

黄文彦,雷正翠,俞剑蔚,等.2017年6月上旬江苏南部一次极端暴雨过程分析[J].沙漠与绿洲气象,2021,15(1):9-18.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2021.01.002

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



2017年6月上旬江苏南部一次极端暴雨过程分析

黄文彦¹,雷正翠^{1*},俞剑蔚²,姚丽娜¹,吴建秋¹,慕熙昱³

(1.常州市气象局,江苏 常州 213022;2.江苏省气象台,江苏 南京 210008;

3.江苏省气象科学研究所,江苏 南京 210009)

摘要:从环流形势、弱冷空气影响、大气稳定度、水汽收支等方面分析了2017年6月上旬江苏南部的一次极端暴雨过程,并与该区域同期其他暴雨事件进行了对比。结果表明,暴雨区位于加强的200 hPa西风急流入口区的右侧,偏强的副热带高压西北侧的西南气流与东北冷涡西南侧的西北气流交汇及850 hPa异常的风场切变是造成本次强降水过程的重要条件,中层弱的干冷空气入侵对降水有增幅作用,32.5°N附近江苏西部冷平流和冷锋锋生强度明显强于东部,造成江苏南部西侧降水强于东侧。暴雨区存在明显的条件性对称不稳定,水汽水平辐合强度、垂直输送强度、总的水汽辐合强度和垂直上升运动及潜热加热强度为其他年份同期暴雨过程的3倍,极端性明显。此外,本次过程中气旋的移动路径易导致江苏南部地区出现强降水。

关键词:极端暴雨;弱冷空气;相当位涡;水汽收支;气旋

中图分类号:P458.3

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2021)01-0009-10

暴雨是我国最常见的灾害性天气之一,江苏省为暴雨事件频发地区,连续或极端暴雨常带来洪涝灾害,给社会经济和人民生产生活造成严重影响。江苏的极端暴雨多发于台风影响期间或梅雨期内,6月上旬一般处在梅汛期前,较少出现极端暴雨,但2017年6月上旬江苏南部却出现了一次区域性极端暴雨过程,暴雨中心常州日降水量达234.1 mm,超过6月上旬旬降水量历史极值(186.2 mm),造成了严重城市内涝,带来了较大经济损失。

关于极端暴雨成因分析的研究成果很多,厄尔尼诺事件^[1]或副热带高压异常偏强^[2]是极有利的气

候背景,天气尺度和中尺度系统的相互作用使降水区长时间维持强的上升运动,为极端降水提供动力条件^[3-5]。曾勇等^[3]对新疆西部出现的一次极端特大暴雨过程进行了分析,认为中尺度对流云团生成后在引导气流的作用下不断向北移动发展,是造成暴雨的直接系统。栗晗等^[4]对河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性进行了分析,发现多个地面中尺度气旋移动造成的“列车效应”是导致局地特大暴雨的主要原因。源源不断地水汽输送是产生极端降水的必要条件之一^[6-9]。廖晓农等^[9]对2012年7月21日北京历史罕见的特大暴雨进行了分析,认为产生长时间强降水的重要原因是边界层以上大气高湿特征一直维持。此外,大气稳定度的变化^[10-12]、冷空气的影响^[13-14]和地形^[15-16]等也是产生极端暴雨的一些重要原因。甘璐等^[10]对北京两次特大暴雨过程进行对比分析得出“7·20”过程前期高空有厚度“爆增效应”,抑制了对流发展,而“7·21”过程整层厚度下降,前期冷空气从高层侵入华北地区,表现为明显

收稿日期:2019-11-18;修回日期:2020-05-18

基金项目:中国气象局预报员专项(CMAYBY2019-043);江苏省气象局科研基金面上项目(KM201704);江苏省气象局预报员专项(JSYBY201809)

作者简介:黄文彦(1989—),男,工程师,主要从事天气预报技术研究。E-mail: h_wenyan@yahoo.com

通信作者:雷正翠(1970—),女,高级工程师,主要从事天气预报技术研究。E-mail: 30896306@qq.com

的斜压性,有利于对流发展。赵大军等^[13]研究结果表明强降水区位于干侵入指数等值线密集带靠近其负值区一侧,当干侵入指数正负中心的零线越靠近,降水越趋于增强。

大部分极端暴雨的研究集中在华北^[17-19]、西南^[20-22]和西北^[23-26]地区,主要从水汽输送特征^[17,20,22,25]、环流形势和中尺度系统特征^[18-19,21,24,26]以及不稳定条件^[23]等方面进行了研究,得出了许多有意义的成果。但不同地区极端暴雨产生的具体原因有一定差异,江苏在夏季也常有极端暴雨出现,目前针对江苏地区未受台风影响且处在梅雨期外的极端暴雨研究较少,因此有必要加强研究。2017年6月上旬在江苏南部出现了一次区域性极端暴雨事件,多个站点打破同期日降水量记录,且出现在梅雨期之前,因此对这次过程进行诊断分析有重要意义。本文主要从形势背景场、弱冷空气影响、大气稳定度、雷达回波特征和水汽收支等方面得出造成这次极端暴雨的主要原因,并与该区域同期其他暴雨事件进行对比分析,为极端降水的预报提供一些有用的信息。

1 资料与方法

降水实况空间分布资料使用中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)提供的自动站与CMORPH降水产品融合的降水数据集,空间分辨率为 $0.1^\circ \times 0.1^\circ$;降水时间序列资料使用气象观测站的逐10 min和逐小时降水量。强降水的原因分析使用ERA-Interim再分析资料,时间分辨率为6 h,空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。雷达资料使用常州多普勒雷达站观测得到的垂直风廓线(VWP)和反射率因子(R)。

干侵入指数(D_I)的计算参照了姚秀萍和彭广^[27]的方法:

$$D_I = -\frac{(-\vec{V} \cdot \nabla T) \cdot P_V}{\theta_{se}} \quad (1)$$

式中, $\vec{V}$ 为水平风速, T 为温度, P_V 为位涡, θ_{se} 为假相当位温,若 $D_I > 0$,表明有干侵入的存在。相当位涡(E_{PV})为Moore等^[28]的定义:

$$E_{PV} = -g\eta \cdot \nabla \theta_{se} \quad (2)$$

其中, g 为重力加速度, η 为绝对涡度, θ_{se} 为假相当位温,若 $E_{PV} < 0$,表明大气具有条件性的对称不稳定。水汽收支方程^[29]为:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + \nabla \cdot \vec{V}q + \frac{\partial \omega q}{\partial p} = -m \quad (3)$$

其中方程左端第一项为水汽局地变化项,左端第二项为水平散度项,左端第三项为垂直输送项,右端一项为水汽凝结项,在强降水过程中水平散度项和垂直输送项起到重要作用。垂直上升运动引起的潜热加热率使用了Raymond^[30]和Emanuel等^[31]的方法,该方法的公式为:

$$\dot{\theta} = \omega \left(\frac{\partial \theta}{\partial p} - \frac{\gamma_m}{\gamma_d} \frac{\theta}{\theta_{se}} \frac{\partial \theta_{se}}{\partial p} \right) \quad (4)$$

式中, θ 指位温, θ_{se} 指假相当位温, γ_m 指湿绝热递减率, γ_d 指干绝热递减率。

2 降雨实况

强降水主要集中在江苏和安徽两省,雨带近似东西走向(图1a)。日降水量超过100 mm的大暴雨区主要位于江苏省长江以南地区,有2站日降水量超过250 mm,其中最大雨量中心为常州金坛站,达265.3 mm。江苏南部南京站破日降水量历史记录,南京浦口站和镇江句容站破6月日降水量历史记录,常州站和常州金坛站破6月上旬日降水量历史记录,具有一定的极端性。

图1b为2个达到特大暴雨级别站点(金坛和句容站)的逐小时降水量分布,这次极端降水过程从10日03时开始一直持续到10日19时,2个特大暴雨站均出现了5个时次以上的短时强降水,最大小时雨强均超过40 mm,可见本次降水过程具有强的对流性特征。图1c为2个站最强小时雨强内逐10 min降水量分布,与逐小时降水量分布相类似,逐10 min降水量分布也呈现出显著的不均匀性。

3 大气环流和水汽条件特征

为了更加清晰地得出造成这次极端强降水的环境形势特征,分析了2017年6月上旬天气形势平均场与近30 a 6月上旬平均场之间的差异。200 hPa(图2a)在我国东部 40°N 以南地区出现一反气旋,以北地区为一气旋,反气旋北部和气旋南部的异常西风加强了高空的西风急流,其中强的异常偏西风位于渤海湾的东侧,达到 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 以上,整个江苏南部正好位于异常偏西风入口区的右侧,也即加强的西风急流入口区的右侧,有利于该地区长时间维持高空辐散,从而加强垂直上升运动。500 hPa(图2b)在我国东南沿海地区出现异常反气旋环流,表明该时期副热带高压偏强,异常反气旋环流西侧为异常

的低压槽,低压槽前部和反气旋环流后部的西南气流有利于将暖湿气流直接输送到苏南地区。中高纬度在东北地区东部出现异常低压环流,表明该时段东北冷涡偏强,此外在蒙古国地区有弱的异常高压环流,低压环流后部和高压环流前部异常偏北风有利于弱冷空气往我国东南部输送,而江苏地区正位于西南暖湿气流和北部弱冷空气输送交汇地带,这有利于降水强度的加强。700 hPa(图 2c)和 850 hPa(图 2d)形势与 500 hPa 相似,偏强的副热带高压西北侧的西南气流与东北冷涡西南侧的西北气流交汇于江苏省,且 850 hPa 上在该地区出现异常风场切变,为强降水的产生提供动力条件。

分析 2017 年 6 月上旬 850 hPa 比湿和水汽通量散度平均场与近 30 a 6 月上旬平均场的差异可

知(图 3), 35°N 以北地区水汽条件大都不如常年,且大部分区域为强的水汽通量辐散区,不利于水汽的集中;而 35°N 以南地区水汽条件好于常年,该区域的比湿大都较常年偏高约 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且大部区域为强的水汽通量辐合区,为强降水提供了有利的水汽条件。

4 物理量特征

10 日 02 时强降水开始前, 32.5°N 附近低层辐合场相对较弱,高层辐散场垂直伸展高度也较薄,垂直上升运动也相对较弱。10 日 08 时和 14 时强降水期间(图 4a、4b)700 hPa 以下出现数值为 $-10\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐合中心,700 hPa 以上出现 $6\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 的辐散中心,且辐合和辐散的垂直伸展高度都较

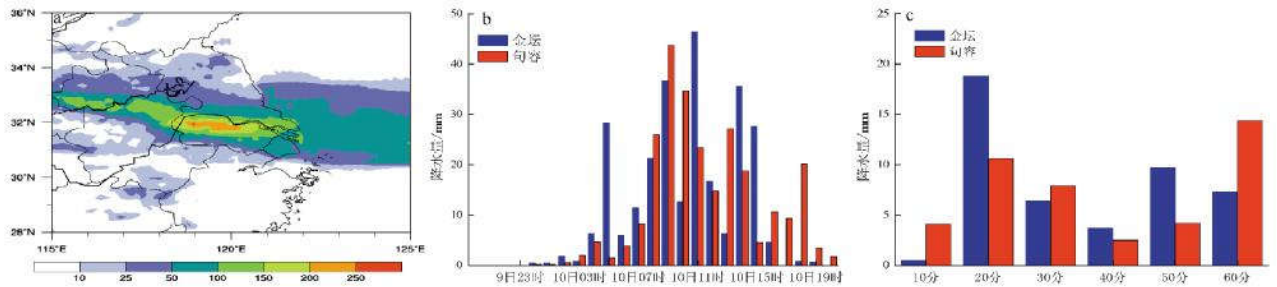


图 1 2017 年 6 月 9 日 20 时—10 日 20 时累积降水量(a)、金坛和句容站逐小时降水量(b)以及金坛和句容站最强小时雨强内逐 10 min 降水量(c)

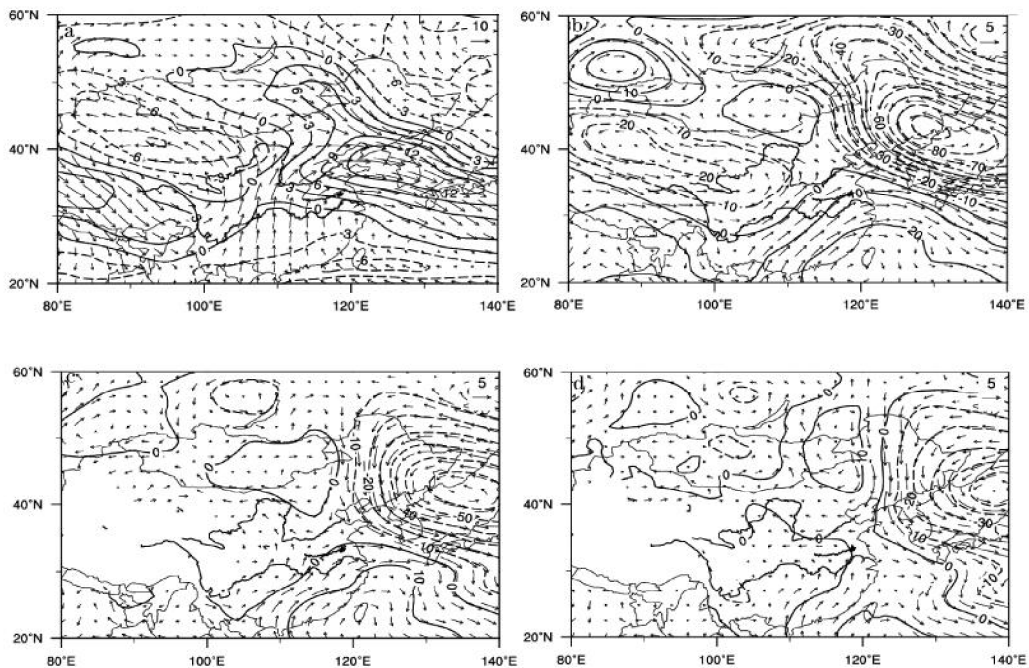


图 2 2017 年 6 月上旬平均 200 hPa(a)风场(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和风速大小(等值线,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)以及 500 hPa(b)、700 hPa(c)、850 hPa(d)风场(箭头,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)和高度场(等值线,单位:gpm)与近 30 a 6 月上旬平均场差异

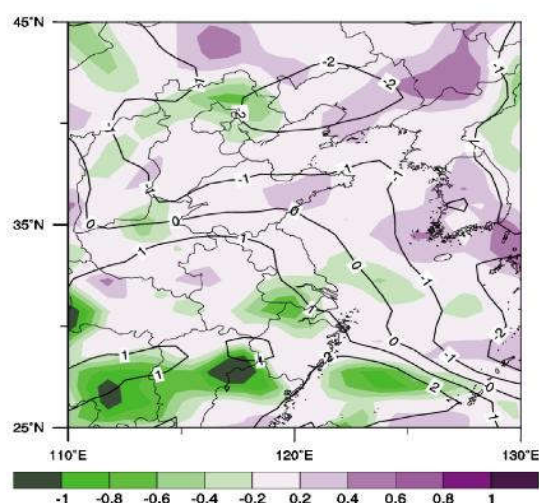


图3 2017年6月上旬平均850 hPa比湿(等值线, 单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和水汽通量散度(阴影, 单位: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)与近30 a 6月上旬平均场差异

高,从而带来了强上升运动,垂直速度中心数值超过 $-15 \text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 。10日20时700 hPa以下强辐合区依旧存在,但高层强辐散区明显变薄,向上仅伸展到500 hPa附近,上升运动强度也显著减弱。由此可见,强垂直上升运动从08时前后一直持续到14时前后,为强降水提供了有利的动力条件。10日08时和14时强降水期间(图4c,d), 32.5°N 附近700 hPa以下比湿均在 $9 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,同时出现强水汽通量辐合,中心数值 $<-10\times 10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,因此较长时间的强上升运动同时配合充足的水汽条件和强的水汽辐合有助于极端降水的出现。以上分析表明通过ERA再分析资料得出的最强垂直上升运动区和水汽通量辐合中心区集中在 32.5°N 附近,向北偏离实际强降水区约 1° 左右(图1a),因此ERA再分析资料对此次过程的分析具有一定的系统偏差。

赵大军等^[13]和韦英英^[14]研究表明,干冷空气入侵对暴雨的发生起着重要作用。10日08时600 hPa温度平流空间分布可以看到(图5a), 114°E 以东地区以暖平流为主,强的冷平流主要集中在 35°N 附近的黄土高原,该地区又有小股冷空气向东向南影响到江苏省的中西部地区,中心冷平流强度在 $-0.8\times 10^{-4} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$,说明中层有弱冷空气侵入。如果锋生函数 >0 ,则表明该地区有锋生的可能。由锋生函数空间分布可知(图5b),江苏省的西部和强上升中心 32.5°N 附近锋生函数为正值,说明这些地区出现锋生。同时, 32.5°N 附近江苏西部冷平流和冷锋锋生强度要明显强于东部,与实况中的江苏南部西侧降水明显强于东侧一致。可见,锋生区、冷平流区和强

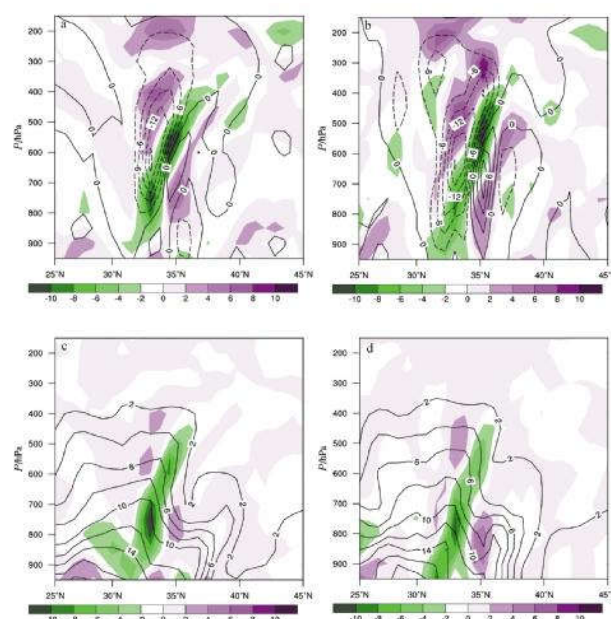


图4 2017年6月10日08时和14时沿 120°E 垂直速度(a,b,等值线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)、散度(a,b,阴影,单位: 10^{-5} s^{-1})、比湿(c,d,等值线,单位: $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和水汽通量散度(c,d,阴影,单位: $10^{-5} \text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) 纬度—高度剖面 (a,c为08时,b,d为14时)

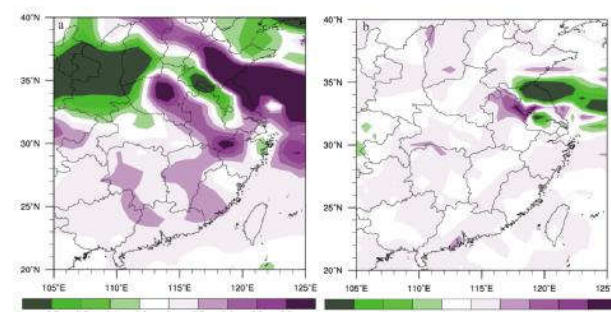


图5 2017年6月10日08时600 hPa温度平流(a,单位: $10^{-4} \text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$)和锋生函数空间分布(b)

降水区有很好的对应关系,当高层干冷空气逐渐向低层受暖湿气流控制的江苏省入侵时,上干冷、下暖湿的配置加强了位势不稳定,有助于对流的产生和发展,也使得暴雨增强。

这次强降水过程中有干冷空气侵入,干侵入指数综合了冷平流、相对湿度和位涡等相关物理量,对强降水区域具有一定的指示意义。干侵入指数若为正值,则表明有干侵入出现。10日08时600 hPa干侵入指数分布表明(图6a),江苏省北部的干侵入指数为负值,即这些地区没有干侵入存在。较明显的干侵入区主要集中在 32.5°N 附近,与冷锋锋生区和强

垂直上升运动区相吻合,表明中层干侵入对这次降水的增幅有一定作用。冷空气的加入还会带来大气稳定度的变化,特别是条件性的对称不稳定能带来强的倾斜对流,而倾斜对流往往导致强降水。相当位涡(EPV)对条件性的对称不稳定具有一定的指示意义,若 $EPV < 0$,则表明大气具有条件性的对称不稳定。10日08时600 hPa相当位涡空间分布(图6b)在江苏北部为大的正值区,表明大气层结是条件性的对称稳定,不利于斜上升运动的发展,而在冷锋锋生区和干侵入区的 32.5°N 附近 EPV 的值 < -1 PVU,即该地区存在明显的条件性对称不稳定,从而加强

斜上升运动,有利于强降水的发生。

5 雷达资料分析

10日01时雷达回波自西向东移动开始影响常州,但此时回波强度还较弱,径向风风廓线(VWP)地面到高空都为稳定的西南风,常州降水基本以主雨带边缘的层云降水为主。04时开始 VWP(图7a)近地层为东南风,向上逐渐转变为西南风,有明显的低空风切变。07时开始(图7b)地面到高空有明显的风向顺时针切变,风速明显加大,中层盛行稳定的西南急流,有利于降水系统的发展和维持。

从回波强度来看,04:29(图8a)部分地区镶嵌着积云带的降水雨带开始影响常州,之后降水回波不断增强发展,9:03开始强度达 $45\sim 55$ dBZ 的强降水回波源源不断地经过常州(图8b),形成明显的列车效应,是产生极端降水的主要原因。

6 极端性分析

6月上旬江苏南部出现暴雨的次数总体并不多,以此次暴雨中心常州地区为例,20世纪90年代以后发生在6月上旬的暴雨过程共有12次,且其他年份11次暴雨量要比这次极端暴雨量少一半以上,

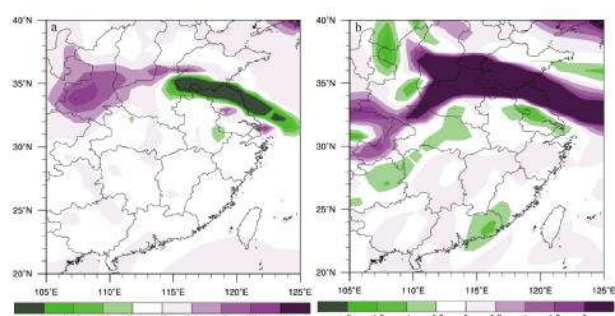


图6 2017年6月10日08时600 hPa干侵入指数(a,单位: $10^{-6}\text{PVU}\cdot\text{s}^{-1}$)和相当位涡空间分布(b,单位:PVU)

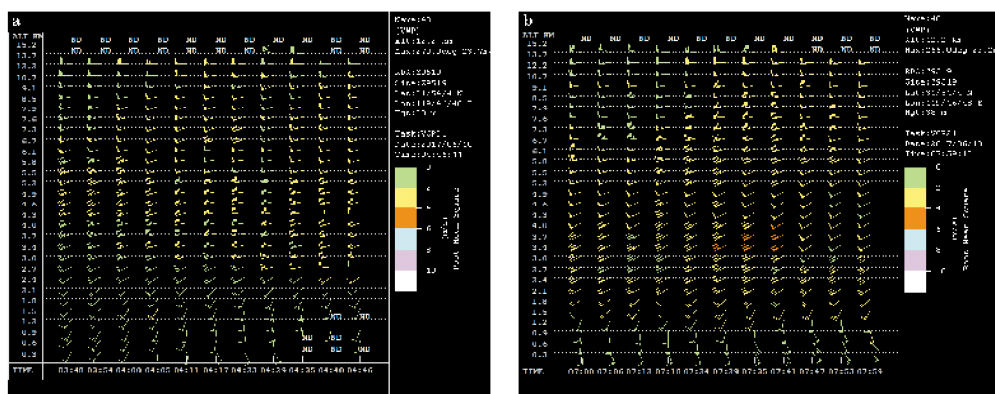


图7 常州雷达站03:48—04:46(a)和07:00—07:59(b)VWP

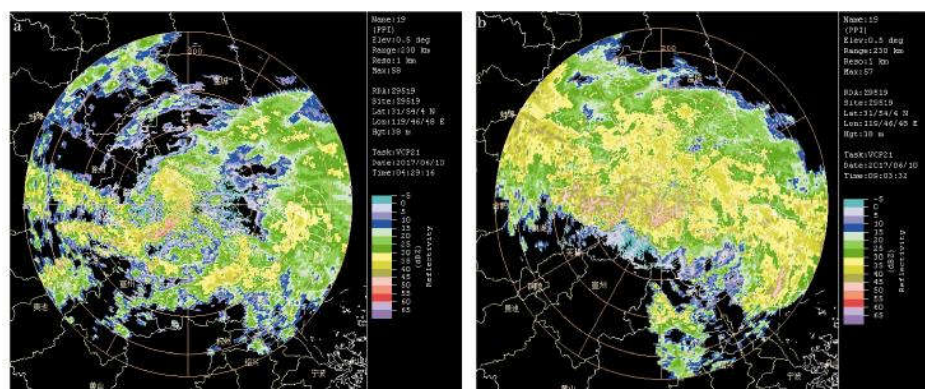


图8 04:29(a)、09:03(b)常州雷达站0.5°仰角反射率强度

可见此次过程相比于其他暴雨过程有显著差异,具有明显的极端性。2017年和其他年份11次6月上旬暴雨过程平均1000~100 hPa水汽通量大小垂直积分分布可知(图9),两者在江苏省的空间分布基本相似,都呈现出由南向北的递减趋势。2017年(图9a)极端暴雨过程的整层水汽通量垂直积分在江苏南部的数值超过 $8\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,而其他年份11次(图9b)暴雨过程的平均值仅为 $6\text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,因此2017年极端暴雨过程的总体水汽条件要明显好于其他几次暴雨过程。

源源不断地水汽输送是暴雨形成的必要条件之一,2017年和其他年份11次6月上旬暴雨过程平均沿 120°E 水汽收支方程中水平散度项和垂直输送项的纬度—高度剖面可知(图10),2017年水平散度项(图10a)在 32.5°N 附近500 hPa以下均为负值,最小值 $<-8\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,表明中低层有显著的水平水汽通量的辐合,从而为强降水提供充足的水汽,其他年份11次暴雨过程中平均水汽辐合区(图10b)仅维持在600 hPa以下,最小值 $<-2.5\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,约为2017年的1/3,因此2017年水汽辐合强度和垂直伸展高度均大于其他年份。

垂直输送项两者同样存在显著差异,2017年(图10c)700 hPa以下数值均为正值,最大值 $>8\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,与水平散度项最小值的绝对值基本相等,表明低层水平辐合的水汽都往高层输送,700 hPa以上负值区逐渐增多,说明低层水汽均被垂直输送到700 hPa以上,最小值出现在500 hPa左右,数值低于 $-6\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,其他年份垂

直输送项(图10d)正负值转换高度也约在700 hPa附近,但强度要明显弱于2017年,低层往高层输送的水汽值仅为 $2\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,高层获得的水汽值也仅低于 $-1.5\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,两者均约为2017年的1/3。从水汽收支方程中水平散度项和垂直输送项之和可知(图10e,10f),两者从地面到200 hPa以上都为负值,即获得水汽,但2017年强水汽辐合中心的数值低于 $-4\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,而其他年份水汽辐合中心的数值 $<-1.2\times 10^{-5}\text{ g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$,可见,2017年强降水区总的水汽辐合强度也为其他年份平均值的3倍。

除水汽条件存在显著差异外,本次极端降水过程中的垂直速度也与其他年份有明显区别。2017年和其他年份11次6月上旬暴雨过程平均沿 120°E 垂直速度和潜热加热率的纬度—高度剖面分布表明(图11),2017年(图11a)强的垂直上升运动从底层一直伸展到200 hPa,而其他年份(图11b)平均垂直上升运动主要集中在850~200 hPa,同时2017年垂直上升运动中心数值在 $-15\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,约为其他年份强上升运动平均值的3倍,因此2017年强降水过程中的上升运动相比于其他年份强度强且垂直伸展的厚度厚。垂直上升运动能带来潜热加热,而潜热加热能正反馈于上升运动。由图11可知2017年强上升运动区的潜热加热率最大值在 $1.2\times 10^{-4}\text{ K}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右,同样是其他年份强潜热加热率平均值的3倍,2017年强的潜热加热也部分加强上升运动,从而引起强降水。

夏季暴雨出现时经常会伴有地面气旋的过境,2017年极端降水出现时地面有气旋东移,其他年

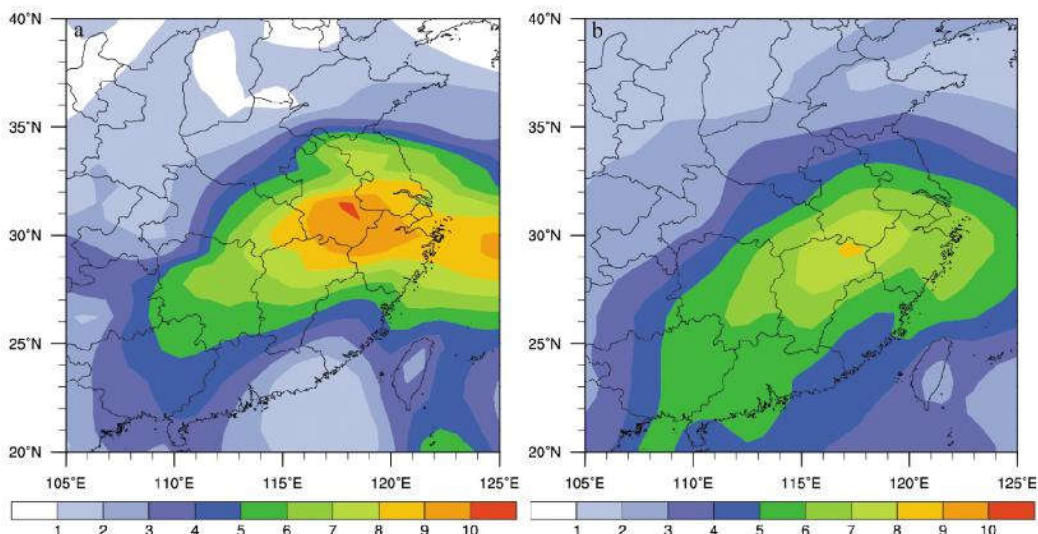


图9 2017年(a)和其他年份11次6月上旬暴雨过程平均(b)1000~100 hPa水汽通量大小垂直积分(单位: $\text{g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

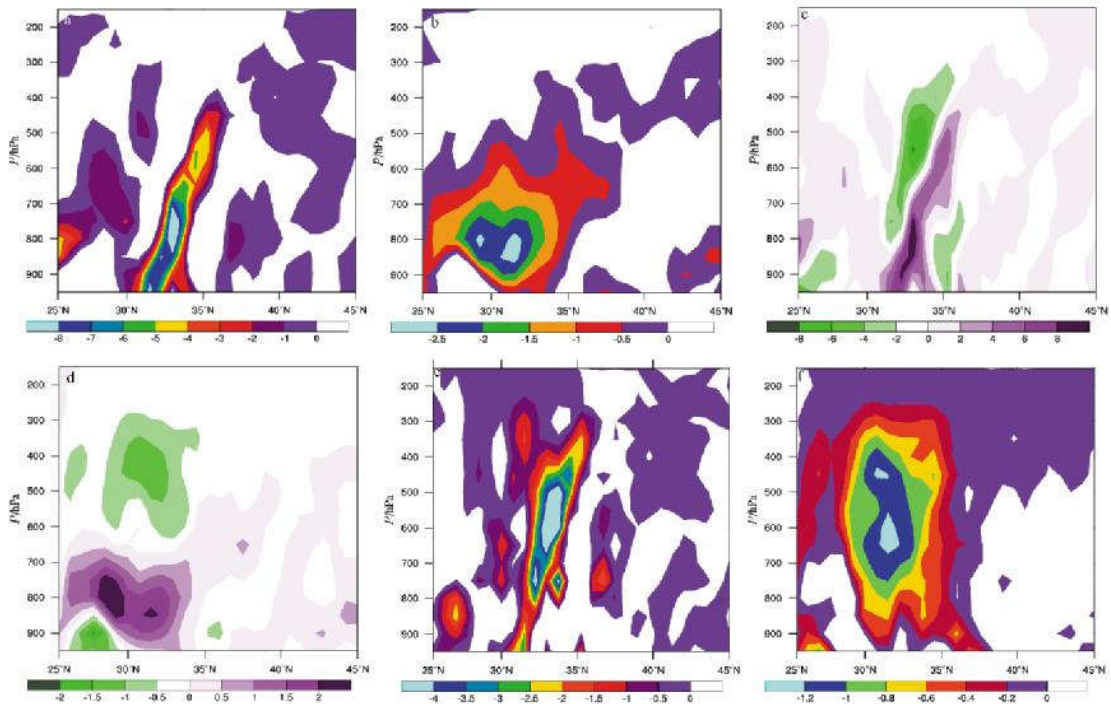


图 10 2017 年和其他年份 11 次 6 月上旬暴雨过程平均沿 120°E 水汽收支方程中水平散度项(a,b,单位: $10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)、垂直输送项(c,d,单位: $10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)及水平散度项和垂直输送项之和(e,f,单位: $10^{-5}\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)纬度—高度剖面 (a,c,e 为 2017 年,b,d,f 为其他年份)

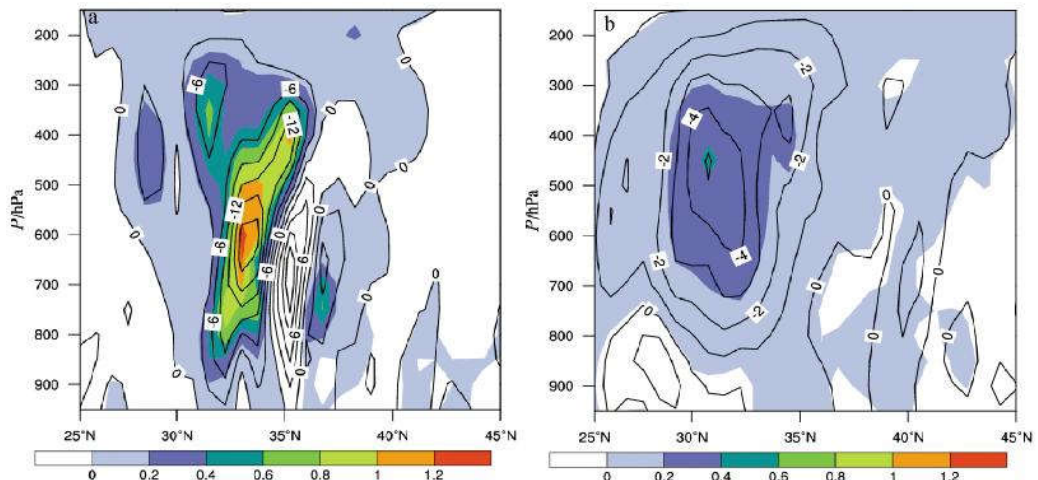


图 11 2017 年(a)和其他年份 11 次 6 月上旬暴雨过程平均(b)沿 120°E 垂直速度(等值线,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)和潜热加热率(阴影,单位: $10^{-4}\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$)纬度—高度剖面

份 6 月上旬 11 次暴雨过程发生时,地面有 6 次出现了气旋。图 12a~12c 给出了不同暴雨过程对应地面气旋路径,2017 年(图 12a)地面气旋形成以后略有北折进入淮河上游,然后在安徽南折进入江苏的南部。其他年份(图 12b,12c)6 次气旋路径中仅有一次与 2017 年类似,先北上然后南下进入江苏南部,其他 5 次过程气旋路径都是以北移或者东移为主,气旋过境江苏时并未出现明显的南移。图 12d

为夏季引起江苏南部区域性暴雨的江淮气旋路径^[32],大部分气旋在安徽开始有明显的南折然后再进入江苏,这一路径和 2017 年的气旋路径相似,且其他年份 6 月上旬中唯一一次同样类似的气旋路径给常州带来的降水也是 100 mm 以上的大暴雨,因此 2017 年极端降水对应的气旋路径是易带来强降水的气旋路径。

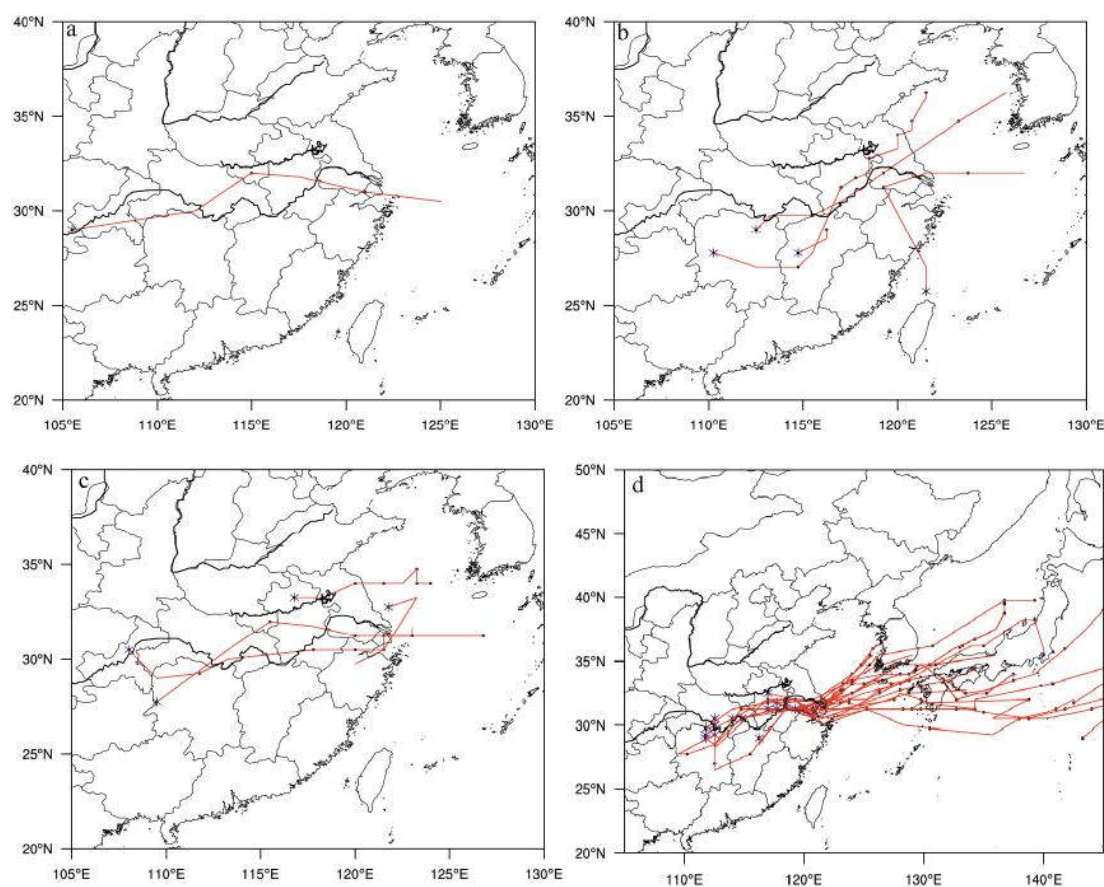


图12 2017年(a)和其他年份(b,c)6月上旬暴雨过程对应的地面气旋路径以及夏季江苏南部气旋路径(d)
(图中蓝色标记为气旋源地)

7 结论

(1)2017年6月上旬江苏南部极端暴雨过程强降水集中在江苏和安徽两省,最强降水中心日降水量超过250 mm。暴雨区位于加强的200 hPa西风急流入口区的右侧,700和850 hPa上偏强的副热带高压西北侧的西南气流与东北冷涡西南侧的西北气流交汇于江苏省,850 hPa在该地区出现异常风场切变,为极端强降水的发生提供了有利的天气背景条件。35°N以南比湿大都较常年偏高 $1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,且江苏南部为异常水汽通量辐合区,为强降水的发生提供了充足的水汽条件。

(2)强降水长时间维持是出现极端降水的重要原因之一。中层干侵入的出现对这次降水的增幅有一定作用。32.5°N附近江苏西部冷平流和冷锋锋生强度明显强于东部,造成了江苏南部西侧降水明显强于东侧。32.5°N附近存在明显的条件性对称不稳定,加强了斜上升运动,有利于强降水的发生。降水雨带中嵌套的中尺度积云降水自西向东移动,在暴雨区形成列车效应,也是

产生极端降水的原因之一。

(3)从水汽水平辐合强度、垂直输送强度、总水汽辐合强度、垂直上升及潜热加热强度来讲,2017年均均为6月上旬同期其他暴雨过程的3倍。此外2017年极端降水对应的地面气旋路径为先东移北折进入淮河上游,然后在安徽南折进入江苏南部,该路径较易给江苏南部带来强降水。

参考文献:

- [1] 毕宝贵,张小玲,代刊.2016年超强厄尔尼诺背景下的强对流和极端降水天气特点[J].科学通报,2017,62(9):928-937.
- [2] 张萍萍,孙军,车钦,等.2016年湖北梅汛期一次极端强降雨的气象因子异常特征分析[J].气象,2018,44(11):1424-1433.
- [3] 曾勇,杨莲梅.新疆西部一次极端暴雨事件的成因分析[J].高原气象,2018,37(5):1220-1232.
- [4] 栗晗,王新敏,张霞,等.河南“7·19”豫北罕见特大暴雨降水特征及极端性分析[J].气象,2018,44(9):1136-1147.
- [5] 张桂莲,仲夏,韩经纬,等.内蒙古中西部地区一次极端大暴雨特征分析[J].干旱气象,2018,36(1):17-26.

- [6] 张云惠,于碧馨,王智楷,等.伊犁河谷夏季两次极端暴雨过程的动力机制与水汽输送特征[J].暴雨灾害,2018,37(5):435-444.
- [7] 刘晶,周玉淑,杨莲梅,等.伊犁河谷一次极端强降水事件水汽特征分析[J].大气科学,2019,43(5):959-974.
- [8] 努尔比亚.吐尼牙孜,杨利鸿,米日古丽.米吉提.南疆西部一次突发极端暴雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(6):75-82.
- [9] 廖晓农,倪允琪,何娜,等.导致“7·21”特大暴雨过程中水汽异常充沛的天气尺度动力过程分析研究[J].气象学报,2013,71(6):997-1011.
- [10] 甘璐,郭文利,邓长菊.北京地区两次特大暴雨过程的对比分析[J].干旱气象,2017,35(2):239-249.
- [11] 张景,周玉淑,沈新勇,等.2016年“7·19”京津冀极端降水系统的动热力结构及不稳定条件分析[J].大气科学,2019,43(4):930-942.
- [12] 朱莉,张腾飞,丁治英.云南两次灾害性特大暴雨不稳定机制的对比研究[J].自然灾害学报,2015,24(2):178-185.
- [13] 赵大军,姚秀萍.北京“7·21”特大暴雨过程中的干侵入指数特征研究[J].暴雨灾害,2017,36(6):527-534.
- [14] 韦英英.一次山东特大暴雨干侵入的作用[J].气象科技,2018,46(2):343-351.
- [15] 顾佳佳,武威.2016年“7·9”豫北特大暴雨过程的中尺度特征分析[J].暴雨灾害,2017,36(5):440-452.
- [16] 王君.豫北两次特大暴雨事件的物理量极端性和中尺度特征[J].干旱气象,2019,37(3):419-429.
- [17] 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.
- [18] 孔凡超,赵庆海,李江波.2003年7月冀中特大暴雨的中尺度系统特征和环境条件分析[J].气象,2016,42(5):578-588.
- [19] 吕林宜,王新敏,栗晗.华东区域模式对河南“7·19”特大暴雨的数值检验与分析[J].气象与环境科学,2019,42(1):101-109.
- [20] 周长艳,唐信英,邓彪.一次四川特大暴雨灾害降水特征及水汽来源分析[J].高原气象,2015,34(6):1636-1647.
- [21] 肖递祥,杨康权,俞小鼎,等.四川盆地极端暴雨过程基本特征分析[J].气象,2017,43(10):1165-1175.
- [22] 王佳津,肖递祥,王春学.四川盆地极端暴雨水汽输送特征分析[J].自然资源学报,2017,32(10):1768-1783.
- [23] 苏军锋,樊明,吴文辉,等.甘肃东南部两次极端致灾暴雨对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(5):26-33.
- [24] 马晓华,马青,刘嘉慧敏,等.陕西榆林一次大暴雨成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2019,13(2):40-47.
- [25] 曾勇,杨莲梅,张迎新.新疆西部一次大暴雨过程水汽输送轨迹模拟[J].沙漠与绿洲气象,2017,11(3):47-54.
- [26] 张俊兰,魏荣庆,杨柳.2013年南疆2场罕见暴雨落区和强度的对比分析[J].沙漠与绿洲气象,2014,8(5):1-9.
- [27] 姚秀萍,彭广.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.
- [28] Moore J T, Lambert T E. The use equivalent potential vorticity to diagnose regions of conditional symmetric instability[J]. Wea Forecasting, 1993, 8(3): 301-308.
- [29] 陈晓红,余金龙,邱学兴,等.2005年7月4—11日淮河流域强降水过程的水汽收支分析[J].气象,2007,33(4):47-52.
- [30] Raymond D J. Nonlinear balance and potential vorticity thinking at large Rossby number[J]. Quart J Roy Meteor, 1992, 118(507): 987-1015.
- [31] Emanuel K A, Fantini M, Thorpe A J. Baroclinic instability in an environment of small stability to slantwise moist convection. Part I: Two-dimensional models[J]. J Atmos Sci, 1987, 44(12): 1559-1587.
- [32] 黄文彦,孙燕,卢楚翰,等.近40年夏季江苏引发暴雨的江淮气旋统计分析[J].气象,2019,45(6):843-853.

Analysis of an Extreme Rainstorm Process in Southern Jiangsu in Early June 2017

HUANG Wenyan¹, LEI Zhengcui¹, YU Jianwei², YAO Lina¹, WU Jianqiu¹, MU Xiyu³

(1.Changzhou Meteorological Bureau, Changzhou 213022, China;

2.Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008, China;

3.Jiangsu Institute of Meteorological Sciences, Nanjing 210009, China)

Abstract The extreme rainstorm process in southern Jiangsu in early June 2017 was analyzed from the aspects of situation, cold air impact, atmospheric stability and water vapor budget, while also compared with other heavy rain events in the same period. It shows that, first, the rainstorm locates at the right entrance of the enhanced 200 hPa westerly jet, and while the intersection of southwest airflow and northwest airflow as well as anomalous wind field shear at 850 hPa are the important preconditions of this process. Second, cold air intrusion in the middle and lower layers has an increasing effect on precipitation intensity. The intensity of cold advection and cold front frontogenesis in the west of Jiangsu Province near 32.5°N are significantly stronger than that in the east, and the distribution of precipitation is also the same. Finally, There is obvious conditional symmetrical instability in the rainstorm area. Water vapor horizontal convergence intensity, vertical transmission intensity, total water vapor convergence intensity, vertical speed, and latent heat release intensity are extremely strong in 2017, which is three times than that of other years. In addition, path of this cyclone is likely to induce heavy precipitation in southern Jiangsu.

Key words extremely rainstorm; weak cold air; equivalent vortex; water vapor budget; cyclone