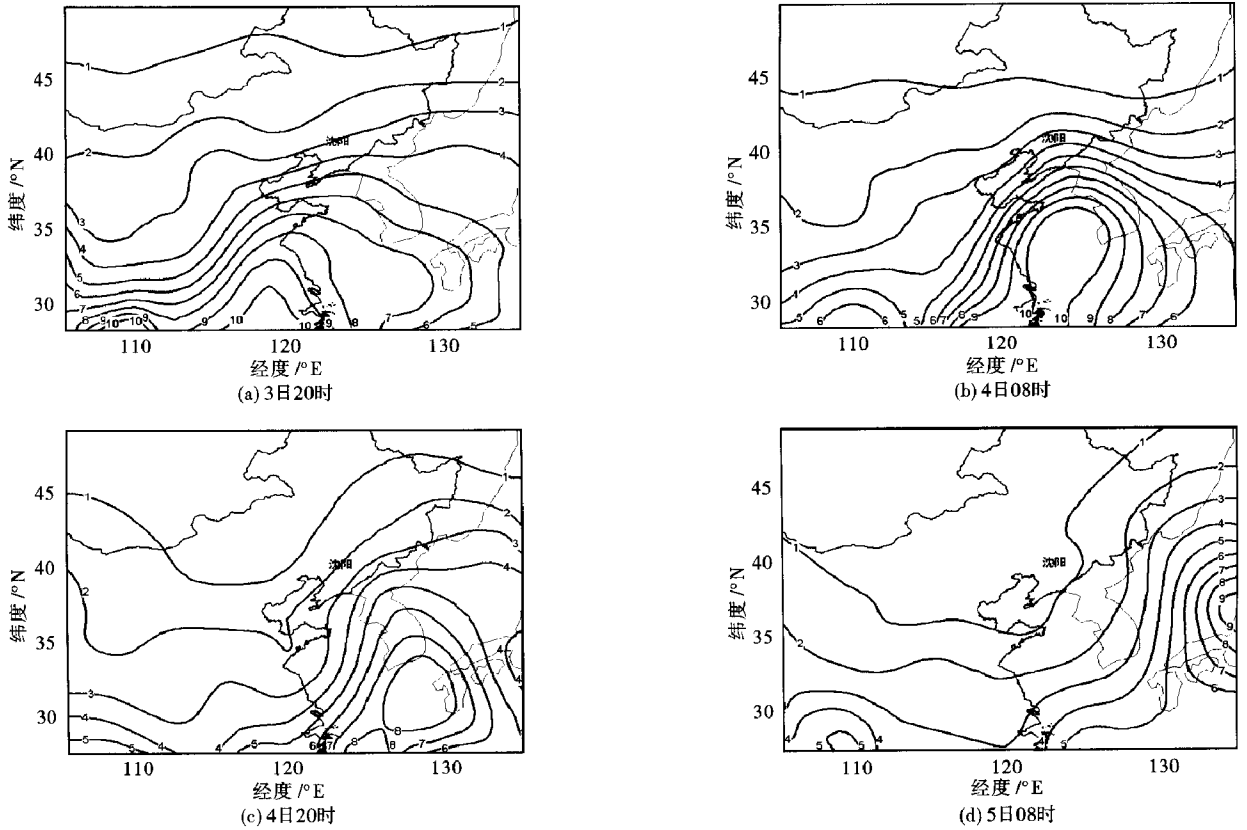


图 7 2007 年 3 月 3—5 日 850 hPa 比湿场

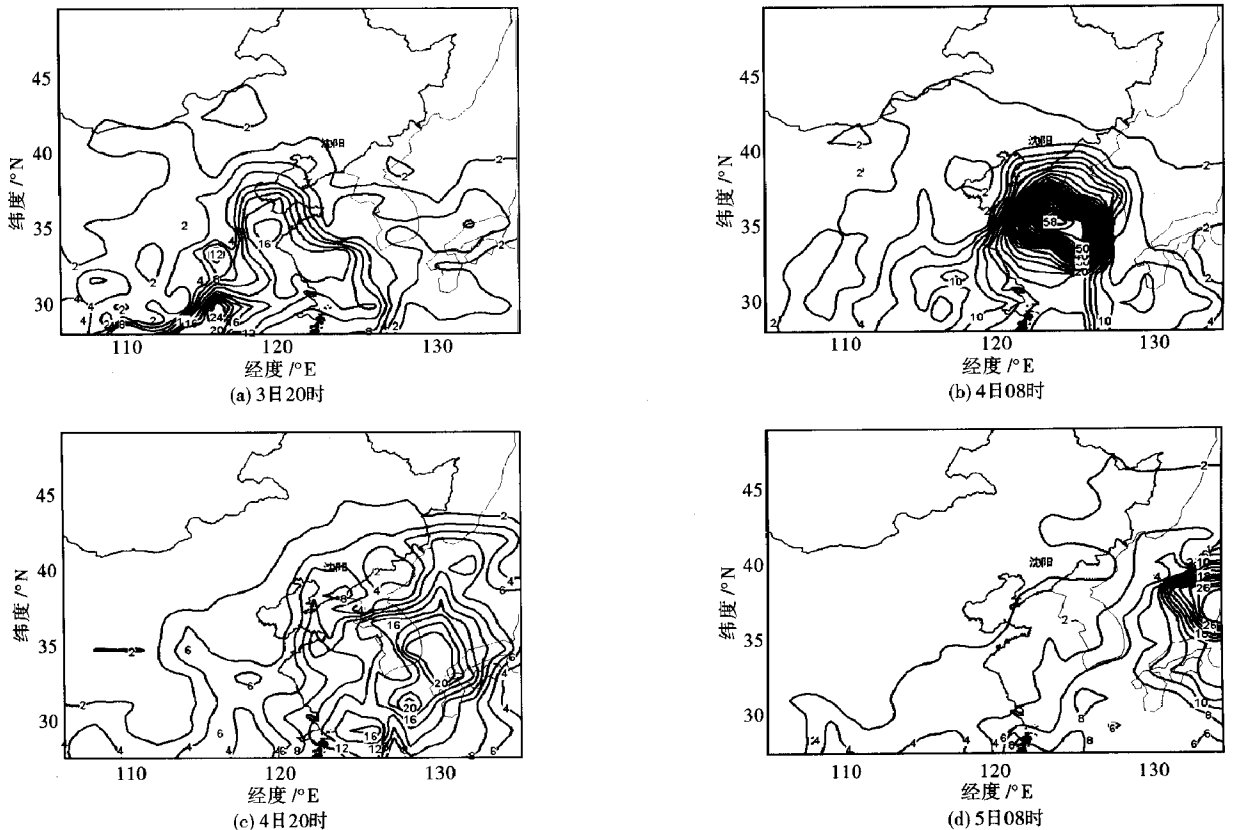


图 8 2007 年 3 月 3—5 日 850 hPa 水汽通量场

暴雪天气的一个主要原因。

3 日 20 时,山东半岛经江淮流域到华南西南沿海一带为大范围的高比湿区。4 日 08 时,高比湿区整体向东北方向移动,850 hPa 比湿大值区中心由四川盆地被输送移到黄海北部地区,辽宁处于高比湿舌顶部。4 日 20 时,随着湿区向东移动和湿中心强度的减弱,辽宁地区的湿度区明显减小。5 日 08 时,由于低层干冷空气的向下侵入,辽宁大部分地区已经出现相对干区,大范围强降雪过程结束。

4.3.2 水汽通量

充沛的水汽来源及输送是形成较大降水的必要条件。分析 3—5 日 850 hPa 水汽通量可以看出(图 8),此次过程的水汽路径和源地主要有 2 个:西南路径,来自中国南海的水汽;东南路径,来自渤海、黄海的水汽。被急流输送的水汽和从海面上获得大量的水汽在有利的环流条件下汇合并被抬升,为此次暴雪过程提供了充沛的水汽条件。

3 日 08 时,受西南涡前部强西南急流影响,在 850 hPa 四川盆地东部出现了明显的水汽通量大值区,中心达到 $24 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着低空急流的向北扩展加强,3 日 20 时水汽通量大值区前沿也随之向北移动到辽宁南部,4 日 08 时 850 hPa 低涡在山东半岛北部地区形成并加强,被急流输送的水汽和从海面上获得大量的水汽汇合,在辽宁南部海面形成了中心达 $58 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 的水汽通量大值区,充沛的水汽配合强的辐合及上升运动为此次提供了水汽条件。4 日 20 时,随着整个系统的东移,水汽通量大值区也明显减弱东移。

5 结论

(1)500 hPa 阶梯槽和地面江淮气旋是此次暴雪过程的主要影响系统;850 hPa 西南急流、东南急流及西南涡顶部偏东急流在辽宁上空形成强水汽辐合,强降雪落区位于急流切变处。

(2)强降雪出现在 850 hPa 涡度和 200 hPa 散度大值区内;强上升运动大值区的位置及移动与暴雪过程的时空演变基本一致。

(3)温度平流的强弱及冷暖过渡带位置均能较

好地反映出降水的强度及落区。

(4)高比湿区移动过程中范围变窄、中心值加大的现象其实是一个将有限的水汽条件向局地集中的过程,是造成此次暴雪的另一个主要原因。

(5)来自南海和渤海、黄海 2 个源地充沛的水汽在有利环流背景下汇合并被抬升为暴雪过程提供了充沛的水汽条件。

参考文献

- [1] Bennetts D A, Hoskins B J. Conditional symmetric instability—a possible explanation for frontal rain bands[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1979, 105(11): 945–962.
- [2] Emanuel K A. Inertial instability and mesoscale convective system. Part I: linear theory of inertial instability in rotating viscous fluids[J]. Advance in Atmospheric Sciences, 1979, 36(12): 2425–2449.
- [3] Frederick S, Lance F. Bosart mesoscale structure in the Megalopolitan snowstorm of 11–12 February 1983. Part I: Frontogenetical forcing and symmetric instability[J]. Advance in Atmospheric Sciences, 1985, 42(10): 1050–1061.
- [4] 隆宵, 程麟生. “95.1”高原暴雪及其中尺度系统发展和演变的非静力模式模拟[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 2001, 37(2): 141–147.
- [5] 王文辉, 徐祥德. 锡盟大雪和“7710”暴雪分析[J]. 气象学报, 1979, 37(3): 80–86.
- [6] 马福全, 隋东. 2003 年 3 月 2 日辽宁暴雪天气分析[J]. 辽宁气象, 2004(1): 10–11.
- [7] 刘宁微. “2003.3”辽宁暴雪及其中尺度系统发展和演变[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(2): 129–135.
- [8] 游德辉, 季锦忠. 遵义地区冰雹短时预报研究[J]. 贵州气象, 1994, 18(1): 3–7.
- [9] 胡中明, 周伟灿. 我国东北地区暴雪形成机理的个例研究[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(5): 679–684.
- [10] 刘素洁, 项英芬, 侯亚红. 辽宁冬季一次大风雪天气个例分析[J]. 辽宁气象, 2001(2): 19–20.
- [11] 陈力强, 张立祥, 杨森. 东北冷涡诱发的一次连续强风暴环境条件分析[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(6): 1–5.
- [12] 韩艳凤, 徐长哲. 半个世纪以来鞍山市春季降水的变化特征[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(3): 27–29.

Diagnostic analysis of very heavy storm from March 3 to 5 in 2007 in Liaoning province

CHEN Chuanlei^{1,2} JIANG Dakai² CHEN Yanqiu² YUAN Zipeng² SUN Xin²
HAN Jiangwen² LU Juan³ CAI Kuizhi² HE Baocai⁴

(1. College of Resource and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110016; 2. Shenyang Central Meteorological Observatory, Shenyang 110016; 3. Liaoning Meteorological Science and Technology Service Center, Shenyang 110016; 4. Huludao Meteorological Observatory, Huludao 125000)

Abstract: Based on the synoptic situation and physical field from March 3 to 5 in 2007 in Liaoning province, the relationships between the characteristics of synoptic situation, the related physical field and the main falling areas of very heavy storm were discussed. The results showed that ladder trough in 500 hPa and Jianghuai cyclone were the key influence systems in this process. Under the background of advantageous circulation, the lower convergence and the upper divergence in troposphere as well as the flush water vapor from two sources were converged and were raised, which were the main reasons causing the heavy storm. The heavy storm occurred in vorticity area of 850 hPa and in large divergence area of 200 hPa. The intensity and falling area of the heavy storm could be reflected by the temperature advection intensity and the cold-warm transition belt location.

Key words: Very heavy storm; Synoptic situation; Influence system; Physical variable; Diagnostic analysis