刘瑞翔，郝玲，姚雷，等. 2017. 2017 年 3 月江苏北部一次雷雨大风天气过程分析[J]. 气象与减灾研究，40(3)：223-230.
Liu Ruixiang, Hao Ling, Yao Lei, et al. 2017. Analysis on a disastrous thunderstorm and gale case in the northern Jiangsu on March 2017[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research，40(3)：223-230.

2017 年 3 月江苏北部一次雷雨大风天气过程分析

刘瑞翔，郝　玲，姚　雷，朱敏华

连云港市气象局，江苏 连云港　222000

摘　要：利用多种常规观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料，分析了 2017 年 3 月 1 日江苏北部出现的一次罕见冷空气雷雨大风天气过程的发生背景、地面要素和云团演变特征，同时从大气动力、热力和水汽条件出发分析了午后对流的成因。结果表明：此次过程发生前，江苏地区位于高空槽前，对流层中低层有冷式切变线伴随两股冷空气南下，受江苏省北部地面气旋阻挡，冷空气在上游堆积，当气旋东移入海冷空气爆发式南下时，造成严重的大风灾害。此次过程中，对流层中高层大气降温而低层回温使大气温度直减率增大，为对流发生提供不稳定条件，但水汽输送主要集中在低层，且高层大气无明显抽吸作用，导致此次过程未发生强对流性降水，主要以大风灾害性天气为主。

关键词：雷雨大风，冷空气，环流形势，温度直减率，水汽条件

中图分类号：P458.1^{+}23　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1007-9033(2017)03-0223-08

doi：10.12013/qxyjzyj2017-034

Analysis on a Disastrous Thunderstorm and Gale Case in the Northern Jiangsu on March 2017

Liu Ruixiang , Hao Ling , Yao Lei , Zhu Minhua

Lianyungang Meteorological Bureau of Jiangsu Province, Lianyungang 222000, *China*

Abstract: A rare thunderstorm and gale case occurred in the northern Jiangsu on 1 March 2017, which caused serious meteorological disaster. Based on multiple kinds of conventional meteorological data, the variation characteristics of meteorological factors and cloud evolution were discussed, and the background of atmospheric circulation and causes of convection were investigated using NCEP/NCAR reanalysis data. The results indicated that before the convection occurred, Jiangsu was in front of the trough at 500 hPa, and two strands of cold air moved southward with shear line in the middle and lower atmosphere. The southward cold air was blocked by a surface cyclone in northeast Jiangsu and accumulated in Hetao region. As the cumulated cold air burst southward while the surface cyclone moved to the east, a gust front was recognized by the Doppler radar of Yancheng. Lapse rate increased when the temperature of lower troposphere rose while that of mid and high troposphere decreased, which provided instability condition for the convection. The moisture amassed at the bottom of atmosphere and the divergence at high altitude was weak, thus no heavy rain occurred.

Key words: thunderstorm and gale; cold air; circulation situation; temperature lapse rate; moisture condition

0　引　言

强对流天气具有突发性强、持续时间短、易致灾等特点，与之相伴随的短时强降水、雷雨大风、冰雹以及龙卷等灾害性天气的形成机理是当前的研究热点。近年来，江苏省灾害性天气频发，包括 2016 年

收稿日期：2017-06-14；**修订日期**：2017-09-05.

基金项目：江苏省气象局预报员专项项目(编号：JSYBY201612)；江苏省气象局青年科研基金项目(编号：Q201708)；连云港市科技局项目(编号：SH1013)；连云港市气象局科技计划项目(编号：LG201604).

作者简介：刘瑞翔，硕士，助理工程师，主要从事气象灾害评估与监测研究，E-mail：nuistlrx@qq.com.

6月23日阜宁龙卷在内的极端对流天气事件,给公众生命和财产安全造成严重威胁。加深对此类天气的认识,提高对流天气的监测和预报技术,增加预警提前量,在天气预报服务业务中具有现实意义。

关于强对流天气的发生机制和活动规律,已有学者从数值模拟和统计学的角度做了大量研究。孙继松和陶祖钰(2012)结合业务中的具体问题,从实践的角度讨论了与强对流有关的基本概念及其在实际预报中的应用问题。赵思雄和孙建华(2013)、郑永光等(2015)系统总结了当前强对流天气监测、预报和预警技术的最新进展,指出基于高分辨率数值模式和融合预报技术的分类强对流预报是未来的主要发展方向。曾明剑等(2015)基于中尺度数值模式,综合多种方法构建了强对流分类预报模型和相关业务化系统,目前该预报方法在江苏省对流预报中已得到较广泛应用。孙建华等(2015)、吴风波等(2016)和周雨等(2016)利用多种资料结合数值模拟等方法对中国不同地区强对流个例的成因做了详细分析。还有学者利用多普勒雷达产品分析了雷雨大风天气过程的雷达回波演变特征(张志刚等,2007)。不同学者的多角度研究有力地加深了人们对不同类型强对流发生机制和活动规律的认识。

2017年3月1日下午,江苏大部分地区出现致灾性冷空气雷雨大风天气,造成盐城、连云港等8市21个县(区)发生严重灾情。此次过程发生在冬季,当地这一季节出现雷雨大风天气十分罕见。文中,利用常规观测资料、NCEP/NCAR再分析数据以及卫星和雷达资料,分别从动力、热力和水汽条件出发,分析此次雷雨大风天气过程的成因,以期为雷雨大风天气的预报提供参考。

1 资 料

文中使用的资料包括江苏省各基本气象站常规观测资料,国家卫星气象中心提供的空间分辨率为0.1°×0.1°的FY-2F卫星逐小时云顶亮温资料,连云港和盐城逐6 min雷达资料,以及NCEP/NCAR垂直31层的多要素逐6 h客观分析资料,水平分辨率为1.0°×1.0°。

2 过程概况

受高空槽东移南下和入海低压后部冷空气影响,从2017年3月1日午后起,江苏省大部分地区出现雷雨大风天气。分析累计降水量和极大风速分布(图1)可知,此次过程累计降水都为小雨量级,无短时强降水出现,对流性天气以雷暴大风为主。由于较强冷空气配合,江苏省北部地区出现8—9级、局地10级以上偏北大风,风力大值区位于盐城阜宁地区,其中阜宁站16:40(北京时,下同)极大风速达26.9 m/s,为该站有气象记录以来最大值,当日风速极大值出现在阜宁县的三灶镇,为30.7 m/s。此外,连云港中南部也有一条东北—西南走向的大风速带。

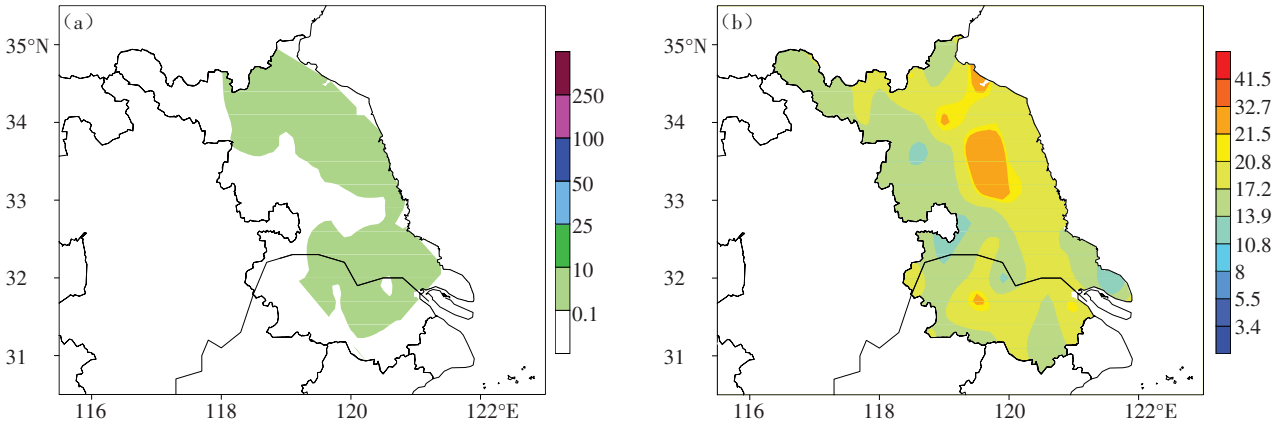


图1 2017年3月1日12—20时累计降水量(a,单位:mm)和极大风速(b,单位:m/s)分布

Fig. 1 Accumulative precipitation (a; unit: mm) and extreme wind speed (b; unit: m/s) during 12:00 - 20:00 BT 1 March 2017

选取连云港、盐城射阳和南京3个自北向南的站点作为代表站,分析其要素演变特征。图2a可知,南京站气温开始下降的时间略早于北部的连云港站和射阳站,但降温缓慢,而连云港站15—16时单时次降温超过8 ℃。由于降温迅速,连云港站和射阳站温度露点差先后小于2 ℃(图2b),与对流发

生时段相对应，而南京站温度露点差始终大于 14 ℃，过程无降水。此外，分析三站极大风速和 3 h 变压的时间序列（图 2c、d）发现，受冷空气呈爆发式南下影响，连云港站和射阳站的风速与 3 h 变压分别在近 15 时和 17 时迅速增大；南京站风速和 3 h 变压虽也有增大趋势，但要素演变缓慢。值得注意的是，冷空气南下过程中江苏省北部要素演变异常剧烈，而南部的南京要素变化却早于东北部，以下将对其原因进行分析。

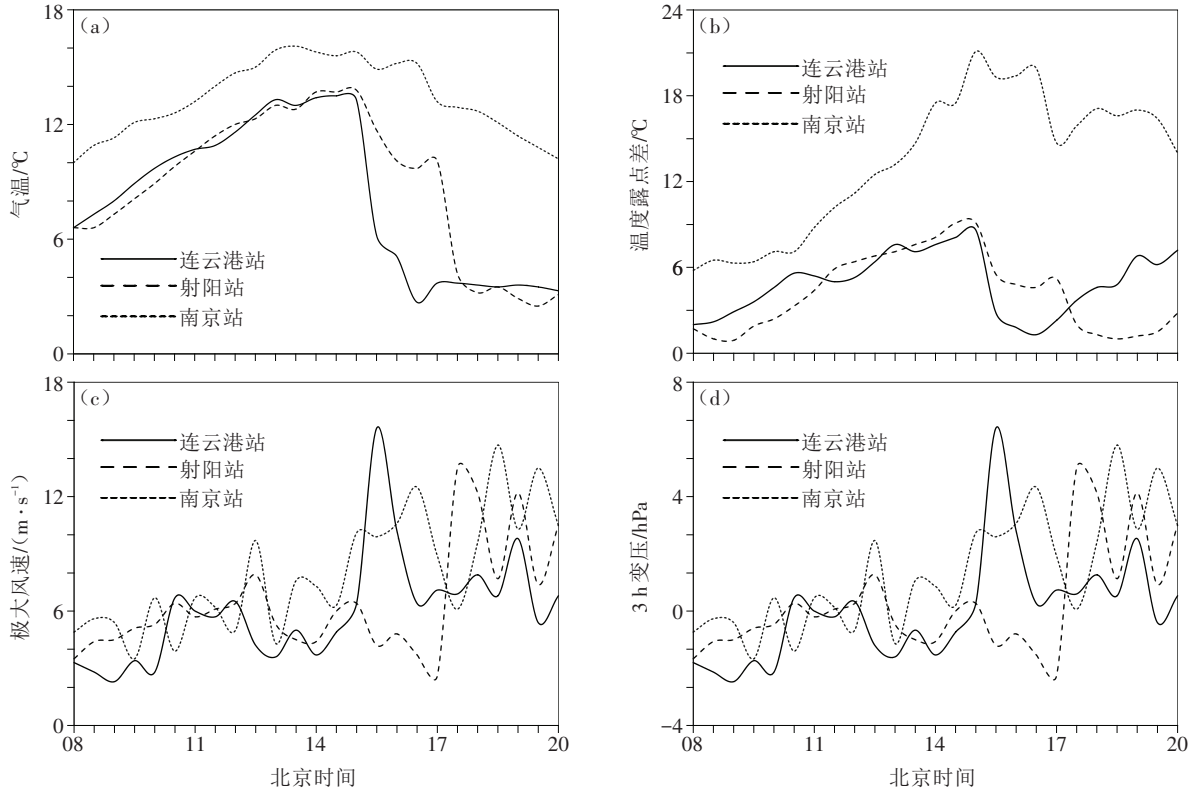


图 2 2017 年 3 月 1 日 08—20 时连云港站、射阳站和南京站的气温(a)、温度露点差(b)、极大风速(c)和 3 h 变压(d)时间序列

Fig. 2 Evolution of temperature (a), depression of the dew point (b), instantaneous wind speed (c) and 3-hour pressure variation (d) for Lianyungang, Sheyang and Nanjing weather station during 08:00－20:00 BT 1 March 2017

3 云团演变及雷达观测分析

分析云图（图略）可知，从 3 月 1 日 04 时起，苏鲁交界地区有云团活动，对应江苏省北部地区出现的弱降水。由于辐射降温少，大气基础温度较前一日偏高。当降水结束后云团东移，1 日上午江苏大部分地区转晴，气温回升，为午后对流生成提供热力条件。从午后起，江苏省北部地区云量增多并逐渐发展，过程最低云顶温度约为 225 K，对流强度一般。受高空西北气流引导，云团向东南方向快速移动，其影响范围主要包括连云港至盐城一带。

分析多普勒雷达基本反射率（图 3）发现，3 月 1 日 14 时左右降水回波开始影响连云港地区，伴有逐渐增强的趋势。15:30 左右回波达最强，此时最大反射率为 40—45 dBz，但由于该部分回波范围小且移动迅速，大部分站点累积雨量都不足 10 mm。分析同时刻连云港站雷达径向速度分布（图 3c）可见，此时环境风整体为偏北风，零速度线呈反“S”形分布，说明中高层有冷空气影响本地。由于冷空气迅速向南渗透使地面气温骤降，降水到达连云港南部县区时转为雨夹雪和小冰粒。

阵风锋对大风的活动有重要指示作用（朱敏华和周红根，2006）。降水回波到达盐城站时已明显减弱（图 3b），此时最大反射率仅 30 dBz 左右，但回波主体前侧仍观测到明显的阵风锋，这是由于冷空气主体已到达本地造成偏北大风引起的。当阵风锋位于盐城阜宁至滨海一带时，出现 27 m/s 左右的大风速带（图3d），其中阜宁县三灶镇出现了30.7m/s

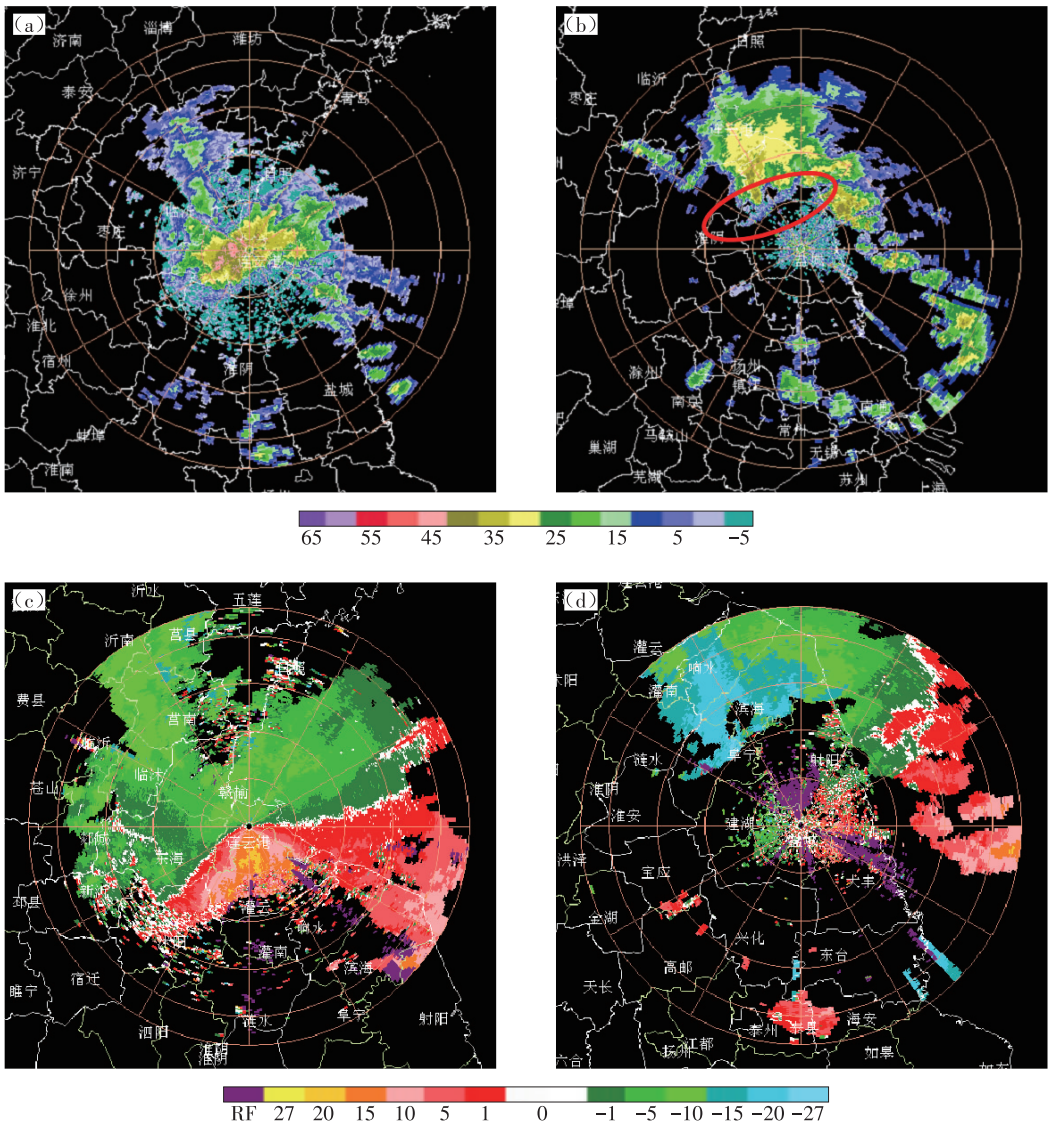


图 3 2017 年 3 月 1 日 15:32 连云港雷达(a、c)和 16:37 盐城雷达(b、d)的 0.5°仰角基本反射率(a、b,单位:dBz)和径向速度(c、d,单位:m/s)

Fig. 3 Basic reflectivity (a, b; unit:dBz) and radial velocity (c, d; unit:m/s) at 0.5 elevation of Lianyungang radar (a, c) at 15:32 BT and Yancheng radar (b, d) at 16:37 BT 1 March 2017

的日极大风速。

4 环流背景及物理量场分析

4.1 环流背景

分析高低层环流形势(图 4)可知,3 月 1 日 08 时,200 hPa 高度层急流轴位于 30°N 附近,且呈纬向分布,江苏省处于冷槽底部偏西风场,高层大气无明显辐合、辐散。500 hPa 高度层槽线位于东北地区中部至河套下游一带,江苏省处于槽前,其上空存在大尺度上升运动。850 hPa 高度层上,1 日 02 时(图略)苏鲁交界处有弱切变活动,08 时切变线移至江苏中部地区,其南侧有明显冷平流,冷平流中心位于江苏中南部地区,受此冷空气前锋影响,当日凌晨至早间江苏省北部地区出现小雨,随着切变线东移南下降水结束。此时,河南省北部上空有冷平流大值中心逐渐南下,该股冷空气于 14 时左右开始影响江苏地区,配合切变线南下,利于对流发生。

在 850 hPa 高度层上,1 日 08 时(图 4c)-4 ℃等温线位于渤海湾—河南北部一带,对降雪区具有较好的指示作用(班欣,2009),14 时左右(图略)该等温线到达苏鲁交界处,随着冷空气不断向南渗透,降水后期相态由液态向固态转换,连云港市南部县区出现雨夹雪和冰粒。

在海平面气压场上,1日08时(图4d)苏鲁交界

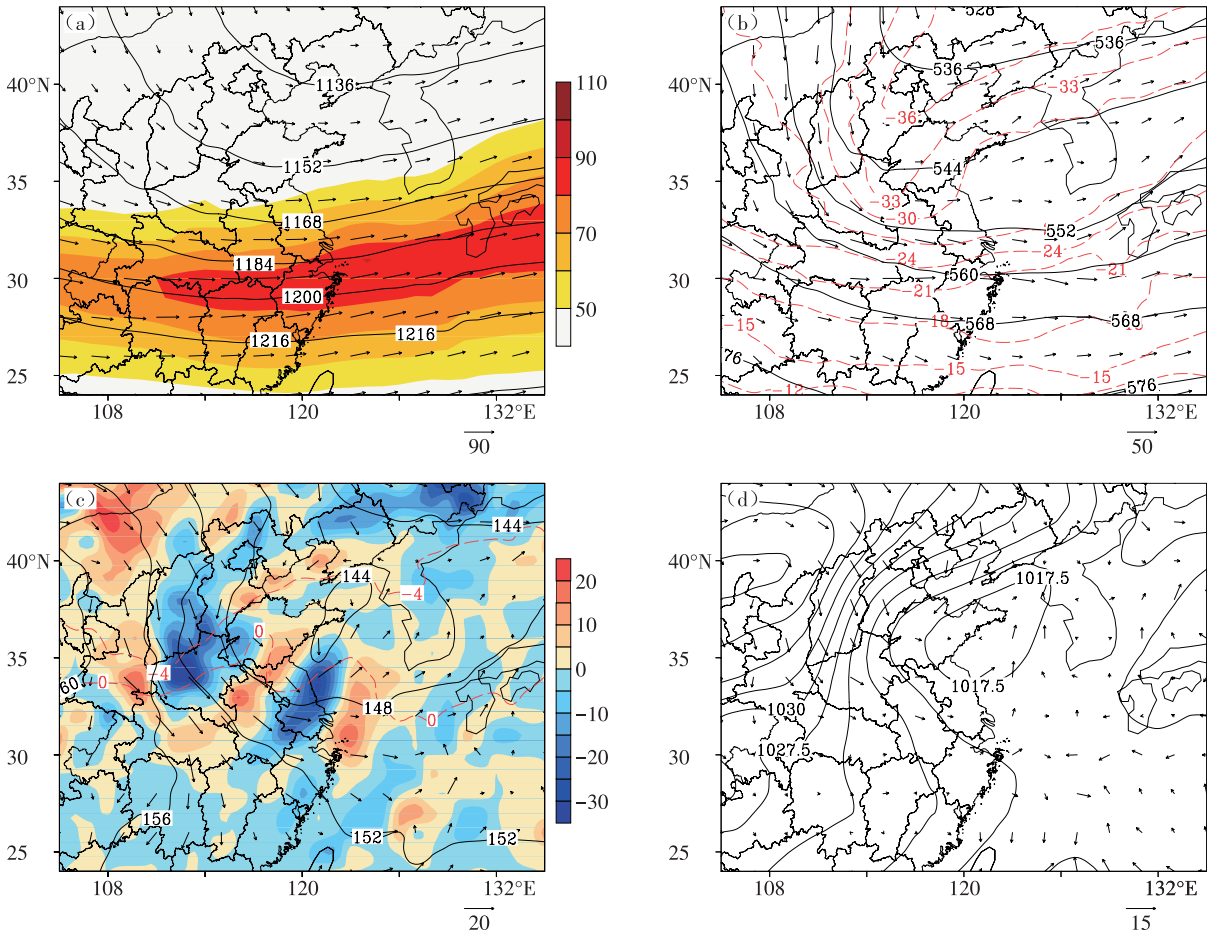


图 4 2017 年 3 月 1 日 08 时 200 hPa 等位势高度场(实线,单位:dagpm)、风场(箭头,单位:m/s)、全风速场(色阶,单位:m/s)分布(a),500 hPa 等位势高度场、风场、温度场(虚线,单位:℃)(b),850 hPa 等位势高度场、风场、温度平流场(色阶,单位:10^{-3} K/s)、温度场(c),海平面气压场(实线,单位:hPa)和风场(d)

Fig. 4 The distribution of geopotential height (solid line; unit:dagpm), wind (arrow; unit:m/s) and wind speed (shaded; unit:m/s) at 200 hPa (a); geopotential height, wind and temperature (dotted line; unit:℃) at 500 hPa (b); geopotential height, wind, temperature advection (shaded; unit: 10^{-3} K/s) and temperature at 850 hPa (c), sea level pressure (solid line; unit:hPa) and wind (d) at 08:00 BT 1 March 2017

至黄海一带有气旋活动而阻挡冷空气南下。受此影响,部分冷空气沿着气旋外围到达江苏省中南部地区,但该地区冷空气强度不强,因此南部站点要素变化略早于北部站点却相对缓慢。此时,冷空气主体受地面气旋阻挡在河套下游堆积,该处等压线异常密集,气旋东移入海后冷空气爆发式南下,伴随大风和剧烈降温过程。

4.2 动力和热力条件

由第 3 章分析可知,降水回波于 3 月 1 日 14 时左右自北向南移至江苏省。分析 14 时垂直速度和散度沿 119°E 的垂直剖面发现(图略),与降水区对应,此时垂直速度大值区在苏鲁交界处 35°N 附近,最大速度约 2.5 Pa/s,位于 900—800 hPa 高度层。锋线前侧低层有明显辐合,说明冷空气南下时锋面抬升是对流触发的重要原因,但 200 hPa 高度层散度值近乎为 0,且在下一时刻即为负值,不利于对流的发展和维持。

K 指数是由温度直减率、低层水汽条件和中层饱和度三项构成的物理量,是反映中低层大气稳定度的综合指标,K 指数越大表明层结越不稳定。3 月 1 日 14 时江苏东北部有 K 指数大值区(图 5),中心值大于 30 ℃,随着冷空气过境大值区东移,该地 K 指数迅速减小。值得注意的是,单从 K 指数中的第一项温度直减率看(图 6),其单项数值在 14 时已经达到 30 ℃,与 K 指数值相差无几,即 850 hPa 露点温度项和 700 hPa 露点温度差项对 K 指数值的贡献可以忽略。由此可知,K 指数值较大,利于较强雷暴的发生发展,但中低层水汽条件差,是实际降水量较少的原因之一。

分析CAPE值可知(图略),08时江苏省及周边

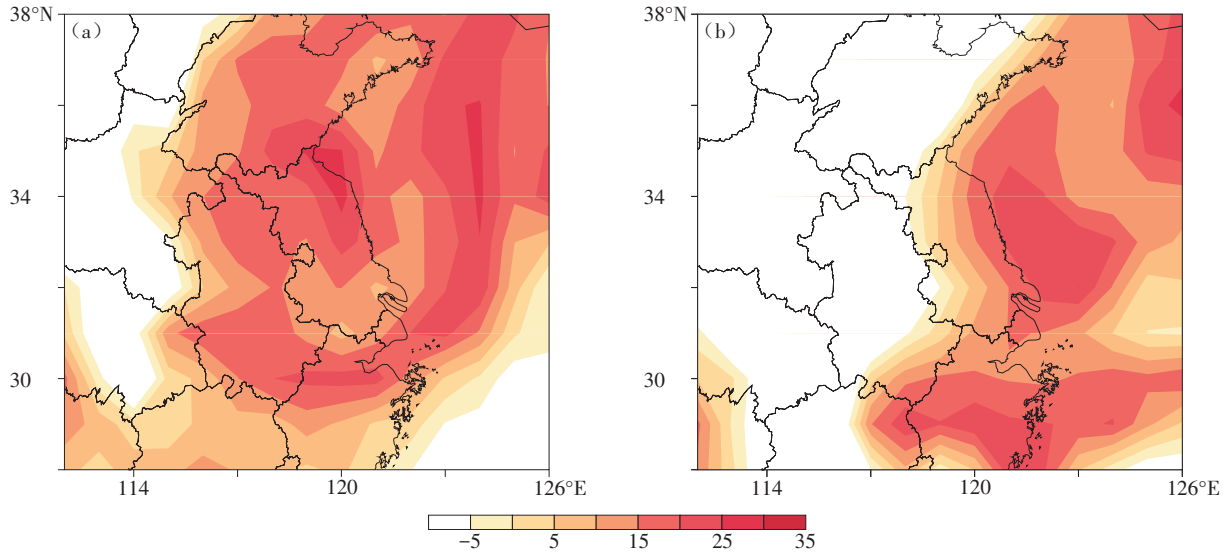


图 5 2017 年 3 月 1 日 14 时(a)和 20 时(b)K 指数分布(单位:℃)

Fig. 5 The distribution of K-index at 14:00 BT (a) and 20:00 BT (b) 1 March 2017 (unit:℃)

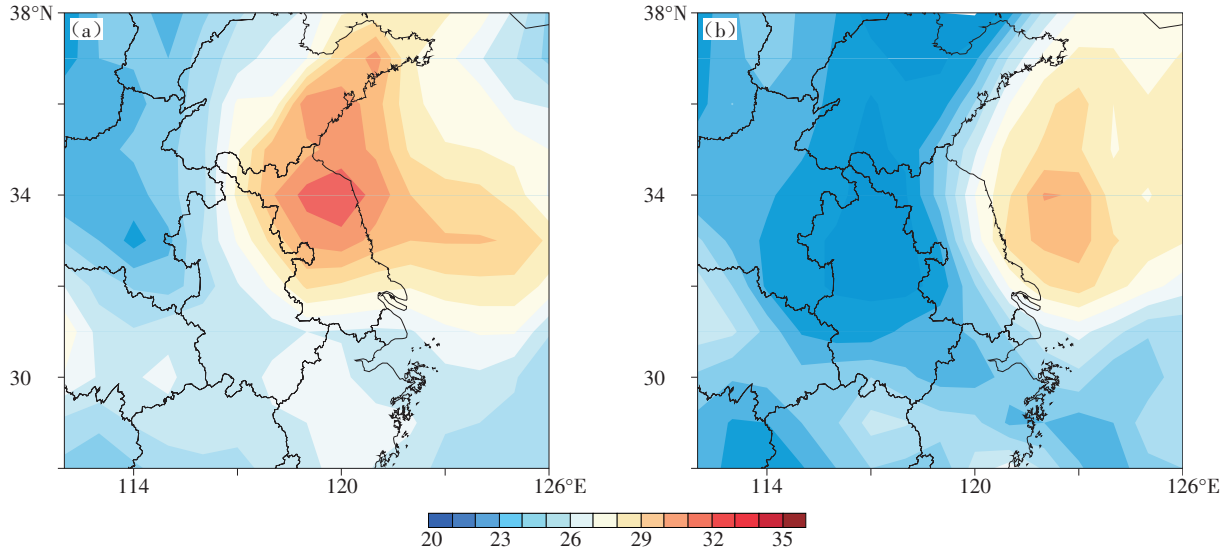


图 6 2017 年 3 月 1 日 14 时(a)和 20 时(b)850 hPa 与 500 hPa 温度差分布(单位:℃)

Fig. 6 The distribution of 850 − 500 hPa temperature difference at 14:00 BT (a) and 20:00 BT(b) 1 March 2017 (unit:℃)

大部分地区 CAPE 值近乎为 0,08 时后云团东移低层回温,14 时在江苏省东北部沿海地区有一个 CAPE 大值区,其中心值为 250 J/kg 左右,这一数值明显较该地区对流发生时 CAPE 通常值低。对流发生后,CAPE 值区其中心数值减小且迅速向东南方向移动。

综上可知,对流往往发生于 K 指数和 CAPE 值快速减小的阶段,而非大值维持期间,即对流的发生往往伴随着不稳定能量的释放,业务人员可基于数值预报产品中对流指数的变化大致判断对流发生的时段。

4.3 水汽条件

图 7 分别给出了 925 hPa 和 850 hPa 水汽通量和水汽通量散度分布。分析发现,在 925 hPa 高度层上,1 日 14 时山东半岛南部为水汽通量大值区,而江苏省北部水汽通量散度为负值,说明水汽在此处辐合利于形成降水。随着冷空气南下,水汽通量大值区在下一时次迅速南移。在 850 hPa 高度层上,江苏地区上游水汽通量大值区主要位于江苏省西北部地区,大值区范围明显较925 hPa小,水汽辐

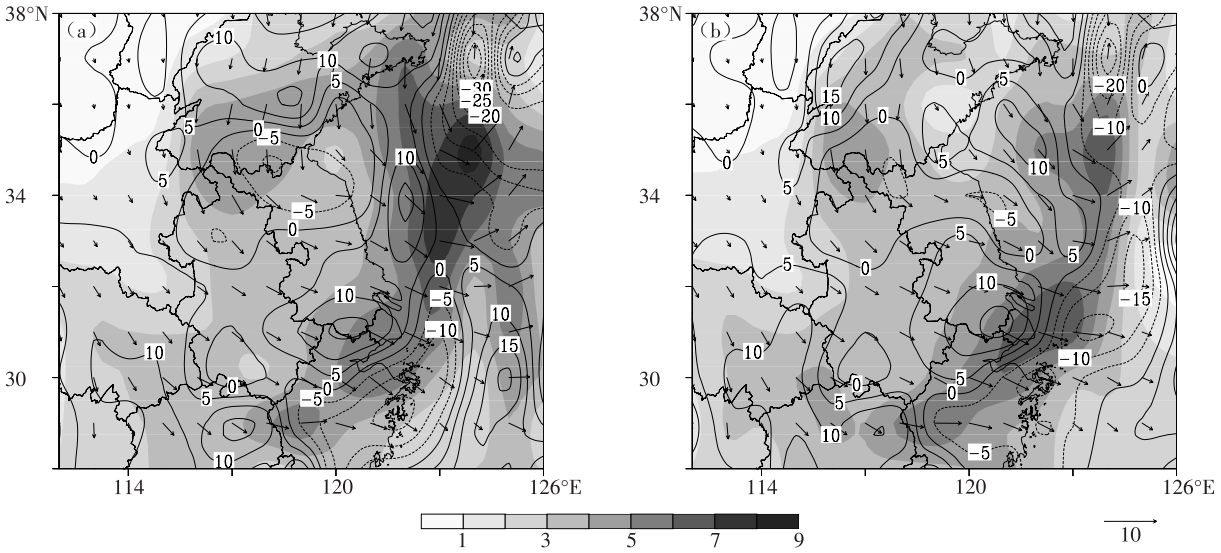


图 7 2017 年 3 月 1 日 14 时 925 hPa(a)和 850 hPa(b)水汽通量(色阶，单位：g/(s·hPa·cm))、水汽通量矢量(箭头，单位：g/(s·hPa·cm))和水汽通量散度(等值线，单位：10^{-6} g/(s·hPa·cm^2))分布

Fig. 7 The distribution of moisture flux (shaded; unit: g/(s·hPa·cm)), moisture flux vector (arrow; unit: g/(s·hPa·cm)) and moisture flux divergence (contour line; unit: 10^{-6} g/(s·hPa·cm^2)) at 925 hPa (a) and 850 hPa (b) at 14:00 BT 1 March 2017

合较弱，说明水汽输送主要集中在低层且强度较弱，这也与第 4.2 节中 K 指数后两项贡献近乎为零的结论一致。水汽辐合仅集中在对流层低层也从侧面说明锋面造成的近地层抬升作用是此次对流的主要触发机制。

5 小 结

基于多种常规观测资料和 NCEP/NCAR 再分析资料，对江苏省北部一次致灾性雷雨大风天气过程的要素变化、天气背景、云团和雷达演变特征进行了分析，并从雷暴三要素出发，分析了动力、水汽和热力条件，得到：

1) 此次过程灾害性天气以大风为主，大风速区主要位于江苏中北部。江苏省南部站点要素变化早于北部站点，气象要素演变相对平稳，而北部站点要素变化异常剧烈。

2) 过程发生前，江苏省处于 500 hPa 高度层槽前正涡度平流区，中低层有切变线活动，两股冷空气分别造成当天凌晨稳定降水和午后对流性降水。冷空气南下时受地面气旋阻挡在上游地区堆积，气旋东移入海后冷空气爆发式南下造成严重大风灾害。

3) 对流发生前，对流层中高层转为冷平流而低层回温明显，温度直减率增大为对流发生提供了不稳定条件。水汽输送集中在低层，且对流发生时高层抽吸作用不明显，不利于对流的维持和较强降水的发生。对流的发生往往伴随不稳定能量的释放，其发生时段对应对流指数快速减小阶段，而非较大指数值维持期间。

参考文献(References)

班欣，范从勇，朱敏华，等. 2009. 连云港市冬季降水天气过程对比分析[J]. 气象科学，29(5)：700-704. Ban X, Fan C Y, Zhu M H, et al. 2009. Analysis and forecast of precipitation type in winter at Lianyungang [J]. Scientia Meteor Sinica, 29(5): 700-704. (in Chinese)

孙继松，陶祖钰. 2012. 强对流天气分析与预报中的若干基本问题[J]. 气象，38(2)：164-173. Sun J S, Tao Z Y. 2012. Some essential issues connected with severe convective weather analysis and forecast[J]. Meteor Mon, 38(2): 164-173. (in Chinese)

孙建华，李娟，沈新勇，等. 2015. 2013 年 7 月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征[J]. 气象，41(5)：533-543. Sun J H, Li J, Shen X Y, et al. 2015. Mesoscale system study of extreme rainfall over Sichuan Basin in July 2013[J]. Meteor Mon, 41(5): 533-543. (in Chinese)

吴风波，李岩松，苏丽蓉. 2016. 2014 年春季华南地区两次强对流天气过程对比分析[J]. 气象与减灾研究，39(3)：179-189. Wu F B, Li Y S, Su L R. 2016. Comparative analysis of two severe convective weather processes in southern China area[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 39(3): 179-189. (in Chinese)

曾明剑，王桂臣，吴海英，等. 2015. 基于中尺度数值模式的分类强对流天气预报方法研究[J]. 气象学报，73(5)：868-882. Zeng M J, Wang G C, Wu H Y, et al. 2015. Study of the forecasting method for the classified severe convection weather based on a meso-scale numerical model[J]. Acta Meteor Sinica, 73(5): 868-882. (in Chinese)

张志刚，吴云荣，裴道好，等. 2007. 江苏盐城 8.17 雷雨大风天气过程

雷达回波特征分析[J]. 气象科学,27(1):101-106. Zhang Z G, Wu Y R, Pei D H, et al. 2007. Analyses on the radar echo of the thunder storm and gale in Jiangsu Yancheng on August 17[J]. Scientia Meteor Sinica, 27(1):101-106. (in Chinese)

赵思雄,孙建华. 2013. 近年来灾害天气机理和预测研究的进展[J]. 大气科学, 37(2):297-312. Zhao S X, Sun J H. 2013. Study on the mechanism and prediction of disastrous weathers during recent years[J]. Chinese J Atmos Sci, 37(2):297-312. (in Chinese)

郑永光,周康辉,盛杰,等. 2015. 强对流天气监测预报预警技术进展[J]. 应用气象学报,26(2):641-657. Zheng Y G, Zhou K H, Sheng J, et al. 2015. Advances in techniques of monitoring, forecasting and warning of severe convective weather[J]. J Appl Meteor Sci, 26(2):641-657. (in Chinese)

周雨,盛志军,许爱华,等. 2016. 2016 年 6 月赣北两次对流性暴雨过程对比分析[J].气象与减灾研究,39(4):269-276. Zhou Y, Sheng Z J, Xu A H, et al. 2016. Comparative analyses of two convective rainstorms in northern Jiangxi in June 2016[J]. Meteor Disaster Reduction Res, 39(4):269-276. (in Chinese)

朱敏华,周红根. 2006. 多普勒天气雷达在阵风锋监测中的应用[J]. 气象科学,26(1):97-102. Zhu M H,Zhou H G. 2006. Application of doppler weather radar in gust front monitoring[J]. Scientia Meteor Sinica, 26(1):97-102. (in Chinese)