

曹倩, 章毅之, 易艳红, 等, 2022. 九岭山地形对弓形飑线形成影响的模拟分析[J]. 气象与减灾研究, 45(3):161-171.

Cao Qian, Zhang Yizhi, Yi Yanhong, et al, 2022. Orographic impact of Jiuling Mountain on the formation of a bow-shaped squall line[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 45(3):161-171.

九岭山地形对弓形飑线形成影响的模拟分析

曹倩¹, 章毅之¹, 易艳红², 刘雅楠¹, 刘良玉¹

1. 江西省气象科学研究所, 江西 南昌 330096

2. 宜春市气象局, 江西 宜春 336000

摘要: 基于 GSI-3DVar 同化系统, 将多部多普勒雷达径向风和反射率资料同化进入初始场, 利用 WRF-ARW 模式对 2016 年 4 月 16 日发生在江西省西北部的一次飑线天气进行数值模拟, 以分析九岭山地形对飑线形状演变的影响及其原因。结果表明: 1) 真实地形下的试验基本再现了飑线在经过九岭山东移下山过程中由直线形演变成弓形的情景, 而将地形高度减半后飑线未能由直线形演变成弓形, 地形直接影响了飑线形状的演变。2) 九岭山地形影响飑线系统的近地面冷池和后侧入流急流的强度, 其中九岭山地形存在时, 气流下山增强, 飑线后侧对流层低层形成强后侧入流急流, 且形成近地面冷池, 有利于飑线由直线形演变成弓形。若九岭山地形不存在时, 后侧入流急流明显减弱, 近地面冷池强度也有所减弱, 飑线未能由直线形演变成弓形。

关键词: 地形影响, 飑线形状, 入流急流, 冷池, 数值模拟

中图分类号: P435

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2022)03-0161-11

doi: 10.12013/qxyjzyj2022-024

Orographic Impact of Jiuling Mountain on the Formation of a Bow-Shaped Squall Line

Cao Qian¹, Zhang Yizhi¹, Yi Yanhong¹, Liu Yanan¹, Liu Liangyu¹

1. Jiangxi Institute of Meteorological Science, Nanchang 330096, China

2. Yichun Meteorological Bureau, Yichun 336000, China

Abstract: The radial velocity data and reflectivity data from multiple Doppler radars were assimilated by the Community Grid-point Statistical Interpolation (GSI) assimilation System, a squall line occurred in Jiangxi province on 16 April 2016 was simulated using WRF-ARW model, to analyze the orographic impact of Jiuling Mountain on the evolution of the squall line. The results showed the experiment with real orographic could reappear the process that the straight squall line gradually evolved into a bow-shaped squall line when it went eastward down through the Jiuling Mountain, but when the terrain height halved the straight squall line could not evolve into a bow-shaped squall line, so the topography directly impacted the evolution of the squall line shape. The topography of Jiuling Mountain affected the intensity of the surface cold pool and the rear inflow jet of the squall line system. As Jiuling Mountain existed, the airflow enhanced when it went down through the mountain, and strong rear inflow jet formed in the lower troposphere back of the squall line, and then cold pool formed, which were both conducive to the evolution process of a straight squall line into a bow-shaped one. If Jiuling Mountain did not exist, the intensity of the rear inflow and cold pool weakened, and the straight squall line would not evolve into a bow-shaped squall line.

Key words: topographic effect; squall line shape; inflow jet; cold pool; numerical simulation

收稿日期: 2022-02-16; **修订日期:** 2022-05-04.

基金项目: 江西省气象局气象科研面上项目“GSI 中雷达径向风同化观测算子的改进及应用”和“江西省风廓线雷达资料的质量控制与同化研究”; 江西省气象局重点项目“江西省短时暴雨的变化特征及其成因初探”。

作者简介: 曹倩, 硕士, 工程师, 主要从事数值模拟及资料同化研究, E-mail: 1305281831@qq.com.

章毅之(通信作者), 硕士, 正高级工程师, 主要从事气候和气候变化研究, E-mail: yizhi-zhang@qq.com.

0 引言

飊线是由一系列活跃的对流云带侧向排列而成的线状或带状的中尺度对流系统,过境时易产生雷暴、暴雨、大风、冰雹和龙卷等天气。其中,弓形飊线常常与下击暴流或强烈的地面直线大风相伴(Nolen, 1959; Wakimoto et al, 2006; Wheatley et al, 2006),比普通的直线形飊线更易产生强灾害性天气(Przybylinski, 1995; Atkins et al, 2005; 梁建宇和孙建华, 2012; 刘香娥和郭学良, 2012),因此一直是国内外同行研究的重点和难点。

近年来,对弓形飊线的研究工作较多。例如, Weisman(2001)通过数值模拟研究发现后侧入流急流是形成弓形回波的重要原因。金龙等(2013)利用多种观测资料和双多普勒雷达反演的三维风场,分析一次弓形回波的三维结构和演变机制发现,降水的拖曳及蒸发冷却在地面形成强冷池,冷池触发的干冷后侧入流在弓形回波前侧下沉,促使回波演变成弓形。公衍铎等(2019)和罗琪等(2019)综合多种观测资料和 NECP 分析资料,分别分析了发生在我国北方的强弓状飊线的形成和维持机制,均发现对流层中层强后侧入流和大的温度露点差导致强下层辐散气流形成,是飊线演变成弓状结构的主要原因。

上述研究对弓形飊线形成的中尺度系统有重要的指示作用,而对影响其演变机制的揭示还不够,特别是地形对飊线发展演变的影响涉及较少,使得飊线上山、下山过程中如何演变很难把握,进而难以预测其引发灾害的强度及位置。江西省坐落于长江中下游,中部丘陵起伏,东西南三面环山,在地形的影响下强对流天气多发(邓诗茹和邹海波, 2015; 刘亚楠等, 2021; 张娟娟等, 2021)。以往造成江西地区大范围雷暴大风的飊线大多产生于临近省份,并逐渐移入江西。为了提高江西地区飊线天气的预报预警能力,尝试对移入江西的飊线做地形敏感性试验,以探究地形对飊线演变特征的影响是非常有必要的。因此,文中首先利用 GSI-3DVar 同化系统同化多部多普勒雷达的径向风和反射率因子资料获得一个相对准确的初始场后,采用 WRF 模式对 2016 年 4 月 16 日对由湖南移入江西的一次弓形飊线天气过程进行数值模拟研究和地形敏感性试验,以揭示地形对弓形飊线形成和演变的影响。

1 个例介绍

文中研究的强对流天气于 2016 年 4 月 16 日

01 时(北京时,下同)在湖南生成,此后逐步发展并快速向东移动,于 04 时演变成尺度较小的直线形飊线并进入江西,之后直线形飊线经过位于江西、湖南两省交界处的九岭山后演变成标准的弓形飊线,08 时进入消散阶段。此次飊线过程伴随雷暴大风和短时强降水天气,造成 27 个县(市)出现短时强降水(≥ 20 mm/h),以都昌县 46.2 mm/h 为最大,以及 8 个区域自动气象站出现短时 10 级以上雷雨大风,其中以金溪县合市站 33.8 m/s 为最大。

利用美国国家环境预报中心(NCEP)提供的每 6 h 一次、分辨率为 $1^\circ \times 1^\circ$ 的再分析资料,分析此次强对流天气过程的大尺度环境背景。2016 年 4 月 15 日 20 时 500 hPa 环流形势(图略)显示,中高纬地区,巴尔喀什湖一带存在一个强大的高压脊,脊前不断有冷空气沿新疆西部进入我国。中低纬地区,从河套地区到华北地区低槽加深东移,低槽后部不断有冷空气扩散南下,青藏高原地区有一低槽位于四川省西部,江西省中北部处于槽前西南急流中,并且温度槽落后于高度槽,强烈的斜压效应使得高空低槽不断发展东移,到 16 日 02 时低槽已经东移至重庆和贵州东部。槽后扩散南下的冷空气与西南暖湿气流在湖南地区上空交汇是触发此次强对流天气的重要因素。分析 850 hPa 和 700 hPa 形势场(图 1)发现,湖南省西部和江西省中北部均受西南暖湿气流控制,其中 700 hPa 层的相对湿度为 60%—80%,而 850 hPa 层上大部分区域相对湿度均大于 80%。西南暖湿气流为飊线的发生提供了充足的水汽,且低层水汽比高层更加充沛。850 hPa 层上湖南地区出现了西北风与西南风切变,这也有利于触发此次飊线天气。

2 雷达回波分析

九岭山为东北—西南走向狭长的条状山峰,最大高度超过 1 500 m(图 2)。图 3 给出了直线形飊线经过九岭山逐渐演变成弓形飊线的过程实况。16 日 04 时左右线状强回波带从湖南移入江西宜春市(图 3a),此时其水平尺度还不小,层云降水区也不宽。之后,线状强回波带逐渐东移爬山,其东北侧有分散的对流单体生成并与主体合并(图 3b、c)。05 时,飊线结构清晰,宜春市存在一条东北—西南向带状强对流回波区,最大回波强度超过 55 dBz,此时飊线前 1 h 所经之处均变成层状云降水区。此后,飊线主体东移下山,其形状由直线形逐渐演变成弓形,中心回波强度均维持在 55 dBz 以上(图 3d、e)。

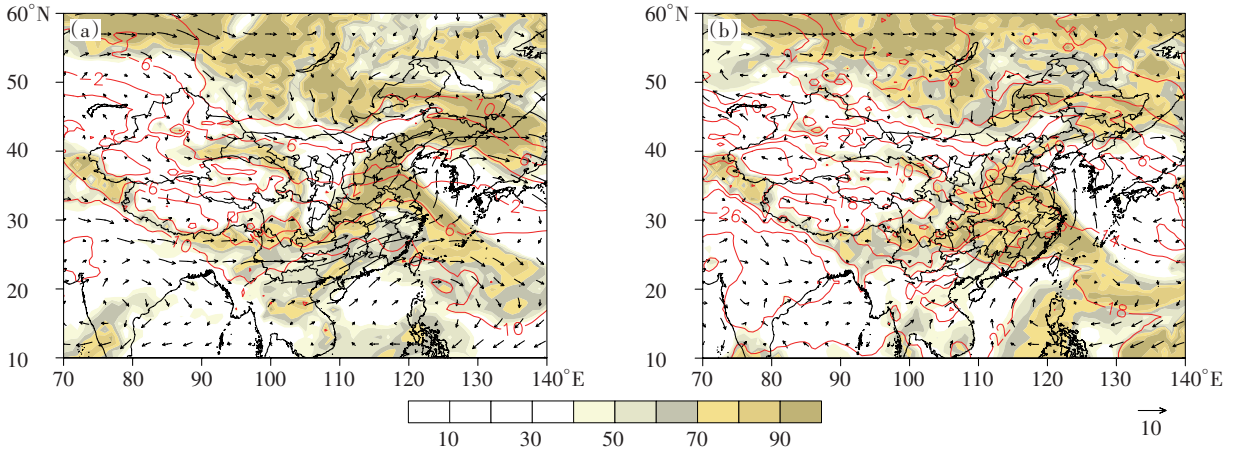


图1 2016年4月16日02时700 hPa(a)、850 hPa(b)风场(矢线,单位:m/s)、温度场(红实线,单位:°C)和相对湿度场(填色,单位:%)

Fig. 1 Wind field (arrow; units:m/s), temperature field (red solid line; units:°C) and relative humidity field (color; units:%) of 700 hPa (a) and 850 hPa (b) at 02:00 BT on 16 April 2016

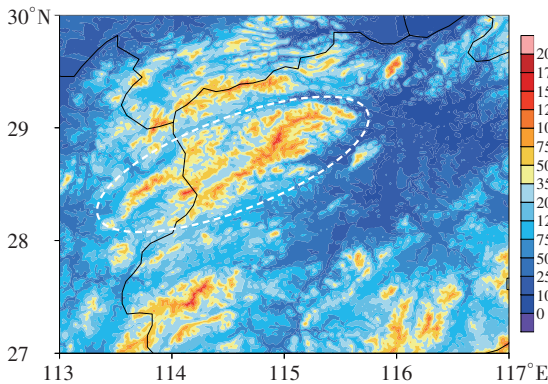


图2 九岭山海拔分布(单位:m;白色虚线内为九岭山)

Fig. 2 Terrain height(shaded; unit:m)of Jiuling Mountain (inside the white dotted line)

06:30,飚线主体发展成熟,强对流区高度组织化,成为一个标准的弓形飚线,并伴有宽广的层云降水区,以及在强对流区和层云区中间存在有界弱回波区(图3f)。

3 模拟试验设计

3.1 雷达径向风同化方法

文中,采用 Liang(2007)和 Chen 等(2017)改进后的基于 IVAP(integrating velocity-azimuth process)方法的雷达径向风观测算子,在同化雷达观测时观测参数由雷达径向风及其空间分布特征计算而来,同时同化径向风和切向风信息。IVAP 观测算子的观测空间(Y_1, Y_2)和分析空间(H_1, H_2)分别为:

$$\left\{ \begin{aligned} Y_1 &= \frac{\sum_{\Omega} V_r \sin\theta}{\sum_{\Omega} \sin^2\theta \cos\varphi} \\ Y_2 &= \frac{\sum_{\Omega} V_r \cos\theta}{\sum_{\Omega} \cos^2\theta \cos\varphi} \end{aligned} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{aligned} H_1 &= \bar{u} + \bar{v} \frac{\sum_{\Omega} \sin\theta \cos\theta \cos\varphi}{\sum_{\Omega} \sin^2\theta \cos\varphi} \\ H_2 &= \bar{u} \frac{\sum_{\Omega} \sin\theta \cos\theta \cos\varphi}{\sum_{\Omega} \cos^2\theta \cos\varphi} + \bar{v} \end{aligned} \right. \quad (2)$$

其中, θ 为雷达的方位角; φ 为雷达的仰角; V_r 为雷达径向风。 Ω 为在模式空间和观测空间取的一个固定区域,其中 \sum_{Ω} 表示物理量在 Ω 空间求和。 (\bar{u}, \bar{v})

为 Ω 空间的平均风速,即 $\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{\Omega} u, \bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{\Omega} v$,式中 N 为 Ω 空间内的格点总数。式(2)即为同化雷达径向风的观测算子。

3.2 云分析简介

GSI(Gridpoint Statistical Interpolation)云分析模块可以结合地面观测、卫星观测、雷达观测等多种观测资料计算云量,反演计算云冰、云水、雪、雨、雹等混合比。文中采用 GSI 中的云分析方法同化雷达反射率因子。使用 RUC 层云方案(Weygandt et al,2006)计算云水和冰的混合比,使用 Thomps-on方案(Thompson et al,2004)计算雪、雨和雹的混

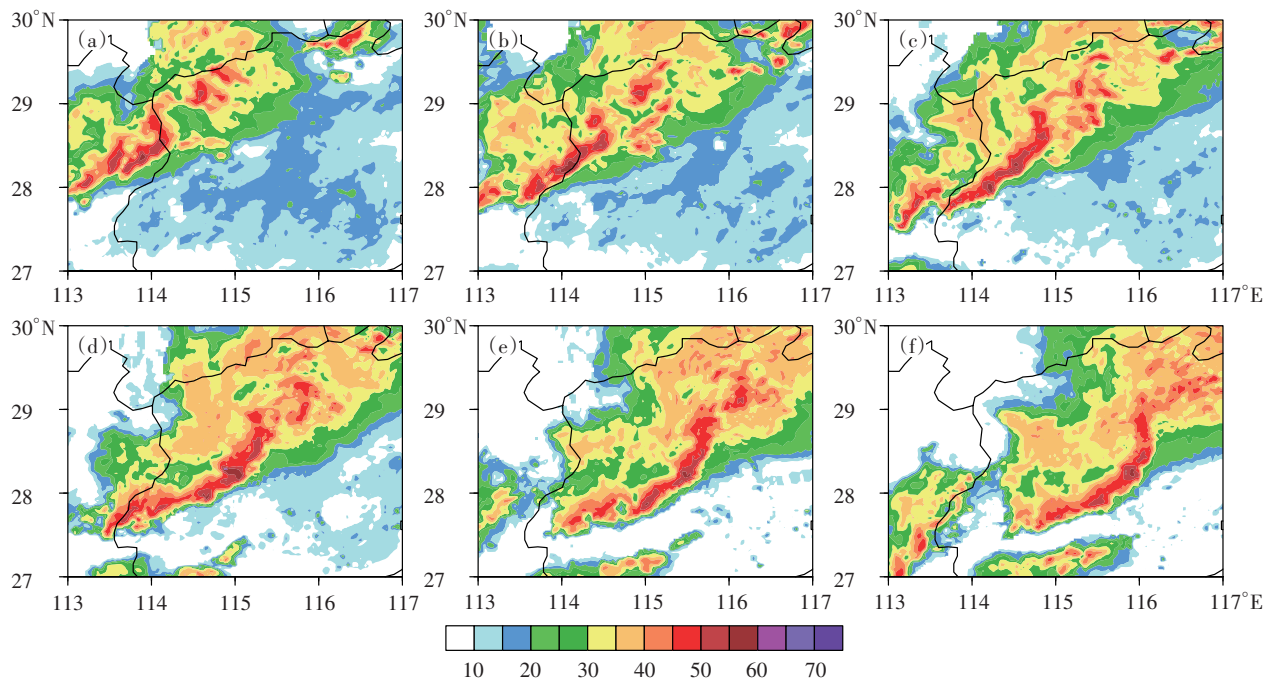


图3 观测的2016年4月16日04:00(a)、04:30(b)、05:00(c)、05:30(d)、06:00(e)、06:30(f)雷达组合反射率(单位: dBz)

Fig. 3 Observed radar composite reflectivity (units: dBz) at (a) 04:00 BT, (b) 04:30 BT, (c) 05:00 BT, (d) 05:30 BT, (e) 06:00 BT, and (f) 06:30 BT on 16 April 2016

合比。采用 APPS 方案(Hu et al,2006)调整云内的温度(假定云内温度垂直变化为湿绝热过程),使云中温度与云场一致。采用 RUC 层云方案(Weygandt et al,2006)调整云中的水汽。

3.3 资料来源和试验设计

研究使用 WRF-ARW V3. 9. 1 和 GSI-3DVar V3. 4 分别作为预报模式和资料同化系统。采用三重嵌套方案,模拟区域中心为(30°N, 114°E)(图略)。外层网格数为 301×301,水平格距为 9 km;第二层网格数为 391×397,水平格距为 3 km;最内层网格数为 601×466,水平格距为 1 km。垂直方向有 50 层,模式顶高为 50 hPa。由每 6 h 一次、分辨率为 1°×1°的 NCEP 再分析资料,通过 WPS 初始化模块处理得到 2016 年 4 月 16 日 02 时的插值场,以之作为初始背景场和侧边界场。同时,采用 GSI 自带的云分析方法(Hu et al,2006)同化江西省南昌、宜春、景德镇、上饶和抚州 5 部多普勒雷达的反射率因子资料,又采用 IVAP 方法(Liang,2007; Chen et al,2017)同化上述 5 部雷达的径向风资料。之后,以 02 时同化后的分析场作为初始场,向前预报 6 h 至 08 时结束,积分时间步长为 30 s,每 30 min 输出一次结果。模式主要参数化方案为 WDM6 云微物理方案、RRTM 长波辐射方案、Dudhia 短波辐射方案、Noah 陆面过程、YSU 边界层方案、Monin-

Obukhov 地表方案,在第一重嵌套中采用 Kain-Fritsch 积云对流方案,第二重和第三重嵌套中关闭积云对流方案。文中主要对第三层网格的模拟结果进行分析。

为了探讨九岭山地形对直线形飑线演变成弓形飑线过程的影响,设计了两组试验:1)控制试验(CTLT),模式使用真实的地形,模拟此次飑线经过九岭山后的发展演变过程;2)模拟过程中将九岭山地形高度减半(HALF),以分析地形对弓形飑线形成的影响。

4 模拟结果及分析

4.1 模拟雷达反射率与实况对比

将控制试验模拟的雷达组合反射率(图 4)与实况观测(图 3)对比分析发现,16 日 04:00(图 4a),线状强回波带从宜春市西部进入江西,其北侧出现了与实况类似的新生对流单体;随着线状强回波带东移爬山,北侧有分散的对流单体与其合并,强回波带水平尺度逐渐变大(图 4b、c);此后,系统东移下山的过程中,强回波带逐渐由直线形演变成弓形,中心强度大于 55 dBz(图 4d—f)。对比整个模拟过程,控制试验模拟的强对流区中心强度、位置和走向与实况有所差别,且模拟的层状云降水区过小;但是控制试验能够基本再现了直线形飑线经过九岭山后其

尺度逐渐增大并演变成弓形飚线的过程。因此, CTLT 试验的模拟结果可以用来探讨地形对弓形飚

线形成的影响。

HALF 试验模拟结果(图5)显示,将九岭山地

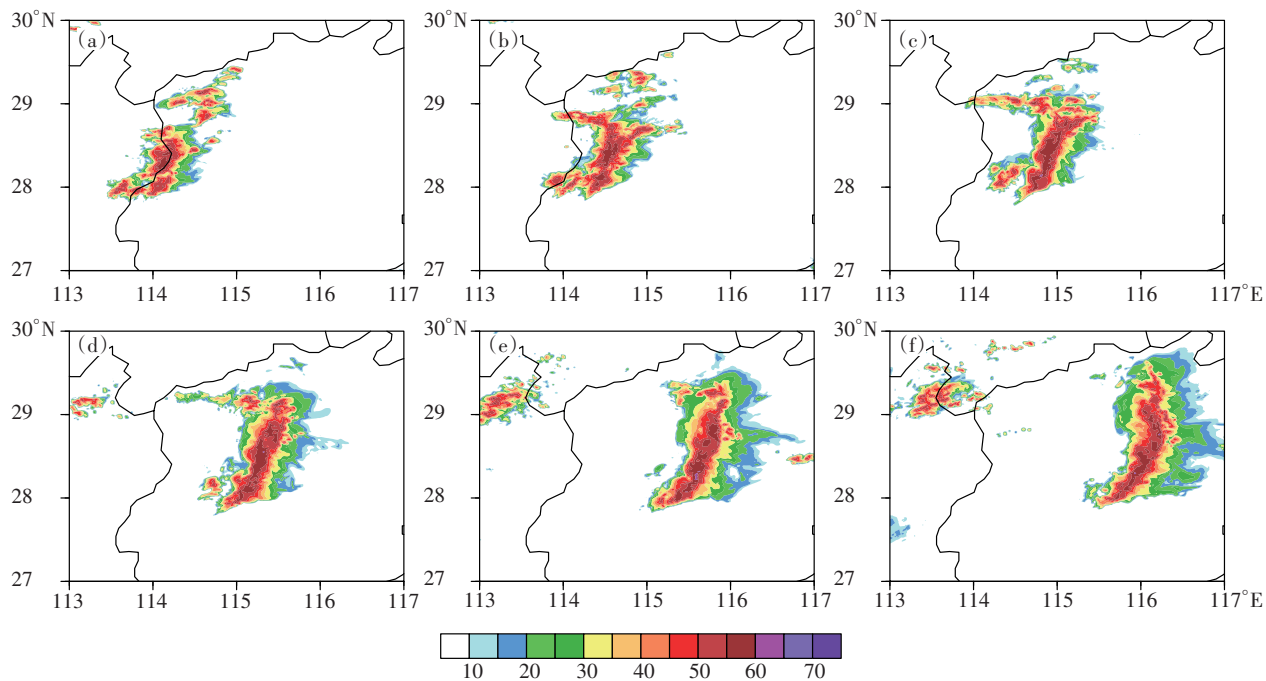


图4 CTLT 试验模拟的 2016 年 4 月 16 日 04:00(a)、04:30(b)、05:00(c)、05:30(d)、06:00(e)、06:30(f)雷达组合反射率(单位:dBz)

Fig. 4 Simulated radar composite reflectivity (units:dBz) by CTLT experiment at (a) 04:00 BT, (b) 04:30 BT, (c) 05:00 BT, (d) 05:30 BT, (e) 06:00 BT, (f) 06:30 BT on 16 April 2016

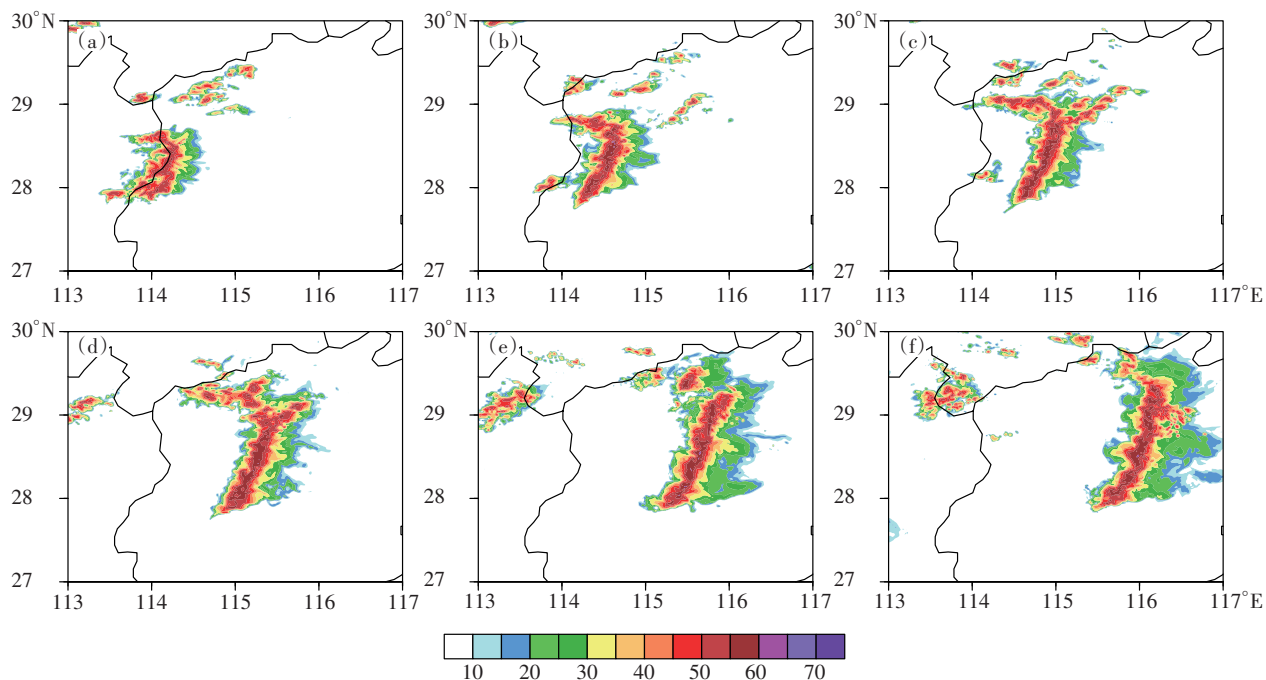


图5 同图4,但为 HALF 试验

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for HALF experiment

形高度减半后,模拟的飊线发展演变过程与 CTLT 试验模拟结果有明显区别。总体来看,HALF 试验和 CTLT 试验模拟的飊线移动速度均与实况一致。04:00—05:00 时段(图 5a—c),HALF 试验和 CTLT 试验模拟的飊线略相似均表现为直线形飊线水平尺度逐渐增大并向东移动,但 CTLT 试验模拟的强对流区较 HALF 试验略宽。飊线下山后(图 5d—f),HALF 试验模拟的飊线仍然表现为直线形并继续向东移动,未能演变成弓形飊线,模拟的飊线发展演变过程与实况有很大差距。由此可知,九岭山地形直接影响飊线能否由直线形演变成弓形。

4.2 动力和热力特征对比分析

后部入流急流和冷池是影响飊线演变成弓形的重要因素(Weisman, 2001; 金龙等, 2013)。文中将通过对比分析两组试验的三维风场结构和近地面冷池,探讨地形对弓状飊线形成影响的内在原因。

图 6 显示了 CTLT 试验模拟的飊线由直线形演变成弓形过程中不同高度的风暴相对风场(即水平风场剔除飊线系统的水平移动速度)。04:30(图 6a₁—c₁),直线形飊线南段经过九岭山下山后,在 1 km 高度上出现了明显的后侧入流,其平均速度约为 16.5 m/s,2 km 高度上还未出现后侧入流,在 3 km 高度上出现风速辐合。05:00—05:30 时段(图 6a₂—c₂、6a₃—c₃),直线形飊线东移至完全下山过程中,在 1 km 和 2 km 高度上均出现了后侧入流,其平均速度约分别为 23.2 m/s 和 17.8 m/s,1 km 高度上的气流强于 2 km 高度,3 km 高度上仍然存在风速的辐合。直线形飊线东移下山后(图 6a₄—c₄、6a₅—c₅),飊线由直线形逐渐演变成弓形,其后侧 1 km 和 2 km 高度上的后侧入流急流仍然非常强,其平均速度分别维持在 24.5 m/s 和 19 m/s 左右。在 3 km 高度上弓形飊线的北端出现了气旋性涡旋,飊线后侧也出现了一致的西风,但后向入流的强度明显弱于低层。中低层后侧入流急流和气旋涡度的出现均有利于飊线由直线形演变成弓形。

HALF 试验模拟结果(图 7)显示,降低九岭山地形高度后,所有时次 1 km 和 2 km 高度上的后侧入流气流比 CTLT 试验均显著偏小,尤其是气流下山后,1 km 和 2 km 高度上的后侧入流气流速度比 CTLT 试验分别偏小 6 m/s 和 10 m/s 左右,因此 HALF 试验中 2 km 高度上的后侧入流气流非常弱。HALF 试验中,在 3 km 高度上存在与 1 km 和 2 km 高度同位置、同强度的后侧入流,飊线前侧

未出现明显的入流,这些也与 CTLT 试验结果存在明显差异。HALF 试验与 CTLT 试验相似之处为 05:30 以后在 3 km 高度上飊线的北端也出现了气旋性涡旋。由此可知,气流在经过九岭山地形后下山增强,使得飊线后侧入流急流明显增强,进而导致飊线由直线形演变成弓形;当地形不存在后,气流下山则不会明显增强,飊线继续维持直线形并继续向前传播。

图 8 和图 9 分别给出了 CTLT 试验和 HALF 试验模拟的近地面小时变温和 950 hPa 地面风场。CTLT 试验结果显示,在 04:00—05:00 时段(图 8a—c)飊线东移下山过程中,冷池强度很弱,其中心值仅为 -2°C ,但在此过程中冷池面积逐渐增大,且伴随冷池出现的冷池出流也逐渐增强。此后,继续东移过程中(图 8d—e),冷池强度逐渐增大,冷池出流的强度也逐渐增大。当飊线演变成标准弓状回波时(图 8f),冷池中心强度低于 -4°C 。HALF 试验结果(图 9)显示,在 04:00—05:00 时段冷池及伴随的冷池出流的强度仅略弱于 CTLT 试验,但是飊线下山后的 05:30—06:30 时段,冷池及伴随的冷池出流的强度与 CTRL 试验差距更大。

对比分析实况(图 10)和 CTLT、HALF 试验模拟的 04 时、05 时、06 时地面小时变温场发现,相较于 HALF 试验,CTRL 试验模拟的冷池位置、范围和强度与实况更接近。由此可知,由于九岭山地形的存在,飊线在下山东移过程中冷池强度增强,导致飊线系统内的温度梯度增大,使得飊线后侧的入流也增强,进而有利于飊线向弓形演变;当地形不存在时,飊线东移过程中其后侧的冷池强度减弱,伴随的冷池出流减弱,飊线系统内的温度梯度同时也减小,飊线后侧的入流也减弱,此时飊线在东移过程中未能由直线形演变成弓形。

5 总结与讨论

利用 GSI-3DVar 同化系统中 IVAP 雷达径向风观测算子同化多部多普勒雷达径向风资料,采用云分析方法同化多部多普勒雷达的反射率资料后,将同化结果作为初始场,再利用 WRF 模式对 2016 年 4 月 16 日发生在江西省西北部的一次飊线天气过程进行数值模拟,探讨地形对飊线形成的影响及其原因,得到以下主要结论:

1) 此次飊线在高空低槽东移、西南急流、低层风切变和地面弱冷空气共同影响的背景下形成,水汽条件充沛。真实地形情景下模拟的雷达回波演变

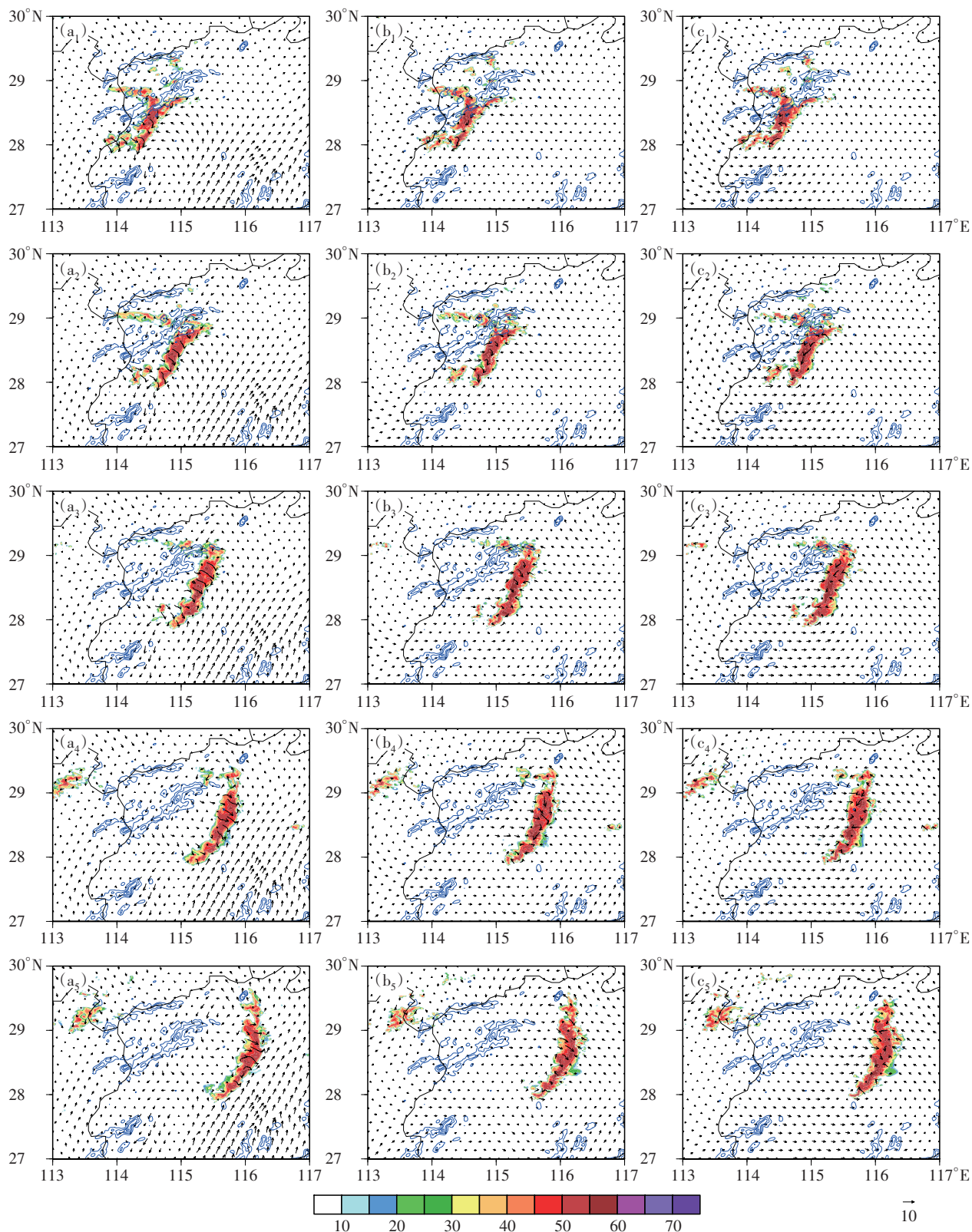


图 6 CTLT 试验模拟的 2016 年 4 月 16 日 1 km(左)、2 km(中)、3 km(右)高度风暴相对风场(矢线,单位:m/s)和雷达反射率因子(填色,单位:dBz)(蓝色等值线表示海拔大于 500 m 地形)(a. 04:30, b. 05:00, c. 05:30, d. 06:00, e. 06:30)

Fig. 6 Simulated radar reflectivity (shaded; units:dBz) and storm-relative wind field (vector; units:m/s) by CTLT experiment at 1 km (left), 2 km (middle) and 3 km (right) on 16 April 2016 (blue contours represent terrain height higher than 500 m)(a. 04:30 BT; b. 05:00 BT; c. 05:30 BT; d. 06:00 BT; e. 06:30 BT)

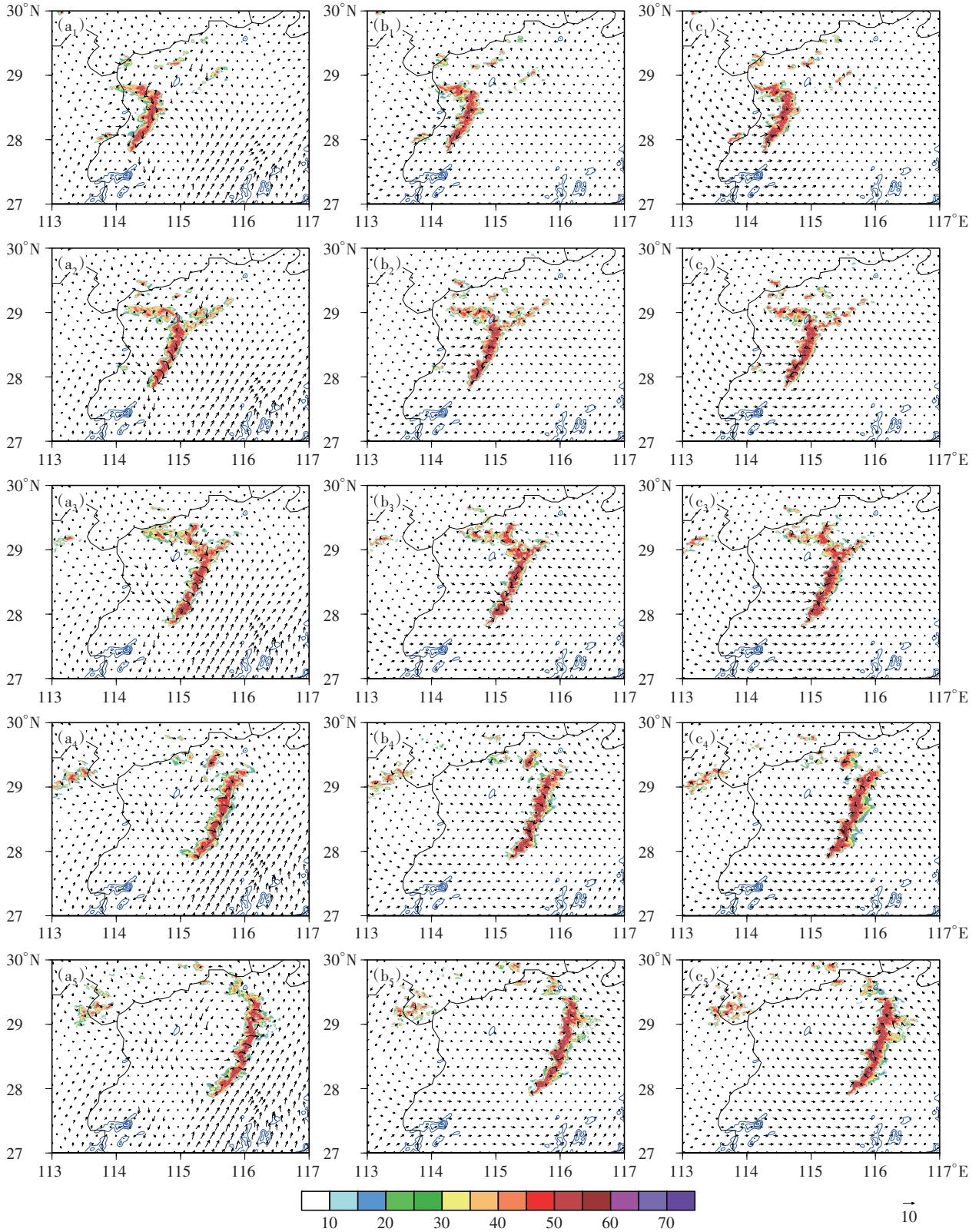


图7 同图6,但为 HALF 试验

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for HALF experiment

特征与实况相似,爬线在爬山的过程中尺度逐渐增大,下山后其形状由直线形逐渐演变成弓形。

2) 爬线从九岭山东侧下山过程中气流增强,形成较强的后侧入流急流和近地面冷池,其形状也由

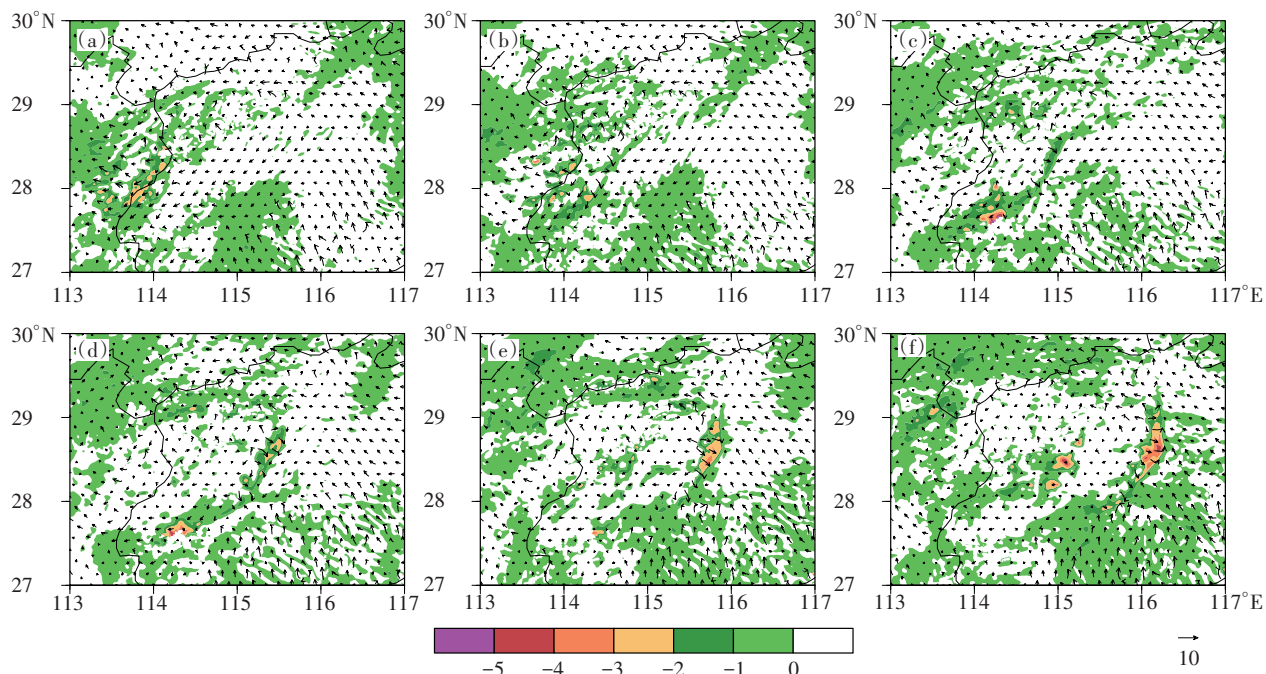


图 8 CTLT 模拟的 2016 年 4 月 16 日 04:00(a)、04:30(b)、05:00(c)、05:30(d)、06:00(e)、06:30(f)950 hPa 风场(矢线,单位:m/s)和小时变温场(填色,单位:°C)

Fig. 8 Simulated hourly wind field (vector; units:m/s) and hourly variable temperature field (shaded; units:°C) of 950 hPa by CTLT experiment at (a) 04:00 BT, (b) 04:30 BT, (c) 05:00 BT, (d) 05:30 BT, (e) 06:00 BT, (f) 06:30 BT on 16 April 2016

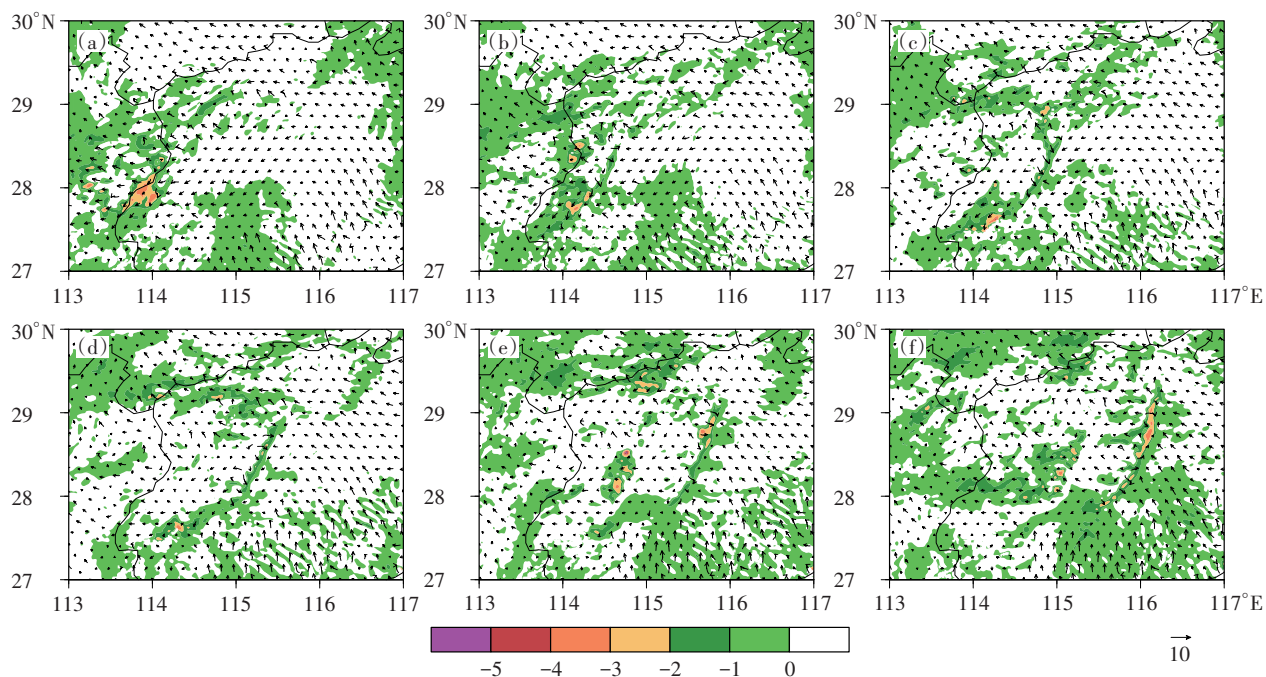


图 9 同图 8,但为 HALF 试验

Fig. 9 Same as Fig. 8, but for HALF experiment

直线形逐渐演变成弓形;当降低九岭山地形高度后,飊线东移过程中后侧入流气流明显减弱,且冷池范

围和强度均减弱,其形状未能由直线形演变成弓形。综上所述,九岭山地形直接影响飊线能否由直

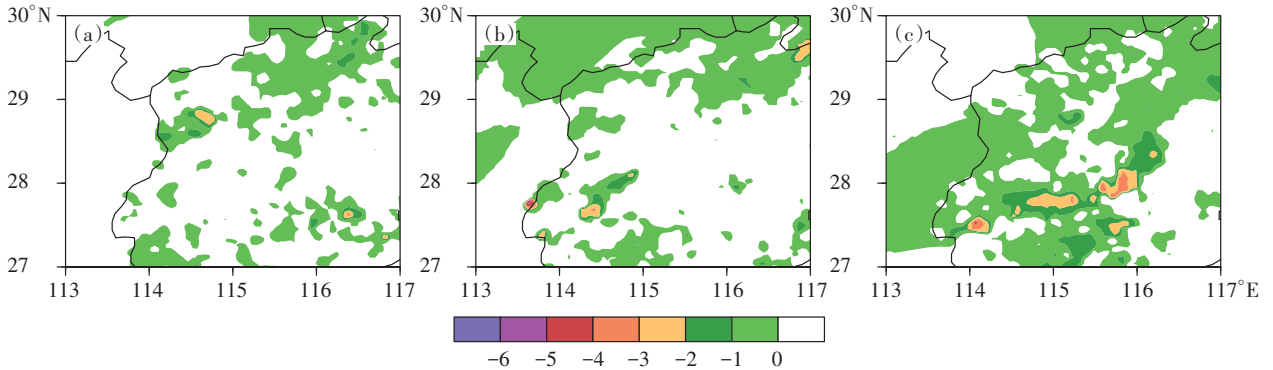


图 10 观测的 2016 年 4 月 16 日 04:00(a)、05:00(b)、06:00(c) 小时变温场(单位: °C)

Fig. 10 Observed hourly variable temperature field (units: °C) at (a) 04:00 BT, (b) 05:00 BT, (c) 06:00 BT on 16 April 2016

线形演变成弓形。然而,以上结论仅仅针对一次飊线过程,得到的结论不一定具有普适性,还需要综合多个飊线个例进行分析。并且,对于机理的分析还仅仅是定性分析,在今后的研究中需要通过定量计算来深入探究地形影响的内在机制。

参考文献 (References)

- Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al, 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX[J]. *Mon Wea Rev*, 138(8): 2275-2296.
- Chen F, Liang X D, Ma H, 2017. Application of IVAP-based observation operator in radar radial velocity assimilation; the case of Typhoon Fitow[J]. *Mon Wea Rev*, 145(10): 4187-4203.
- 邓诗茹, 邹海波, 2015. 2014 年 6 月 21—22 日江西省暴雨天气过程模拟及地形影响试验[J]. *气象与减灾研究*, 38(3): 19-25.
- Deng S R, Zhou H B, 2015. Numerical simulation and analysis of topography influence on rainstorm in Jiangxi[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 38(3): 19-25. (in Chinese)
- 公衍铎, 郑永光, 罗琪, 2019. 冷涡底部一次弓状强飊线的演变和机理[J]. *气象*, 45(4): 483-495. Gong Y D, Zheng Y G, Luo Q, 2019. Evolution and development mechanisms of an arc-shaped squall line occurring along the south side of a cold vortex[J]. *Meteor Mon*, 45(4): 483-495. (in Chinese)
- Hu M, Xue M, Brewster K, 2006. 3DVAR and cloud analysis with WSR-88D Level-II data for the prediction of the Fort Worth, Texas, tornadic thunderstorms. Part II: impact of radial velocity analysis via 3DVAR[J]. *Mon Wea Rev*, 134(2): 699-721.
- 金龙, 赵坤, 谢利平, 等, 2013. 一次弓形回波结构和演变机制的观测分析[J]. *气象科学*, 33(6): 591-601. Jin L, Zhao K, Xie L P, et al, 2013. Radar observation analysis on structure and evolution mechanism of a bow echo[J]. *Scientia Meteor Sinica*, 33(6): 591-601. (in Chinese)
- 梁建宇, 孙建华, 2012. 2009 年 6 月一次飊线过程灾害性大风的形成机制[J]. *大气科学*, 36(2): 316-336. Liang J Y, Sun J H, 2012. The formation mechanism of damaging surface wind during the squall line in June 2009[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(2): 316-336. (in Chinese)
- Liang X D, 2007. An integrating velocity-azimuth process single-Doppler radar wind retrieval method[J]. *J Atmos Oceanic Technol*, 24(4): 658-665.
- 刘香娥, 郭学良, 2012. 灾害性大风发生机理与飊线结构特征的个例分析模拟研究[J]. *大气科学*, 36(6): 1150-1164. Liu X E, Guo X L, 2012. Analysis and numerical simulation research on severe surface wind formation mechanism and structural characteristics of a squall line case[J]. *Chin J Atmos Sci*, 36(6): 1150-1164. (in Chinese)
- 刘雅楠, 刘照明, 邹海波, 等, 2021. 江西西北部地形对一次大暴雨过程影响的数值模拟分析[J]. *气象与减灾研究*, 44(2): 105-114. Liu Y N, Liu X M, Zou H B, et al, 2021. Analysis of terrain effect for a heavy rainstorm in northwestern Jiangxi by numerical simulation[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 44(2): 105-114. (in Chinese)
- 罗琪, 郑永光, 陈敏, 2019. 2017 年北京北部一次罕见强弓状飊线过程演变和机理[J]. *气象学报*, 77(3): 371-386. Luo Q, Zheng Y G, Chen M, 2019. Evolution and development mechanisms of a rare strong arc-shaped squall line that occurred in northern Beijing in 2017[J]. *Acta Meteor Sinica*, 77(3): 371-386. (in Chinese)
- Nolen R H, 1959. A radar pattern associate with tornadoes[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 40: 277-279.
- Przybylinski R W, 1995. The bow echo: Observation, numerical simulations, and severe weather detection methods[J]. *Mon Wea Rev*, 10(2): 203-218.
- Thompson G, Rasmussen R M, Manning K, 2004. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis[J]. *Mon Wea Rev*, 141(11): 4098-4117.
- Wakimoto R M, Murphey H V, Davis C A, et al, 2006. High winds

- generated by bow echoes. Part II: The relationship between the mesovortices and damaging straight-line winds [J]. *Mon Wea Rev*, 134(10):2813-2829.
- Weisman M L, 2001. Bow echoes: A tribute to T T Fujita [J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 82(1):97-116.
- Weygandt S, Benjamin S, Devenyi D, et al, 2006. Cloud and Hydro-meteor Analysis Using METAR, Radar, and Satellite Data within the RUC/Rapid-Refresh Model[C]. In Proceedings of the 12th conference on Aviation Range and Aerospace Meteorology, Atlanta, GA, USA.
- Wheatley D M, Trapp R J, Atkins N T, 2006. Radar and damage analysis of severe bow echoes observed during BAMEX [J]. *Mon Wea Rev*, 134(3):791-805.
- 张娟娟, 刘波, 张瑛, 2021. 台风“鲇鱼”(1617)导致的江西持续性暴雨天气过程成因[J]. *气象与减灾研究*, 44(1):16-24. Zhang J J, Liu B, Zhang Y, 2021. Study on the causes of persistent rain-storm by Typhoon Megi (1617) in Jiangxi province [J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 44(1):16-24. (in Chinese)