Climate Change Research Letters 气候变化研究快报, 2021, 10(6), 677-688
Published Online November 2021 in Hans. http://www.hanspub.org/journal/ccrl
https://doi.org/10.12677/ccrl.2021.106078

干侵入在湖南邵阳一次暴雨中的触发作用

向　钢，唐娅琼，王晶晶，孙于之，谭春阳，黄俊翔

湖南省邵阳市气象局，湖南　邵阳

收稿日期：2021年10月10日；录用日期：2021年11月8日；发布日期：2021年11月15日

摘　要

利用邵阳地面自动气象站降水观测资料、欧洲中心ERA5再分析资料，对2018年5月6~7日发生在湖南邵阳的暴雨过程进行了诊断分析。结果表明：此次邵阳暴雨过程的发生主要是由于中高层的干冷空气侵入低层造成。水汽的输送主要来源于孟加拉湾的西南气流与南海低压环流左侧的西南气流，强水汽通量辐合区和强降水存在较好的对应关系。高层冷空气南下并向低层渗透形成上层干、下层湿度低的大气结构特征，不稳定的层结条件有利于大气不稳定能量的释放。干舌前侧与暴雨落区有较好相关性，暴雨发生在干空气与湿空气交界处，暴雨区与湿位涡负异常值对应关系较好。

关键词

暴雨，水汽输送，干冷空气，湿位涡

Triggering Effect of Dry Intrusion on a Rainstorm in Shaoyang, Hunan Province

Gang Xiang, Yaqiong Tang, Jingjing Wang, Yuzhi Sun, Chunyang Tan, Junxiang Huang

Shaoyang Meteorological Bureau of Hunan Province, Shaoyang Hunan

Received: Oct. 10th, 2021; accepted: Nov. 8th, 2021; published: Nov. 15th, 2021

Abstract

Using the precipitation observation data from the surface automatic weather station in Shaoyang and the reanalysis data from the European Center ERA5, a diagnostic analysis of the rainstorm process occurred in Shaoyang, Hunan on May 6~7, 2018. The results show that the Shaoyang rainstorm was mainly caused by the intrusion of cold air from the middle and upper levels into the lower levels. The transportation of water vapor mainly comes from the southwest airflow in the Bay of Bengal and the southwest airflow on the left side of the low-pressure circulation in

文章引用: 向钢, 唐娅琼, 王晶晶, 孙于之, 谭春阳, 黄俊翔. 干侵入在湖南邵阳一次暴雨中的触发作用[J]. 气候变化研究快报, 2021, 10(6): 677-688. DOI: 10.12677/ccrl.2021.106078

the South China Sea. There is a good correspondence between the strong water vapor flux convergence area and heavy precipitation. The high-level cold air descends south and penetrates into the lower level to form the atmospheric structure characteristics of dry upper layer and low humidity in the lower layer. Unstable stratification conditions are conducive to the release of unstable energy in the atmosphere. The front side of the dry tongue has a good correlation with the rainstorm area. The rainstorm occurs at the junction of dry air and wet air, and the rainstorm area has a good correspondence with the negative abnormal value of the wet potential vorticity.

Keywords

Heavy Rain, Water Vapor Transport, Dry and Cold Air, Wet Potential Vorticity

1. 引言

来自中高层的干空气楔入到低层的现象称为干侵入[1] [2]，其具有低湿度和高位涡的特征。国内许多学者近年来对干侵入在暴雨中所起的作用进行了大量研究。干侵入对气旋的发展、不稳定的增幅、暴雨的发生及低涡的发生发展起重要作用[3]-[8]。姚秀萍[9]指出梅雨期的干冷空气侵入是梅雨锋维持及形成的重要动力和热力条件。刘会荣等[10]也提出干空气侵入除了利于锋区的形成和维持，还可以增强低层的对流不稳定，从而利于对流的维持和发展。沈浩等[11]通过 wrf 模式模拟发现干侵入能抬升暖湿气流，促进东北冷涡降水，增强层结不稳定，促进云系垂直发展。白涛等[12]通过个例研究了陕西西南部一次暴雨过程中干侵入的特征及机理，发现具有高位涡的干空气入侵到低层时，由于湿位涡的保守性，从而引起倾斜涡度发展，最终导致低层的垂直涡度不断发展。吴志彦等[13]对山东半岛的一次台风暴雨过程中干冷空气侵入进行了分析，发现水汽图像上的暗区与干区和位涡有很好的对应关系，都表明有冷空气向南入侵。于玉斌等[14]系统地综述了干侵入的机制和作用、结构特点，及其在天气系统的发生发展中所起的作用。2018 年 5 月 6~7 日受干冷空气的影响，邵阳出现一次暴雨天气过程。本文以此次暴雨过程为例，研究干冷空气入侵在此类暴雨过程中所起作用。以期为此类干侵入造成的邵阳暴雨提供预报依据。

2. 资料与方法

本文利用 2018 年 5 月 6 日 20 时~7 日 08 时地面自动站降水观测资料、欧洲中心 ERA5 0.25˚ × 0.25˚ 的 1 h 间隔再分析资料。运用 NCL 软件针对暴雨降水过程的干空气活动特征、大气环流形势进行分析，讨论了降水过程中水汽通量、天气形式、相对湿度及湿位涡等物理量场，并揭示此次暴雨发生的物理机制。

3. 结果分析

3.1. 强降水过程分析

2018 年 5 月 6 日 20 时~7 日 08 时，湖南邵阳地区出现一次暴雨、局地大暴雨天气，西部和南部多个乡镇 12 小时内累计雨量达 50 mm 以上。根据邵阳市自动站降水观测资料统计，图 1(a)为 6 日 20~7 日 08

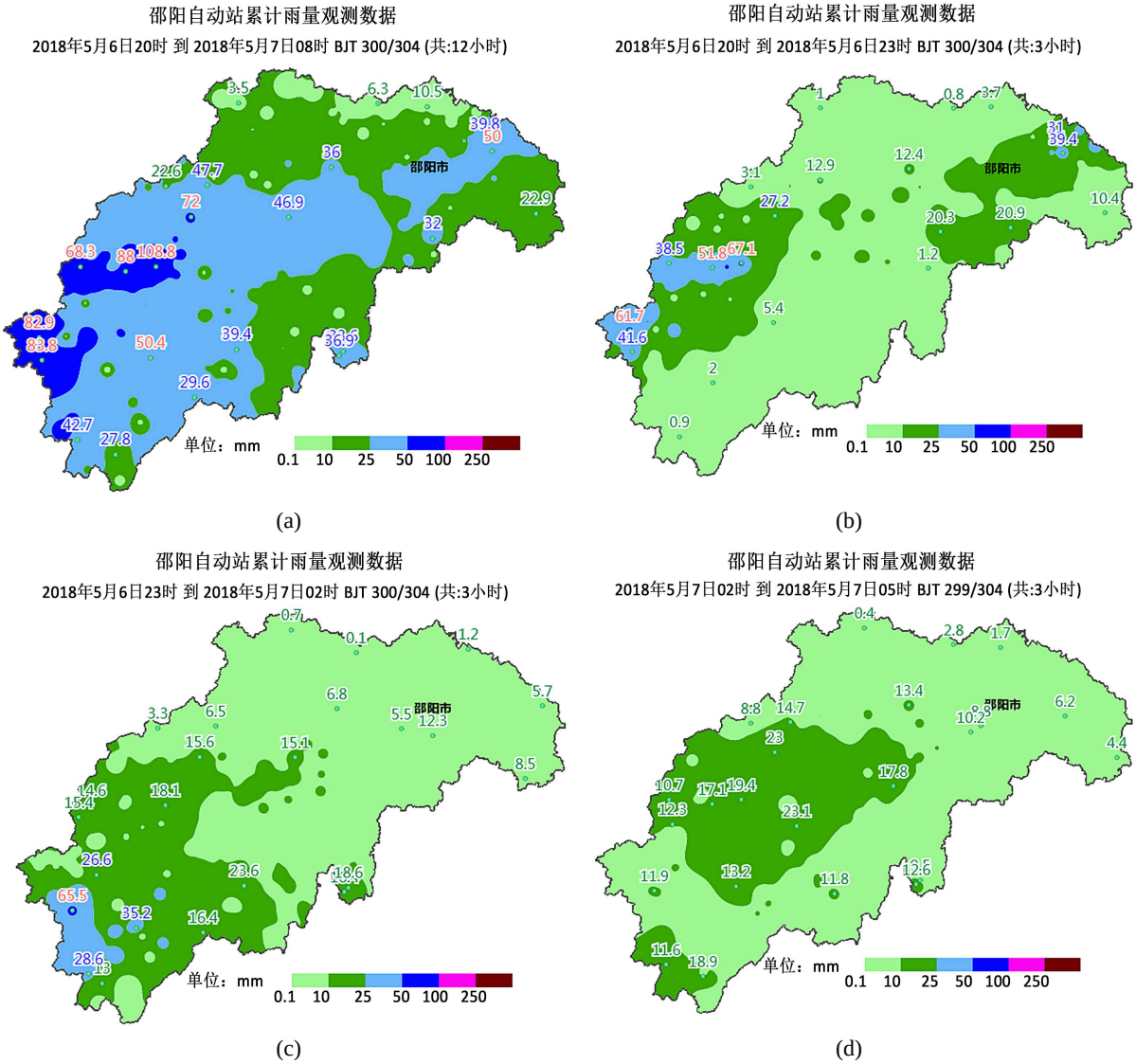
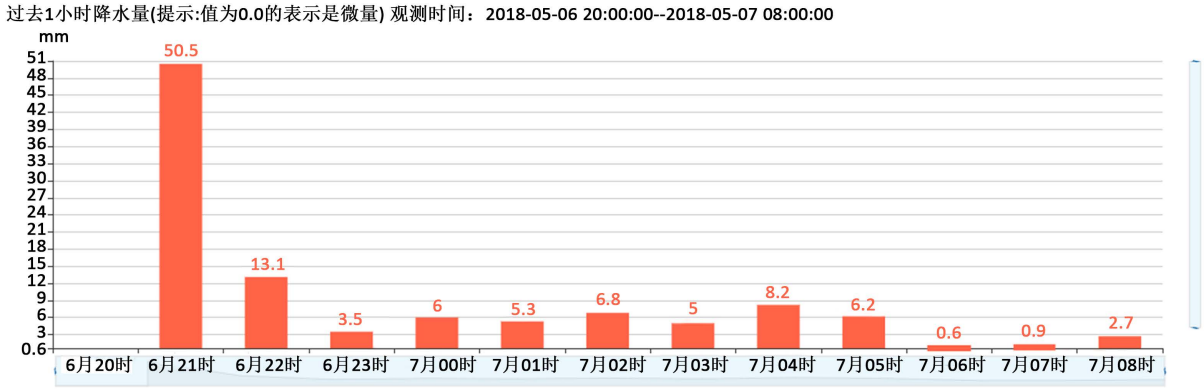


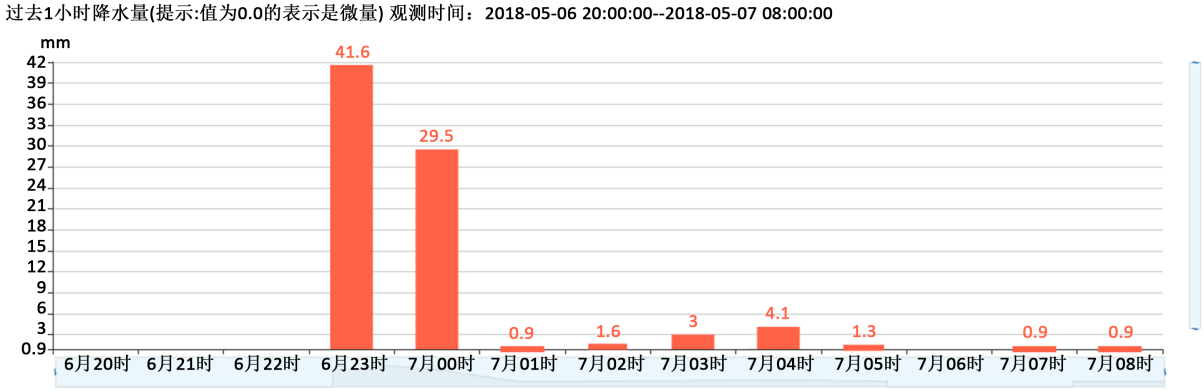
Figure 1. The distribution of 3 h rainfall over Shaoyang from 20:00 on 6 May to 08:00 on 7 May 2018
图 1. 邵阳 2018 年 5 月 6 日 20 时~7 日 08 时及 6 日 20 时~7 日 08 时逐 3 h 降雨量分布

(北京时间，下同)降雨分布情况，全市出现大暴雨 1 站、暴雨 36 站、大雨 83 站，单站最大雨量达 108.8 mm，出现在绥宁县红岩镇焦溪站。此次暴雨过程造成部分农作物受灾，房屋受损，道路坍塌，直接经济损失严重。强降雨主要分布在邵阳西部和南部，主要集中在 6 日 20 时~23 时、6 日 23 时~7 日 05 时两个阶段。6 日 20 时~6 日 23 时，降雨中心位于邵阳西部绥宁和洞口(图 1(b))，3 h 最大雨量 61.7 mm；随着冷式切变线南压，西部强降雨中心南移至绥宁南部和城步县(图 1(b))，降水强度维持，中心雨量 65.5 mm，强降雨范围明显缩小；7 日 05 时以后降水减小逐渐停止。

图 2 给出了绥宁西部焦溪站和东南部黄桑 2 个自动站 1 h 降雨量变化情况，可以看到焦溪站的降水时段主要集中在 6 日 21 时~22 时，最大小时雨量达 50.5 mm，具有明显的突发性和对流性特征，23 时以后雨量明显减小，每小时降雨量在 5~8 mm 之间；南部黄桑站的降雨表现得更为突发性，小时雨强达到 51.1 mm，7 日 01 时以后降水迅速减小，小时雨强不到 5 mm，但持续时间较长，直到上午 10 时降水才停止。由此可见，此次过程的影响系统是自北向南逐步移动的，以对流性短时强降水为主。



(a)

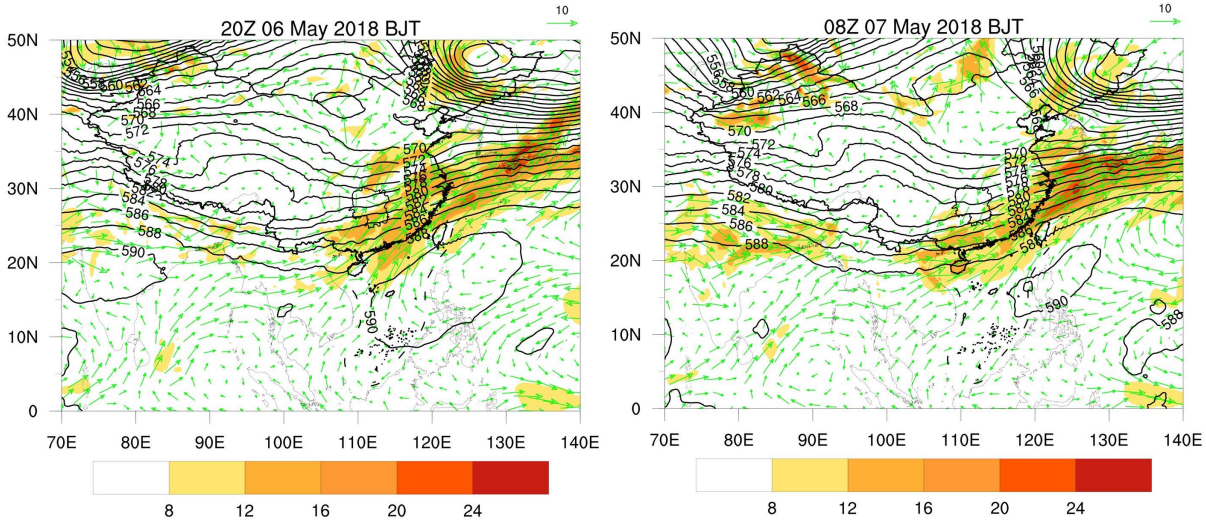


(b)

Figure 2. Time variation of the 1 h precipitation amount at Huangsang and Jiaoxi stations from 20: 00 On 6 May to 08:00 on 7 May 2018

图 2. 2018 年 5 月 6 日 20 时~7 日 08 时绥宁焦溪站黄桑站逐小时雨量

3.2. 环流形势分析



(a) (b)

Figure 3. The wind field at 700 hPa and 500 hPa field from 20: 00 on 6 May (a) to 08: 00 on 7 May 2018 (b)

图 3. 2018 年(a) 5 月 6 日 20 时、(b) 7 日 08 时 500 hPa 高度场和 850 hPa 风场

中高纬东北冷涡后部的干冷空气与低纬低层暖湿空气交绥是这次邵阳市暴雨发生的主要原因。500 hPa 上 2018 年 5 月 6 日 20 时(图 3(a))，中高纬为两槽一脊的环流形势，贝加尔湖为高压脊控制，东北冷涡的中心位于黑龙江地区。青藏高原上不断有短波槽东移，南海上空有一低压环流维持。湖南上空不断有短波槽从云贵高原东移过来。副热带高压势力强大，已经控制华南沿海地区。850 hPa 上南海低压环流左侧的西南气流于来自孟加拉湾的西南气流汇合，最大风速达到 25 m/s，从华南到华东有一条明显的宽而长的低空急流带。冷涡后部渗透南下的东北风于西南风开始在湖南北部交汇，形成冷式切变线。到 6 日 23 时，短波槽继续东移，湖南北部的冷平流不断南下，与低压系统西侧的暖湿气流交汇，冷暖气流已经影响湘中及湘西南地区，西北部降水明显增强。同时随着冷空气逐渐推进，西南急流的明显加强，切变线推至雪峰山西北侧，西南急流带来较好的水汽和能量条件加上山脉地形的抬升作用，雪峰山附近的怀化、邵阳地区出现了暴雨，并伴有短时强降雨、雷电等强对流天气。冷涡后部的干冷空气侵入作用维持到 7 日 08 时以后(图 3(b))，湘西南 850 hPa 为东北风控制，降雨逐渐停止。由此可见，形势场上，中纬冷涡的长时间维持使冷空气持续南压。干冷空气侵入南下，西南低空急流带来的较好的水汽和能量条件加上雪峰山脉地形的抬升作用造成了邵阳地区的暴雨和大暴雨。

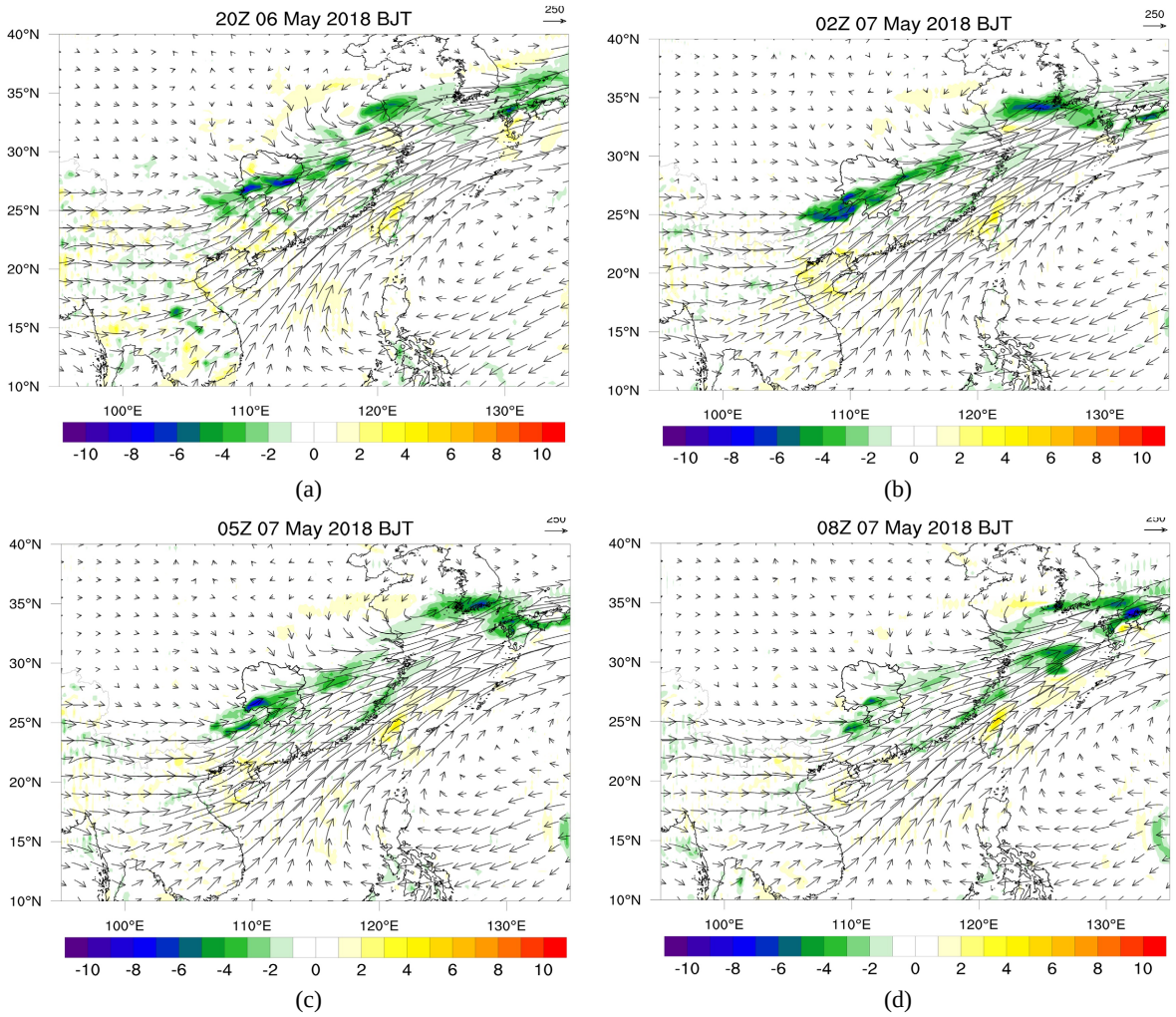


Figure 4. The water vapor flux divergence field (shading, unit: 10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1}) and the water vapor flux field (unit: kg·m^{-2}·hPa^{-1}.s^{-1}) from 300~1000 hPa at (a) 20:00 (Beijing time) on 6 Jun 2018, (b) 02:00 on 7 May 2018, (c) 05:00 on 7 May 2018, (d) 08:00 on 7 May 2018

图 4. 2018 年 5 月 6 日 20 时(a)、7 日 02 时(b)、05 时(c)、08 时(d) 300~1000 hPa 水汽通量散度场(阴影，单位：10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1})和水汽通量(单位：kg·m^{-2}·s^{-1})矢量叠加图

3.3. 诊断场分析

3.3.1. 水汽条件分析

水汽条件在暴雨形成和发展中起着决定性作用，许多研究中用水汽通量、水汽通量散度来表征水汽条件。徐冬英[2]等发现强降水的位置一般位于水汽通量散度平流和散度辐合配合较好的地方。6 日 20 时~23 时(图 4(a))整层水汽通量图上，来自孟加拉湾的西南暖湿气流与来自南海低压环流左侧的西南气流汇合成

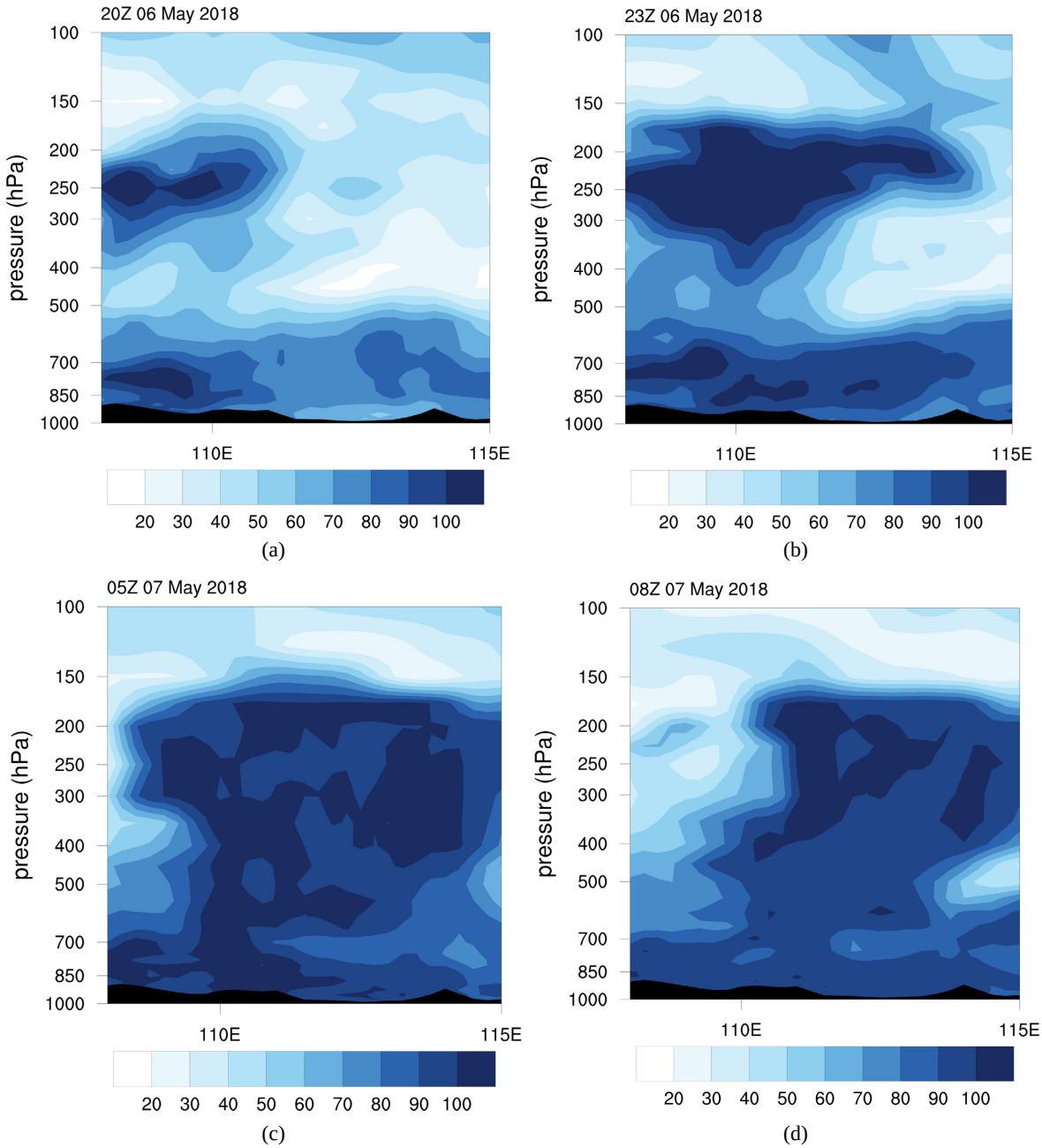


Figure 5. The vertical section for relative humidity (vertical section over 26.5˚N) at (a) 20:00 (Beijing time) on 6 May 2018, (b) 23:00 (c) 05:00 on 7 May 2018 (d) 08:00 on 7 May 2018

图 5. 2018 年 5 月 6 日 20 时~7 日 08 时相对湿度(垂直剖面沿 26.5˚N 剖面)：(a) 6 日 20 时；(b) 23 时；(c) 7 日 05 时；(d) 08 时

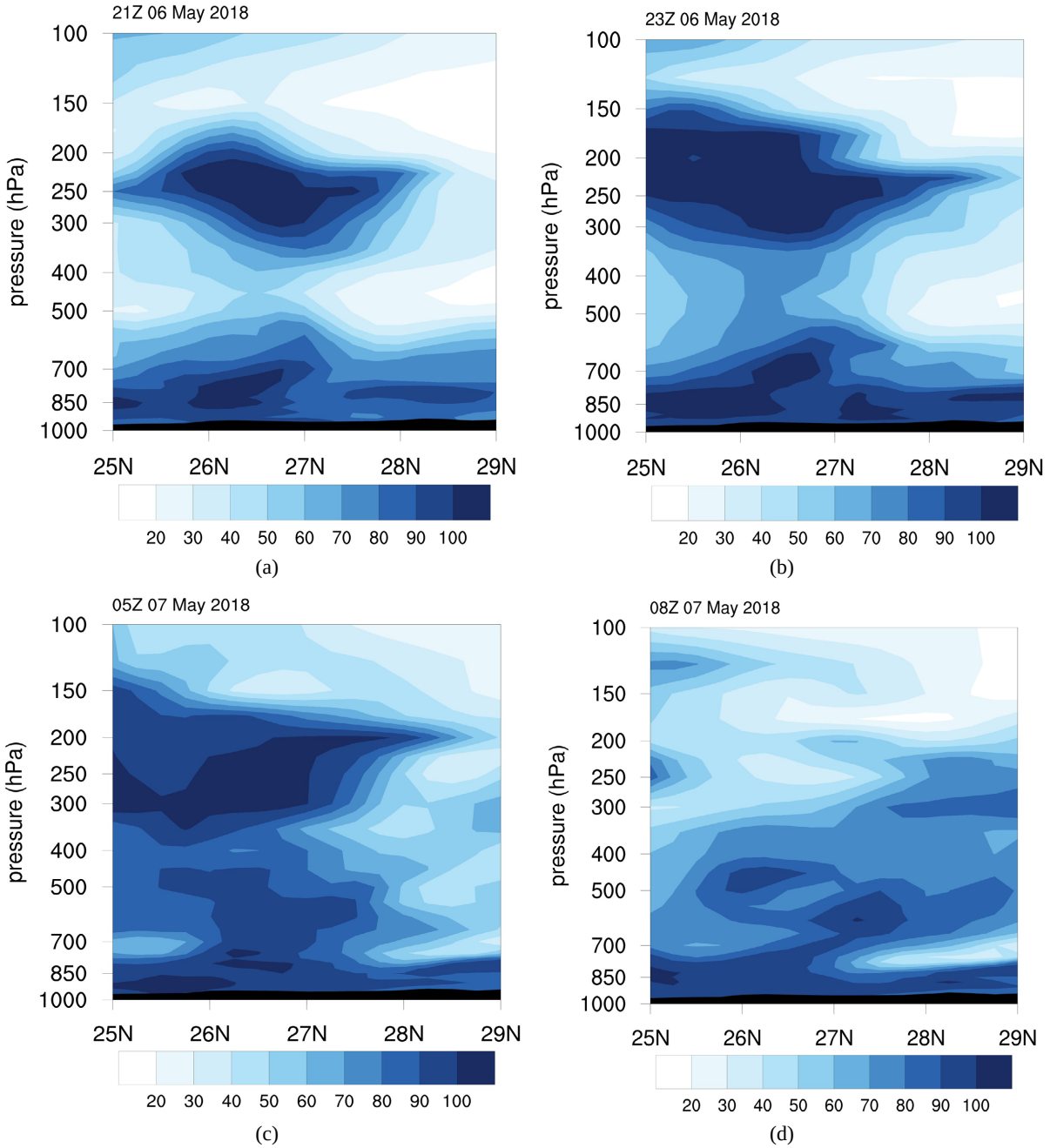


Figure 6. The vertical section for relative humidity (vertical section over 109.5˚E) at (a) 20:00 (Beijing time) on 6 May 2018, (b) 23:00, (c) 05:00 on 7 May 2018, (d) 08:00 on 7 May 2018

图 6. 2018 年 5 月 6 日 20 时~7 日 08 时相对湿度(垂直剖面沿 109.5˚E 剖面)：(a) 6 日 20 时；(b) 23 时；(c) 7 日 05 时；(d) 08 时

的西南低空急流为此次暴雨过程源源不断地输送水汽。从贵州南部到华东地区形成了一条东北－西南向的水汽通量辐合带。湘西南和湘中地区有两个强度为-10×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1} 的辐合中心，同时对应着(50 kg·m^{-1}·s^{-1})的水汽通量中心，最强降水出现在此段时间，邵阳西南部暴雨、大暴雨，绥宁焦溪自动站 1 小时雨量达 50.3 mm。7 日 02 时(图 4(b))湘中地区的水汽通量辐合中心消失，湘西南的水汽通量散度辐合中心范围扩大，一直延伸到广西北部，但强度稍有减弱，为-8×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1}。此时段对应的降水范围虽

有扩大，但降水强度稍有减小。切变线稳定维持在雪峰山脉附近，地形的抬升作用使湘西南的水汽通量散度辐合中心长时间维持(图 4(c))，随着强降水的发生，水汽不断消耗，水汽输送减弱，水汽通量辐合中心的范围缩小、强度减弱。降水强度也明显减小，小时雨强在 5 mm 左右。08 时冷空气进一步南压，短波槽东移，水汽输送迅速减弱，水汽通量辐合中心东移出邵阳，强度减弱至-4×10^{-4} kg·m^{-2}·s^{-1}，随后降水趋于结束。可见，水汽的输送主要来源于孟加拉湾的西南气流与南海低压环流左侧的西南气流，强水汽通量辐合区和强降水存在较好的对应关系。东北部冷空气的南下侵入、切变线的长时间维持加上水汽通量长时间辐合、水汽输送是邵阳暴雨形成的主要因素。

3.3.2. 相对湿度分析

干侵入主要的特征是相对湿度低，但由于目前尚未在干侵入中相对湿度的标准上形成统一共识。本文主要借鉴徐冬英[2]、白涛等[12]的做法，将相对湿度 ＜60%的区域定义为干区。图 5 给出了 6 日 20 时~7 日 08 时不同时次沿 26.5˚N 相对湿度的经度－高度剖面图。6 日 20 时(图 5(a))，在 110˚E 附近、300~500 hPa 有明显的干空气存在，500~850 hPa 则为相对湿度超过 90%的高湿度区，形成上层干、下层湿度低的大气结构特征，不稳定的层结条件有利于大气不稳定能量的释放，容易造成短时强降雨、雷暴大风等强对流天气。7 日 02 时(图 5(b)) 100˚E~105˚E 区域 150~300 hPa 湿区扩大，中层干空气有向低层渗透的趋势，300~700 hPa 形成明显的干舌区，表明干空气强度逐渐加大，干冷空气在 110˚E 附近交汇，交汇区域对应着明显的强降水。7 日 05 时、08 时(图 5(c)~(d))中高层的干区消失，整层表现出高湿特征，此时邵阳西部暴雨过程基本结束，可见，中高层干冷空气的入侵有利于暴雨过程的发生。

沿 109.5˚E 的垂直剖面上，6 日 21 时(图 6(a)) 400~700 hPa 为干空气所覆盖，200~400 hPa、700~1000 hPa 相对湿度都超过了 95%。27˚N 以北在 300~700 hPa 有一干舌，随东北风加强而向南入侵。7 日 02 时干冷空气进一步向南入侵至 27˚N 的中高层区域，200~300 hPa 相对湿度增加、范围扩大。27˚N 以北的中高层区域由于降雨的原因，相对湿度逐渐增大。05 时干冷空气已南侵至 28˚N 左右，干舌延伸至 850 hPa，说明冷空气开始向低层入侵。此时干冷空气南侧的永州地区降雨明显增强，表明随着冷空气的南下入侵，增强了冷空气前侧冷暖空气的对流，有利于强降水的发生。08 时(图 4(d)) 27˚N 以北中层高湿度迅速增大到 90%以上。这与郭连英等的研究，在暴雨发生之前，对流层的中上层 200~500 hPa 有大片干区，而在暴雨发生后干区会减弱消失的结论相似。综上可知，强降水区发生在干、湿气团的交界处。干空气团逐渐向低层渗透的过程有利于大气不稳定层结的发展并造成暴雨过程的发生。而干空气团的减弱消失与降水的结束也有很好的对应关系。

3.3.3. 湿位涡分析

湿位涡与位涡相比，不仅能反映大气的动力、热力特性，还能反映水汽作用。因此湿位涡比位涡更能反映其对暴雨所起的作用。为了全面探讨湿位涡在强降水过程中的分布情况，本文研究分析了 700 hPa 湿位涡的分布情况及湿位涡的高度－经向剖面图。6 日 20:00 (图 7(a))整个湖南上空为负的湿位涡，负湿位涡中心位于邵阳到广西一带，正 MPV 中心位于贵州。结合 8500 hPa 风场、水汽通量分析，湿位涡的负中心与西南低空急流左侧风速水平切变大值区相对应，与此后 3 小时的降水实况对应较好。7 日 02:00 (图 7(b))湿位涡中心范围和值都明显增大，出现一对 mpv 正、负值的对称中心，正中心仍然位于贵州，负中心移动到邵阳南部、永州北部和衡阳地区，负湿位涡中心对应强降水区域。7 日 05 时(图 7(c))湿位涡正、负值区域进一步向东移动，邵阳地区逐渐转为正湿位涡控制，负值中心仍然停留在永州、衡阳，负值中心对应着局地的暴雨天气。7 日 08 时(图 7(d))正湿位涡区增大，湘西南、湘中均为正湿位涡区，对应的区域降水也明显减弱。由此可见，湿位涡的负值区能很好地指示暴雨的发生，代数值越大，说明该区域上空对流不稳定发展越旺盛，越有利于强降水的发生。

图 8 给出了 6 日 20 时-7 日 08 时沿 26.5˚N 湿位涡的经度—高度剖面图。6 日 20 时(图 8(a))，暴雨区上空 700 hPa 以上为湿位涡正值区，700~850 hPa 以下 110˚E 以西为湿位涡负值中心区，地面附近为湿位涡正值区。600 hPa 以上和 850 hPa 以下湿位涡正值区为对流稳定区，600~850 hPa 为对流不稳定区。这是造成 700~850 hPa 高度上有 2~5PVU 的负值 MPV 扰动的主要原因，湿位涡负值中心对应暴雨、大暴雨中心。7 日 02 时(图 8(b)) 111˚E~113˚E 的 850 hPa 以下正湿位涡区发展，850 hPa 以上的负湿位涡区也不断发展，形成强不稳定区，02 时以后强降雨主要发生在此区域。05 时(图 8(c)) 110˚E 上空的正、负湿位涡均已减弱，111˚E~113˚E 低层正湿位涡虽增大，但 850 hPa 上的负湿位涡减小，对应的降雨也已减小。08 时(8 d) 110˚E 附近上空负湿位涡进一步减小，被正湿位涡替代。这主要由于东北气流与西南气流交汇而导致其存在一定的斜压性，到了 05 时以后，随北风南压此处斜压性减弱而导致该负值区缩小。

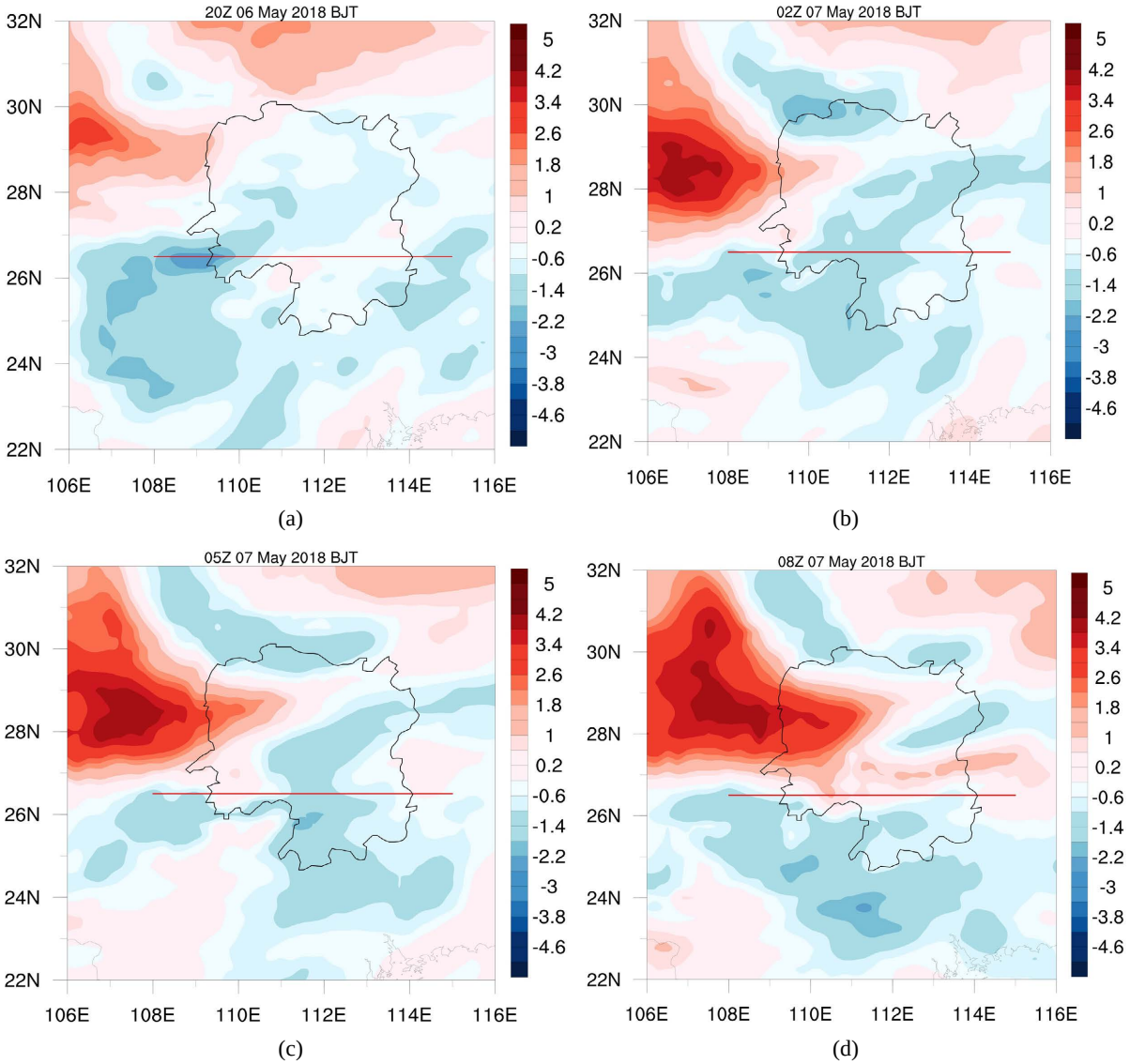


Figure 7. The generalized moist potential vorticity at 700 hPa at (a) 20:00 (Beijing time) on 6 May 2018, (b) 02:00 on 7 May 2018 (c) 05:00 (d) 08:00

图 7. 2018 年 5 月 6 日 20 时(a)、7 日 02 时(b)、05 时(c)、08 时(d)湿位涡

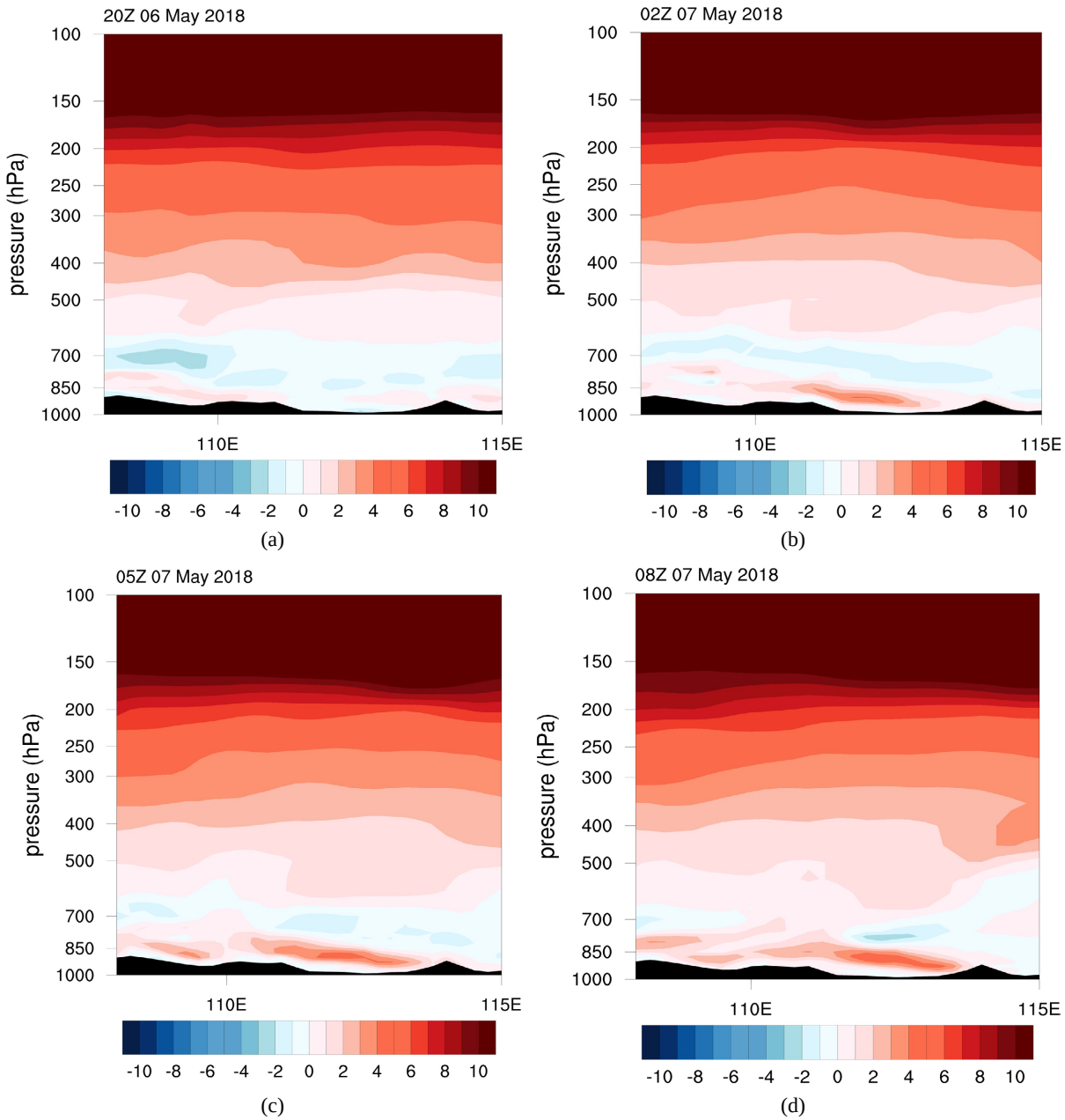


Figure 8. The vertical section for generalized moist potential vorticity (vertical section over 26.5˚N) at (a) 20:00 (Beijing time) on 6 May 2018, (b) 02:00 on 7 May 2018, (c) 05:00, (d) 08:00

图 8. 2018 年 5 月 6 日 20 时(a)、7 日 02 时(b)、05 时(c)、08 时(d)沿 26.5˚N 湿位涡垂直剖面图

3.3.4. 垂直速度

图 9 给出 5 月 6 日 20 时~7 日 08 时不同时刻过绥宁附近沿 26.5˚N 的垂直速度纬向剖面图。从中看到，暴雨初期(图 9(a))，110˚E 西侧上空 850~300 hPa 有很强的上升运动，达到−2.5 m/s。切变线还未影响到 110˚E 以东地区，因此东侧的垂直速度为 0。7 日 02 时垂直速度大值区位于 110˚E 及以东地区，中心值增大到−2.5 m/s，与此时段强降雨的位置配合很好。7 日 05 时垂直速度中心值增大到−3 m/s，但此时的降水已明显减弱，结合水汽通量图可以看到，主要原因是切变线已经南压，水汽条件迅速转差，因此垂直速度虽强但降水不明显。7 日 08 时垂直速度大值中心小时，降水趋于结束。

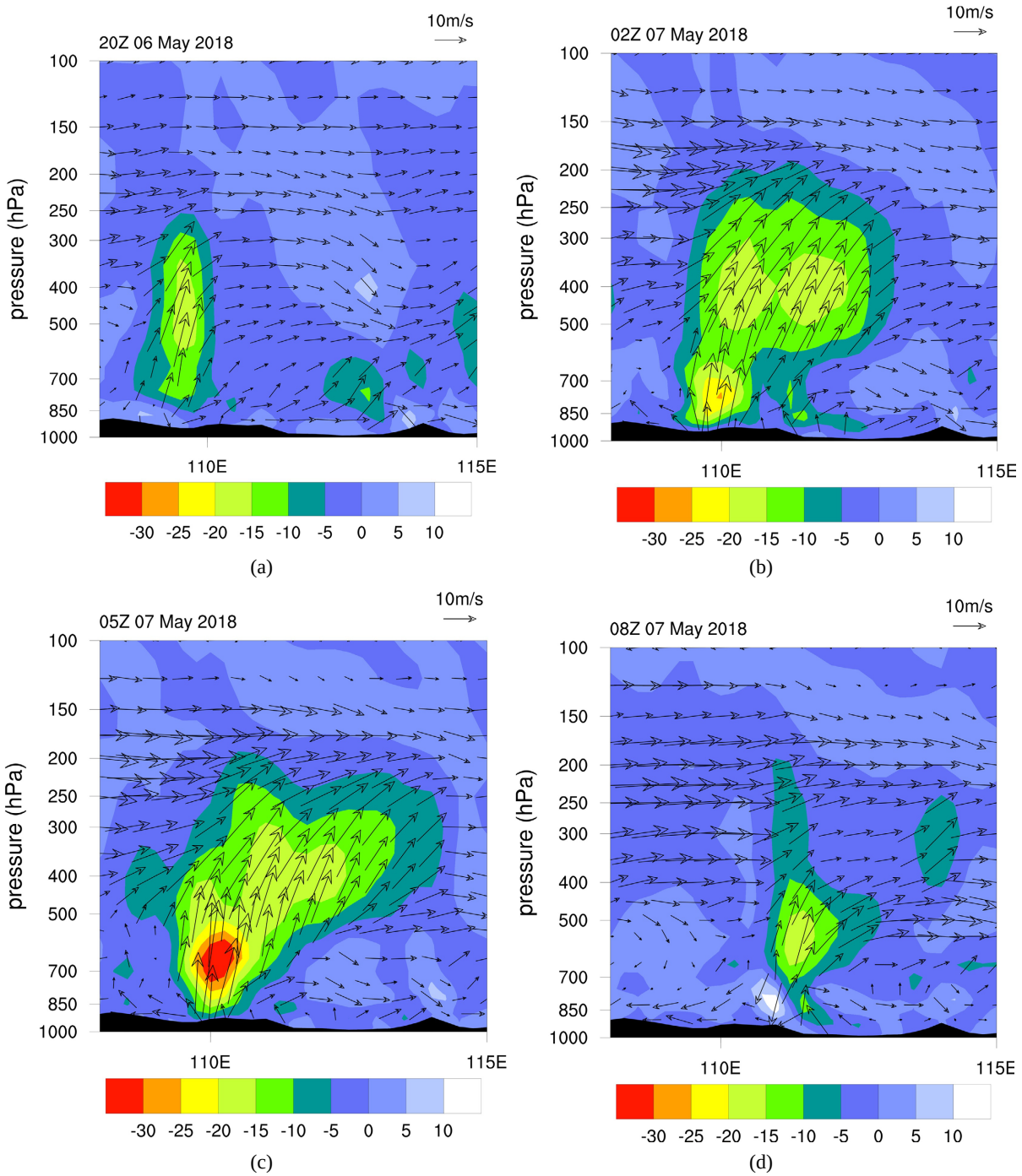


Figure 9. The vertical section for omega (vertical section over 26.5˚N) at (a) 20:00 (Beijing time) on 6 May 2018, (b) 02:00 on 7 May 2018 (c) 05:00 (d) 08:00

图 9. 垂直速度 omega 单位 m/s (图中扩大了 10 倍)：(a) 20 时；(b) 7 日 02 时；(c) 05 时；(d) 08 时沿 26.5˚N 湿位涡垂直剖面图

4. 结论与讨论

针对 2018 年 5 月 6~7 日发生在邵阳的暴雨过程，分析了本次暴雨过程的大尺度环流背景，探讨了干冷空气的侵入在这次暴雨事件中的特征及作用，和干侵入影响降水的机制机理，得到以下结论：

1) 有利的大尺度环流背景场是暴雨发生首要条件。中纬冷涡的长时间维持使冷空气持续南压，干冷空气侵入南下，西南低空急流带来的较好的水汽和能量条件以及雪峰山脉的地形抬升作用造成了邵阳地区的暴雨和大暴雨。

2) 这次暴雨过程中有明显的干空气从高层侵入低层的现象。干空气表现为由东北向西南自对流层向下的侵入。

3) 利用水汽通量、水汽通量散度场、相对湿度和湿位涡探讨了干侵入影响暴雨的机制。高层冷空气南下并向低层渗透形成上层干、下层湿度低的大气结构特征，不稳定的层结条件有利于大气不稳定能量的释放。暴雨发生在干空气与湿空气交界处，暴雨落区与干舌前侧联系紧密。

4) 湿位涡的分析表明，暴雨区发生在湿位涡负值区，暴雨区与湿位涡负异常值对应关系较好。

基金项目

湖南省气象局短平快课题 XQKJ17B039。

参考文献

[1] 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), 2007, 37(3): 417-428.

[2] 徐冬英，尹丽云，李红梅. 干侵入在云南一次全省性暴雨中的触发作用[J]. 云南大学学报(自然科学版)，2015, 37(5): 705-716.

[3] 彭贵康，卢萍，李昀英. 雅安“8·26”特大暴雨的天气分析[J]. 高原山地气象研究, 2008, 28(3): 27-36.

[4] 唐秀，支俊，李海花. 克州一次强降水天气过程的多普勒天气雷达回波分析[J]. 沙漠与绿洲气象，2011，5(3): 25-28.

[5] 彭军，高卫飞，张琼，等. 一次局地暴雨过程的多普勒雷达特征分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2010, 4(1): 28-31.

[6] 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.

[7] 谷秀杰，牛淑贞，介玉娥，等. 2007 年 8 月 2 日郑州大暴雨过程分析[J]. 气象与环境科学, 2010, 33(2): 53-58.

[8] 牛广山，李俊杰，李秋元，等. 一次豫北春季强对流暴雨过程的螺旋度分析[J]. 气象与环境科学，2010，33(1): 40-47.

[9] 姚秀萍，于玉斌. 2003 年梅雨期干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.

[10] 刘会荣，李崇银，周育锋. 山东地区一次台风降水事件中的干侵入特征分析[J]. 气候与环境研究，2011，16(3): 289-300.

[11] 沈浩，杨军祖繁等干空气人侵对东北冷涡降水发展的影响[J]. 气象, 40(5): 562-569.

[12] 白涛，李崇银，王铁，等. 干侵入对陕西“2008.07.21”暴雨过程的影响分析[J]. 高原气象, 2013, 32(2): 345-356.

[13] 吴志彦，李宏江，石燕清，等. 山东半岛一次台风暴雨过程的冷空气侵入特征分析[J]. 暴雨灾害，2016，35(1): 61-68.

[14] 于玉斌，姚秀萍. 干侵入的研究及其应用进展[J]. 气象学报, 2003, 62(6): 769-778.