

吴迪,寿绍文,姚秀萍.东北冷涡暴雨过程中干侵入特征及其与降水落区的关系[J].暴雨灾害,2010,29(2):111-116

东北冷涡暴雨过程中干侵入特征及其与降水落区的关系

吴迪^{1,2},寿绍文³,姚秀萍^{2,4}

(1.南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044;2.中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081;
3.南京信息工程大学江苏省气象灾害重点实验室,南京 210044;4.中国气象局公共气象服务中心,北京 100081)

摘要:利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、FY-2C 卫星资料及常规气象观测资料,对一次典型东北冷涡暴雨过程中干侵入特征及其对东北冷涡暴雨发生发展的作用机制进行分析。结果表明,干侵入在卫星水汽图像上明显,为暗区,该暗区与大气动力场有较好的配置,与 350 hPa 位涡高值区分布一致;干侵入区是高位涡和低湿的重叠区,干侵入前沿为降水落区,表明了干侵入与强降水落区存在密切联系;对流层高层低湿、高位涡的冷空气下传有利于冷涡暴雨的发生发展,暴雨强度随着干侵入强度增强而增大。同时冷平流效应非常重要,其对干侵入强度指数的变化起到主要作用。

关键词:东北冷涡;暴雨;干侵入;降水落区

中图分类号:P458.1*21.1 文献标识码:A 文章编号:1004-9045(2010)02-0111-06

1 引言

对干侵入的研究早在 20 世纪 60 年代已经开始, Danielsen^[1]绘制了干侵入气流的三维结构图; Browning 等^[2-4]指出干侵入对温带气旋和爆发性气旋的发生发展起促进作用,对锋面降水结构产生重要的影响; Lemon^[5]研究表明干侵入对中气旋的发生发展十分有利; Richard 等^[6]分析了影响干侵入内垂直速度变化的相关因子; Curtis^[7]指出龙卷爆发与中层干侵入密切相关。 Yao Xiuping 等^[8-10]对与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入进行研究,说明了梅雨锋上低涡降水的产生、发展和维持与干侵入过程及演变密切联系; 杨贵名等^[11]揭示了干侵入在强降水和黄海气旋中的作用; 姚秀萍等^[12]综合考虑干侵入的源地、路径、特征、机制和效应,定义了表征干侵入强度的物理量,即干侵入强度指数(DII)来描述干侵入的强度; 王东海^[13]将表征干侵入气流的单个物理量综合起来,用一个简单的、使用方便的物理参数来表征干侵入; 李银娥等^[14]指出江淮流域梅雨期干冷空气的侵入对暴雨的产生发展起着重要的动力作用,除此之外,它还能够调整湿度场结构,产生热力效应。

综上所述,干侵入有利于温带气旋、爆发性气旋、中气旋、龙卷以及暴雨的发展^[15],那么就发生在东北地区且对天气具有重要影响的冷性涡旋系统即东北冷涡而言,它的发生、发展是否与干侵入有关? 东北冷涡暴

雨过程中干侵入有何特征? 与降水是否存在联系? 本文对一次典型的东北冷涡个例进行分析,揭示干侵入特征、对冷涡暴雨发生发展的作用机制及其与降水落区的关系,为今后对此类暴雨的诊断预报提供一定参考。

2 环流背景及降水特征

本文以 2006 年 7 月 20—24 日东北冷涡过程为例,利用 NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料、FY-2C 卫星资料及常规气象观测资料进行分析。

此次东北冷涡形成的整个过程中,亚欧中高纬 500 hPa 平均高空环流呈现稳定的两槽一脊形势(图 1a),贝加尔湖到我国东北地区为低槽区,槽区中我国东北地区上空有一冷涡中心,阻塞高压位于贝加尔湖以北中西伯利亚区域,至此,极地冷空气沿阻高脊前偏北气流南下,有利于东北冷涡的维持和发展。根据每隔 6 h 的 500 hPa 位势高度场、温度场及风场演变(图略)可见,此次东北冷涡过程在 21 日 12UTC 前后经历了一次明显的生消变化,即形成于黑龙江省西部旧冷涡的消亡和黑龙江省北部一个新冷涡的生成。为便于分析,这里将 19 日 12UTC 至 21 日 12UTC 出现的冷涡称为旧冷涡,21 日 12UTC 至 24 日 12UTC 出现的冷涡称为新冷涡。

从东北冷涡形成发展到减弱移出东北地区,我国东北以及内蒙古东部地区出现了大范围的降水,强降水主要集中在 20—22 日,过程雨量如图 1b 所示,其

收稿日期:2010-02-26;定稿日期:2010-04-27

基金项目:中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室 2008 年开放基金(2008LASW-B06)、中国气象局武汉暴雨研究所 2008 年度暴雨研究开放重点基金项目、国家自然科学基金项目(40875030、40875025)共同资助

作者简介:吴迪,女,1979 年生,硕士生,主要研究方向为中尺度大气动力学。E-mail:wu-di--2007@163.com

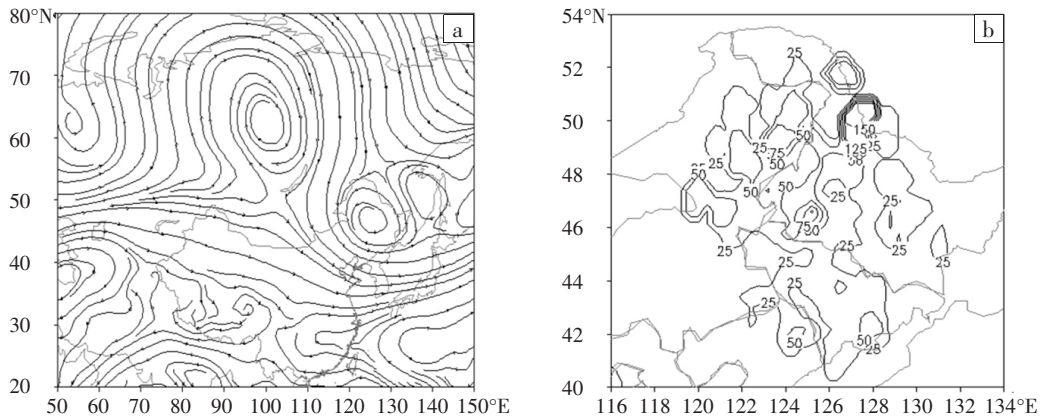


图 1 2006 年 7 月 19 日 12UTC 至 24 日 12UTC 的 500 hPa 平均环流背景场(a)和降水量(b, 单位:mm)图

中有两个强降水中心。最大降水中心位于黑龙江省的北部黑河地区附近,中心雨量达 150 mm,其次为出现在黑龙江省西南部安达附近的降水中心,雨量达 100 mm 以上。此次东北冷涡暴雨过程具有降水持续时间长、雨带多呈经向带状分布的特征。

3 干侵入特征和机制

3.1 干侵入特征

卫星水汽图像是监测干侵入的有效工具,干侵入是卫星水汽图像上中等到近黑色灰度的特定区域^[16]。为此,利用卫星水汽图像并与大气动力场结合,揭示此次冷涡暴雨过程中干侵入的特征。

图 2 给出的是旧冷涡(图 2a、2b、2c)和新冷涡(图 2d、2e、2f) 不同发展阶段卫星水汽图像上干侵入的演

变过程。在旧冷涡发展过程中,卫星水汽图像上螺旋状云带特征与干侵入区(暗区)已经非常明显(图 2a),之后随冷涡的逐渐减弱并向东南方向移动,干侵入区(暗区)的范围缩小(图 2b、2c),并在移动过程中暗区已经演变成细长狭状,逐渐减弱。而在新冷涡的发展过程中,黑龙江省北部有更冷的空气注入(图 2d),干侵入区(暗区)前部呈逆时针上翘与冷涡相互缠绕,干冷空气逐渐侵入到冷涡中心(图 2e、2f),使冷涡进入成熟阶段,直至 23 日 06UTC 冷涡开始减弱,干侵入区(暗区)也逐渐变得不再明显(图略)。由此可见,此次冷涡过程中干侵入在卫星水汽图像上表现得非常清楚。

由于干侵入是指从对流层顶附近下沉至低层的干空气^[2],且具有高位势涡度和低湿球位温两个重要

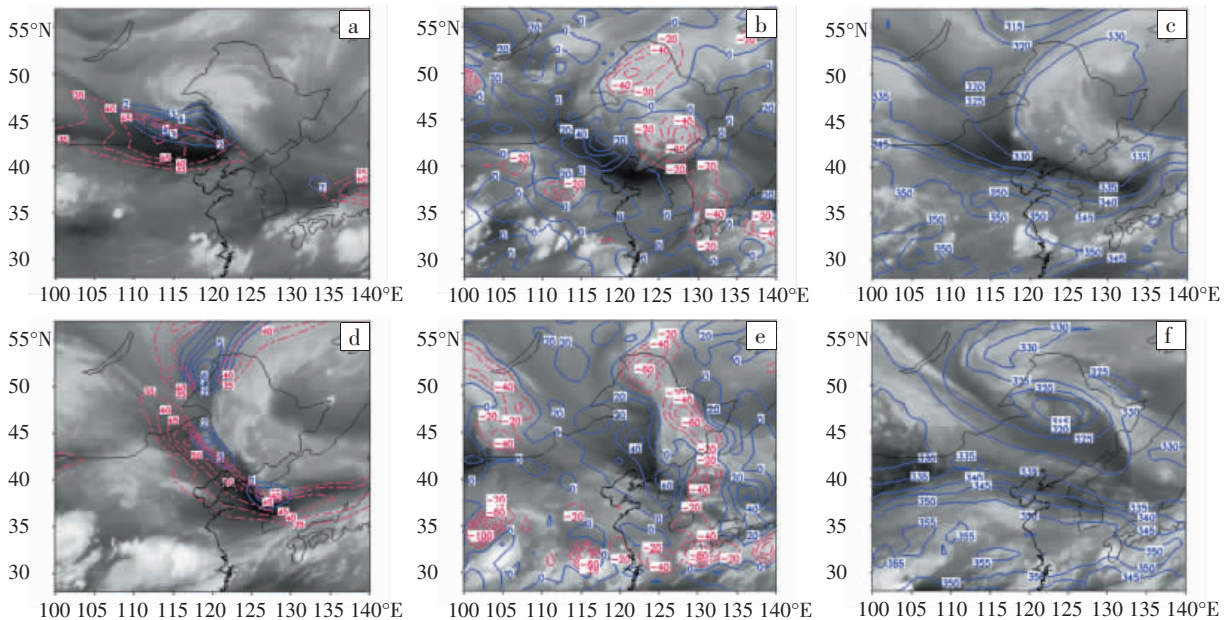


图 2 2006 年 7 月 20—22 日卫星水汽图像与 350 hPa 位涡(实线,单位:1PVU,1PVU= $10^{-6}m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$)及 300 hPa 风速(虚线,单位:m/s)叠加图(a、d)、与 400 hPa 垂直速度(单位: $10^{-2}Pa/s$)叠加图(b、e)、与 400 hPa 相当位温(单位:K)叠加图(c、f)

(a)20 日 00UTC,(b)20 日 12UTC,(c)21 日 00UTC,(d)21 日 12UTC,(e)22 日 00UTC,(f) 22 日 12UTC

特征,那么下面就分析此次冷涡暴雨过程中,是否具备干侵入以上特征。

图 2a、2d 中实线为 350 hPa 位涡,虚线为 300 hPa 高空急流。结合卫星水汽图像可以看到,高位涡分布区域也即是干侵入区(暗区),它与干侵入的走向也是一致的,同时干侵入区也是高空急流所在区。而从 400 hPa 垂直速度的分布可见(图 2b、2e),干侵入区(暗区)对应着下沉运动区。由于相当位温是一个能够综合反映温度和水汽条件的特征参数,当相当位温为高值区时代表的是高温高湿区,低值区代表低温低湿区,因此,图 2c、2f 中给出了 400 hPa 相当位温场。从图中可以看出,干侵入区(暗区)为低相当位温区,在新冷涡的成熟阶段已形成中心值为 315 K 的低温低湿中心(图 2f)。可见,此次东北冷涡暴雨过程中干侵入特征非常明显,卫星水汽图像上的干侵入区(暗区)与对流层高层高位涡区及干冷区相对应,同时也是下沉运动和高空急流所在地。

3.2 干侵入机制

姚秀萍等^[12]指出干侵入机制可以用位涡、温度平流和假相当位温表征。其定义的等压面上干侵入强度指数 DII_p 写为 DII_p ,表达式为: $DII_p = \frac{(-v_p \cdot \nabla_p T) \cdot (PV)_p}{(\theta_{se})_p}$ 。其中,下标“p”代表等压面上的值, v 为水平风速(单位

为 $m \cdot s^{-1}$), T 为温度(单位为 K), $-v_p \cdot \nabla_p T$ 为水平温度平流(单位为 $K \cdot s^{-1}$), PV 为位涡(单位为 1 PVU,即 $10^{-6} m^2 \cdot K \cdot s^{-1} \cdot kg^{-1}$), θ_{se} 为假相当位温(单位为 K)。下面就从此角度出发,以旧冷涡过程为例,分析干侵入对东北冷涡暴雨的作用机制。

图 3 给出的是沿冷涡中心的位涡、假相当位温和相对湿度(图 3a、3b、3c)及温度平流(图 3d、3e、3f)纬向垂直分布。在旧冷涡的形成阶段(图 3a),对流层高层为高位涡区,同时对应有干区存在,而在对流层中层冷涡中心附近有一孤立的值为 1PVU 的位涡区。从温度平流分布看(图 3d),只在对流层高层有弱的冷平流。到了旧冷涡的发展阶段(图 3b),高层具有高位涡值的干冷空气不断地向下补充,干区范围扩大并下伸至对流层中低层,高层冷平流强度明显增大(图 3e)。在旧冷涡开始减弱阶段(图 3c),冷涡中心上空的高位涡和干区强度无明显变化,但是冷平流的强度变化较大,高层的冷平流大值中心减弱,并由对流层高层贯穿于低层(图 3f)。由此可见,对流层高层具有低湿、高位涡的冷空气不断地向对流层的中下层侵入,促使低层冷涡中心上空出现了“上干冷、下暖湿”的垂直结构,有利于低层冷涡中心上空出现对流不稳定层结,这种对流不稳定的发展为冷涡暴雨的增强创造了有利的条件。

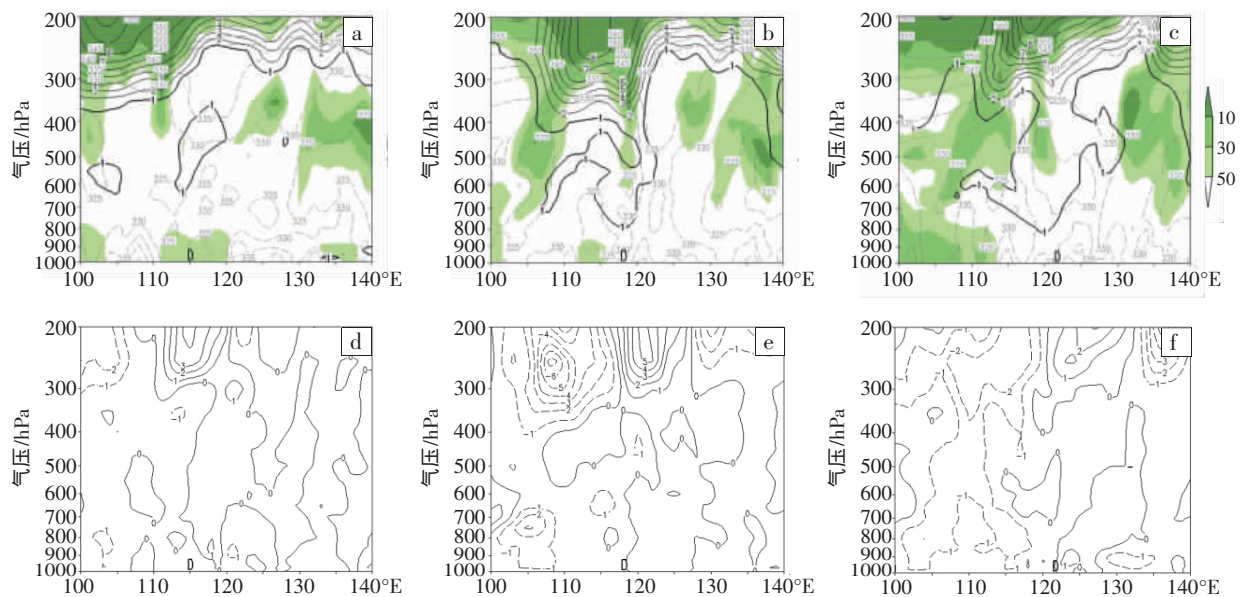


图 3 2006 年 7 月 19—20 日沿冷涡中心的位涡(实线,单位:1PVU)和假相当位温(虚线,单位:K)及相对湿度(阴影,单位:%)叠加图(a、b、c)、以及温度平流(单位:K/s)的纬向垂直剖面图(d、e、f)
D 为冷涡中心,(a、d)19 日 12UTC,(b、e) 20 日 00UTC,(c、f) 20 日 12UTC

在干侵入过程中,当高位涡异常越强,湿球位温越低,冷平流效应越强时,干侵入效应越强^[12]。从干侵入强度指数沿冷涡中心的纬向垂直剖面图中可见(图 4),干侵入强度指数的高值区位于对流层的高层,随

干侵入强度指数的增强,冷涡进入加强发展阶段(图 4b)。然而,在冷涡的减弱阶段,虽然冷涡中心上空的高位涡和干区强度变化不大,但是由于冷平流的明显减弱,使得干侵入强度指数也随之减小。这也充分说

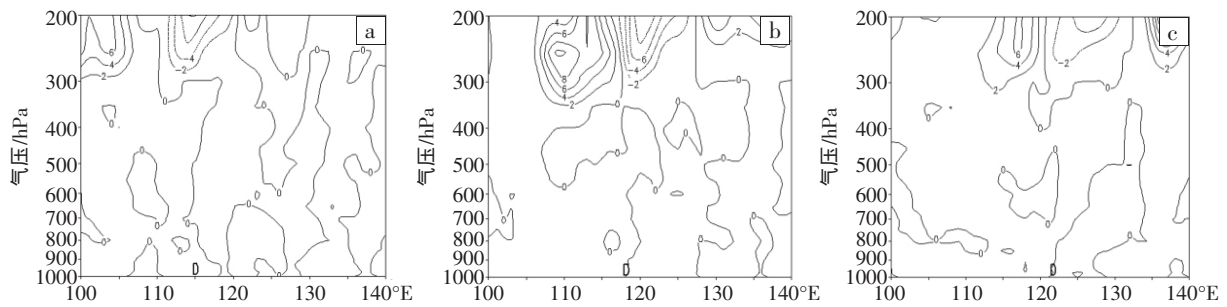


图 4 2006 年 7 月 19—20 日沿冷涡中心的干侵入强度指数(单位:PVU/s)纬向垂直剖面图
D 为冷涡中心,(a)19 日 12UTC,(b)20 日 00UTC,(c)20 日 12UTC

明了干侵入中冷平流效应的重要作用。

由干侵入强度指数的垂直分布可见,其高值区位于对流层的高层,为此,图 5 给出 250 hPa 温度平流和干侵入强度指数的水平分布。从温度平流的演变可见,在旧冷涡的形成阶段(图 5a), 45° — 50° N、 105° — 110° E 区为弱的冷平流,其东侧的暖平流比其强度大。

进入旧冷涡的发展阶段(图 5b),冷平流强度明显增强,并随西北气流向东南方向移动,此时冷平流要略强于其东侧暖平流。到了旧冷涡的减弱阶段(图 5c),冷平流分裂为 3 个冷中心继续向东南方向推进,但强度减弱。干侵入强度指数的分布(图 5d、5e、5f)与温度平流的分布十分相似,这里不再赘述。

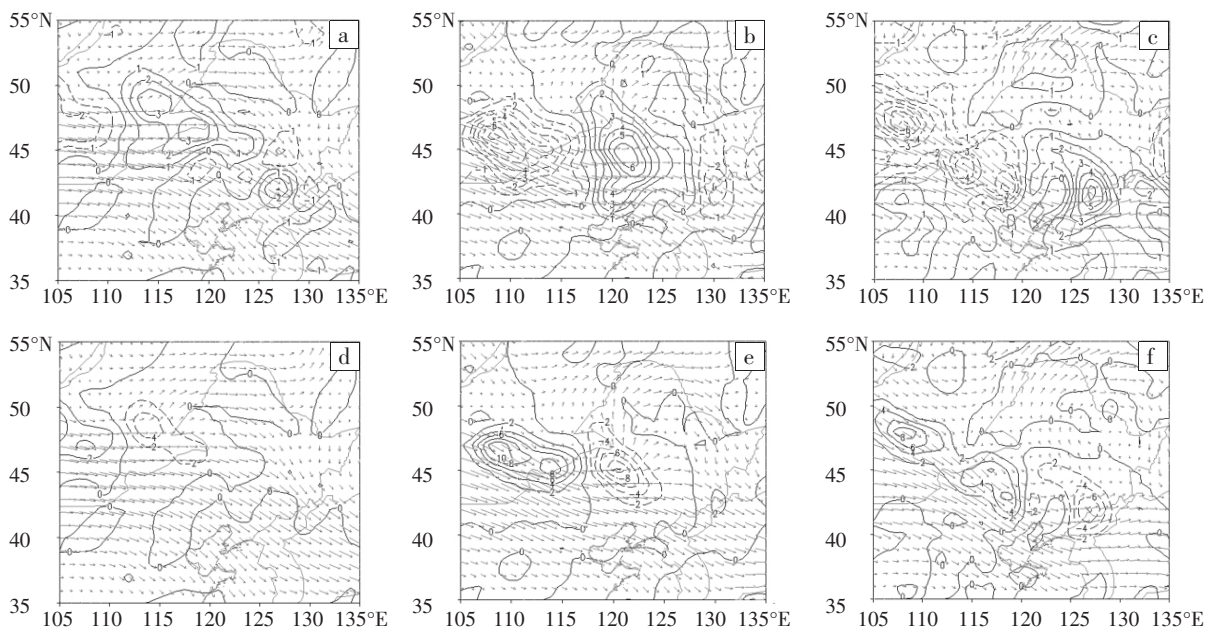


图 5 2006 年 7 月 19—20 日 250 hPa 温度平流(单位:K/s)和风场叠加图(a、b、c)、
250 hPa 干侵入强度指数(单位:PVU/s)和风场叠加图(d、e、f)
(a、d)19 日 12UTC,(b、e) 20 日 00UTC,(c、f) 20 日 12UTC

综上对干侵入机制分析可见,低湿、高位涡的冷空气下传,叠置在暖湿气流之上,有利于冷涡暴雨的发生发展,且干侵入强度增强时,冷涡暴雨强度也随之增大。干侵入强度指数大值区位于对流层的高层,同时,冷平流作用不可忽视,其对干侵入强度指数的变化起主要作用。

4 干侵入与降水落区关系

强降水发生时,对流层中高层表现为对流稳定,而低层为对流不稳定区,即当高层干冷空气下滑与上升的低空高温高湿空气交汇,易于储存和释放能量,

利于暴雨的发生。根据以往的研究可知,位涡理论在暴雨形成物理机制以及暴雨强度和落区方面得到了一些有意义的结论^[17-18],而高位涡正是干侵入的一个重要特征,那么干侵入与强降水的落区有怎样的配置关系?下面就从干侵入的两个特征出发,分析干侵入与降水落区间的关系。

图 6a、6b、6c 和图 6d、6e、6f 分别给出了旧冷涡过程的发展开始减弱阶段和新冷涡过程的发展阶段 350 hPa 位涡、相对湿度、风场以及降水的分布情况。其中粗实线为 ≥ 2 PVU 的位涡分布区,细实线代表 $\leq 50\%$ 的相对湿度,阴影区为每隔 6 h 的降水情况。结合卫

星水汽图像(图2)可以看到,高位涡与水汽图像上暗区的走向、分布基本上是一致的,同时高位涡分布区也是低相对湿度区,而降水落区主要位于高位涡等值线逆时针上翘点的前部,也即是降水分布于高

位涡等值线前沿,对应于湿度场上的高湿区内。那么,这里若用高位涡和低湿的重叠区来表示干侵入区,则以上的分析充分说明了干侵入与强降水落区是密切相关的。

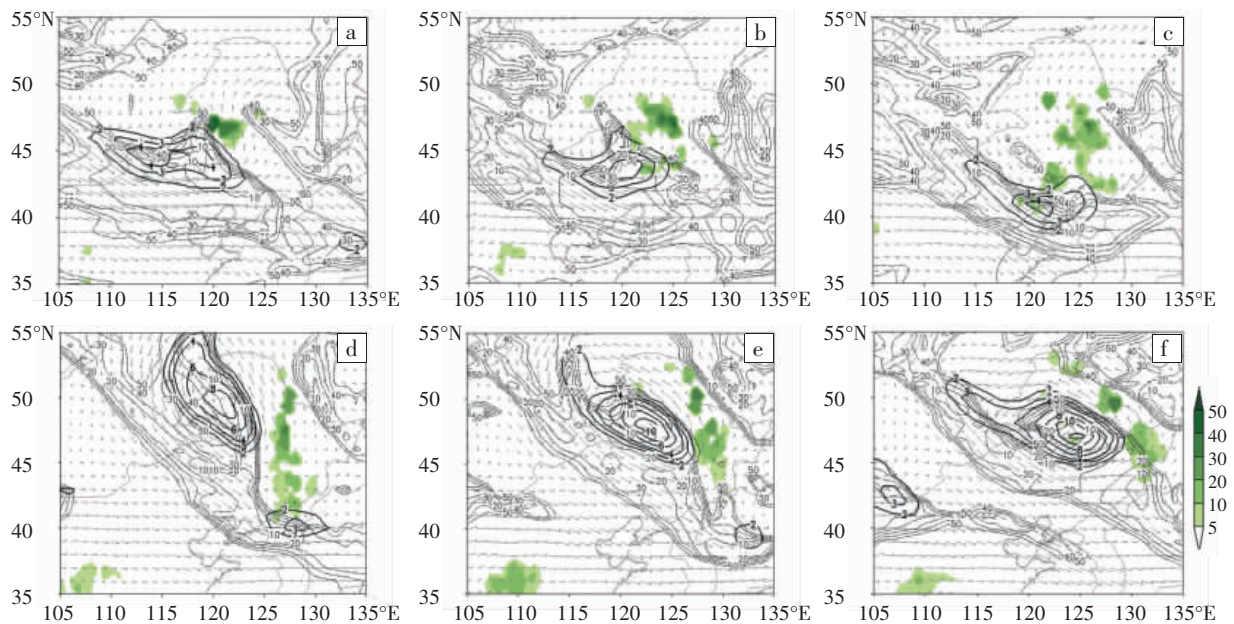


图 6 2006 年 7 月 20、22 日 350 hPa 位涡(≥ 2 PVU,粗实线,单位:PVU)、风场(单位:m/s)、相对湿度($\leq 50\%$,细实线,单位:%)与 6 h 降水量(阴影区,单位:mm)叠加图
(a)20 日 00UTC, (b)20 日 06UTC, (c)20 日 12UTC, (d)22 日 00UTC, (e)22 日 06UTC, (f)22 日 12UTC

5 结论

本文结合卫星水汽图像,对 2006 年 7 月 20—24 日东北冷涡暴雨过程中干侵入的特征进行分析,揭示了干侵入对东北冷涡暴雨发生发展的作用机制,指出了干侵入与降水落区间的配置关系,得出以下结论:

(1)此次东北冷涡暴雨过程中,卫星水汽图像上干侵入(暗区)非常明显,干侵入重要特征在卫星水汽图像与大气动力场叠加图中得以体现。卫星水汽图像上的干侵入区(暗区)与对流层高层高位涡区及干冷区相对应,同时也是下沉运动和高空急流所在区。

(2)低湿、高位涡的冷空气下传叠置在暖湿气流之上,有利于冷涡暴雨的发生发展,且干侵入强度增强时,冷涡暴雨强度也随之增大。干侵入强度指数大值区位于对流层的高层,同时冷平流作用非常重要,其对干侵入强度指数的变化起主要作用。

(3)350 hPa 位涡高值区分布与卫星水汽图像上的暗区一致,若用高位涡和低湿的重叠区表示干侵入区,则降水落区主要位于干侵入前沿,表明干侵入与强降水落区密切相关。

参考文献:

[1] Danielsen E F. Project Springfield Report [R]. Washington D C:

Defense Atomic Support Agency,1964:99.

- [2] Browning K A. The dry intrusion perspective of extra-tropical cyclone development[J]. Meteor Appl,1997,4(4):317-324.
- [3] Browning K A,Golding B W. Mesoscale aspect of a dry intrusion within a vigorous cyclone [J]. Q J R Meteorol Soc, 1995, 121(523): 463-493.
- [4] Browning K A, Roberts N M. Variation of frontal and precipitation structure along a cold front [J]. Q J R Meteorol Soc, 1996, 122 (536):1845-1872.
- [5] Lemon L R. On the mesocyclone "dry intrusion" and tornadogenesis[C]. In: Preprints,19th Conference on Severe Local Storms. Minneapolis: Amer Meteor Soc, 1998.752-755.
- [6] Richard P J, John H E Clark. The diagnosis of vertical motion within dry intrusions[J]. Weather and Forecasting, 2003, 18(5):825-835.
- [7] Lon Curtis. Midlevel dry intrusions as a factor in tornado outbreaks associated with landfalling tropical cyclones from the Atlantic and Gulf of Mexico[J]. Weather and Forecasting, 2004,19(2):411-427.
- [8] Yao Xiuping, Wu Guoxiong, Zhao Bingke et al. Research on the dry intrusion accompanying the low vortex precipitation [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007,50(9):1396-1408.
- [9] 姚秀萍,吴国雄,赵兵科,等.与梅雨锋上低涡降水相伴的干侵入研究[J].中国科学 D 辑地球科学,2007,37(3):417-428.
- [10] 姚秀萍,于玉斌.2003 年梅雨期干冷空气的活动及其对梅雨降水的作用[J].大气科学,2005,29(6):973-985.
- [11] 杨贵名,毛冬艳,姚秀萍."强降水和黄海气旋"中的干侵入分析[J].高原气象,2006,25(1):16-28.

- [12] 姚秀萍,彭广,于玉斌.干侵入强度指数的表征及其物理意义[J].高原气象,2009,28(3):507-515.
- [13] 王东海,杨帅.一个干侵入参数及其应用[J].气象学报,2009,67(4):522-529.
- [14] 李银娥,谌伟,张萍萍.一次华北冷涡暴雨过程的诊断分析[J].暴雨灾害,2007,26(4):306-310.
- [15] 于玉斌,姚秀萍.干侵入的研究及其应用进展[J].气象学报,2003,61(6):769-778.
- [16] 帕特里克·桑特里特,克里斯托.卫星水汽图像和位势涡度场在天气分析和预报中的应用[M].方翔,译.北京:科学出版社,2008:1-156.
- [17] 于玉斌,姚秀萍.华北一次特大台风暴雨过程的位涡诊断分析[J].高原气象,2000,19(1):111-121.
- [18] 陈德花,寿绍文,张玲,等.“碧利斯”引发强降水过程的湿位涡诊断分析[J].暴雨灾害,2008,27(1):37-41.

Dry Intrusion's Feature and Its Relationship with Rainfall Regions on Cold Vortex Heavy Rain Process in Northeast China

WU Di^{1,2}, SHOU Shao-wen³, YAO Xiu-ping^{2,4}

(1.Institute of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;

2.State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081;

3.Jiangsu Key Laboratory of Disaster Weather, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044;

4.Service Center of Public Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: Based on the NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ reanalysis data, FY-2C satellite data and conventional meteorological observations, the characteristics of the dry intrusion and its impacts on the formation and development of the cold vortex heavy rain during 20-24 July, 2006 are analyzed. The results show that the dry intrusion is a dark and obvious zone on the water vapor image. The dark zone has a better correspondence with the dynamic field corresponding with the distribution of the high potential vorticity at 350 hPa. Dry intrusion area is the overlap of both high potential vorticity and low humidity. Forefront of the dry intrusion is the rainfall regions, which indicates that the dry intrusion has a close relationship with strong rainfall regions. The downward cold air characterized by high potential vorticity and low humidity in the upper troposphere enhances the development of cold vortex heavy rain. The cold vortex heavy rain increases with an increasing intensity of dry intrusion. Meanwhile, the cold advection plays a very important role in variation of DII.

Key words: Northeast cold vortex; Heavy rain; Dry intrusion; Rainfall regions