

鲁蓉,孙建华,李德帅.初值水汽场对华南春季一次强飑线触发和维持影响的数值试验[J].热带气象学报,2019,35(1):37-50.

文章编号:1004-4965(2019)01-0037-14

初值水汽场对华南春季一次强飑线触发和维持影响的数值试验

鲁蓉^{1,2},孙建华^{1,2,3},李德帅⁴

(1. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室,北京 100029;
2. 中国科学院大学,北京 100049;3. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081;
4. 中国人民解放军 93995 部队,陕西 西安 710300)

摘要:在对观测资料分析的基础上,采用 WRF 模式探讨初始场水汽分布对华南 2014 年 3 月 30—31 日产生雷暴大风、强降水的飑线过程触发和维持的影响。研究基于 ERA-interim 和 NCEP-FNL 再分析资料在华南地区水汽分布的差异性,设计了四组将两类资料水汽按比例融合作为初始场的数值试验,水汽场从 NCEP-FNL 越靠近 ERA-interim 水汽,模拟的飑线演变越趋近实况,试验结果表明更准确的水汽初始场有利于提高飑线等强对流系统的预报准确率。在对流初生阶段,区域内地内水汽含量增多,最大有效位能增大,对流越容易触发,对流发展中后期,充沛的水汽有利于飑线组织形态和强度的维持。

关键词:飑线,水汽,模式初值,大风

中图分类号:P435.1 文献标识码:A DOI:10.16032/j.issn.1004-4965.2019.004

1 引言

2014 年 3 月底华南地区出现了大范围的强对流天气,其中 30—31 日一条飑线自西北向东南方向横扫广西、广东大部分地区(图 1a),飑线过境时伴随强降水、雷暴大风等强烈天气(图 1b),站点记录的最强降水达 116.2 mm/h,最大阵风 34.3 m/s(12 级)。

关于飑线的结构及其发展、维持机制,前人已做了非常多的研究。Maddox^[1]将飑线定义为线状的中尺度对流系统,强调飑线是包括对流区和层状云区的对流系统,Browning 等^[2]提出了典型风暴的气流三维结构,Houze 等^[3]总结了飑线成熟阶段的概念模型,主要包括飑前近地面入流、对流核内对流尺度的上升和下沉运动、层状云中上层向

后的上升出流和中下层向前的下沉入流。关于强飑线的维持机制,Rotunno 等^[4]提出 RKW 理论,着眼于冷池产生的负涡度和垂直风切变产生的正涡度相互作用,这一观点得到了诸多的数值模拟验证^[5-7]。之后又有学者对强飑线的维持发展机制进行了补充,强调诸如后向入流急流和涡旋对等因素的动力作用^[8-12]。此外,许多学者研究了产生飑线的云的组织形态^[13-15],当然,不同的组织类型所产生的天气现象也有所不同,Fujita^[16]指出弓状回波更容易产生地面大风。丁一汇等^[17]根据我国 18 个飑线个例,将飑线发生的天气背景划分为四种环流型:槽前型、槽后型、副热带高压后部型和台风倒槽型。相比于美国飑线的生成环境,中国飑线的大气环境中水汽更为充沛,但垂直风切变要弱一些^[18-19],杨新林等^[20]对华南雷暴大风环境条件的研究表明,相比于普通雷暴,雷暴大风一般发生在

收稿日期:2017-12-02;修订日期:2018-10-18

基金项目:国家自然科学基金项目(41675045)、灾害天气国家重点实验室基金(2016LASW-B05)共同资助

通信作者:孙建华,女,北京市人,研究员,主要从事中尺度气象学研究。E-mail:sjh@mail.iap.ac.cn

更不稳定的大气环境中，中高层更冷而低层更暖湿，大气环境斜压性更强。进一步的研究表明，水汽的垂直分布和含量对对流系统的组织形式、地面冷池、大风等均具有重要影响^[21]。

目前对于飑线过程伴随的大风等天气现象及其实时预报，仍是数值模式及业务工作中的难点。从可预报性角度出发，初始误差中所有变量的扰动对中尺度对流系统特征的预报都有显著影响，其中湿度扰动对最大上升运动的强度和地面大风的影响最大^[22-23]。因此水汽初始场的准确度对飑线等中尺度系统模拟和预报非常重要，但是通常作为初始场的多种再分析资料之间水汽变量存在明显的差异。前人对于再分析资料的评估主要是从气候角度出发，例如比较温度、降水和辐射等及其衍生变量的年代际、年际以及季节变化差异及可信度，或是针对特殊地区如高原、海洋或极地等分析资料的系统性误差^[24-28]，而关于水汽短期区域内误差的评估相对匮乏，主要是出于水汽变量缺乏准确的观测资料对比。因此，本文从个例数值试验模拟角度出发，比较两类再分析资料之间分布的差异性，选取不同的比例将两者水汽场融合，并将不同初始场试验结果与实况对比，从而对两类资料水汽的差异性及其对中尺度对流系统预报的影响有更加清楚的认识。

在本文的研究中，首先采用观测资料分析飑线发生的环流背景条件和发展过程，然后研究不同的初始场水汽分布对模拟飑线发生发展过程的影响，期望通过构造相对较好的水汽初始场提高飑线过程的预报效果。

2 资料与方法

本文采用的资料主要有：3 h 间隔的常规地面观测数据及 12 h 间隔的探空数据，地面自动气象站逐小时和 10 min 间隔的观测资料，地面加密的逐小时降水观测数据；我国地面闪电定位仪观测的逐小时地闪资料；我国新一代天气雷达观测到的 6 min 间隔的反射率数据，NCEP 与 ECMWF 逐 6 h 的全球 1°×1°再分析资料。

本文首先基于再分析数据，分析了此次过程的环流背景，利用雷达、卫星及地面自动气象站数据，分析了飑线的结构、天气现象及产生强降水、

雷暴大风的可能原因。然后，利用高分辨率模式 WRF(Weather Research and Forecasting)对此次过程进行了模拟，选取不同的比例将两类再分析资料水汽变量融合作为水汽初始场（其他初始场变量保持一致），通过将不同初始场试验结果与实况对比，深入探讨初始场水汽分布对飑线发生发展过程模拟和预报的影响。

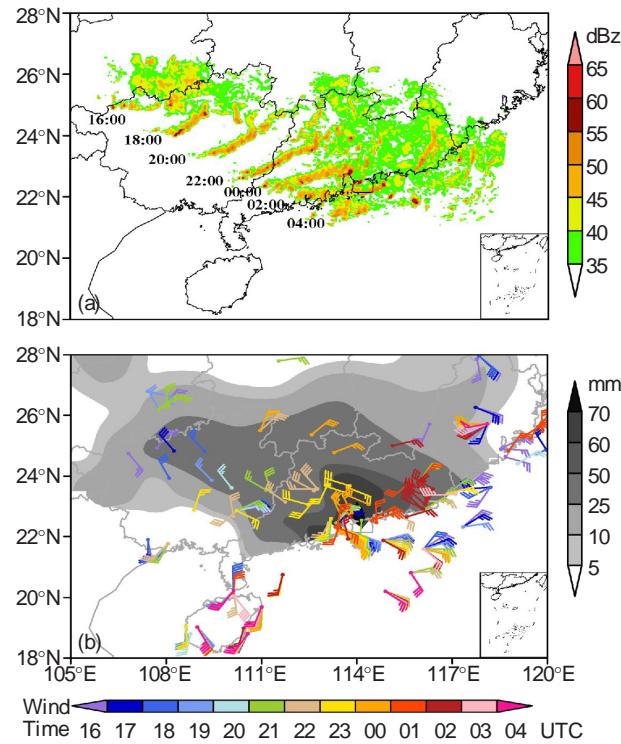


图 1 2014 年 3 月 30 日 16 时—31 日 04 时华南飑线过程
a. 雷达组合反射率演变(阴影, 单位 dBz, 时间间隔为 2 h); b. 累计降水(灰色阴影, 单位 mm) 以及地面大风分布(大于 10 m/s, 全风向杆, >4 m/s, 风羽颜色表示不同时次)。

3 环流背景及观测分析

3.1 飑线发生的天气背景条件

2014 年 3 月 30—31 日的飑线过程影响范围广、强度大、持续时间长(约 14 h)，其发生在高空槽前的天气形势下。2014 年 3 月 30 日 12 时(世界时, 下同) 200 hPa 有两支高空急流，华南地区处在两急流的中间断裂处，广西、贵州部分地区位于西风带急流出口区左侧，广东位于近海副热带急流入口区右侧(图 2a)。亚欧中高纬 500 hPa 呈两槽一脊，亚洲大陆在宽广的高压脊控制下，青藏高原东部有一短波槽东移至两广地区，槽后有冷空

气南下(图2b)。850 hPa 上在青藏高原东侧有气旋式环流 ,冷空气沿着涡旋西部南下 ,南海西北部的低层风速由 8 m/s 左右增加到 16 m/s 左右 ,低空急流发展起来 ,中心逐渐向沿海靠近。低空急流的发展有利于水汽的输送 ,冷暖空气在广西贵州边界处交汇(图 2c)。整体而言 ,华南地区处在 500 hPa 高空槽前的西南气流中和南岭附近的 850 hPa 气旋性切变的南侧 ,符合典型的华南前汛期暴雨和强对流天气发生的环流特征。

除了有利的天气形势外 ,充沛的水汽是强对流发展的重要因素。由于前期近地面的温度、露点都很高(图略) ,加上低空急流的外来输送 ,华南地区大气可降水量 (PWAT) 在 3 月份便达到了 45 mm 以上 ,水汽含量充沛。从探空分析也可看出 ,此次飑线过程发生之前 500 hPa 以下大气湿度比较大 ,但是 500 hPa 以上迅速变干 ,说明中层有干冷空气侵入 ,这种上干下湿的结构有利于对流的出现(图略)。

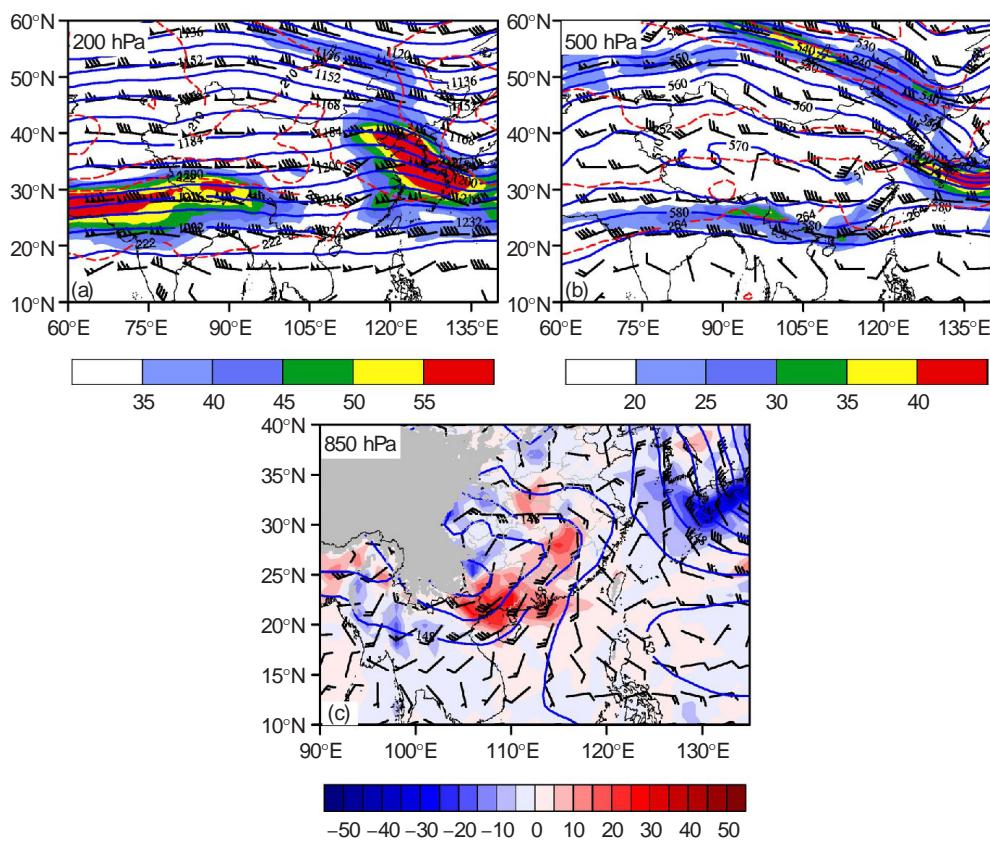


图 2 2014 年 3 月 30 日 12 时形势场
a. 200 hPa 位势高度(蓝色等值线,dagpm)、温度(红色等值线 K) ,
风场(风标,全风向杆 $\pm 4 \text{ m/s}$)和急流(阴影, m/s) b. 500 hPa 位势高度、温度、风场和急流 c. 850 hPa 位势高度、
温度平流(阴影, K/s)和风场,灰色阴影为地形高度大于 1 500 m。

3.2 飑线的发展过程

由雷达组合反射率可见 ,此飑线属于典型的尾随层状云类型 ,即 TS 类型(图 3)。3 月 30 日 14 时系统在广西、贵州交界处发展 ,并向东移动 ,此时地面出现弱降水 ,雷暴大风主要分布在飑线系统前端 ,而地闪出现在飑线后部。19 时已形成完整的线性组织结构 ,强回波后部存在层状云区 ,地面出现 20 mm/h 以上的强降水 ,并伴随雷暴大风 ;同时在广东东北部存在一个正在消散的系统 ,该

系统为前一次过程的残留。21 时飑线发展达到强盛阶段 ,降水强度增强 ,降水面积也进一步扩大 ,闪电数量明显增多。之后对流系统继续东移 ,31 日 00 时移至广东沿海 ,强降水主要分布在飑线系统的南端 ,最大雨强达 30 mm/h ,而雷暴大风仍主要分布在飑线系统的前部。02 时以后飑线系统开始减弱 ,但是在飑线后方有新生单体出现并发展 ,该对流单体也带来较强降水。04 时飑线主体移至海上 ,其结构也逐渐松散、孤立。

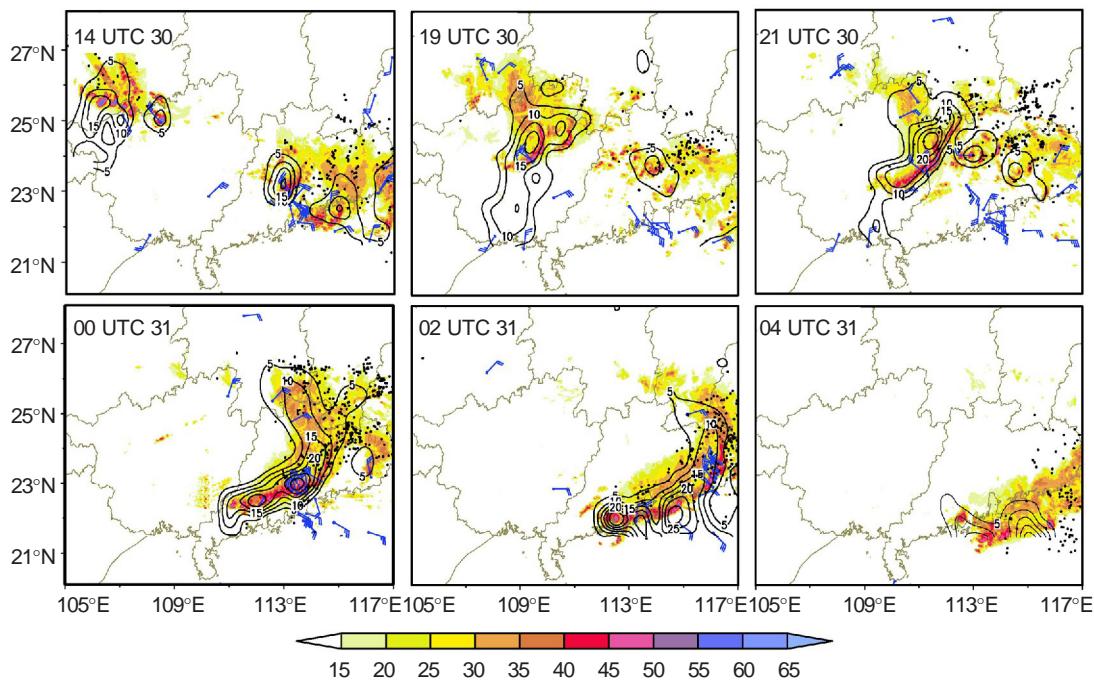


图3 2014年3月30—31日雷达组合反射率(阴影,单位:dBz)、闪电(黑色圆点)、每小时降水量(黑色实线,单位:mm)及地面大风(蓝色风羽,全风向杆4 m/s)的分布

Leary等^[29]根据飑线系统的雷达组合反射率特征和降水特征将飑线生命史划分为初生、增强、成熟和消散四个阶段。根据雷达组合反射率、大风、降水和地闪等天气现象的统计结果,结合6 min间隔的雷达组合反射率拼图,可将此次飑线过程大致划分为如下几个阶段:(1)初生阶段30日14—16时;(2)发展阶段30日17—21时;(3)成熟阶段30日22时—31日01时;(4)消散阶段31日02时以后。

在飑线的形成阶段,广西中西部有低压系统(图4),而对流初生于低压前侧。随后地面倒槽逐渐发展起来,飑线在倒槽区发展,且在其前方有较清晰的地面辐合线,系统随辐合线向东南方向移动。与图3对比可看出,降水过程也随着地面辐合线的发展而发展,而地面辐合线消失强降水过程也随之结束。地面大风主要分布在强回波的前侧,这可能与阵风锋有关。

从单站的气象要素变化可以更详细地分析飑线过境时的特征。图5为受飑线过程影响较大的珠海站各气象要素的变化,时间分辨率均为10 min。珠海站的风廓线仪与自动气象站的距离约40 km,可代表自动站上空的风场情况。由图5a可

见飑线系统影响珠海之前,边界层内一直有急流存在,在飑线过境前低空急流达到最强;而当飑线过境后,低空急流逐渐减弱消失。23:30—00:40在500 m以下为东南风,500 m以上逐渐转为南风或西南风,风切变较强,0~3 km风切变达 $7.58 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$;31日00:50低层风速转为一致的西南风并迅速增大,100 m处的风速达19.3 m/s,800 m左右风速达37.8 m/s(低空急流核),01:10之后风速迅速减小,低层风向发生急剧转变,先由偏西气流转为偏东气流,然后转为偏北气流,01:00开始测站温度、露点迅速降低,气压不断上升,同时出现降水(图5b、5c)。02:10之后低层转为西北气流,风速相应减小,此时测站气温、露点有所上升,气压逐渐下降,降水也趋于平缓。值得注意的是,10 min雨量从0.4 mm迅速增加到16.4 mm(图5c),然后缓慢减小,降水峰值前后呈现强的不对称性,这与飑线属于尾随层状云的结构有关。从以上分析看出强降水发生在风向转换的时刻(01:20—01:40),近地面大风发生在强降水之前20~30 min,可见在这次飑线过程中,尽管雷暴大风与强降水出现的时间非常接近,但大风出现在强降水的前缘,与前人理想模拟的结果一致^[30]。

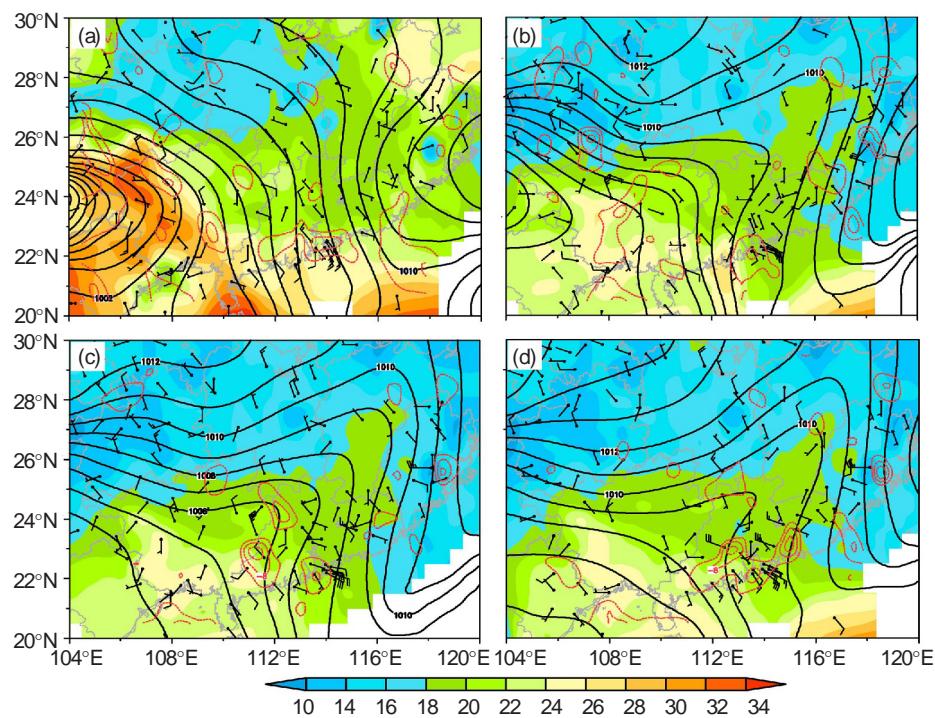


图4 2014年3月30—31日地面气压场(黑色等值线 hPa)、温度场(阴影, °C)、风场(风标, 全风向杆 4 m/s)以及散度(红色等值线为辐合区, 间隔 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$) a. 30日09时 b. 30日18时 c. 30日21时 d. 31日00时。

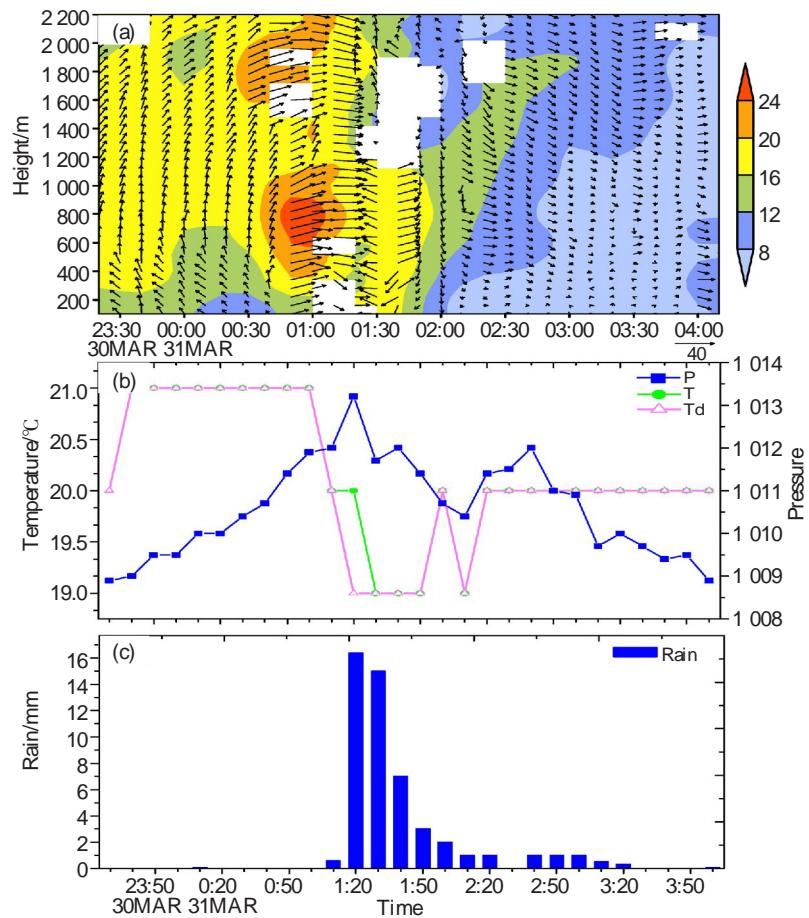


图5 2014年3月30日23:30—31日04:00珠海风廓线和地面站各气象要素随时间的变化 a. 风廓线演变(箭矢, 单位: m/s; 阴影表示风速); b. 地面温度(绿色线, 单位: °C)、露点(粉色线, 单位: °C)和气压(蓝色线, 单位: hPa); c. 降雨量(单位: mm)。

4 龙卷风的数值模拟

前面采用观测资料分析了龙卷风的环境特征和发展过程,由于龙卷风发生发展过程及其产生天气现象的预报一直是业务工作的难点,因此本文将利用WRF模式^[3],基于两类再分析资料水汽分布差异性的特征,构造不同的水汽初值对龙卷风进行模拟,探索能达到较好模拟效果的水汽初始场,进一步揭示初始场水汽分布对龙卷风的发生发展和产生天气现象的强弱的影响机理,提高龙卷风过程的可预报性。

4.1 模拟方案

模拟采用WRF模式2层双向嵌套,水平分辨率为13.5 km、4.5 km,垂直方向为50层,模拟区域示于图6。微物理选取WSM 6-class方案,第一层网格积云对流方案为Kain-Fritsch方案,第二层不采用积云方案。长波辐射采用RRTM方案,短波辐射采用Dudhia方案,陆地选取Noah

方案,边界层选取YSU方案。模拟初始时间为2014年3月30日12时,积分时长为24 h。初始场来自欧洲中期天气预报中心ECMWF(European Center for Medium-Range Weather Forecasts)再分析资料ERA-Interim(简称EC)和美国国家环境预测中心NCEP(National Centers for Environmental Prediction)全球再分析资料(Final Operational Global Analysis,简称FNL)。同时同化地面观测资料和探空资料改进初值。由于EC和FNL的水汽场存在较大的差异,而这种差异又使得模拟龙卷风的过程出现了显著的差别,这表明初始场水汽对龙卷风的发生、发展过程有重要的影响。因此,设计了系列数值模拟试验(表1),将EC初始水汽场减去FNL初始水汽场得到两种资料在水汽方面的差异,分别按其25%、50%、75%的比例叠加在FNL初始水汽场上,保持FNL其他变量不变,进行数值模拟,并将其与未修改的FNL资料模拟结果对比,分析每组试验龙卷风系统发展呈现出的异同。

表1 试验方案

试验名称	试验方案
EC	初始场变量完全来自EC资料
EC-FNL	初始场水汽变量来自EC资料,其他变量来自FNL资料
FNL	初始场变量完全来自FNL资料
FNL-25	水汽变量由EC减去FNL,其差按25%比例加在FNL水汽变量中
FNL-50	水汽变量由EC减去FNL,其差按50%比例加在FNL水汽变量中
FNL-75	水汽变量由EC减去FNL,其差按75%比例加在FNL水汽变量中

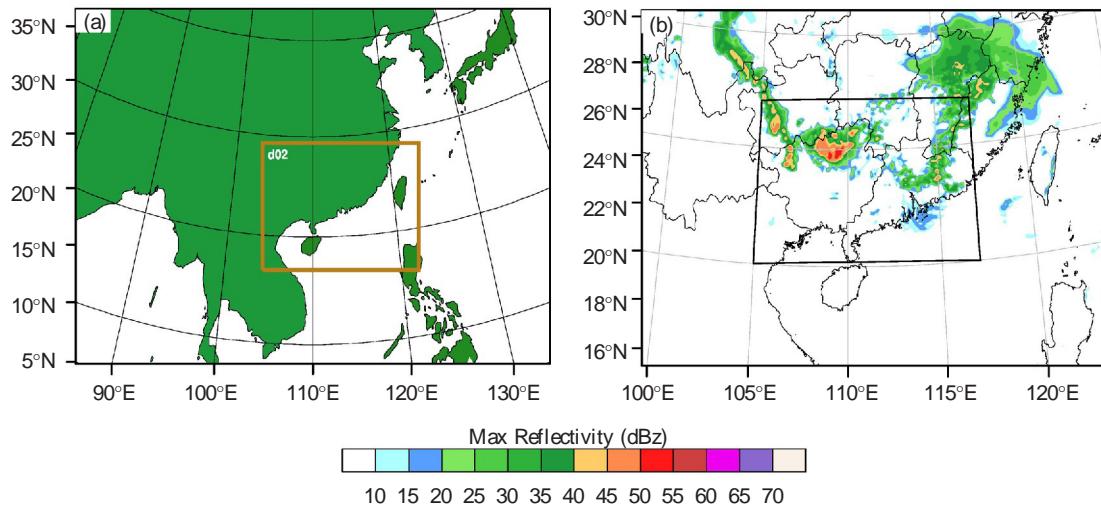


图6 WRF模拟区域d01、d02(a)和龙卷风的主要活动区域和影响范围(粗实线框)(b)

b中填色部分为EC-FNL试验在2014年3月30日13时的雷达组合反射率(单位dBZ)。

4.2 EC 和 FNL 初始场水汽差异

EC 和 FNL 资料在水汽场上存在显著的差别(图 7), 其他变量差异很小(图略), 水汽的差异直接导致了飑线发展过程的差异。从 PWAT 来看, 2014 年 3 月 30 日 12 时 EC 资料作为初始场在广西西部至与贵州部分交界区 PWAT 显著偏高, 而飑线就在这个区域生成, 该区域内水汽含量的高低可能对对流生成时间以及能否生成有重要影响。而 FNL 水汽初始场则是在广西东部以及广东中北部沿海 PWAT 高于 EC, 这部分差异可能导致了飑线的发展和增强在时间和地点上的不同。

另外我们还比较了 2014 年 3—4 月两种再分析数据的平均 PWAT(图 7d), 结果发现 EC 水汽也是在广西西部偏高, 而 FNL 资料在广东东部沿海包括海上水汽含量偏高, 与此次个例初始场两种资料的水汽分析结果大体一致。结合地形等值线分析, 这种水汽分布差异性与地形密切相关, EC 资料在高原和山地地区水汽含量高于 FNL 资料。探究这种地域性特征和资料间的系统性差异, 有利于构造更为合适的水汽初始场, 提高中尺度对流系统的可预报性。

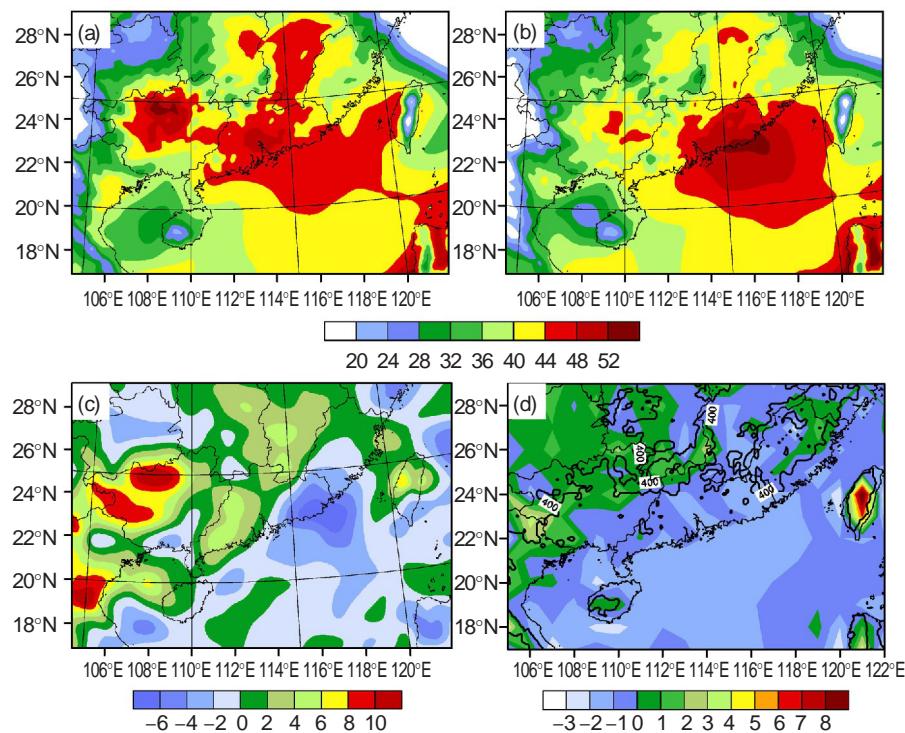


图 7 2014 年 3 月 30 日 12 时 初始场的 PWAT(单位 mm) a. EC b. FNL c. EC 与 FNL PWAT 之差 ; d. 2014 年 3—4 月 EC 与 FNL 资料 PWAT 之差(阴影 , 单位 mm) , 地形等值线(单位 m , 间隔 400 m)。

4.3 不同试验方案对流系统发展过程的对比

对于此次飑线过程的模拟 EC 试验中, 对流系统前期偏强而后期组织性差且消散快, FNL 试验模拟效果也不理想, 线性组织的对流出现偏晚导致整个过程比实况延迟较多; EC-FNL 试验结果总体趋近于实况, 这组试验充分体现了水汽初始场对飑线过程可预报性具有显著的影响(图 8)。

对比各组融合两类水汽场的数值试验结果来看, 以 EC-FNL 和 FNL-75 试验的结果与实况最为接近。EC-FNL 试验的飑线发生发展过程与观测较为相似, 尤其是飑线发展的前期和中期, 只是触发

时间较实况提早了 1~2 h, 但飑线发展的后期与实况有一定的差异, FNL-75 试验整体与实况较一致, 在系统前期触发时间和后期形态维持上均与观测大致相似, FNL-50 与 FNL-25 模拟效果相对于 FNL 试验有不同程度的提高(图 8)。总体来说, 在 FNL 水汽变量的基础上叠加其与 EC 的差异后, 对流的形成与增强时间相对 FNL 试验, 不同程度地提早, 向 EC 试验靠近(表 2), 对流的组织性也有增强。因此, 水汽分布形态不仅对对流系统的触发时间和强度有影响, 而且能够使飑线的组织形态与结构发生较大差异。

表2 不同试验方案对流系统演变阶段划分

试验方案	形成阶段	发展阶段	成熟阶段	消散阶段
EC	13—16时	17—20时	21—00时	01—05时
EC-FNL	13—16时	17—20时	21—00时	01—05时
FNL	16—19时	20—00时	01—05时	06—10时
FNL-25	15—18时	19—23时	00—04时	05—09时
FNL-50	14—17时	18—21时	22—03时	04—08时
FNL-75	14—16时	17—20时	21—02时	03—07时

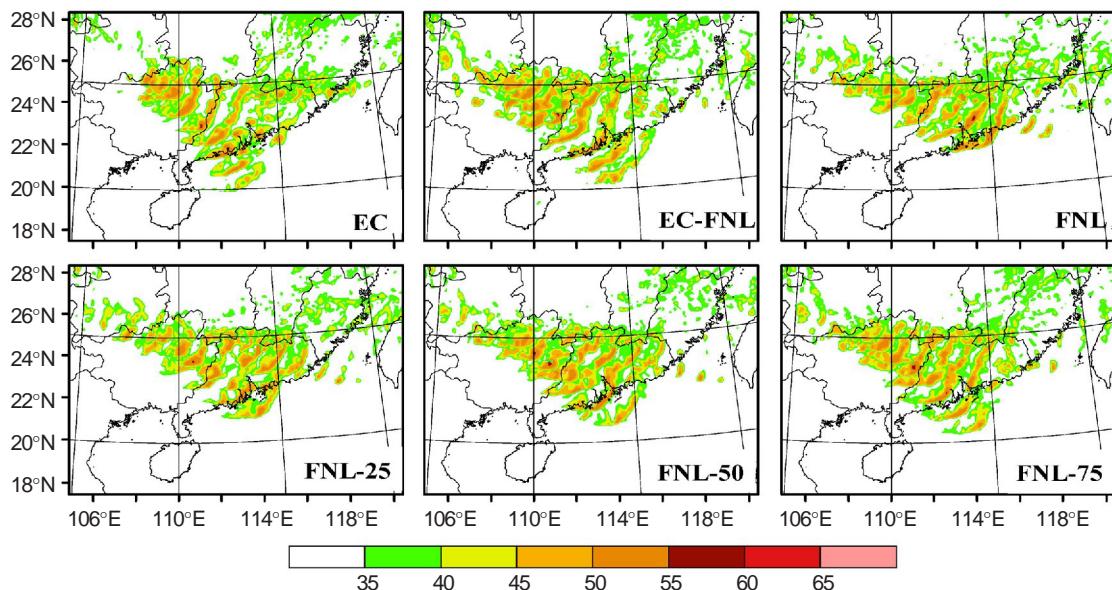


图8 2014年3月30日14时—31日04时各试验模拟的飑线雷达组合反射率演变(阴影 单位 dBz 时间间隔为2 h)

4.3.1 形成阶段

EC-FNL试验中,30日13时在广西与贵州交界处有弱回波形成,14时以后回波逐渐加强,形成组织化程度较高的中尺度对流系统(图8)。从地面气压场看,此时强回波带前部对应着地面低压,同时强回波处在偏东风和偏南风的辐合区中,这与广西贵州地区的高原地形的阻挡作用有密切的联系(图略)。EC试验在形成阶段与之类似,而FNL试验演变为飑线的对流系统触发时间在18—19时附近,地点位于广西的中东部,与前两组试验差别较大。EC-FNL试验与FNL试验除水汽场外,其他要素均差异非常小,说明初始场水汽对于飑线触发具有重要的影响。FNL-25、FNL-50、FNL-75触发时间相对于FNL依次提前,向EC-FNL试验趋近。FNL-25、FNL-50、FNL-75对流初生时间分别为16时、15时、14时,触发地点均位于广西西北部,但是强度上存在一定差异,FNL-75的初生对流要

强于其他两组试验,组织结构上也更有利于发展成线状对流,同时向东南方向的移速更快。这三组试验中FNL-75负变温范围最大,而EC-FNL试验在所有试验中正变压范围最广强度最强,其对应雷暴高压发展最强。每组试验的触发地点和水汽场相对大值区对应较好,表明早期区域内水汽的多少和分布决定对流触发时间和地点。

4.3.2 发展阶段

EC-FNL试验中,30日17时,类似于弓状回波的线性组织结构形成。18时地面气压场,飑线前部有中尺度低压,后部有雷暴高压和尾流低压(图略)。飑线前部的东南风增强,最强回波带对应着飑前东南风和飑线后部偏北风的辐合区,东南风的增强促进了飑线的进一步发展。此时,地面由于降水的蒸发冷却作用气温降低,冷池形成,负变温显著(图9)。

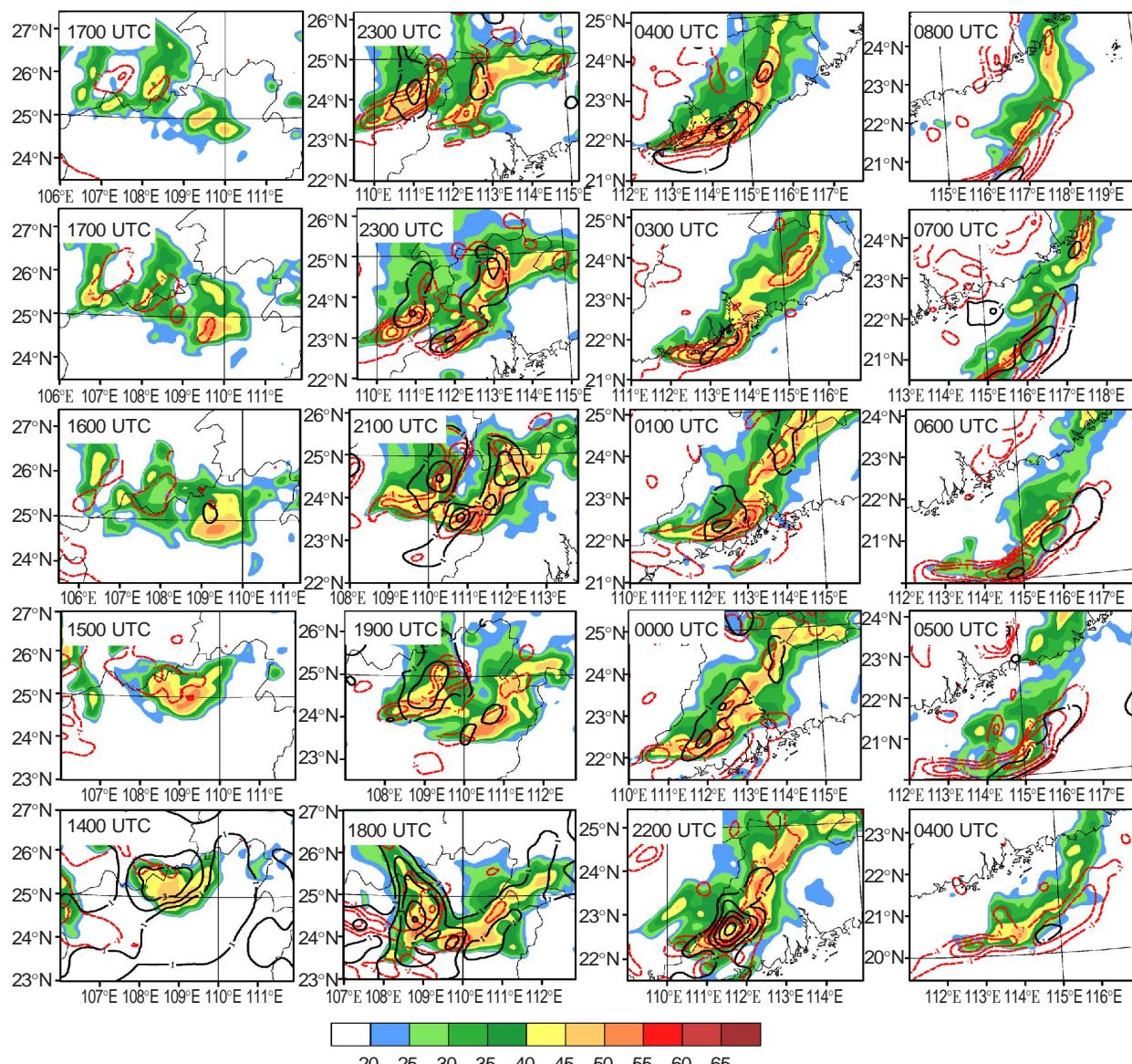


图9 FNL(第1行)、FNL-25(第2行)、FNL-50(第3行)、FNL-75(第4行)以及EC-FNL(第5行)试验形成(第1列)、发展(第2列)、成熟(第3列)和消亡(第4列)阶段代表时刻的雷达组合反射率(阴影,单位dBZ)等值线 1.5 km 高度上的负变温线(红色虚线,间隔 1 K)和正变压线(黑色实线,间隔 1 hPa)。

FNL、FNL-25、FNL-50、FNL-75 以及 EC-FNL 试验对流组织成线性的时间分别是 20 时、19 时、17 时、16 时、16 时。在几组 FNL 试验中, FNL-75 线性组织结构最佳(图 8)。这几组试验基本都形成了 TS 型线状回波, 即层状云区在强对流区的后部, 层状云发展一段时间后部分减弱消失, 部分汇入前部的线状回波中。初值的水汽含量越低, 回波的线性组织形成越慢。值得注意的是, 几组 FNL 试验中, FNL-50 的正变压更显著, 与对流弓状回波的结构有关。这个阶段飑线前部的雷暴大风分布较多, 降水强度增加, 地面大风位于强回波带的

前沿, 主要与飑前低层的强劲入流有关(图 10)。FNL-50 试验结果说明在对流能发展起来后, 适当降低水汽含量有利于线性组织对流产生较强的天气现象。

4.3.3 成熟阶段

EC-FNL 试验 21 时之后, 雷达组合反射率进一步增强, 系统南部的弓状回波与北部逐渐发展的增大的线状对流合并, 一起向东南方向移动。移动方向与其前部的风场辐合密切相关。雷暴高压进一步增强, 大风分布在雷暴高压边缘。同时地面降温进一步加剧, 高压中心与冷池位置相重叠(图

9)。此时小时降水达到最强，强降水区主要出现在弓状回波区(图10)。

其他试验的成熟阶段，对流系统组织形态也发展为更加清晰的线性结构，发展阶段线性回波后部的不规则回波消失，南北两段线状对流连接紧密(图9)，一起向广东沿海方向移动。飑线前的雷暴大风由入流方向的东南风转为出流方向的西北风(图10)，负变温增强，对应着冷池更加显著。几组FNL试验与EC、EC-FNL试验相比，后期对流发展强度明显更强，主要是因为FNL试验的初值在广东沿海地区水汽含量较高，有利于对流在该地区的维持。相反EC和EC-FNL试验在成熟以及之后的消散阶段，其线状组织逐渐变成零散对流，周围有层状云回波(图8)。因此，在线状组织对流发展的中后期，充足的水汽有利于其线状组织

结构的维持或增强。

4.3.4 消散阶段

EC-FNL试验中31日01时开始，雷暴高压随对流移到海上，飑线强度开始减弱，线性组织结构逐渐趋向消散。弓状回波中间段首先开始减弱并断裂，先于南北两段回波消亡。此时环境场垂直切变显著减小(图略)，负变温区移至系统前方，地面最大风速和降水减弱(图9、10)，部分雷暴大风出现在系统的后部，海上残留的对流系统于09时完全消散。其他几组试验中，在对流入海后，演变过程与EC-FNL试验基本相似，强度都有所减弱并迅速消散。但是由于同时刻区域内水汽含量显著高于EC以及EC-FNL试验，其消散时间相应偏晚，以FNL为最。这表明初始场水汽含量分布可以影响对流系统后期的演变。

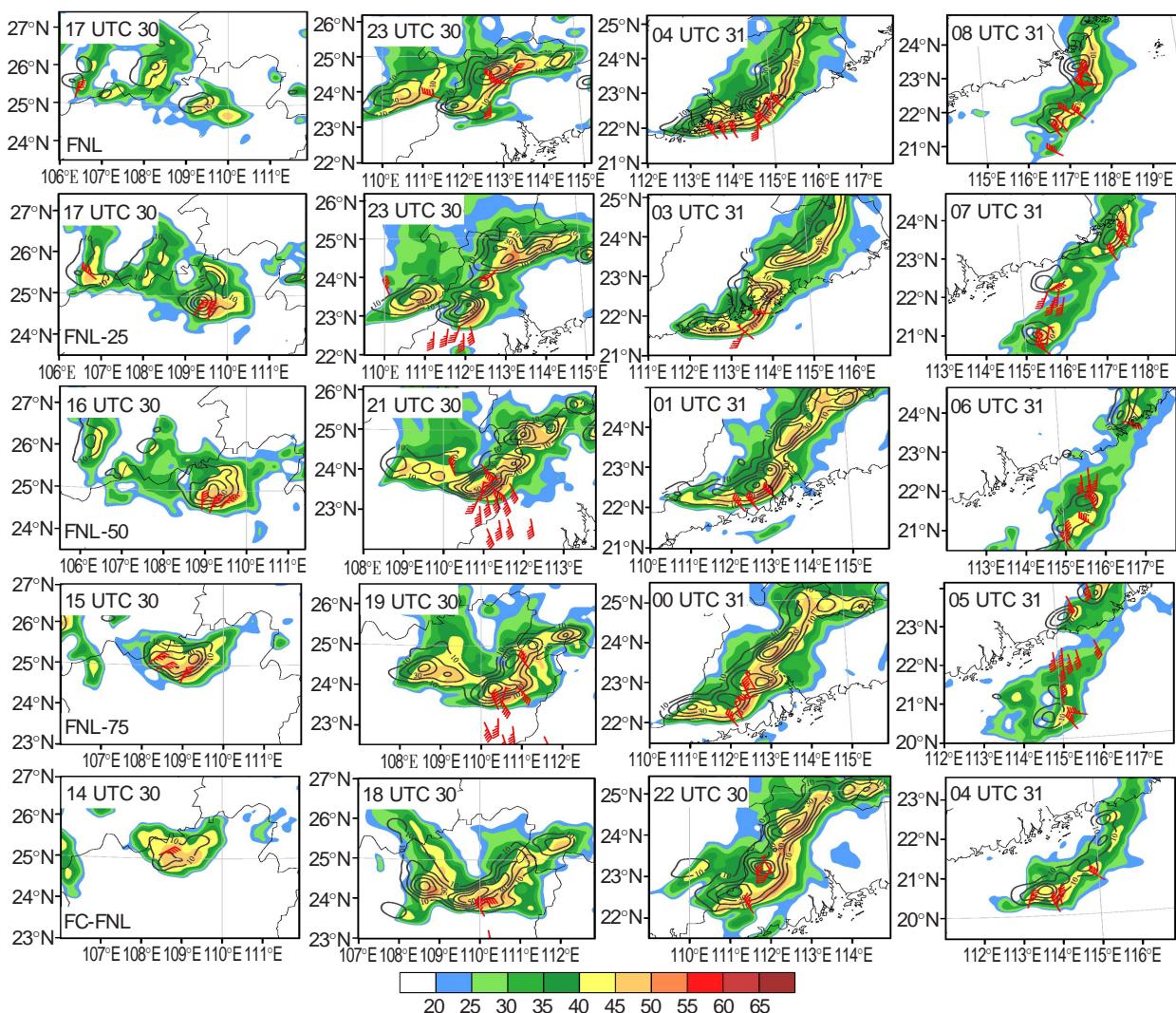


图10 FNL、FNL-25、FNL-50、FNL-75以及EC-FNL试验形成、发展、成熟和消亡阶段代表时刻的雷达组合反射率(阴影, 单位 dBz), 小时降水量(等值线, 间隔 10 mm)和地面大风(风标, 大于 17 m/s)

飑线过程引发的主要灾害天气之一是雷暴大风，雷暴大风从一定程度上可以反映对流系统的强度和变化，因此我们对各个试验飑线过程地面10 m最大风速的演变情况进行了分析(图11)。从风速极大值来看，在模拟时段的前期(14—18时)，FNL-75依次大于FNL-50、FNL-25以及FNL，而

在模拟中后期，FNL-25最大风速要大于其他试验，这与EC初始场在对流初生地水汽偏高，而FNL在对流成熟区域水汽偏高密切相关。同时，EC-FNL与EC试验雷暴大风演变规律一致，充分说明初始场水汽分布对对流系统及其产生的强天气现象有重要的影响。

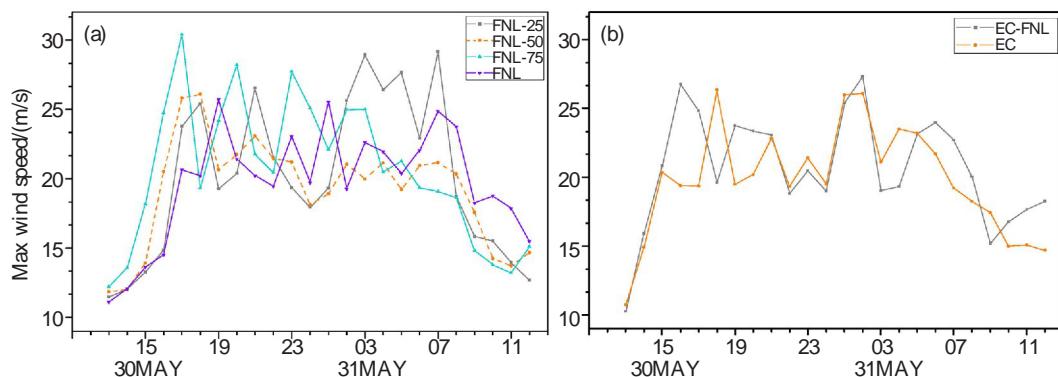


图11 2014年3月30日13时—31日12时各组试验地面最大风速的时间演变 单位 m/s。

综上所述，本次飑线发生发展过程中，在对流的初始阶段，水汽含量高对流更容易触发且强度更强；而对流触发地区的水汽减少，对流触发时间不同程度推迟。在对流发展阶段，适当的减少水汽有利于弓状回波的出现和雷暴大风的形成；在线性对流发展的中后期，区域内水汽充沛有利于对流的线性组织形态和强度的维持甚至加强，出现大风等强天气现象的时间也更长。

5 水汽含量影响飑线发展的机制

根据上文的分析，初始场水汽含量及其分布对飑线发生发展过程有重要的影响，下面主要从PWAT以及最大对流有效位能(MCAPE)的角度

来探讨初值场水汽如何影响飑线的发生发展。

图6b实线框为飑线初生、发展、成熟以及消亡阶段所在的区域，因此计算该区域内PWAT随时间演变的情况(图12a)。水汽试验修改的是初始场，即30日12时的所有水汽变量，整个过程中FNL几组试验(FNL、FNL-25、FNL-50以及FNL-75)PWAT整体差异幅度相对较小，EC-FNL/EC与之相比变化幅度略大，后期减小很快，预示其对流后期迅速减弱消亡。所有试验均在14—15时PWAT达到过程中最大值，此时对应着对流系统的初生，EC-FNL、FNL-75的PWAT依次大于FNL-50、FNL-25、FNL，这与各组实验早期对流强度与触发时间的早晚基本一致。

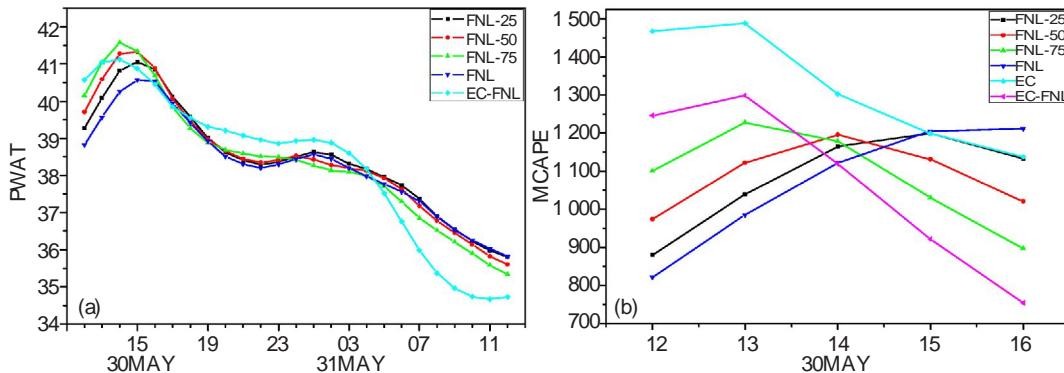


图12 2014年3月30日12时—31日12时各组试验在飑线影响区域内(图6b实线框)PWAT的时间演变(a,单位 mm);12—16时各组试验对流初生区域内(105°–112°E, 23°–26.5°N)最大对流有效位能的时间演变(b,单位:J/kg)

而在飑线成熟阶段后期，对流系统移至沿海地区，此时各组试验的 PWAT 达到第二个峰值（MCAPE 演变趋势与之一致），结合 PWAT 逐时刻水平分布图分析（图略），FNL 试验在广东沿海 PWAT 逐渐超越其他试验，对应着飑线系统再一次增强（图 8）。PWAT 的这种演变与初始场 FNL 资料水汽在广东中北部沿海及海上显著高于 EC 资料相关，同时也直接导致了对流系统和强天气现象呈现一致的演变。

MCAPE 对初始对流的发生有很好的指示意义，因此我们计算了 12—16 时对流初生阶段区域内（ $105^{\circ}\text{--}112^{\circ}\text{E}$, $23^{\circ}\text{--}26.5^{\circ}\text{N}$ ）MCAPE 平均值（图 12b）。EC 试验的 MCAPE 最高，其次分别是 EC-FNL、FNL-75、FNL-50、FNL-25 和 FNL 试验，这与 PWAT 的排序结果基本一致。MCAPE 越大，可以释放的不稳定能量越多，那么区域内生成的对流越早且越强，这与各组试验雷达组合反射率演变规律是一致的。另一方面，从 MCAPE 的时间

演变来看，对流生成的越早，MCAPE 释放的越快，其峰值下降的越早（EC、EC-FNL、FNL-75 > FNL、FNL-25, FNL-50）。在 MCAPE 大值时刻（13 时，图 13），EC 和 EC-FNL 试验由于水汽含量及分布较为接近，对流触发的时间以及位置也几乎一致，尽管两者的风场存在一定的差异。从风场辐合来看，EC 风场辐合更加显著，位置集中；而 EC-FNL 和 FNL 的风场辐合相对偏弱。基于风场辐合的差异，EC-FNL 试验仍能触发与 EC 相当的对流，充分说明在启动该处对流的过程中，水汽及其代表的不稳定能量起着举足轻重的作用。这可能也与对流发展地区起伏的地形有一定的关系，地形的影响非常复杂，本文不再讨论。结合 15 g/kg 水汽混合比等值线来看，MCAPE 随着水汽含量增加而增强（图 13），对应的 FNL-25、FNL-50、FNL-75、EC-FNL 试验对流触发时间也相应提前，且水汽增加越多，初始对流发展越强。

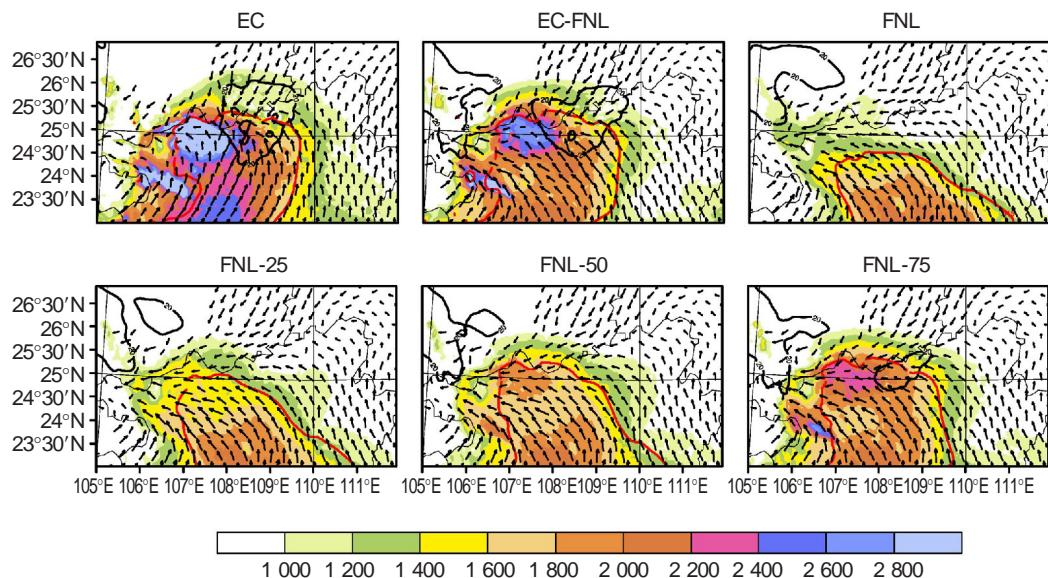


图 13 2014 年 3 月 30 日 13 UTC 各组试验 MCAPE(阴影, 单位: J/kg)、1 km 高度上风场(风矢, 单位: m/s)、 $15 \text{ g}/\text{kg}$ 水汽混合等值线(红色线)、雷达组合反射率(黑色等值线, 间隔 20 dBZ)

6 小结和讨论

本文对华南地区 2014 年 3 月 30—31 日一次产生雷暴大风、强降水的强飑线过程进行了观测资料分析和数值模拟研究。飑线系统发生在有利的天气背景条件下， 200 hPa 位于高空急流的出口

区左侧， 500 hPa 有浅槽配合， 850 hPa 有低涡系统并处于冷暖平流交界处，同时地面有低压倒槽，这些条件符合典型的华南前汛期暴雨和强对流天气共存的环流形势特征。环境场表现为中层干下层湿的特征，低层湿度大但是湿层薄。

由于 EC 和 FNL 资料的水汽场在华南地区分布有较大的差异，差异较大地方正是飑线初生和

后期增强的地方。本文分别采用 EC 和 FNL 资料对此次飑线过程进行了模拟试验，结果表明 FNL 资料作为初始场，模拟效果并不理想，当水汽场用 EC 资料代替而其他变量保持不变时，试验结果总体趋近于实况。三组将 EC 和 FNL 两种资料水汽场按不同比例融合的对比试验表明，FNL-75 试验整体模拟效果优于 FNL-50 以及 FNL-25，在早期对流触发和后期靠近沿海后组织结构的维持上均表现较好。

数值试验结果表明初始场不同的水汽分布对飑线的触发、组织和发展过程有重要影响。在对流的初始阶段，触发区水汽增多，有效位能增大，对流越容易触发且强度更强。在系统发展阶段，适当

的减少水汽有利于弓状回波和雷暴大风等强天气现象的形成，飑线的最强雷暴大风一般出现在这个阶段。在线性对流发展的中后期，区域内水汽充沛有利于对流组织形态的维持或强度加强，延长对流系统生命史和雷暴大风等强天气现象发生的时间。总体而言，给出相对准确的水汽初始场，可以有效提高飑线系统的触发、发展过程以及结构特征的模拟和预报效果。当然本文只是针对一次过程的探索，如何修正水汽场以提高飑线等中尺度对流过程的可预报性，还需要大量更加系统及有针对性的试验来支撑。华南地区海陆和地形分布复杂，ERA-interim 和 NCEP-FNL 资料在该地区的水汽分析误差需要开展深入分析。

参 考 文 献：

- [1] MADDOX R A. Mesoscale convective complexes[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1980, 61(11): 1 374-1 387.
- [2] BROWNING K A, LUDLAM F H. Airflow in convective storms[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1962, 88(376): 117-135.
- [3] HOUZE JR R A, BIGGERSTAFF M I, RUTLEDGE S A, et al. Interpretation of Doppler weather radar displays of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Bull Amer Meteor Soc, 1989, 70(6): 608-619.
- [4] 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.
- [5] WEISMAN, MORRIS L, ROTUNNO, et al. A theory for strong long-lived squall lines revisited[J]. J Atmos Sci, 2004, 61(3): 463-485.
- [6] BRYAN G H, KNIEVEL J C, PARKER M D. A multimodel assessment of RKW theory's relevance to squall-line characteristics[J]. Mon Wea Rev, 2006, 134(10): 2 772-2 792.
- [7] 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飑线过程发展维持的数值模拟[J]. 气象学报, 2012, 70(3): 371-386.
- [8] SMULL B F, HOUZE R A. Rear inflow in squall lines with trailing stratiform precipitation[J]. Mon Wea Rev, 1987, 115(12): 2 869-2 889.
- [9] WEISMAN M L. The role of convectively generated rear-inflow jets in the evolution of long-lived mesoconvective systems[J]. J Atmos Sci, 1992, 49(19): 1 826-1 847.
- [10] ZHANG D L, GAO K. Numerical simulation of an intense squall line during 10-11 June 1985 PRE-STORM. Part II: Rear inflow, surface pressure perturbations and stratiform precipitation[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(9): 2 067-2 094.
- [11] GRIM J A, RAUBER R M, MCFARQUHAR G M, et al. Development and forcing of the rear inflow jet in a rapidly developing and decaying squall line during BAMEX[J]. Mon Wea Rev, 2009, 137(4): 1 206-1 229.
- [12] MENG Z, ZHANG F, MARKOWSKI P, et al. A modeling study on the development of a bowing structure and associated rear inflow within a squall line over South China[J]. J Atmos Sci, 2012, 69(4): 1 182-1 207.
- [13] PARKER M D, JOHNSON R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems[J]. Mon Wea Rev, 2000, 128(10): 3 413-3 436.
- [14] GALLUS JR W A, SNOOK N A, JOHNSON E V. Spring and summer severe weather reports over the Midwest as a function of convective mode: A preliminary study[J]. Wea Forecasting, 2008, 23(1): 101-113.
- [15] ZHENG L, SUN J, ZHANG X, et al. Organizational modes of mesoscale convective systems over central East China[J]. Wea Forecasting, 2013, 28(5): 1 081-1 098.
- [16] FUJITA T T. Manual of downburst identification for project NIMROD [M]. Satellite and Mesometeorology Research Project, Department of the Geophysical Sciences, University of Chicago, 1978.
- [17] 丁一汇, 李鸿洲, 章名立, 等. 我国飑线发生条件的研究[J]. 大气科学, 1982, 6(1):18-27.
- [18] MENG Z, YAN D, ZHANG Y. General features of squall lines in East China[J]. Mon Wea Rev, 2013, 141(5): 1 629-1 647.
- [19] 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.
- [20] 杨新林, 孙建华, 鲁蓉, 等. 华南雷暴大风天气的环境条件分布特征[J]. 气象, 2017, 43(7):769-780.

- [21] 孙建华, 郑淋淋, 赵思雄. 水汽含量对飑线组织结构和强度影响的数值试验[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 742-755.
- [22] WANDISHIN M S, STENSRUD D J, MULLEN S L, et al. On the predictability of mesoscale convective systems: Two-dimensional simulations[J]. Wea Forecasting, 2008, 23(5): 773-785.
- [23] WANDISHIN M S, STENSRUD D J, MULLEN S L, et al. On the predictability of mesoscale convective systems: Three-dimensional simulations[J]. Mon Wea Rev, 2010, 138(5): 863-885.
- [24] SERREZE M C, HURST C M. Representation of mean Arctic precipitation from NCEP-NCAR and ERA reanalyses[J]. J Climate, 2000, 13(1): 182-201.
- [25] BROMWICH D H, FOGT R L. Strong trends in the skill of the ERA-40 and NCEP-NCAR reanalyses in the high and midlatitudes of the Southern Hemisphere, 1958-2001[J]. J Climate, 2004, 17(23): 4 603-4 619.
- [26] 赵天保, 符淙斌. 应用探空观测资料评估几类再分析资料在中国区域的适用性[J]. 大气科学, 2009, 33(3):634-648.
- [27] 赵天保, 符淙斌, 柯宗建, 等. 全球大气再分析资料的研究现状与进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(3):242-254.
- [28] BAO X, ZHANG F. Evaluation of NCEP-CFSR, NCEP-NCAR, ERA-Interim, and ERA-40 reanalysis datasets against independent sounding observations over the Tibetan Plateau[J]. J Climate, 2013, 26(1): 206-214.
- [29] LEARY C A, HOUZE JR R A. The structure and evolution of convection in a tropical cloud cluster[J]. J Atmos Sci, 1979, 36(3): 437-457.
- [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] SKAMAROCK W C, KLEMP J B, DUDHIA J, et al. A Description of the Advanced Research WRF Version 3[R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 2008, 113 pp.

NUMERICAL SIMULATION OF THE INFLUENCE OF INITIAL WATER VAPOR ON THE TRIGGER AND MAINTENANCE OF A SEVER SPRING SQUALL LINE IN SOUTH CHINA

LU Rong^{1,2}, SUN Jian-hua^{1,2,3}, LI De-shuai⁴

(1. Key Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms(LACS), Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;
 3. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China;
 4. Unit 93995 of People Liberation Army, Xi'an 710300, China)

Abstract: Based on analysis of observational data, the influence of initial water vapor distribution on the triggering and maintenance of a squall line process, which occurred with strong wind and heavy rainfall over the south of China on March 30-31, 2014, is investigated by the WRF model. According to the differences between ERA-Interim and NCEP-FNL reanalysis in the south of China, four tests of numerical simulations with different initial water vapor fields were designed by merging the two reanalysis datasets in proportion. Contrast tests confirmed that when initial water vapor evolves from NCEP-FNL to ERA-interim, the simulation results tend to approach real situation more closely. Therefore, it is advantageous to improve the predictability of squall line and other strong convective systems by constructing more accurate initial water vapor field. In the initial stage of convection, the more the water vapor content in the region accompanied by greater maximum available potential energy, the easier the convection is triggered. In the later convection development, abundant water vapor is conducive to the maintenance of organization and strength of squall line.

Key words: squall line; water vapor; initial condition; strong wind