

孙晓蕾, 闵锦忠, 王仕奇, 等. 中尺度对流系统的动热力特征及其演变对风垂直切变的响应[J]. 热带气象学报, 2020, 36(3): 401-415.

文章编号: 1004-4965(2020)03-0301-15

中尺度对流系统的动热力特征及其演变对风垂直切变的响应

孙晓蕾^{1,2}, 闵锦忠^{1,2}, 王仕奇^{1,2}, 沈菲菲^{1,2}, 杜宁珠^{1,2}

(1. 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044;
2. 南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室, 江苏 南京 210044)

摘 要: 为探究环境风切变在对流系统发生发展与维持过程中的重要性, 利用2009年6月5日20时(北京时间)上海宝山的探空资料生成理想试验初始场, 设计了包含改变整层、中层和低层风切变在内的多组试验, 对比分析各试验系统的动热力结构特征及其演变发现: (1) 整层环境风切变的改变对中尺度对流系统的影响最显著, 其次是中层风切变。增大整层风切变时, 对流系统强度及组织性最强, 生命史增长。减小整层风切变时, 系统强度最弱且组织结构易发散。(2) 风切变增加, 水平涡度增大, 其受垂直运动影响转化为垂直涡度, 涡旋对与垂直运动间相互作用形成的正反馈过程是系统强度增强并可以长时间维持线状结构的重要原因。(3) 风切变减小, 对流系统移动速度远小于阵风锋, 阵风锋移至系统前方, 阻断系统前沿上升气流必需的暖输送。阵风锋后冷而稳定的环境令系统逐渐消散。

关键词: 理想试验; 风垂直切变; 垂直运动

中图分类号: P445 **文献标志码:** A **Doi:** 10.16032/j.issn.1004-4965.2020.038

1 引 言

强对流天气具有突发性, 天气现象剧烈, 破坏力极强, 常伴有雷雨大风、冰雹、短时强降雨等强对流性灾害天气, 是最严重的自然灾害天气之一, 其造成的损失占气象灾害总损失的一半以上^[1]。研究表明, 中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)是造成强对流天气的重要系统, 其水平尺度在2~2 500 km之间, 时间尺度在几小时至几天之间, 包括对流单体、多单体风暴和超级单体风暴等各种组织形态^[2-4]。由于范围小、生命史短、局地性强, 常规观测资料难以捕捉, 中尺度对

流系统一直是天气预报的难点^[5]。Cotton等^[6]发现, 以不同形式的对流形态存在的MCS的演变特征及结构存在较大差异。Parker等^[7]指出, 线性中尺度对流系统存在三种不同组织形式的主要原因是对流层中上层相对风暴的平均风场的差异, 风场的不同造成水汽平流的差异, 从而影响层状云的分布。郑淋淋等^[8]发现在不同的水汽环境下发生的MCS的生命史及产生的天气现象明显不同。因此, 对于这类能产生严重灾害性天气的对流系统, 探讨其在不同环境条件下的发展变化过程对防灾减灾具有重要作用。

在早期的研究中, 垂直风切变被认为是影响中尺度对流系统发生发展的重要环境因素之一。

收稿日期 2019-10-21 修订日期 2020-04-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2017YFC1502103); 国家自然科学基金重点项目(41430427); 江苏省高校自然科学基金重大基础研究项目(11KJA170001); 国家自然科学基金项目(41805070)共同资助

通讯作者: 闵锦忠, 男, 江苏省人, 教授, 博士, 主要从事中小尺度数值模拟与资料同化、风暴尺度集合预报等方面的研究。E-mail: minjz@nuist.edu.cn

1950年代,Newton^[9]首次提出垂直风切变影响风暴的概念模型,认为环境风垂直切变与“热风”之间的不平衡造成的螺旋环流会增强有利于风暴发展的低层辐合高层辐散的配置。Lilly^[10]发现,线状超级单体与风切变间存在夹角可以使各单体间环流相互干扰减弱,从而维持风暴的稳定结构。Rotunno等^[11]通过理想试验,首次提出RKW理论,即冷池出流产生的负涡度与风切变产生的正涡度间的平衡,是决定飢线发展强度与生命史的重要机制,当两者相差较大时,飢线强度和生命史减小。Takemi等^[12-13]指出,低层风切变和冷池间的相互作用对强对流的发展与维持具有决定性作用。Guarriello等^[14]通过敏感性试验分析了低层风垂直切变的变化对超级单体形态的影响。此外,许多研究表明中、高层风切变对风暴的结构及演变也有重要影响^[15-18]。Coniglio等^[19]指出高层切变可使垂直抬升达到最大,在阵风锋附近保持较强上升气流,从而有利于对流的发展和维持。Johnson等^[20]通过观测证实热带与副热带地区,中、低层风切变对对流的组织作用相同,Coniglio等^[21]总结了在运用“RKW”理论时可能会存在的一些问题,一是切变深度的不确定性;二是冷池的不确定性,他发现3 km以上的切变也很重要。

国内对垂直风切变的影响也有一定研究。陈明轩等^[22]基于一次华北飢线过程分析得出,低层环境风切变和冷池的相互作用是对流系统得以维持发展和传播的重要机制。李娜等^[23]分析了一次华东飢线过程的动热力特征及对流系统发生的环境条件。张建军等^[24]基于理想试验分析了低层风切变和水汽条件对风暴内部结构配置及强度变化的影响。此外,许多学者^[25-26]也通过理想试验指出不同环境条件下地形对降水的影响。在以往的理想试验中,模式背景场多基于理想探空^[12-13],其假设风速随高度线性减小,这与风的实际分布不符。且过去研究多强调低层风切变或低层风切变与冷池之间的相互作用对对流系统的影响,忽略了其他层次切变。

针对上述问题,利用江淮地区一次飢线发生前的单点探空资料生成模式初始场,设计了改变中层、低层与整层风切变的多组理想试验,以期深入了解环境风切变在对流系统发生发展与维持过程中的重要性,探究哪种环境风切变更有利于系

统的发展与维持。

2 试验方案及对流系统演变过程介绍

2.1 试验方案

采用Weather Research and Forecasting(WRF)理想模块研究不同层次、不同强度的风切变对对流系统发生发展过程的影响,探究哪种环境风切变的分布最有利于对流系统的发生发展及其原因。模式水平区域为700 km×600 km,水平分辨率为1 km,模式顶高18 km,垂直方向为40层。侧边界采用开放边界条件,避免扰动返回区域影响结果。不考虑积云参数化,模式积分过程中忽略边界层、辐射等物理过程,微物理方案选用WDM6方案。试验过程积分12小时,积分步长为6秒。

理想试验是在均一场中加温度扰动场,本研究中,初始场的温度、气压、湿度和风场由观测探空资料决定。2009年6月5日江淮地区出现飢线过程,此次过程始于6月5日12时(北京时,下同),上海嘉定及市区先后出现了冰雹、强雷电大风及短时强降水,过程中最大风速达28 m/s,最大冰雹直径达30 mm,过程累计最大降水出现在宝山为33 mm,至6日02时对流在安徽南部地区减弱消失^[27-28]。利用2009年6月5日20时上海宝山站探空资料来生成模式初始场(图1)。该探空对流有效位能是1 886 J/kg,具有上干下湿的水汽条件,低层存在风速和风向的切变,较有利于对流发生。模式启动采用模式自带热泡扰动,即在模拟的水平区域西北角位置添加一个水平半径为10 km,垂直半径为1.5 km的热泡,其中心位于地面1.5 km高度上。热泡的温度分布为:

$$\Delta T = T_0 \times \cos^2(\beta\pi/2) (\beta \leq 1) \quad (1)$$

其中, ΔT 为温度扰动, T_0 为扰动振幅。

$$\beta = \sqrt{\left[\frac{(x-x_c)}{x_r}\right]^2 + \left[\frac{(y-y_c)}{y_r}\right]^2 + \left[\frac{(z-z_c)}{z_r}\right]^2} \quad (2)$$

其中 $x_r=y_r=10$ km,为扰动半径, (x_c,y_c,z_c) 为热泡的扰动中心点。本研究中采用的温度扰动为正值,即取 $\Delta T>0$ 。

我国地处西风带,实际观测中纬向风分量较大,且纬向风垂直风速差较大,风切变主要由于纬向风变化造成^[27],因此本文只改变纬向风垂直切

变。纬向风速的计算公式^[29-30]如下:

$$U = U_0 + A_s \tanh(Z_0/Z_s) \quad (3)$$

其中, A_s 取-5 m/s和5 m/s; $Z_s=3$ km; U_0 、 Z_0 为原始探空中各个高度的纬向风和高度值。分别增加或减少整层(地面至模式层顶; US5、US-5)、低层(0~3 km; LUS5、LUS-5)和 中层(3.5~6.5 km; MUS5、MUS-5)的风速得到如下多组试验(表1)。

其中控制试验中各层风速即为观测探空原始风速,中低层风切变计算公式为:

$$S = \sqrt{(U_1 - U_2)^2 + (V_1 - V_2)^2} \quad (4)$$

其中低层风切变的计算中, U_1 、 V_1 为3 km高度上风速, U_2 、 V_2 为地面风速;在中层风切变的计算中则分别为3.5 km和6.5 km上风速。各组试验纬向风廓线如图2。

表1 试验方案名称及中、低层切变值

试验名称	CTRL	US-5	US5	LUS-5	LUS5	MUS-5	MUS5
A_s /(m/s)	0	-5	5	-5	5	-5	5
改变风速的层	原始	整层	整层	0~3 km	0~3 km	3.5~6.5 km	3.5~6.5 km
0~3 km切变/(m/s)	17.0	14.5	19.8	14.5	19.8	17.0	17.0
3.5~6.5 km切变/(m/s)	5.5	4.9	6.1	5.5	5.5	4.9	6.1

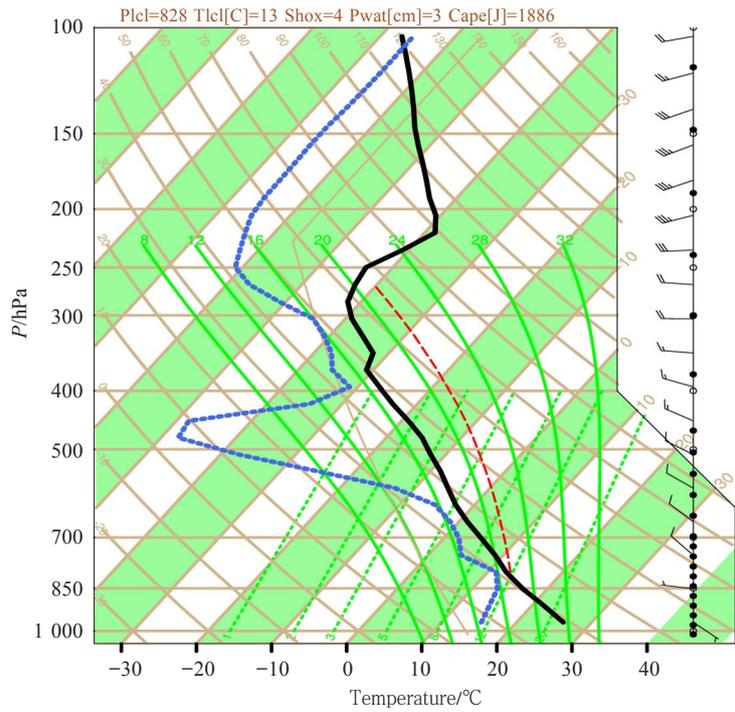


图1 上海宝山站2009年6月5日20时的探空图 蓝色虚线为露点温度,黑色实线为环境温度,单位:°C。

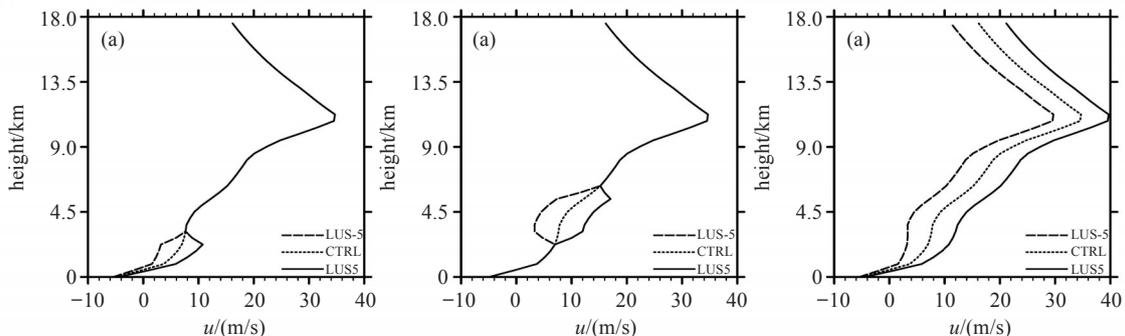


图2 LUS5、LUS-5和CTRL(a),MUS5、MUS-5和CTRL(b),US5、US-5和CTRL(c)试验的纬向风廓线分布

2.2 对流系统发展过程

图3为控制试验发生、发展、成熟、衰减阶段的雷达组合反射率。在初始阶段(图3a),模拟区域西北角有对流单体生成,最强回波强度达45 dBZ以上。随后,对流向东南方向发展移动,形成东北-西南走向的带状回波,最强回波达50 dBZ以

上。在回波带的西南部不断有新的对流单体生成。成熟阶段(图3c),对流结构的组织性较强,线状特征明显,伴随强烈的地面出流。衰减阶段(图3d),对流范围继续扩大,强回波区减少,对流结构的组织性较弱。

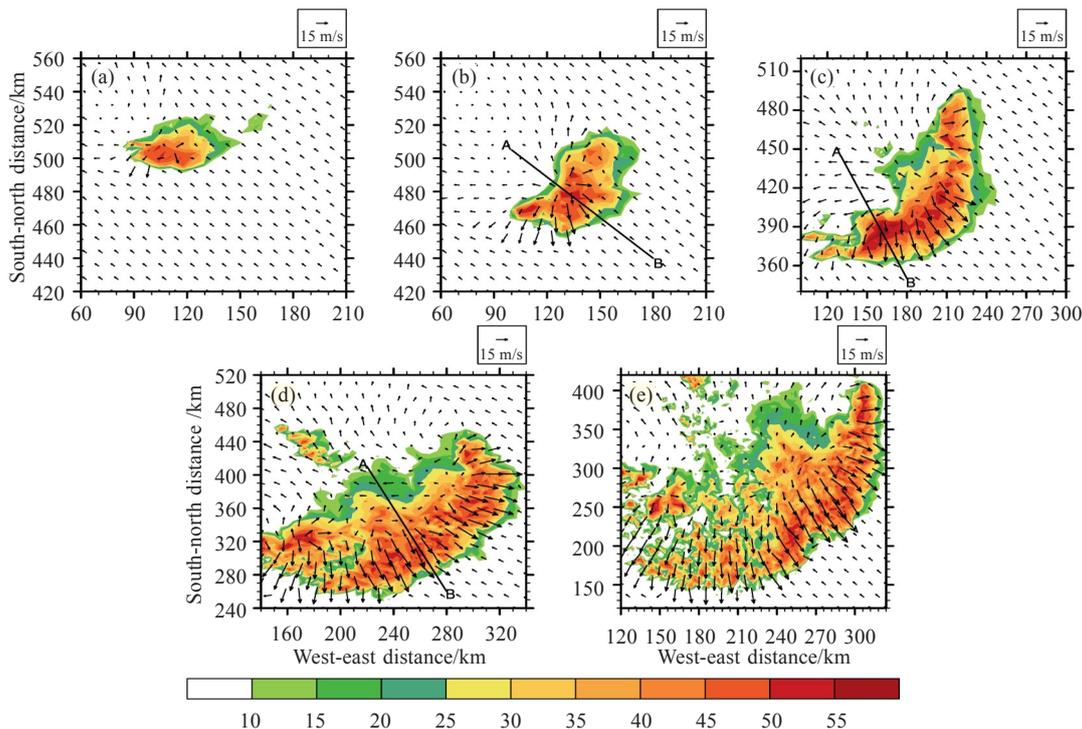


图3 控制试验2 h(a)、3 h(b)、5 h(c)、7 h(d)、9 h(e)的最大反射率(阴影,dBZ)和近地面风场(箭头,m/s) 直线AB为剖面位置。

图4为沿垂直于图3回波强度最强位置做直线所取剖面图。积分3 h时,系统处于发展阶段,大于40 dBZ的对流核高度伸展至8 km,对流水平尺度较小。至积分5 h时(图4b),系统处于成熟阶段,最强回波达55 dBZ以上,系统前部有贯穿整

层的上升运动存在,大于45 dBZ的对流核高度伸展至10 km,近地面对流活动旺盛。积分7 h时,系统强度减弱,进入衰减阶段,系统结构的组织性逐渐减弱。下文将以3 h、5 h分别作为系统发展和成熟阶段的代表时次进行具体分析。

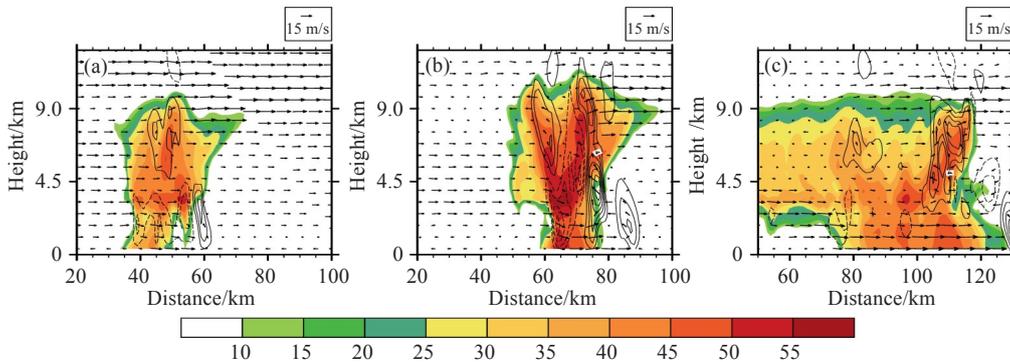


图4 控制试验3 h(a)、5 h(b)和7 h(c)沿图3直线AB所做剖面上的最大反射率(阴影,dBZ)、垂直速度(等值线,实线为正,虚线为负,m/s)、风场(箭头,m/s)

3 强对流系统对风垂直切变的响应

3.1 对比分析各组试验

对比分析各组试验同时刻雷达反射率发现,积分3 h时(图5),US5 试验系统强度、范围最大,最大回波强度达 55 dBZ 以上,其次是 MUS5 试验,其余试验没有形成明显的线状对流。积分7 h 时(图6),US5 试验系统仍存在明显的线状结构,

系统结构的组织性最强,最强回波强度在 55 dBZ 以上。US-5 试验系统结构的组织性最弱。

以往研究^[11]指出主要是低层环境风垂直切变的强度决定对流强度,而本文试验结果表明在低层风切变存在的前提下,整层风切变的改变对对流影响最显著,增加整层风切变试验中系统结构的组织性最强,生命史最长。下面将深入分析改变整层风切变试验(US5 和 US-5)如何影响对流系统动热力特征及其演变。

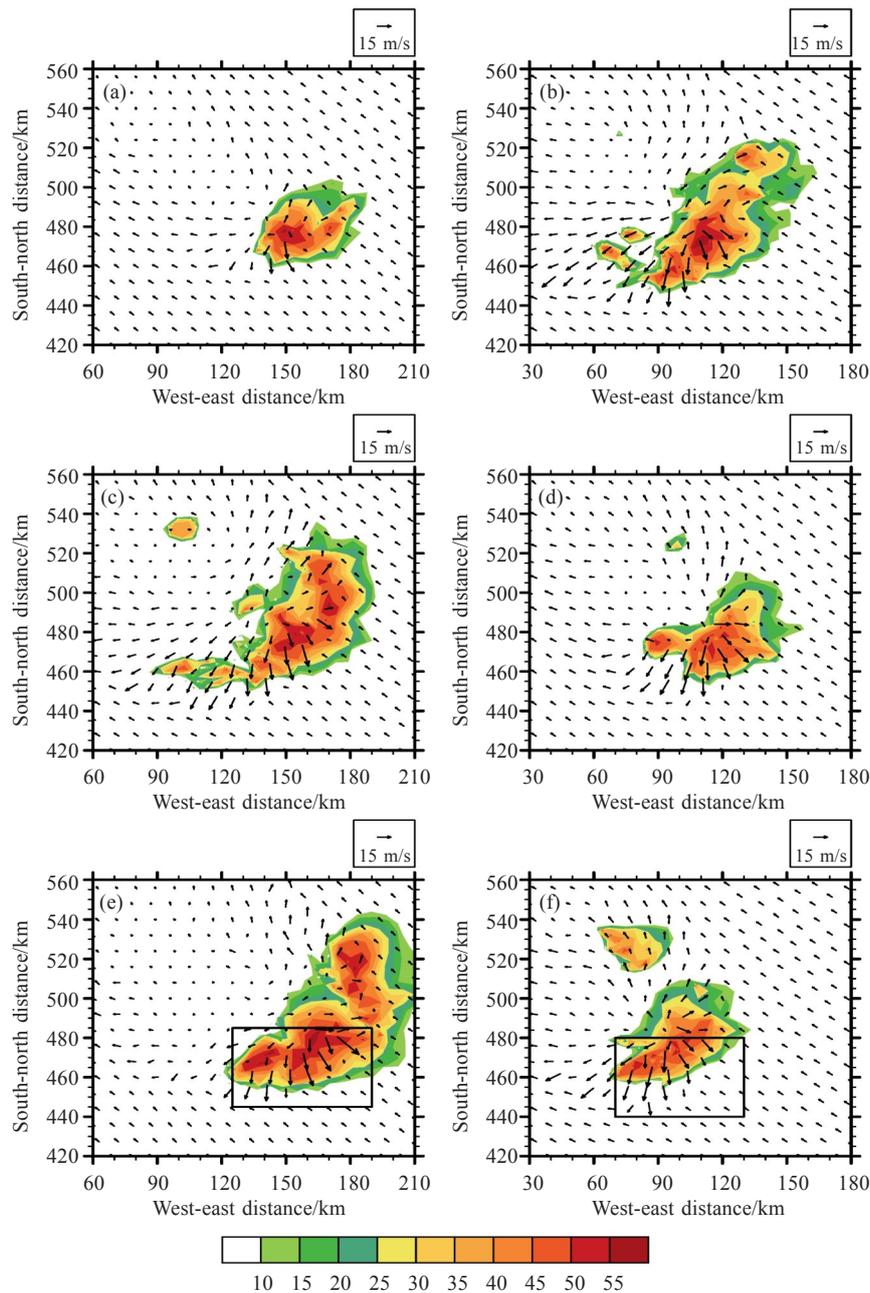


图5 积分3 h时增加(a、c、e)及减小(b、d、f)低层(a、b)、中层(c、d)和整层(e、f)风切变试验的最大反射率(阴影, dBZ),地面风场(箭头, m/s) 黑框为图7对流区位置。

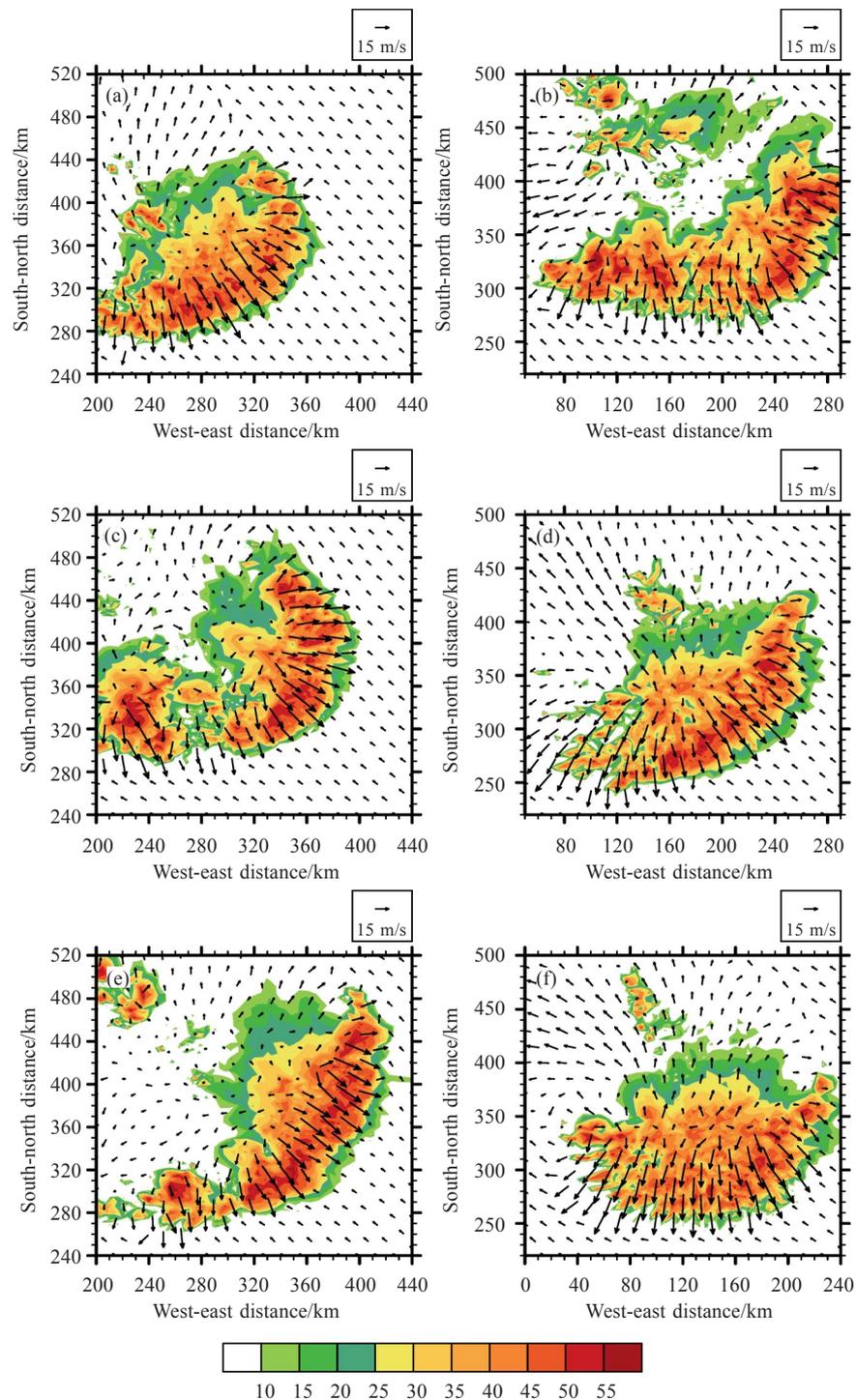


图6 积分7 h时增加(a、c、e)及减小(b、d、f)低层(a、b)、中层(c、d)和整层(e、f)风切变试验的最大反射率(阴影, dBZ)和地面风场(箭头, m/s)

3.2 强对流系统动力特征及演变对风垂直切变的响应

3.2.1 垂直风切变与垂直运动场

从垂直运动场的分布可以看出(图7), 气流在垂直运动过程中存在旋转^[30], 且US5试验中气流

旋转作用更强。积分3 h时, US5试验系统垂直运动更剧烈(图7a1~7c1), US-5试验的线状对流区的上升运动中心随高度向北显著倾斜(图7a2~7c2), 导致系统发展阶段上升下沉运动间相互干扰增强, 上升运动垂直分量减小, 系统强度减弱。

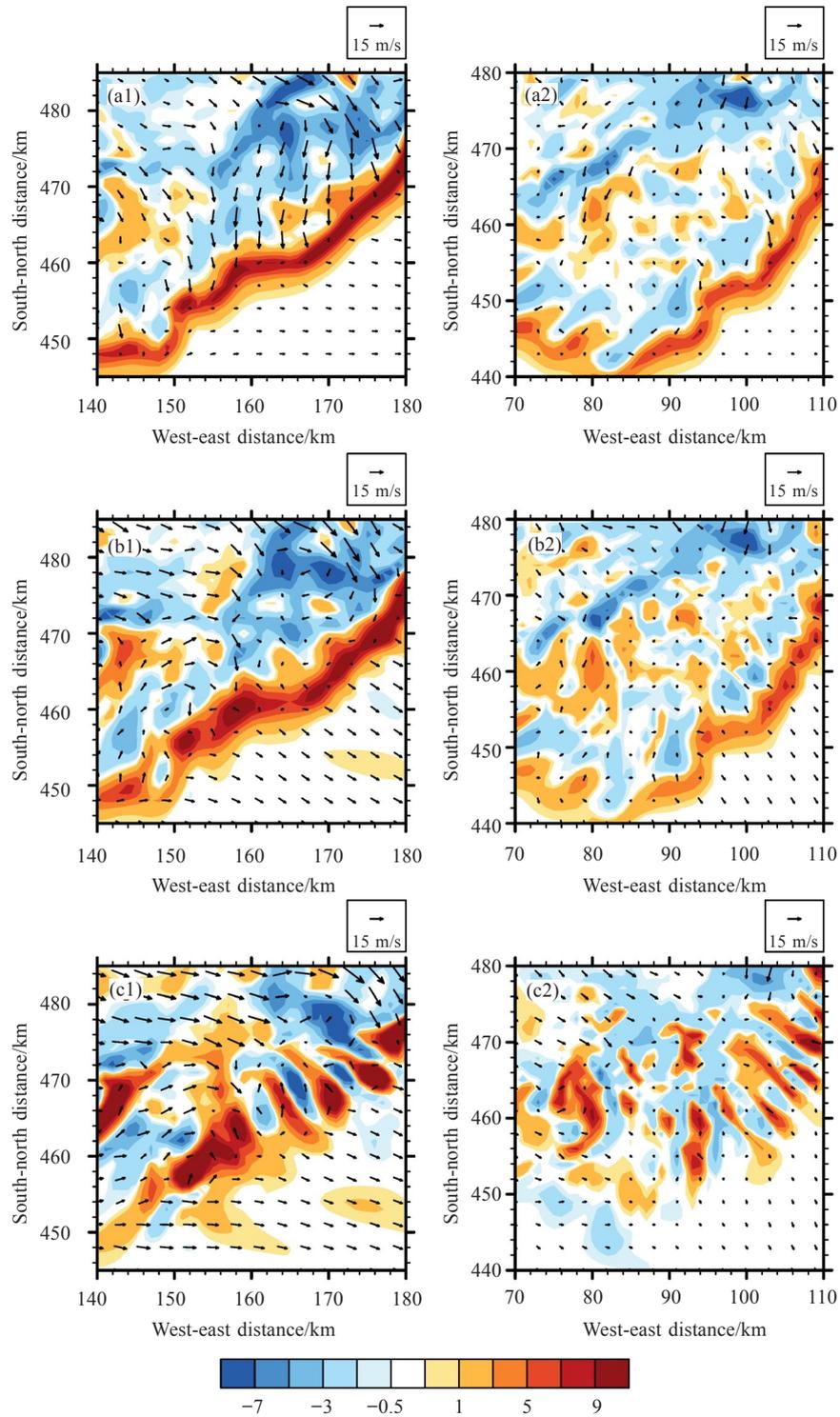


图7 积分3 h时US5试验(a1~c1)和US-5试验(a2~c2)对流区(图5黑框位置内)在1.5 km(a)、2.5 km(b)和4 km(c)上的垂直速度(阴影,m/s)和水平风场(箭头,m/s)

US5与US-5试验中最大垂直运动速度随高度变化的趋势几乎一致,积分3 h时(图8a),US5试验上升速度略大于US-5试验,US-5试验最大值所在高度略高。成熟阶段(图8b)US5试验各高度最

大上升速度大于US-5试验。US5试验最大上升速度所在层上升至9 km,而US-5试验最大上升速度所在高度层降低,这是由于US-5试验中上升气流随高度向北倾斜(图7),导致气流垂直分量减小,

最大上升速度出现高度随之降低。

积分3 h时,1.5 km以上US5试验各高度最大下沉速度大于US-5试验(图8c),差值达6 m/s。成熟阶段(图8d)US5试验低层最大下沉速度减小,中上层最大值增大。而US-5上层最大值减小,两组试验最大下沉速度差值达11 m/s,这是因

为对流的垂直运动会激起气流水平方向的振荡,上升运动越强,其附近的下沉运动也会增强。值得注意的是,US5试验发展阶段最大下沉速度大于成熟阶段,对应成熟阶段低层水平风速增大,这与苏洋^[32]结论一致,强对流系统发展阶段下沉速度大于成熟阶段。

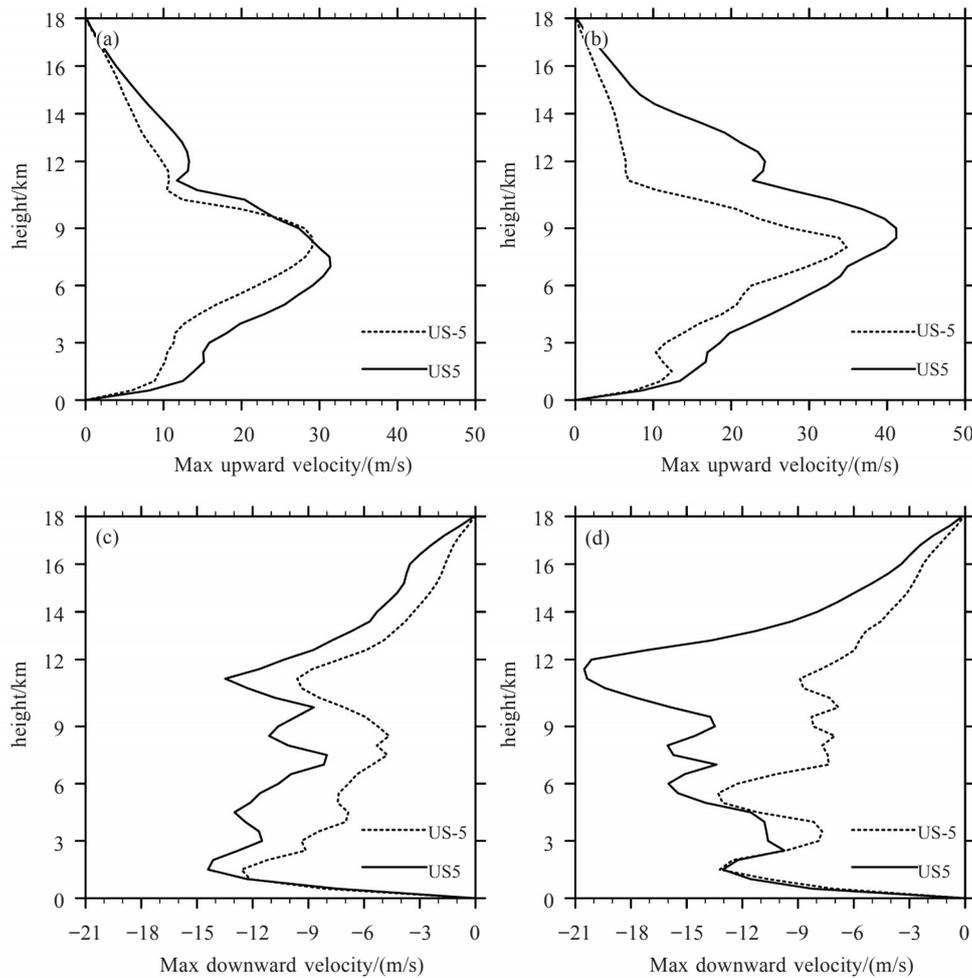


图8 US5和US-5试验在3 h(a,c)和5 h(b,d)最大上升速度(a,b,单位:m/s)和最大下沉速度(c,d,单位:m/s)随高度的变化

3.2.2 垂直风切变与涡度场

通过对比各组试验3 h垂直涡度发现(图9),增加整层风切变(US5试验)时,系统的平均涡度最大,涡旋对分布最密集,在US-5试验中系统的平均涡度最小。垂直涡度越大,表明环境风垂直

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\left(u \frac{\partial \zeta}{\partial x} + v \frac{\partial \zeta}{\partial y}\right) - \left(u \frac{\partial f}{\partial x} + v \frac{\partial f}{\partial y}\right) - w \frac{\partial \zeta}{\partial z} + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z} \frac{\partial w}{\partial x}\right) - (f + \zeta) \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right) \quad (5)$$

其中 ζ 是垂直涡度, f 是地转涡度, u 和 v 分别为纬向风和经向风, w 为垂直运动,方程左边为涡度局地变化项,方程右边各项依次是相对涡度平流项、

切变造成的气流旋转上升的趋势越强,即垂直涡度大小与风切变存在对应关系。下面通过涡度方程分析造成涡度增长变化的主要原因,垂直方向的涡度方程为:

地转涡度平流项、涡度垂直输送项、涡度倾侧项和散度项。

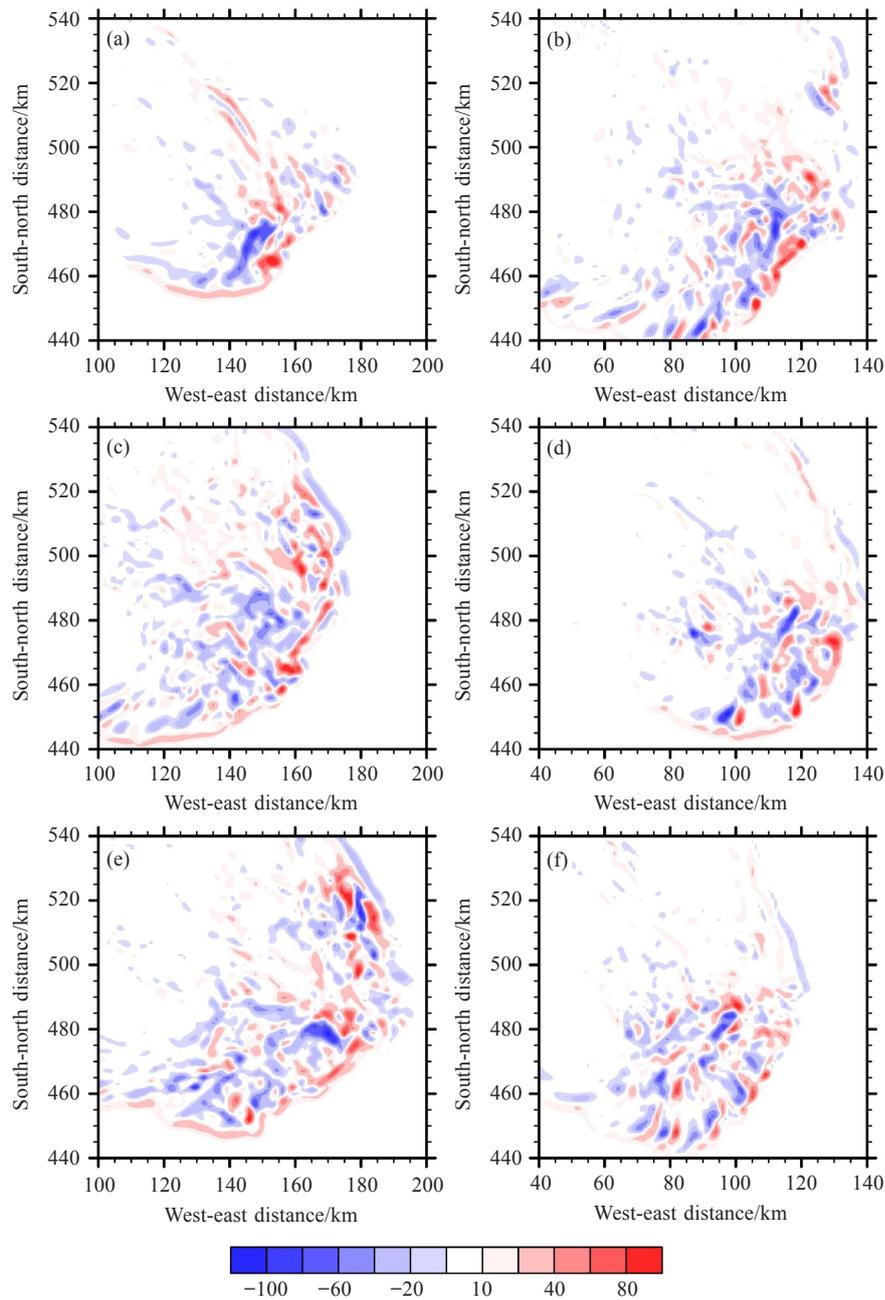


图9 积分3 h增加(a、c、e)及减小(b、d、f)低层(a、b)、中层(c、d)和整层(e、f)风切变试验在1.5 km高度的垂直涡度分布(阴影,单位: $10^{-4} s^{-1}$)

图10是系统发展阶段,涡度方程各项在1.5 km高度的水平分布图,可以发现影响涡度变化的主要项是涡度倾侧项(图10b)和相对涡度平流项(图10c),说明系统局地涡度变化主要是由这两项引起。而相对涡度平流只与涡度的水平输送有关,并不能造成系统整体涡度的增长,因此系统垂直涡度的来源主要是涡度倾侧项。涡度倾侧项是指风垂直切变和垂直运动水平分布不均匀所引起

的涡度变化,其物理意义是垂直运动使原本的水平涡管发生倾斜,从而产生了垂直涡度分量。对比US5试验和US-5试验(图10b),发现US5试验中的涡度倾侧项相对更大。说明增大整层风切变时,系统的水平涡度更大,且垂直运动更剧烈,因此由涡度倾侧项产生的垂直涡度更大。为了验证以上猜想,下面分析系统的水平涡度和垂直运动的相对关系。

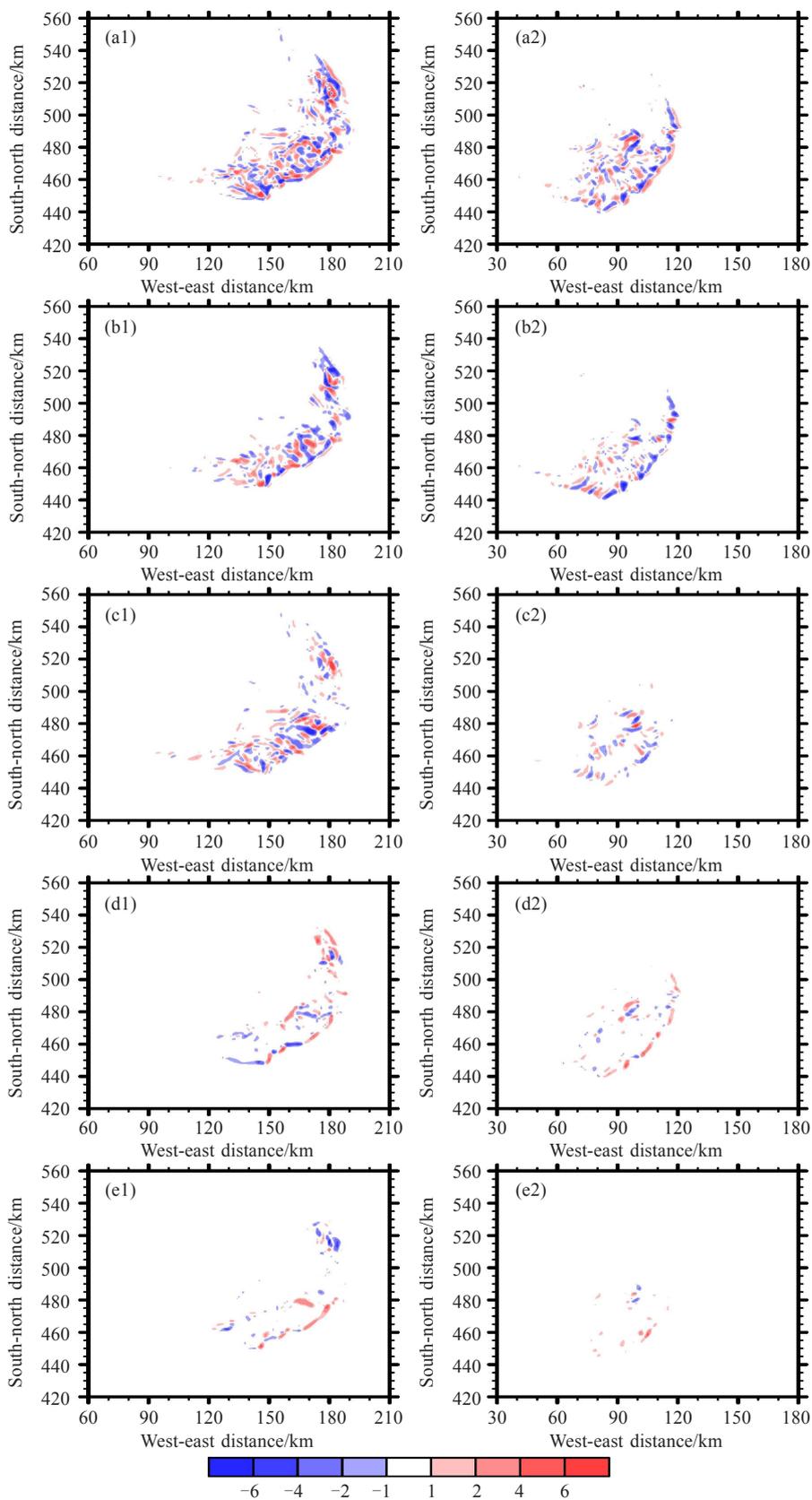


图10 积分3 h时US5试验(a1~e1)和US-5试验(a2~e2)在1.5 km上的涡度局地变化项(a)、涡度倾侧项(b)、相对涡度平流项(c)、涡度垂直输送项(d)和散度项(e,单位: 10^{-5}s^{-2})

在自然坐标系下水平涡度可以分解为沿流线方向的水平涡度(streamwise horizontal vorticity)和垂直于流线方向的水平涡度(crosswise horizontal vorticity),沿流线方向的水平涡度(以下简称流线涡度)指平行于水平气流的水平涡度分量^[33]。Davies^[34]发现,具有正流线涡度的气流在上升时会呈气旋式旋转。上升运动导致水平涡度倾斜产生垂直涡度,流线涡度越大,所对应的上升气流越有可能具有更大的垂直涡度。为进一步探究涡旋对与系统强度间的联系,考察分析了流线涡度、垂直运动与垂直涡度的水平和垂直分布。在US5试验中,涡旋对附近存在垂直运动和流线涡度的正值中心(图11b1、11c1),表明上升运动使水平涡度倾斜,从而形成了垂直涡度的极值中心,

气旋式旋转的气流会导致气旋中心附近产生辐合运动,低层气压增大,从而进一步产生上升运动。涡旋对与垂直运动间相互作用,使系统可以长时间地维持与发展。

在US-5试验中(图11b2、11c2),垂直涡度中心附近垂直运动较弱,流线涡度较小,涡旋对与垂直运动间相互作用减弱,不利于系统的维持与发展。对比两组试验发现,增加整层风切变可产生更剧烈的垂直运动和更强的水平涡度,上升气流使水平涡度倾斜产生垂直涡度,形成涡旋中心,其与垂直运动间的相互作用进一步促进垂直运动发展增强,形成正反馈过程,使系统可以长时间地维持与发展。

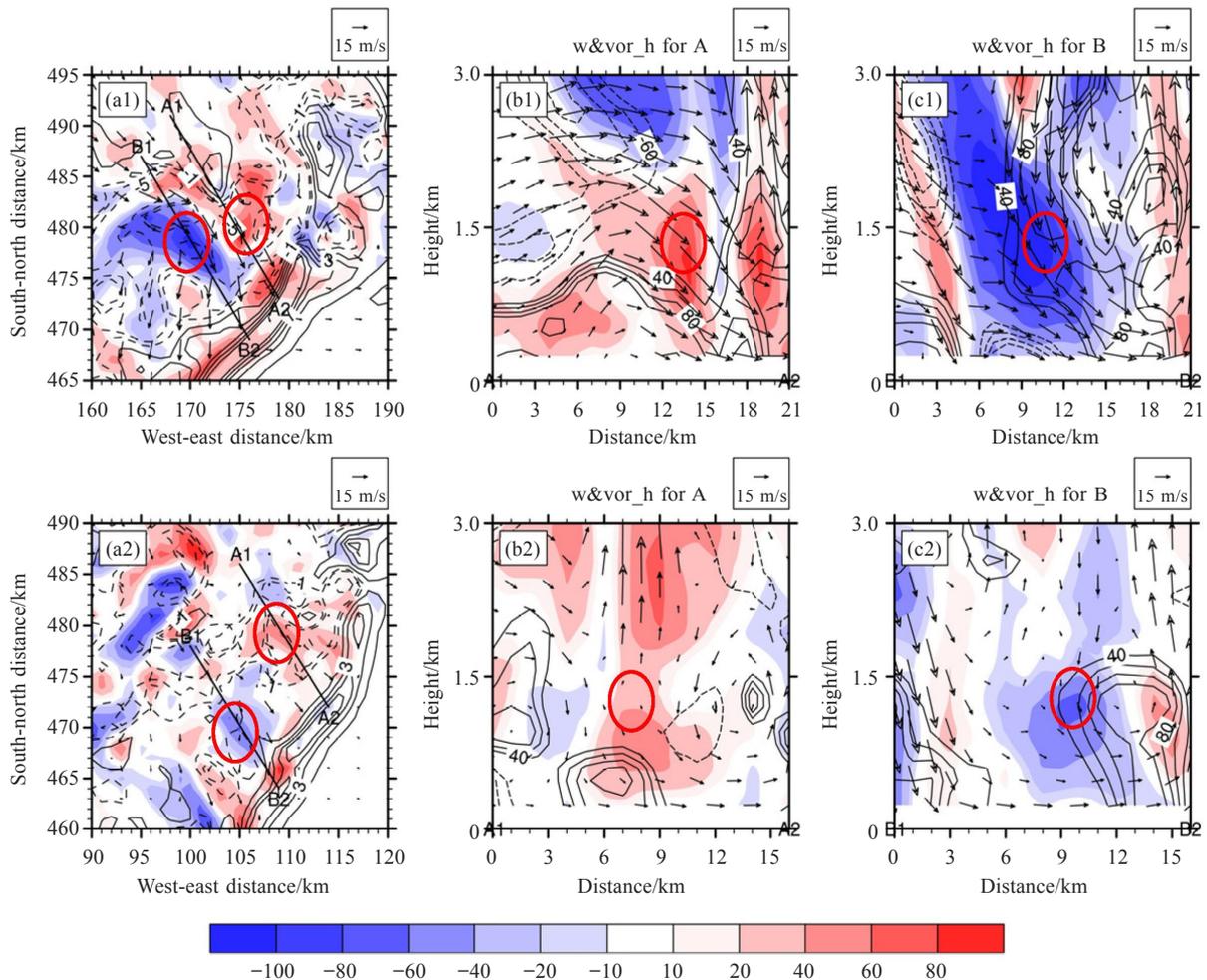


图11 US5(a1~c1)和US-5(a2~c2)试验积分3 h在1.5 km高度垂直涡度(阴影, $10^{-4} s^{-1}$),垂直速度(等值线, m/s)和水平风场(箭头, m/s)分布 红圈标示出气旋与反气旋中心位置,两条黑色实线A1A2、B1B2分别表示图b、c中垂直剖面位置。 b1、c1和b2、c2分别对应US5和US-5试验为沿a中直线位置所做剖面上的垂直涡度(阴影),流线涡度(等值线,实线为正,虚线为负, $10^{-4} s^{-1}$)和风场(箭头)。

3.3 强对流系统热力特征及演变对风垂直切变的响应

冷池是由于风暴中降水蒸发冷却导致的冷空气堆,可用近地面扰动位温来表征其强度及范围。通常情况下,冷池前沿就是风暴出流边界即阵风锋的位置。US5 试验系统在积分 3 h 时(图 12a),近地面负扰动位温最大值为 -6 K ,阵风锋位于系统中前部。积分 5 h 时(图 12b),近地面冷池范围增大且强度增强,阵风锋移至系统前沿。环境风

场的暖入流与冷池出流在阵风锋前沿辐合,触发生成新的上升气流,有利于新的对流单体生成,使系统继续发展并向前移动。对比发现 US-5 试验中冷池强度与范围较小(图 12c、12d)。积分 5 h 时(图 12d),US-5 试验中阵风锋移至系统前方约 10 km 处,导致维持系统前沿上升气流所必需的暖入流供应被切断,上升气流减弱,系统处于阵风锋后冷而稳定的环境中,发展条件不充分,系统强度减弱,生命史减短。

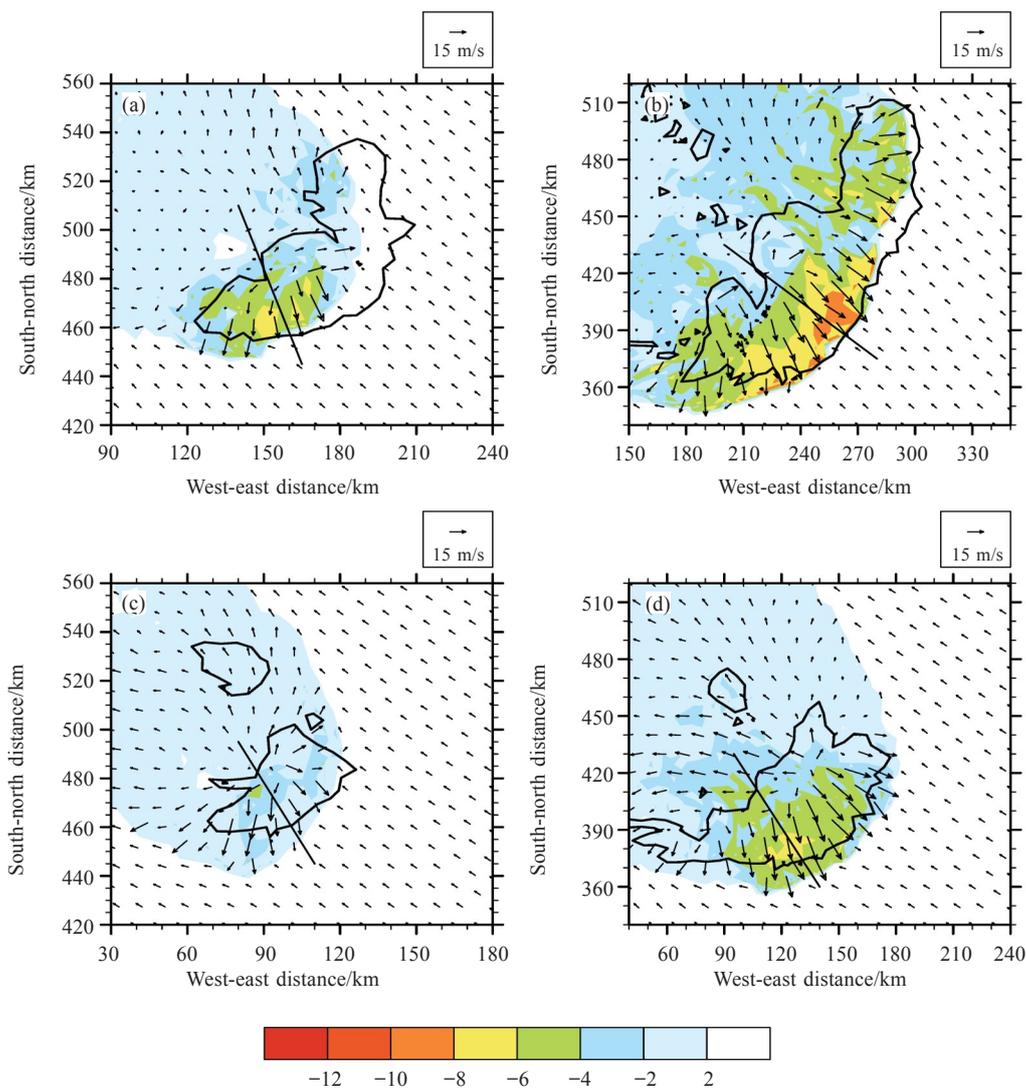


图 12 US5(a、b)和 US-5(c、d)试验在 3 h(a、c)和 5 h(b、d)的近地面扰动位温(阴影, K)和组合反射率(等值线, 25 dBZ) 直线为图 13 剖面位置

图 13 为沿图 12 直线位置所作剖面上的位温分布,以便对比分析冷池的垂直结构。冷池边缘位温梯度大,所以可用 302 K 的位温等值线位置表示冷池边缘。对比分析发现,垂直风切变增加

时(图 13a、13b),冷池强度强、高度高,表明系统内部下沉运动增强。而减小风切变时,冷池的强度、高度均减小。

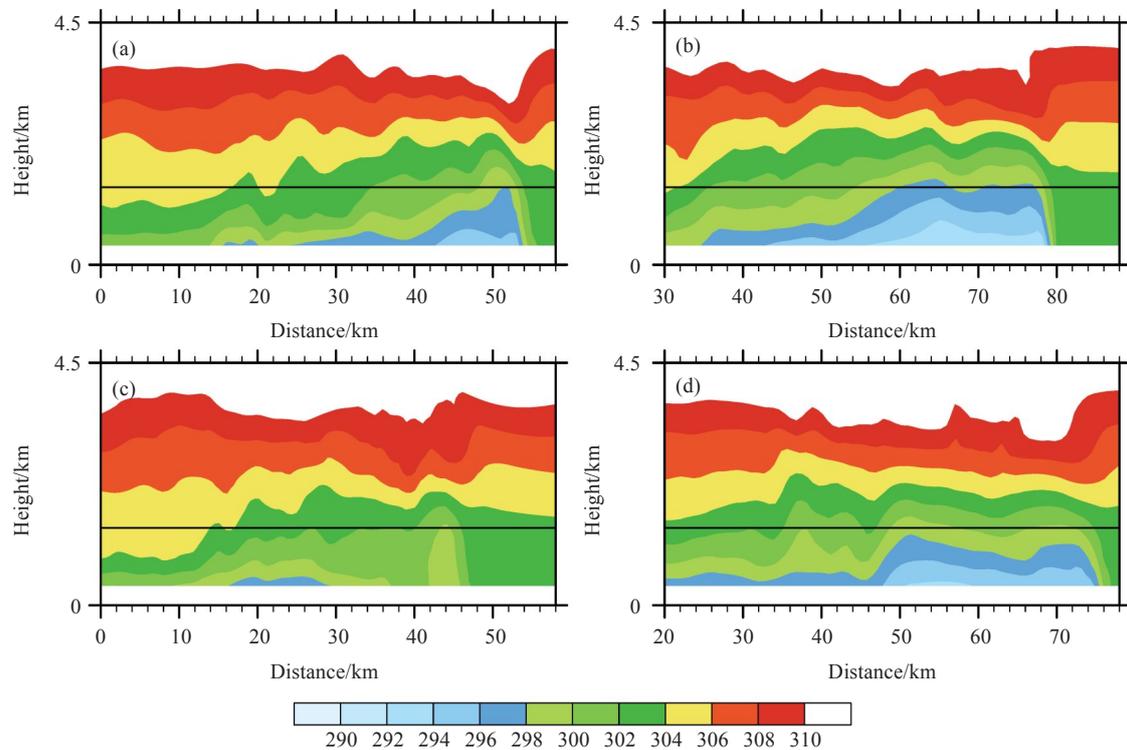


图13 US5(a、b)和US-5(c、d)试验在3 h(a、c)和5 h(b、d)沿图12直线位置所做剖面上的位温分布(阴影,K) 直线为1.5 km高度。

4 结果与讨论

为突出强调环境风切变在对流系统发生发展过程中的重要性,探究哪种环境风切变更有利于系统的发展与维持。本文根据2009年6月5日一次江淮强对流天气过程,利用2009年6月5日20时上海宝山站探空资料生成WRF理想模式初始场。通过增加和减小不同层次风切变,设计了改变整层、中层和低层环境风切变的多组试验。试验结果如下。

(1) 低层风切变是对流产生的必要条件,在低层风切变存在的前提下,整层风切变的改变对系统影响最显著。增加整层风切变时,系统强度明显增强,生命史增长,更易维持线状组织结构。减小整层风切变时,系统强度减弱,移速减慢,组织结构易发散。

(2) 进一步分析对流系统的动力结构及其演

变特征发现:增加风切变,系统垂直运动更剧烈,水平涡度增强,水平涡度受垂直运动影响转化为垂直涡度,产生涡旋中心,涡旋产生的气压梯度力促进上升气流发展增强,形成正反馈过程。涡旋对与垂直运动间相互作用,使系统可以长时间地维持与发展。减小风切变,流线涡度和垂直运动明显减小,涡旋强度减弱,不利于系统发展。

(3) 对冷池及其前沿阵风锋的强度及位置演变进行分析发现:风切变增大时,冷池高度高、强度大,对流系统与阵风锋的运动几乎同步,冷池出流与环境风场暖入流在系统前沿辐合,保证系统前沿上升气流的连续发展,有利于对流的发展与维持。风切变减小时,冷池高度低、强度弱,阵风锋的移速远大于对流系统的移速,阵风锋移至系统前方约10 km处,切断系统前沿上升运动所必需的暖输送,对流系统处于阵风锋后冷而稳定的环境中,发展条件不充分,不利于其进一步发展,系统强度减弱。

参 考 文 献:

- [1] 章国材. 强对流天气分析和预报[M]. 北京:气象出版社, 2011.
- [2] 曾智琳, 湛芸, 朱克云, 等. 2017年“5.7”广州特大暴雨的中尺度特征分析与成因初探[J]. 热带气象学报, 2018, 34(6):73-87.
- [3] 王丹妮, 丁治英, 王咏青, 等. 一次多弓状中尺度雨带的成因机理及其与水平涡度的关系[J]. 热带气象学报, 2020, 36(1): 131-144.
- [4] 刘瑞翔, 丁治英, 孙凌光. 夏季江淮地区中尺度对流系统的统计特征分析[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(3): 215-222.
- [5] 张小玲, 杨波, 盛杰, 等. 中国强对流天气预报业务发展[J]. 气象科技进展, 2018, 8(3):8-18.
- [6] COTTON W R, ANTHES R A(著). 叶家东等译. 风暴和云动力学[M]. 北京:气象出版社, 1993.
- [7] PARKER M D, JOHNSON R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. *Mon Wea Rev*, 2000, 128(10): 3413-3436.
- [8] 郑淋淋, 孙建华. 干、湿环境下中尺度对流系统发生的环流背景和地面特征分析[J]. 大气科学, 2013, 37(4): 891-904.
- [9] NEWTON C W. Structure and mechanism of the prefrontal squall line[J]. *J Atmos Sci*, 1950, 7(3): 210-222.
- [10] LILLY D K. The dynamical structure and evolution of thunderstorms and squall lines[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2003, 7(1): 117-161.
- [11] ROTUNNO R, KLEMP J B, WEISMAN M L. A theory for strong, long-lived squall lines[J]. *J Atmos Sci*, 1988, 45(3): 463-485.
- [12] TAKEMI T. Impacts of moisture profile on the evolution and organization of midlatitude squall lines under various shear conditions[J]. *Atmos Res*, 2006, 82(1-2): 37-54.
- [13] TAKEMI T. A sensitivity of squall-line intensity to environmental static stability under various shear and moisture conditions[J]. *Atmospheric Research*, 2007, 84(4): 374-389.
- [14] GUARRIELLO F, Nowotarski C J, Epifanio C C. Effects of the low-level wind profile on outflow position and near-surface vertical vorticity in simulated supercell thunderstorms[J]. *J Atmos Sci*, 2018, 75(3): 731-753.
- [15] LEMONE M A, Zipser E J, Trier S B. The role of environmental shear and thermodynamic conditions in determining the structure and evolution of mesoscale convective systems during TOGA COARE[J]. *J Atmos Sci*, 1998, 55(23): 3 493-3 518.
- [16] ALEXANDER G D, YOUNG G S. The relationship between EMEX mesoscale precipitation feature properties and their environmental characteristics[J]. *Mon Wea Rev*, 1992, 120(4): 554-564.
- [17] MONTMERLE T, LAFORE J P, REDELSPERGER J L. A tropical squall line observed during TOGA COARE: Extended comparisons between simulations and doppler radar data and the role of midlevel wind shear[J]. *Mon Wea Rev*, 2010, 128(11):C17-C21.
- [18] XUE M. Density currents in two-layer shear flows[J]. *Quart J Roy Meteor Soc*, 2000, 126(565): 1 301-1 320.
- [19] CONIGLIO M C, STENSRUD D J, WICKER L J. Effects of upper-level shear on the structure and maintenance of strong quasi-linear mesoscale convective systems[J]. *J Atmos Sci*, 2006, 63(4): 1 231-1 252.
- [20] JOHNSON R H, AVES S L, CIESIELSKI P E, et al. Organization of oceanic convection during the onset of the 1998 East Asian Summer Monsoon[J]. *Mon Wea Rev*, 2005, 133(1): 131-148.
- [21] CONIGLIO M C, CORFIDI S F, KAIN J S. Views on applying RKW theory: An illustration using the 8 May 2009 derecho-producing convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 2012, 140(3): 1 023-1 043.
- [22] 陈明轩, 王迎春. 低层垂直风切变和冷池相互作用影响华北地区一次飊线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 371-386.
- [23] 李娜, 冉令坤, 高守亭. 华东地区一次飊线过程的数值模拟与诊断分析[J]. 大气科学, 2013, 37(3): 595-608.
- [24] 张建军, 王咏青, 钟玮. 飊线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应[J]. 大气科学, 2016, 40(4): 689-702.
- [25] 杨婷, 闵锦忠, 张申龔. 分层气流条件下地形降水的二维理想数值试验[J]. 气象科学, 2017: 222-230.
- [26] 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 大对流有效位能和条件不稳定下地形降水的三维理想数值研究[J]. 气象学报, 2011, 69(5): 782-798.
- [27] 王楠. 2009年6月两次飊线过程的差异及成因分析[D]. 南京:南京信息工程大学, 2014.
- [28] 郑晓栋, 路璐. 2009年6月5日一次飊线天气特征分析[C]//第六届长三角气象科技论坛论文集. 2009.
- [29] WEISMAN M L, KLEMP J B. The dependence of numerically simulated convective storms on vertical wind shear and buoyancy[J]. *Mon Wea Rev*, 1982, 110(6): 504-520.
- [30] 郑淋淋, 孙建华. 风切变对中尺度对流系统强度和组织结构影响的数值试验[J]. 大气科学, 2016, 40(2): 324-340.
- [31] FOVELL R G, OGURA Y. Effect of vertical wind shear on numerically simulated multicell storm structure[J]. *J Atmos Sci*, 1989, 46(20): 3 144-3 176.
- [32] 苏洋. 一次华南飊线的动热力和云微物理特征及演变的模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2017.
- [33] 俞小鼎, 姚秀萍, 熊廷南, 等. 多普勒天气雷达原理与业务应用[M]. 北京:气象出版社, 2006.
- [34] DAVIES-JONES R. Streamwise vorticity: The origin of updraft rotation in supercell storms[J]. *J Atmos Sci*, 1984, 41(20):2 991-3 006.

DYNAMIC AND THERMODYNAMIC CHARACTERISTICS OF MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEM AND THE IMPACT OF ITS EVOLUTION ON VERTICAL WIND SHEAR

SUN Xiao-lei^{1,2}, MIN Jin-zhong^{1,2}, WANG Shi-qi^{1,2}, SHEN Fei-fei^{1,2}, DU Ning-zhu^{1,2}

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Key Laboratory of Meteorological Disaster (Nanjing University of Information Science and Technology), Ministry of Education, Nanjing 210044, China)

Abstract: To explore the importance of wind shear in the development and maintenance of convective system, the present study uses the sounding data from the Shanghai Baoshan meteorological observation station at 20:00 on June 5th 2009(LTS) to generate the initial field of idealized simulation, and designs a series of tests including the change of the entire level, mid-level, and low-level wind shear. The system's dynamic and thermodynamic characteristics and the evolution of the system are analyzed, and the following results are found. (1) The change of wind shear in the entire layer has the most significant impact on the mesoscale convective system, followed by the change of wind shear at mid-level. When the entire layer vertical wind shear is increased (decreased), the convective system has the strongest (weakest) strength and organization, and the life span of the system becomes longer (shorter). (2) As the vertical wind shear increases, the horizontal vorticity also increases, which will be converted into vertical vorticity under the influence of vertical motion. The positive feedback developed by the interaction between the vortex and vertical motion is an important reason for the enhancement of the strength of the system and the maintenance of the linear structure for a long time. (3) When the wind shear decreases, the movement speed of the convection system becomes much lower than that of the gust front, which moves to the front of the system and blocks the necessary warm transportation of the updraft at the front of the system. The cold and stable environment after the gust front dissipates the system.

Key words: idealized simulation; wind vertical shear; vertical motion