

文章编号: 2096-1618(2018)01-0078-06

高低空急流的配置对2015年8月3日 辽宁暴雨的影响机制

谭政华^{1,2}, 巩远发¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院, 四川 成都 610225; 2. 辽宁省本溪市气象局, 辽宁 本溪 117000)

摘要:2015年8月3-4日, 辽宁东部地区发生了一次暴雨-大暴雨天气过程, 为研究高低空急流对此次天气过程的影响机制, 利用 FNL 再分析资料及中国自动站与 CMORPH 降水融合产品对这一天气过程进行了诊断分析。重点从高低空急流的配置、演变及其次级环流的垂直结构特征角度出发, 分析了高低空急流在本次暴雨过程中的作用。结果表明, 高低空急流上升支耦合是本次暴雨过程的重要抬升机制, 高空急流次级环流的锋生作用为暴雨过程提供了触发条件和能量供应, 低空急流的强烈水汽输送作用是强降水产生的重要原因。另外, 长白山地形对水汽自南向北输送时的抬升作用也对降水增强起到了一定作用。

关键词:天气动力学; 暴雨诊断; 高空急流; 低空急流; 耦合作用; 次级环流

中图分类号:P442⁺.1

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2018.01.014

0 引言

高低空急流是暴雨天气中重要的影响系统之一, 近年来, 有关高空、低空急流在暴雨天气中的作用受到许多学者和气象业务人员的高度关注。全美兰等^[1]、刘海文等^[2]分别对2012年发生在北京地区的“7.21”暴雨进行了分析研究, 认为“7.21”暴雨的产生及降水增幅与高空急流强烈的辐散机制和次级环流密切相关; 濮梅娟^[3]对2004年6月发生在江淮地区的一次暴雨过程进行了数值模拟研究, 指出暴雨发生时的强烈上升运动与高低空急流相互耦合产生的次级环流有关, 急流耦合是暴雨增幅的动力机制之一; 廖移山等^[4]分析了2008年湖北省一次大暴雨天气的发生机制, 认为南压高压及高空急流右后侧风速辐散区的稳定维持是降雨持续发展的重要原因。林毅等^[5]通过数值模拟等方法研究了2002年6月福建地区的一次暴雨天气过程, 指出高空急流风速下传有利于低空急流的维持, 是暴雨发生的一种触发机制, 急流动力场的耦合作用也是暴雨产生的动力条件之一。徐海明等^[6]研究了倾斜高空急流轴对强降水的作用, 指出倾斜高空急流轴出口处由于水平风场的分布不均, 导致倾斜急流轴出口处的右侧形成较强高空辐散场, 有利于大暴雨产生。综合前人的研究可以看出, 高低空急流在暴雨天气中扮演着举足轻重的角色, 一方面表现

为高空急流的辐散机制、低空急流的水汽输送作用为暴雨发生、维持提供了有利的动力条件和水汽条件^[4-9]; 另一方面, 高空急流和低空急流次级环流相互耦合产生的强烈上升运动既是暴雨发生的一种启动机制, 同时也是暴雨增强的动力因子^[10-16], 高低空急流相互耦合以及高空风速动力下传对低空急流的促进加强往往是暴雨、大暴雨天气发生的关键因子^[2-3, 5, 14]。因此, 对暴雨天气中急流耦合作用和次级环流结构进行分析, 研究急流耦合对暴雨天气发生发展的作用, 对认识暴雨等高影响天气的发生机制及暴雨天气的分析预报具有十分重要的意义。

选取2015年8月3-4日发生在辽宁东部地区的一次暴雨-大暴雨天气过程, 利用 FNL 再分析资料及中国自动站与 CMORPH 降水融合产品, 从高低空急流的配置演变及急流耦合区次级环流垂直结构角度入手, 配合水汽通量、湿位涡、假相当位温等物理量场的诊断分析, 对高低空急流耦合在此次暴雨天气过程中的作用进行研究。其中 FNL 资料来源于 NCAR/UCAR RDA 网站 (<https://rda.ucar.edu>), 资料空间分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$, 时间分辨率为 6 h; 中国自动站与 CMORPH 降水融合产品来源于中国气象数据网 (<http://data.cma.cn/>) 提供的“中国自动站与 CMORPH 降水产品融合的逐时降水量网格数据集(1.0版)”, 该产品采用中国范围内经过质量控制后的 3~4 万个自动气象站逐小时降水观测资料对美国气候预测中心研发的全球 30 min, 8 km 分辨率的 CMORPH 卫星反演降水产品进行误差订正及最优插值后得到^[17-18], 经过误

收稿日期: 2017-09-25

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91537214); 国家自然科学基金资助项目(41775079、41275080)

差订正后的 CMORPH 降水融合产品对中国地区夏季降水的描述具有较高精确度,同时具有时空分辨率高等特点,其空间分辨率达到 $0.1^{\circ}\times 0.1^{\circ}$,时间分辨率为 1 h,能够反映出尺度在 10 km 范围的 γ 中尺度系统特征,极大的弥补了许多地区中小尺度系统降水资料稀缺等问题。国内外许多学者针对该套融合产品开展了大量的验证工作,结果表明中国自动站与 CMORPH 降水融合产品在中国地区质量可靠^[19-20],目前已在台风的监测诊断^[21]、高原降水的诊断分析^[22]中取得广泛应用。

1 天气过程概述

2015 年 8 月 3 日 12 时–4 日 12 时(世界时,下同),辽宁东部地区出现大到暴雨局地大暴雨天气,暴雨落区沿长白山西南侧迎风坡呈东北–西南向带状分布(图 1b),降水中心位于辽宁省本溪市桓仁县境内,24 h 最大降水量 155.4 mm,达到大暴雨量级。图 1(a)给出了 2015 年 8 月 3 日 12 时–4 日 12 时 500 hPa 平均高度场,可以看出,从环流背景上,本次强降水过程主要受西太平洋副热带高压北侧西南气流及高空低涡南侧锋区共同影响。其中西太平洋副热带高压受其南侧超强台风“苏迪罗”挤压作用影响强烈北抬,125°E 处西伸脊点位于 30°N 附近。副高北侧东北地区北部为高空低涡,低涡向南伸出低槽,低涡南侧与副高之间等高线密集,在辽宁上空形成强烈锋区。并且,低纬度地

区印度半岛上空有低涡稳定少动,高原南侧南支低槽活跃,引导孟加拉湾水汽沿南支槽前经副高西侧向辽宁上空输送。

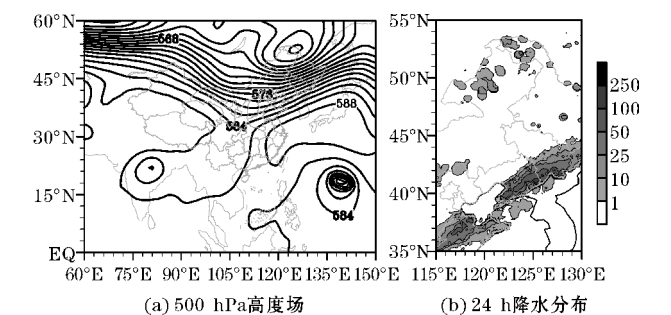


图 1 2015 年 8 月 3 日 12 时–4 日 12 时 500 hPa 平均高度场及 24 h 降水分布

图 2(a)给出了位于辽宁东部本溪市桓仁县境内的降水中心(41.1°N,125.3°E)附近逐小时降水量时间序列图,可以看出,降水从 8 月 3 日 12 时开始,13 时突然增强,小时雨强超过 20 mm,出现第一次短时强降水过程,随后降水有所减弱,3 日 15 时–4 日 17 时降水出现短暂停歇。说明 3 日 13 时前后降水中心附近恰有对流单体经过,降水具有一定中尺度特征,强度分布不均。3 日 18 时开始降水再次增强,降水中心附近于 3 日 19 时再次出现短时强降水过程,小时雨强达 24.6 mm,说明有新的对流单体再次经过。3 日 19 时后降水强度有所减弱,但仍以 3~10 mm/h 的强度稳定维持,4 日 03 时降水略有增强,小时雨强在 14 mm 左右,随后降水逐渐减弱,到 4 日 07 时之后,降水过程基本结束。

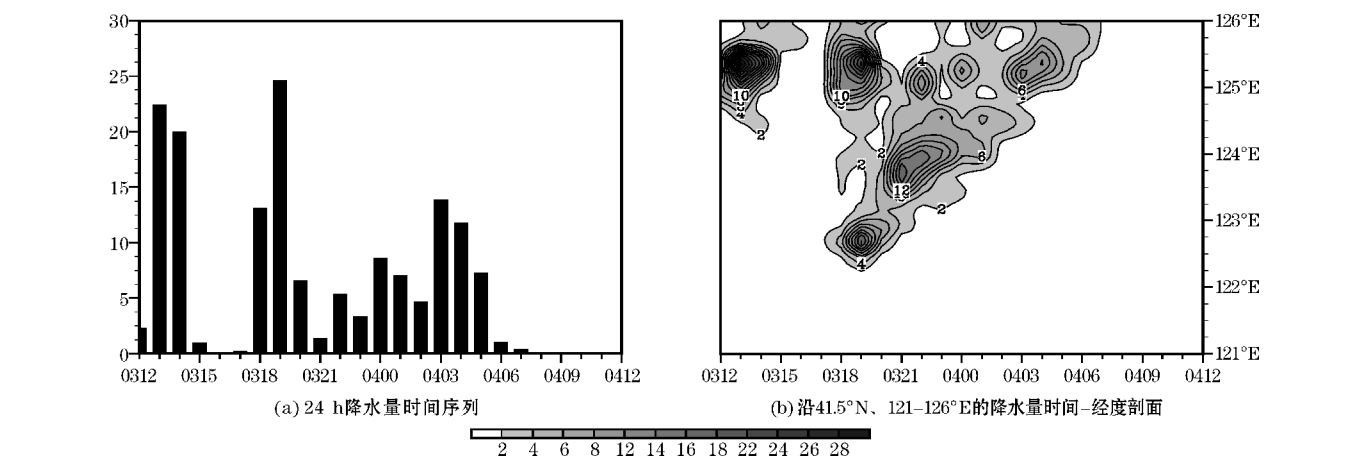


图 2 2015 年 8 月 3 日 12 时–4 日 12 时降水中心(41.1°N,125.3°E)附近的降水变化(横坐标前两位为日期,后两位为时间)

为进一步分析暴雨的时空演变及中尺度特征,图 2(b)给出 8 月 3 日 12 时–4 日 12 时降水中心附近(41.5°N,121°–126°E)的降水量时间–经度剖面。从降水量时空演变上可以看出,位于 125°E 附近的降水具有很强的局地性,3 日 13 时、18 时前后分别有强降水雨团在局地生成并快速发展,雨团生成后几乎没有

随时间移动,而是在原地维持并逐渐减弱,两个雨团在生成地附近维持时间不长但降水强度大。与此同时,3 日 18 时前后在 122°E 附近有雨团生成并向东传播,雨团在向东传播过程中,在 123.5°E 附近达到最强,降水强度达到 16 mm/h。21 时后雨团继续向东传播,强度迅速减弱。

2 高低空急流配置及演变

高空急流是对流层高层动量集中的气流带,高空急流的存在提供了对流层高层强烈的辐散机制,为对流层低层形成辐合上升运动提供有利条件;与此同时,由于高空急流与其两侧气流间强烈的风速切变,在高空急流入口区和出口区两侧形成环绕急流的次级环

流^[23-24]。对于急流入口区,次级环流在其南侧形成上升气流,这支上升气流一方面为急流南侧的降水提供抬升机制,一方面在对流层低层引导偏北气流携带冷空气向南入侵,促使冷锋锋生,增加大气斜压性,为降水提供抬升机制及动力条件。而存在于对流层低层的低空急流一方面为降水落区提供水汽输送,一方面在其左侧由于风速切变形成正的切变涡度,促进低层上升运动加强,为降水提供动力条件。

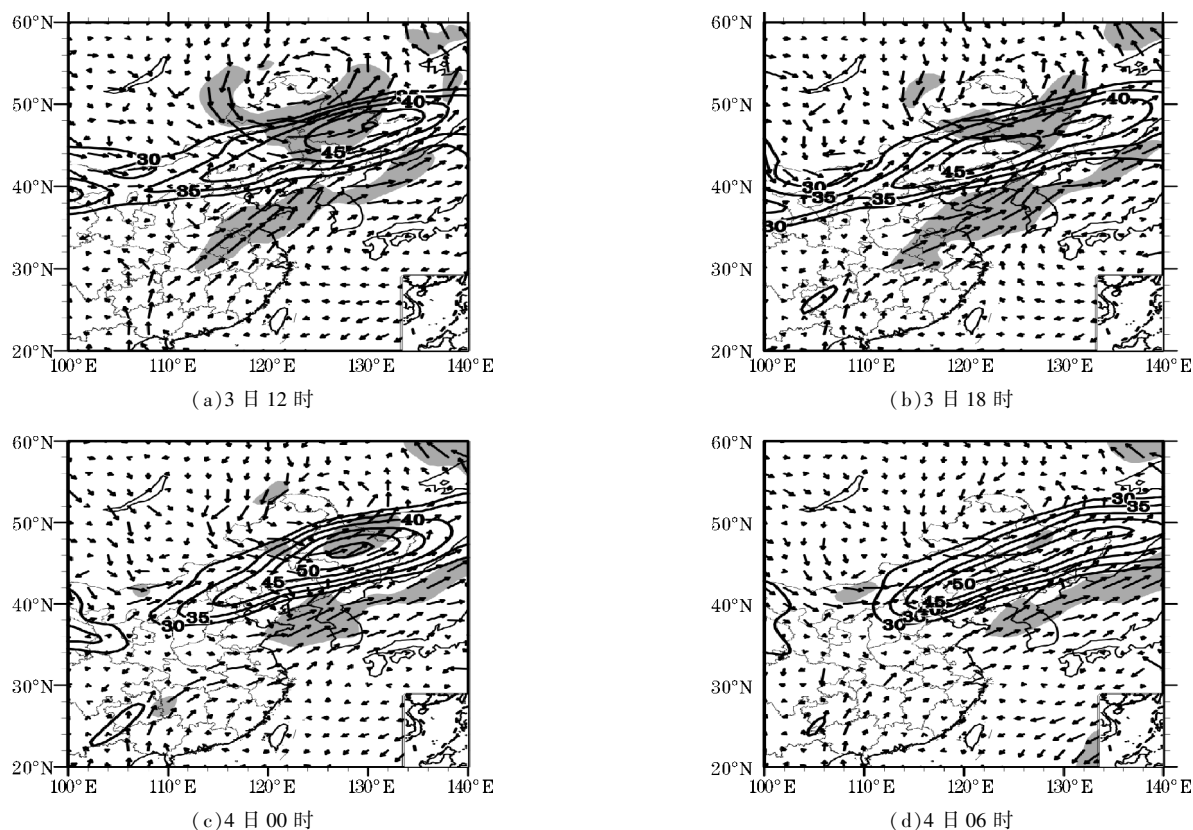


图3 2015年8月3日12时-4日06时850 hPa风场(浅色填色区域为850 hPa风速 ≥ 12 m/s的低空急流区)和200 hPa风速(等值线仅为200 hPa风速 ≥ 30 m/s的高空急流区域,等值线间隔为5)

为分析高低空急流及其配置在本次强降水过程中的作用,图3给出3日12时-4日6时逐6小时高低空急流配置及其演变情况。可以看出,辽宁东部的降水落区上空在强降水产生、维持的4个时段始终位于200 hPa高空急流入口区南侧,并且在前3个时段(强降水的主要发生时段),降水落区还同时位于850 hPa低空急流出口区左前侧,给强降水过程提供了较强的动力条件。而在高低空急流的时间演变上可以看出,3日12-18时,200 hPa上空带状急流加强南压,850 hPa低空急流也有所加强北抬,从高低空急流的配置上,两支急流在辽宁东部形成耦合,其中3日18时耦合程度达到最强,与地面降水中心附近触发中尺度对流性雨团、降水突然增强并出现短时强降水的时间吻合(图2a、2b),说明急流耦合可能提供了中尺度对流系统的触发机制。与此同时,850 hPa低空急流引导南海、渤海上空水汽沿副高边缘向降水落区输送。4日0-6时,

200 hPa高空急流进一步加强但中心位置明显东移北抬,与此同时,850 hPa低空急流强度明显减弱并逐渐东移,对应地面降水逐渐减弱并在4日7时之后结束。

3 高低空急流次级环流结构特征

通过第2节的分析发现,高低空急流耦合程度最强的时段与地面降水中心突然加强在时间上有较好的一致性,为进一步揭示高低空急流耦合作用及其次级环流在本次降水过程中的重要作用,图4分别给出了3日18时这一降水最强时刻,沿强降水落区所在经度(垂直于高空急流入口区,图4a)和沿暴雨落区所在纬度(高空急流入口区南侧,图4b)的风速场和 u 、 $-w$ 合成场垂直结构。从中可以看出,在垂直于高空急流入口区方向(图4a),45°N上空存在明显的风速大值区,

其中风速的大值中心位于200 hPa高度附近,这一风速大值中心与第2节分析中给出的高空急流中心相对应。在高空急流中心两侧有明显的次级环流,其中急流南侧低层为强烈的上升运动,上升运动最强的高度出现在700 hPa附近。这支次级环流上升运动最强的区域与此次降水过程中强降水落区有很好的对应,进一步说明高空急流次级环流的上升支对强降水产生具有一定的触发作用。在高空急流入口区南侧(图4b),125°E上空对流层低层700 hPa附近也有一风速大值

区,其中心最大风速达到25 m/s,说明该区域上空有较强的低空急流经过。在低空急流风速大值区左侧,低空急流北侧气旋性切变区产生的上升气流与高空急流南侧次级环流的上升支相互耦合,垂直运动加强。其中垂直运动最强区域在急流轴附近,而地面降水最大值出现在700 hPa急流轴左侧下方、高低空急流耦合上升运动最强区域,说明高低空急流耦合产生的强烈垂直运动对本次强降水过程有明显作用。

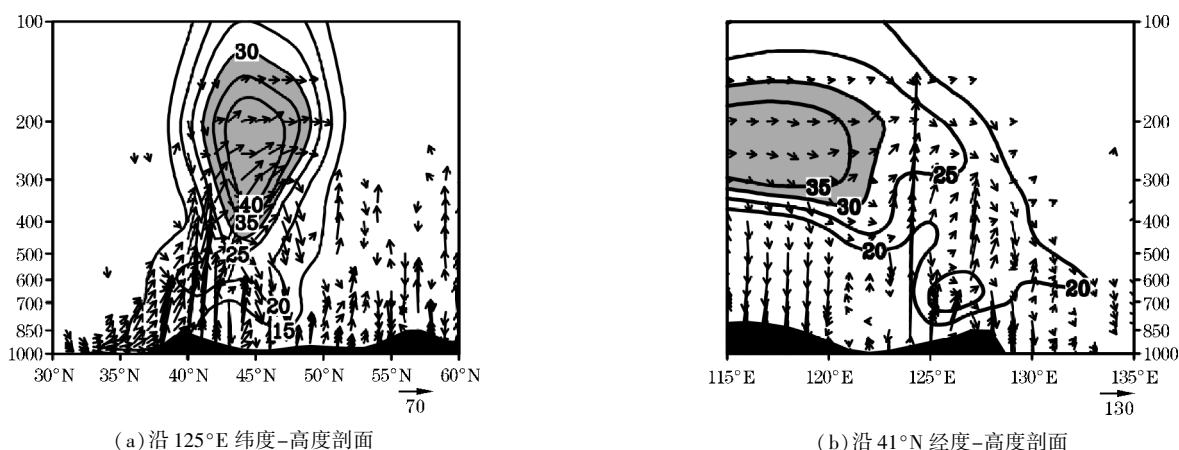


图4 2015年8月3日18时沿125°E纬度-高度剖面和沿41°N经度-高度剖面(等值线为全风速,单位:m/s,等值线间隔为5,浅色阴影区为风速 ≥ 30 m/s区域;矢量场为纬向风 u 及垂直速度 $\omega \times (-100)$ 的合成;图下部黑色阴影区为地形)

4 水汽输送及对流层锋区结构特征

高空急流入口区的次级环流是一个热力正环流圈,即该次级环流在急流入口区南侧暖区的低层上升后,在对流层高层向北绕过急流轴后在急流入口区北侧下沉,下沉气流到达对流层低层后向南辐散,引导对流层低层冷空气向南输送。根据前人研究,这一热力正环流圈被认为是中纬度地区冷锋锋生及冷空气向南爆发的一种机制^[2,24]。在暴雨天气中,高空急流入口区北侧的冷空气回流可以促使对流层中低层冷锋锋生,增加大气的斜压性,为暴雨过程提供触发机制及动量、能量供应。

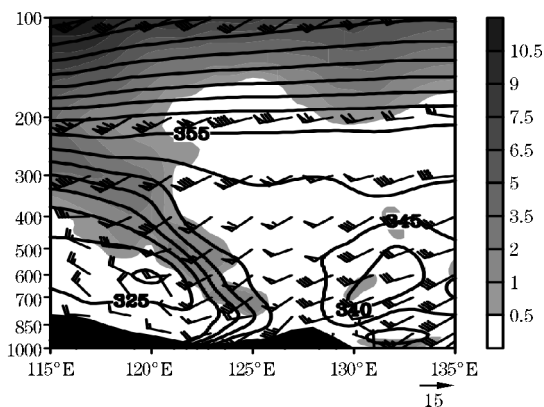
位涡是近年来在暴雨诊断中的常用物理量,是一个兼顾动力学特征和热力学特征的诊断物理量。在暴雨诊断中,位涡的垂直结构可以较好的反映大气的斜压性及能量分布特征,对降水落区的分析诊断有较为明确的指导意义^[25]。为进一步分析本次暴雨过程的锋区结构特征及高空急流次级环流对暴雨过程的能量输送特征,图5(a)给出了3日18时沿暴雨落区所在纬度(41.5°N)所做的假相当位温、湿位涡和风场结构的经度-高度剖面。可以看出,降水落区西侧对流层中存在着明显的锋区特征,等假相当位温线自低层向高层逐渐向冷区倾斜,其中等假相当位温线的密集区

域为对流层锋区所在位置,锋区附近风向有明显的气旋式切变。对流层低层西北气流引导冷空气自西向东推进,强降水落区位于冷锋前部的暖区中,为降水发生提供热力条件,有利于锋前暖区降水的发生。在对流层锋区上空100 hPa高度上有湿位涡的大值中心,并且沿锋区向下湿位涡自高层向低层传播,能量沿锋区下传,其向下传播到达位置与地面强降水落区吻合。与此同时,在地面强降水落区上空500 hPa对流层中层附近也存在一个湿位涡的大值中心,即降水落区上空是一个较强的能量中心,该能量中心与对流层低层低空急流的风速大值区有关。另外,考虑长白山西南侧迎风坡的地形抬升作用,对流层低层锋区在向东推进的过程中受地形影响抬升作用增强,更有利于强降水的发生和增强。

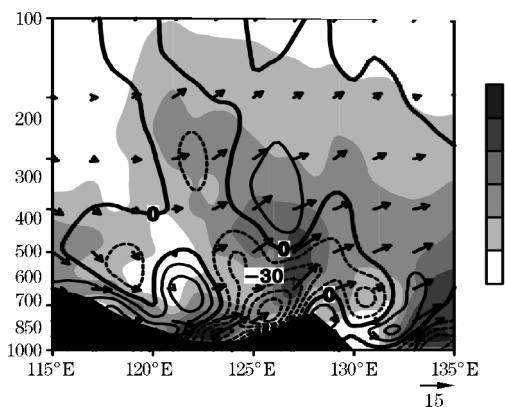
低空急流在提供本次暴雨过程中能量和动力条件的同时,其强烈的水汽输送作用也对强降水过程有着重要作用。在第2部分对高低空急流配置及演变特征进行分析时(图3),发现本次降水过程中的850 hPa低空急流起源于中国南海,沿副高边缘逐渐转为西南-东北方向并逐渐加速,到达渤海湾上空时急流中心最大风速可达20 m/s,这支急流引导南海、渤海上空水汽向降水落区输送。图5(b)给出了此次降水过程中降水最强时段(3日18时)沿41.5°N所做的水汽通量及水汽通量散度垂直剖面。可以看出,在降水最强时段,

水汽沿西南-东北方向向降水落区输送,水汽在向东输送的过程中受长白山迎风坡地形影响强迫抬升,增强了降水产生的动力机制。并且,在降水中心上空对流层低层存在水汽输送及水汽辐合的大值区,水汽输送量达 $22 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$,且水汽强烈辐合,水

汽辐合中心强度达 $-70 \times 10^5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,与地面降水中心及降水突然增强出现第二次短时强降水的时刻充分对应,说明低空急流对本次暴雨的水汽输送过程有重要作用,是导致暴雨发生尤其是强降水出现的重要原因。



(a) 假相当位温(等值线,单位:K,等值线间隔为5)、湿位涡(填色,单位: $10^5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、风场(风向杆)



(b) 水汽通量(填色,单位: $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、水汽通量散度(等值线,单位: $10^5 \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,等值线间隔为15)、水汽通量 u 、 v 分量合成场(箭头,单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)

图5 2015年8月3日18时沿 41.5°N 的经度-高度剖面(图下部黑色阴影区为地形)

5 结论与讨论

通过对2015年8月3-4日辽宁东部地区一次暴雨过程中的高低空急流配置和演变、高低空急流耦合区次级环流结构特征和降水过程中能量、水汽输送特征的分析讨论,得到以下结论。

(1) 高低空急流的动力作用在本次辽宁暴雨过程中具有重要作用,尤其是高低空急流次级环流上升支的相互耦合为此次暴雨过程提供了较强的动力抬升条件,对暴雨过程中强降水落区的产生及降水的增强有重要作用。

(2) 高空急流北侧下沉气流引导冷空气南下促使对流层中低层冷锋锋生,增强了大气斜压性,在触发中尺度对流系统的同时,冷锋锋生造成湿位涡沿锋区下传为强降水的发生提供充足的能量条件。

(3) 低空急流为本次暴雨过程提供了充分的水汽输送,降水大值区上空强烈的水汽输送及水汽辐合为强降水落区提供了充足的水汽条件,是强降水发生尤其是短时强降水产生的重要原因。

(4) 长白山迎风坡地形对对流层锋区前侧西南气流及沿西南向东北方向输送的水汽有一定的地形抬升作用,增强了气流抬升及水汽辐合强度,在一定程度上增强了强降水落区上空的上升运动强度,对暴雨发生尤其是强降水落区的产生起到了一定的促进作用。但有关长白山地形对本次强降水过程的影响仍需通过数值模拟等方法进行进一步的分析研究,结合敏感性实验确定地形作用对降水落区、降水强度及抬升运动的

影响,从定量角度讨论长白山地形对辽宁东部地区降水的影响机制。

参考文献:

- [1] 全美兰,刘海文,朱玉祥,等. 高空急流在北京“7.21”暴雨中的动力作用[J]. 气象学报, 2013, 71(6): 1012-1019.
- [2] 刘海文,全美兰,朱玉祥,等. 锋生及其次级环流对北京2012.7.21最大降水增幅和最大降水的影响[J]. 热带气象学报, 2014, 30(5): 911-920.
- [3] 濮梅娟. 暴雨天气动力过程及强降水增幅机理的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [4] 廖移山,冯新,石燕,等. 2008年“7.22”襄樊特大暴雨的天气学机理分析及地形的影响[J]. 气象学报, 2011, 69(6): 945-955.
- [5] 林毅,刘铭,刘爱鸣,等. 高低空急流在闽西北大暴雨过程中的作用及数值模拟[J]. 气象科学, 2006, 26(4): 449-455.
- [6] 徐海明,何金海,周兵,等. “倾斜”高空急流轴在大暴雨过程中的作用[J]. 南京气象学院学报, 2001, 24(2): 155-161.
- [7] 陈春. 华南前汛期暴雨机制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [8] 熊文兵,李江南,姚才,等. “05·6”华南持续性暴雨的成因分析[J]. 热带气象学报, 2007, 23(1): 90-97.
- [9] 孟振雄,于秀娟,于亚薇,等. 辽西一次特大暴雨

- 过程的急流分析[J]. 江西农业学报, 2012, 24(12): 147-150.
- [10] 许新田, 李明, 陶建玲, 等. 陕西2003年持续性暴雨高低空急流特征分析[J]. 气象科学, 2006, 26(6): 682-688.
- [11] 张守保. 华北回流天气的多尺度结构特征[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2009.
- [12] 寿亦萱. 中尺度高空急流—锋云系与暴雨的结构及演变机制的动力学研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- [13] 武麦凤, 梁生俊, 李春娥, 等. 渭河流域三次暴雨过程水汽和上升运动的垂直结构比较[J]. 暴雨灾害, 2010, 29(3): 245-250.
- [14] 王欢. “03.7”江淮梅雨锋暴雨中尺度系统的诊断与模拟研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [15] 赵娴婷, 魏建苏, 朱定真, 等. 急流在梅雨期持续暴雨过程中的作用[J]. 气象科学, 2011, 31(2): 211-216.
- [16] 刘鸿波, 何明洋, 王斌, 等. 低空急流的研究进展与展望[J]. 气象学报, 2014, 72(2): 191-206.
- [17] Shen Y, Zhao P, Pan Y, et al. A high spatiotemporal gauge-satellite merged precipitation analysis over China[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2014, 119(6): 3063-3075.
- [18] Xie P, Xiong A Y. A conceptual model for constructing high-resolution gauge-satellite merged precipitation analyses[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2011, 116(D21): 21106.
- [19] 沈艳, 潘昶, 宇婧婧, 等. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 37-46.
- [20] 廖捷, 徐宾, 张洪政. 地面站点观测降水资料与CMORPH卫星反演降水产品融合的试验效果评估[J]. 热带气象学报, 2013, 29(5): 865-873.
- [21] 苏传程, 毛文书, 师春香, 等. 多种降水融合产品对“苏迪罗”台风的监测效果对比[J]. 成都信息工程学院学报, 2016, 31(6): 614-621.
- [22] 李山山, 李国平. 一次鞍型场环流背景下高原东部切变线降水的湿Q矢量诊断分析[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 317-329.
- [23] M A Shapiro. Further Evidence of the Mesoscale and Turbulent Structure of Upper Level Jet Stream-Frontal Zone Systems[J]. Mon. Wea. Rev., 1978, 106: 1100-1111.
- [24] 孙令东. 沙尘暴个例的热力动力结构分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(4): 49-55.
- [25] 寿绍文. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 2010, 36(3): 9-18.
- [26] 李洪权, 陈中赞, 骆丽楠, 等. 南亚高压和高低空急流对2010年浙江梅汛期暴雨的影响[J]. 气象科学, 2012, 32(3): 310-316.
- [27] George P, Cressman. Circulations of the West Pacific Jet Stream[J]. Mon. Wea. Rev., 1981, 109, 2450-2463.
- [28] 王婧羽, 崔春光, 王晓芳, 等. 2012年7月21日北京特大暴雨过程的水汽输送特征[J]. 气象, 2014, 40(2): 133-145.
- [29] 杨晓亮, 李江波, 杨敏, 等. 河北2007年7月18日局地暴雨成因分析[J]. 气象, 2008, 34(9): 47-56.

Study of the Dynamic Effects of the Upper and Low-Level Jet Collocation on the Liaoning Rain Storm of 3 Aug 2015

TAN Zheng-hua^{1,2}, GONG Yuan-fa¹

(1. College of Atmosphere Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 2. Benxi Meteorological Administration, Benxi 117000, China)

Abstract: From August 3 to 4 in 2015, the eastern part of Liaoning province has experienced a heavy rainstorm process. To explore the effects of upper and lower jet in this rainstorm, this research studied the heavy rain process by using FNL reanalysis data and CMORPH precipitation product. The study focused on the configuration, evolution and the secondary circulation of the high and low-level jet. The research also analyzed the effect of the high and low-level jet in this rainstorm. The results indicate that the ascending branch coupling of high-low jet induces intense ascending movement, what is more, it is an important triggers of the heavy rainstorm; frontogenesis of the secondary circulation that excited by upper jet provided energy for the heavy rainfall process; and the strong water vapor transport excited by low-level jet is an important reason for the heavy rainstorm. Moreover, the forced ascending of the Changbai Mountain terrain also played an important role in the heavy rainfall when the water vapor transport from the south to the north.

Keywords: synoptic dynamics; rainstorm diagnosis; upper-level jet; low-level jet; coupling effect; secondary circulation