启动对流的初始扰动对热带飑线模拟的影响

张进 谈哲敏

南京大学中尺度灾害性天气教育部重点实验室,大气科学系,南京 210093

摘 要 在中尺度数值模拟及数值预报中,正确的对流启动是模拟或预报是否取得成功的关键。作者针对一次 热带海洋飑线过程,利用一个风暴尺度云分辨数值模式进行数值模拟,采用不同的初始扰动触发与启动对流发 展,重点讨论这些不同启动对流的初始扰动对飑线演变、生命史及其成熟结构等模拟的影响。结果表明,初始扰 动的结构、形态分布及其与环境场的不同配置对具有深对流的飑线生命史存在重要影响,而对飑线的成熟结构影 响较小。

关键词 飑线 初始扰动 对流启动 背景场 文章编号 1006-9895(2008)02-0309-14 **中图分类号** P444 **文献标识码** A

Impacts of Initial Convection-Triggering Perturbations on Numerical Simulation of a Tropical Squall Line

ZHANG Jin and TAN Zhe-Min

Key Laboratory of Mesoscale Severe Weather/Ministry of Education of China, and Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093

Abstract Squall lines could be considered as self-organized convective systems, which develop through interaction between their own low-level cold pools and the environmental vertical shears. For the numerical simulations and forecasts, it is an initial-value problem in which the simulated convective systems are to be evaluated in a deterministic fashion. Even though squall lines are able to create their own forcings, the convection initialization plays an important role and remains an uncertain issue from both observational and modeling perspectives. In general, an initial and artificial temperature perturbation in a horizontally homogeneous environment is chosen for the triggering of these convective systems in the storm-scale numerical simulations. Although the choice of the initial perturbations is an important factor of successful simulations, the effects on the simulation of the nonphysical initiation set-up have been rarely discussed. In the present study, a well-documented tropical squall line observed during the TOGA-COARE on 22 February 1993 is simulated using a three-dimensional, non-hydrostatic and storm-scale numerical model ARPS, with different initial perturbation schemes triggering the convection in a horizontally homogeneous environment, to investigate the impacts of the different convection initiating on the mature structure, evolution and life cycle of the simulated tropical squall line. Observations revealed that the squall line studied here was characterized by a rapidly eastward propagating precipitation line which was about 100 km long and oriented perpendicular to the low-level vertical shear vector. It initially was highly linear and later evolved as a pronounced "bow-shaped" bulge. An up-shear tilting leading convective region with multiple updraft maximums was evident during its linear stage as well as its bow stage. The modeling results showed that the simulated squall lines using different convection-triggering perturbations could reproduce the main features of the observed ones. As a self-organized deep convection sys-

收稿日期 2006-08-16, 2007-03-01 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40325014、40333031,教育部优秀青年教师奖励计划,全国优秀博士学位论文专项资金资助项目 作者简介 张进,男,1977年出生,博士,主要从事中尺度动力学与数值模拟研究工作。E-mail: zhangjin@cma.gov.cn tem, the mature structure and evolution of the squall line are mainly dominated by the environment field, however, the amplitude of initial convection-triggering perturbations has distinct impacts on the life cycle of the squall line. A relative weaker initial perturbation could lead to a later formation of the low-level cold pool, and then a slower development and longer life cycle of the squall line. Furthermore, the different structure, shape and configuration with environmental winds of initial perturbation result in the different evolution of the squall line. The warm and line type initial perturbation normal to the environmental low-level vertical wind shear vector is favorable to initiate convections and lead to the formation of cold pool, whose interaction with the low-level vertical shear supports a long-life tropical squall line. The deterministic adjustments of the environments on the mature structure of the tropical squall line are also discussed. It is suggested that the interaction between the low-level cold pool and the low-level vertical shear, and redistributing of precipitation substance by the up-level winds, etc. restricted the impact of initial perturbations on the development of conviction system, and conduce to the analogous features of squall line in its mature stage. Therefore, the predictability of such kind of convective systems could be ensured.

Key words squall line, initial perturbation, convection initiation, environmental filed

1 引言

热带地区是中尺度对流系统多发区域,而飑线则是热带海洋上最普遍、最重要的一类中尺度对流系统。Rickenbach和Rutledge^[1]通过对船舶雷达资料的分析,发现近50%的组织性线形对流系统具有热带海洋飑线的特征。热带地区大气的能量、动量垂直分布在很大程度上主要取决于这类强对流系统。观测、理论研究表明,热带飑线一般发生在具有较大的对流有效位能(Convective Available Potential Energy,简称 CAPE)、较强的低层风垂直切变及相对较弱的高层逆向切变的环境场中。一般说来,热带飑线的深对流带大致与低空风切变相垂直,以与环境场低空急流相仿的速度快速移动^[2~4]。对流带前缘处具有强烈的地面阵风、温压湿突变等明显特征,对流带后部具有伸展范围广阔的层结降水区。

对于飑线系统的成熟结构及其长生命史的维持 机制,已开展了大量的理论与模拟研究^[5,6]。这些 研究表明,飑线属于"自由性中尺度对流"系统, 在其发展过程中,主要通过由其对流活动诱发的低 层冷池与垂直于对流带前缘的环境风垂直切变分量 之间相互作用激发出新的上升流,使得飑线系统得 以维持和发展。因此,飑线可被看作一类由相继产 生、成熟、衰竭的若干短生命史的普通对流单体所 组成的长时间维持的中尺度对流系统,环境风切变 对飑线系统的发展和成熟结构起着决定作用。但 是,冷池的形成、加强与对流降水的蒸发致冷密切 相关,所以,对飑线系统起决定性作用的"低层冷 池-垂直风切变"相互作用机制,必须依靠初始对 流活动才能建立。因此,在飑线系统的数值模拟 中,除了给出正确的环境场(包括低层风垂直切 变、温度、湿度场等)外,初始对流的启动、触发非 常重要。准确的对流启动和触发,可以使得影响飑 线发展、演变与生命史的"低层冷池-垂风直切变" 相互作用机制得以正确建立,从而能模拟出较为真 实的飑线系统发展、演变与成熟结构特征。

在实际大气中,风暴尺度的强对流系统的启动 和触发机制非常复杂,目前的观测系统仍然无法对 其进行精确的观测。在目前的风暴尺度数值模式 中,无法在其初始场中充分反映或者包含对流启动 所需要的必要的动力学、热力学的信息。所以,在 对大气中的一类"自由性"强对流系统数值模拟 中,例如飑线系统,一般在水平均一的动力、热力 学环境场中加入初始扰动进行对流启动,然后进入 对流系统的自组织过程,从而模拟出整个强对流系 统发展、演变过程,其理论基础是风暴环境场是决 定这些强对流系统演化、结构的唯一因素。然而, 问题在于模式如何正确启动对流,由于目前观测资 料无法提供或者分辨出这类对流启动所需要的实际 动力学、热力学结构和信息,需要引入初始扰动触 发与启动对流,而引入的扰动一般由研究者按惯例 或根据系统的观测推断而得。因此,由于初始扰动 的引入,其模拟的强对流系统的演变与成熟结构中 必然或多或少地携带初始扰动的信息,如何引入一 种比较合适初始扰动,使其对于模拟结果影响达到 最小,这是本文重点研究的问题。Brooks 和 Wilhelmson^[7]曾利用不同扰动与不同背景的多种组合

方案对超级单体进行数值模拟,结果显示,在中等 不稳定、强风切变的背景场中,由较弱初始扰动激 发的单体最终发展成为弱降水的超级单体,与其他 方案下的"典型"强降水超级单体存在较大的差别。

另外,从强对流系统可预报性的角度来看,与 天气尺度系统相比,强对流系统的初始误差具有更 快速增长速率,这种初始误差的快速增长可以导致 预测的失败或者不可信^[8]。在对强对流系统的数值 模拟中,如何适当地引入初始扰动?一方面通过引 入初始扰动较正确地启动和触发出对流,另一方面 引入的初始扰动对于对流系统的实际动力学、物理 过程的影响较小。引入启动对流的不同的初始扰动 是如何影响强对流系统的模拟结果的?这也是本文 所关注的主要问题。

本文利用热带海洋全球大气海洋-大气耦合响 应试验(the Tropical Ocean Global Atmosphere Coupled Ocean-Atmosphere Response Experiment, 简称 TOGA-COARE)期间观测到的 1993 年 2 月 22 日的热带海洋飑线过程^[9~11],采用同一探空资 料初始化模式背景场,配合不同的初始扰动方案, 对其进行高分辨数值模拟,着重讨论在典型的热带 飑线环境场中,初始扰动对热带飑线系统演变、成 熟结构的模拟影响,并分析环境场对飑线演变与结 构的决定作用。

这次热带飑线过程具体的观测特征为:(1)沿 对流带大部分上升流为典型的后倾结构,由对流带 前缘处上升流中心、中层较弱上升带、高层强上升 区自前向后依次排列构成;(2)水平面方向上,对 流带由初期的线状分布向成熟时期的弓形形态转 化;(3)降水区相对于对流带前缘向后横向伸展, 与中纬度尾留层云降水型(trailing stratiform precipitation, TS type)飑线^[11]相类似。该飑线系统 的高分辨数值模拟表明该系统具有典型的热带飑线 系统的特征^[12,13]。

本文第2节给出数值模式与试验设计方案,第 3节讨论不同初始扰动对于飑线系统的演化过程、 系统成熟结构等的影响作用,第4节为具体分析与 讨论,第5节给出主要结论。

2 数值模式与试验方案设计

2.1 数值模式

本文采用的数值模式是美国俄克拉荷马 (Okla-

homa) 大学强风暴分析与预报中心 (the Center for Analysis and Prediction of Storms, 简称 CAPS) 开发的高等区域预报系统 (the Advanced Regional Prediction System, 简称 ARPS)。ARPS 是以风暴尺度系统预测为目的而发展的一个云分辨 率的原始方程组模式[14,15]。在本工作中,模式区 域为 125 km×125 km×15 km, 水平分辨率为 1.25 km, 垂直方向采用拉伸网格, 最低层格距为 100 m, 至8 km 左右格距拉伸至700 m, 8 km 以上 格距保持 700 m 不变。采用跟随网格使得积分区 域随系统一起移动, 侧边界与上下边界分别采用辐 射边界条件和刚壁边界条件,模式在高度 12 km 以 上采用海绵吸收层,以减少重力波的反射。云微物 理过程采用冰相过程^[16],水物质包括液(云水、雨 水)、固(云冰、雪、雹)两种相态,次网格湍流采 用 1.5 阶的 TKE 参数化方案^[17]。鉴于系统发生于 低纬地区,未考虑科里奥利力。关于模式的详细说 明见文献[14,15]。

2.2 模式初始化与试验设计

本文用以初始化模式水平均匀背景场的探空是 来自 TOGA-COARE 试验期间的观测资料。背景 场中,在最低层的 50 hPa 以内可具有 1500 J/kg 左 右的对流有效位能。整个对流层内水汽充沛,相当 位温 θ。在地面处与 2~4 km 层次内相差约 15 K (图 1a)。在最低层 2 km 高度内存在较强的风切 变,切变大致沿东东北方向;低空急流轴大约位于 2 km 高度处,急流轴上方风场随高度存在较弱的 逆切变(图 1b)。该探空代表了热带飑线发生、发 展典型的动力与热力环境^[12]。模式中启动对流的 初始扰动采用柱状的温度扰动结构(半径 5 km,高 1 km 的空气柱,简称扰动泡),柱内温度扰动分布 为:

 $\Delta T = T_0 \times \cos^2(\beta \pi/2) \quad (\beta \leqslant 1, z \leqslant 1 \text{ km}),$ 其中, ΔT 为温度扰动值, T_0 为扰动振幅, $\beta = \sqrt{[(x-x_c)/x_r]^2 + [(y-y_c)/y_r]^2} (x_r = y_r = 5 \text{ km}),$ (x_c, y_c) 为圆柱轴线的水平坐标; x_r, y_r 为圆柱半 径。

为了研究不同初始扰动的影响作用,本研究设计了两组试验,第一组试验为"热泡启动"试验,即温度扰动为正,取 $\Delta T > 0$,另外一组为"冷泡启动"试验,即温度扰动为负,取 $\Delta T < 0$ 。对每组试验中选取三种不同的扰动结构,具体为:(1)试验



图 1 初始化背景场的探空 (引自文献[18]): (a) *T* − ln*p* 图: 温度 (实线)、露点 (虚线) (单位: ^C); (b) 矢端曲线 (单位: m/s),曲线上 的数字为高度值 (单位: km)

Fig. 1 (a) Temperature (solid) and dew point (dashed) curves (units: °C) and (b) hodograph (units: m/s) used to specify the initial condition in the numerical model (quoted from reference [18]). In (b), numbers labeled on hodograph indicate height above mean sea level (units: km)

表1 初始扰动方案

Table 1 Initial Perturbation Schemes

	扰动振	扰动空气	
实验编号	幅 ΔT	柱数量	排列方向
W-CTRL	$+8~{\rm K}$	3	南北 (垂直于低层风切变)
W-SING	$+8~{\rm K}$	1	
W-EWLN	$+8~{\rm K}$	3	东西 (平行于低层风切变)
C-CTRL	-8 K	3	南北 (垂直于低层风切变)
C-SING	-8 K	1	
C-EWLN	-8 K	3	东西 (平行于低层风切变)

CTRL:初始扰动为南北方向排列、具有一定间隔 的三个气柱,作为该组试验的控制试验;(2)试验 SING:初始扰动为单个气柱,其振幅与 CTRL 中 相同;(3)试验 EWLN:初始扰动结构和振幅与试 验 CTRL 相同,但三个气柱的排列为东西方向。相 应这四种试验中采用正、负 ΔT ,构成六个试验,两 组不同的试验分别用"W-"和"C-"表示,具体试 验见表 1。三种不同温度扰动结构分布见图 2。

在"热泡启动"组内,其对流的启动主要是通 过扰动气柱中的暖空气主动上升而完成,其中,在 W-CTRL 中对流由垂直于低层风切变的线状热泡 上升来启动,在 W-SING 中其对流主要是单柱上升 气流而启动,而在 W-EWLN 中,初始热泡排列方 向与低层垂直风切变方向相平行。通过 W-CTRL 与 W-SIGN 试验结果的比较,可考察不同扰动形态 对热带飑线模拟的影响,而 W-CTRL 与 W-EWLN 的比较可分析出初始扰动(线)与环境风场配置对 飑线模拟的作用。在"冷泡启动"组中,对流的启 动主要通过冷气柱的冷出流挤压其前缘的环境暖湿 空气,强迫导致上升气流而完成的。显然,通过 "冷泡启动"与"热泡启动"试验的比较,可反映出 初始扰动性质对热带飑线模拟的影响。

3 飑线结构与演变特征

3.1 总体特征时间演变

为比较各种扰动方案(见表 1)对热带飑线模 拟的有效性,以及不同试验方案中飑线系统的总体 演变特征,图 3 给出"热泡启动"与"冷泡启动"各 试验中最大垂直运动、最大雨水混合比及地面最低 位温扰动随时间的演变情况。由图 3a 可知,在"热 泡启动"的情况下,除了初始阶段对流有一个调整 外(且对每种初始扰动而言模式调整的"spin-up" 时间非常类似),在随后的时间里,所有试验中最 大垂直运动速度基本上保持在 20 m/s,说明对流系 统能得到较好的发展,并且,不同初始扰动方案下 其对流垂直运动在总体上有一定的相似性(图 3a)。 最大雨水混合比随时间演变特征与图 3a 中的垂直 运动变化相类似,由于在各种初始扰动情况下对



图 2 0.5 km 高度"热泡启动"试验初始温度扰动分布: (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN

Fig. 2 Initial temperature perturbation distributions at 0.5 km in "warm bubble initiating" simulations: (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN

流均得到了比较充分的启动,随着时间增加,由 对流持续发展形成的雨水含量都保持相近的最大 值(图 3b)。在飑线发展过程中,其冷池的形成与 降水在地面附近的蒸发有关,最小位温扰动(扰 动幅度为最大)可以反映出飑线低层冷池的强度。 在飑线发展过程中,对流增强,降水增加,地面降 水的蒸发导致低层冷池加强,相应的,位温扰动 随时间不断增强。在不同初始扰动的模拟中, 位 温扰动随时间演变趋势基本相似(图 3c)。由此说 明,对于"热泡启动"情况下的不同初始扰动,尽 管在对流初始阶段其发展有一定的差异, 飑线对 流均得到充分发展, 且总体演变特征基本保持相 当的一致性。

由图 3d 可知, 在"冷泡启动"试验组内, 除 C-CTRL外,其他初始扰动情况下其触发的对流都 没有得到很好发展,其最大垂直速度基本保持在 5 m/s 以下, 直到 4.5 h 后, 才有一定强度的上升 气流发展。对于 C-CTRL, 虽然上升气流的增强较 "热泡启动"缓慢, 但最大垂直速度在2h后保持在 15 m/s 以上, 表明了该初始扰动方案下, 飑线系统 仍能得到充分的发展。同样,在最大雨水混合比随 时间演变也反映出,虽然各个试验中在初始调整阶 段中激发出一定降水,在随后的时间,除C-CTRL 外,其他扰动情况在 4.5 h 前,基本无降水形成 (图 3e)。位温扰动的演变也具有类似的特征,表明 低层冷池在整个模拟期间未能形成(图 3f)。可见, 在"冷泡启动"的情况下,除C-CTRL能较好触发 对流的产生,飑线系统能得到充分发展外,其他扰 动方案均无法正确模拟出飑线系统。

由上述分析可知,"热泡启动"组中的所有扰 动方案与"冷泡启动"组中的 C-CTRL 能较好地触 发并启动对流, 使得飑线系统能够得到充分发展, 但"冷泡启动"组的其他方案中,虽然具备有利于 飑线发展的环境条件,但系统未能发展,体现了启 动对流的初始扰动在飑线系统模拟或预报中的重要 性。为了进一步考察不同初始扰动所触发的飑线系 统演变过程中的异同及其影响作用,下面将对有效 初始扰动触发方案下得到的飑线发展过程中降水、 中层流场及低层冷池等主要特征进行详细的比较。 对"冷泡启动"扰动方案中除 C-CTRL 外其他方案 不再进行讨论。



图 3 "热泡启动"(a~c) 与"冷泡启动"(d~f) 各试验随时间的演变情况:(a、d) 垂直运动最大值;(b、e) 雨水混合比最大值;(c、f) 位 温扰动最小值

Fig. 3 Time series of (a, d) the maximum vertical velocity, (b, e) the maximum rain water mixing ratio, (c, f) the minimum potential temperature perturbation in (a-c) "warm-bubble initiating" simulations and (d-f) "cold-bubble initiating" simulations

3.2 降水特征

一般来说,模式估算雷达反射率可以反映出对 流性系统降水的基本特征。图4给出了各种有效初 始扰动方案下不同时刻1km高度处模式估算雷达 反射率水平分布图。在试验W-CTRL中,至2h 时,对流系统呈现南北线状分布,南北方向延伸约 50km,在对流带后侧,降水大值区(>40dBZ)已 呈现出组织化特征(图4a)。1小时后,对流带已发 展为弓形,相对于对流带南段,较弱降水区向西北 方向延展的趋势非常明显(图略)。到4h时,降水 区范围进一步扩大,对流带弓状特征更加显著,但 降水强度却开始减小,系统已进入减弱时期(图 4b)。在试验 W-SIGN中,其模拟结果与试验 W-CTRL的结果有一定相似性,但系统的对流带出现 弓形结构时间较早,降水范围与对流带的南北伸展 长度较小(图4c)。至4h时,与试验W-CTRL相

125.0

100.0

[©](h)





(g)

125.0

100.0

图 4 1 km 高度处模拟 2 h (a、c、e、g) 和 4 h (b、d、f、h) 模式估算雷达反射率 (等值线间隔: 10 dBZ): (a、b) W-CTRL; (c、d) W-SING; (e、f) W-EWLN; (g、h) C-CTRL

Fig. 4 Model-estimated radar reflectivity (contour intervals are 10 dBZ) at 1 km MSL at 2 h (a, c, e, g) and 4 h (b, d, f, h): (a, b) W-CTRL; (c, d) W-SING; (e, f) W-EWLN; (g, h) C-CTRL

比,试验W-SIGN 中飑线对流与降水的水平范围仍 然要小(图4d)。试验W-EWLN的结果与上面两 个试验结果存在较大的差异,至2h时,对流带虽 为线状分布,但大致呈东西走向,这与初始扰动为 东西向分布有关(图4e)。至4h时,对流带在环境 风场作用下转变为南北走向,同时形成弓形结构, 降水带的横向伸展特征也得以体现, 但飑线的整体 位置向北偏(图4f)。在试验C-CTRL中,2h时对 流带同样呈现线状,但南北方向上尺度较短,模式 估算雷达反射率大值区存在单体特征(图 4g)。1 小时后对流带出现弓状特征,降水区的后向延伸形 态与试验 W-CTRL 中基本一致, 但其延伸程度相 对较弱(图略)。到4h时,对流系统进一步增强, 表现在对流带长度的增加、降水区的进一步横向延 伸、降水强度的增强,但飑线的整体范围要比 W-CTRL 中的小 (图 4h)。

从上面分析可以看出,在不同初始扰动情况 下,虽然飑线系统均具有对流带由线状向弓形的转 化、降水区的后向伸展的演变特征,但其演变过程 具有一定的差异。在试验 W-CTRL 中,系统发展 较为强烈,模拟初期较其他试验中的降水区的尺度 要大,降水强度要强,其整体特征与实际观测最为 接近。在试验 W-SIGN、C-CTRL 中, 飑线大约在 5h小时才开始进入衰竭期,此时反映在模式估算 雷达反射率图上, 表现为降水尺度和强度与试验 W-CTRL中4h时的特征比较接近(图略)。在试 验 W-EWLN 中, 在模拟初期, 系统受初始扰动影 响较大,对流带走向与观测不符,在随后的发展过 程中,系统降水区逐步调整,至成熟期,模拟结果 向实测调整。可见,初始扰动所引起的上升运动强 度对系统的生命周期影响较为显著,而对流系统成 熟时的尺度与强度在很大程度上赖于环境场。

3.3 中层流场结构

从系统降水分布、演变上来看,飑线演变的一 个突出特征在于其对流带由线状向弓形的演化,这 一特征同样在系统上升流结构上表现得非常明显。 在水平剖面上,飑线一般表现为一狭长的上升带。 下面选取飑线对流带特征最明显的中层流场来考察 飑线的水平结构及其演化,水平剖面高度取为 3 km。

在试验 W-CTRL 中,至2h时,对流的上升运动活跃,垂直速度最大值可达 6.19 m/s,对流带大

致呈线状,南北方向延伸约50 km,而这种强烈的 对流显著地调整了水平流场。从相对系统的风场分 布看,对流带南北两端后侧出现两个旋转方向相反 的绕流,系统前方入流在流经上升区时,获得能量 补充,风速增大,而后方入流此时表现得不明显。 1小时后,系统上升强度继续增强,同时对流尺度 进一步增大,其弓形结构已非常明显,对流带两端 的绕流运动的水平尺度增大,出现较大正负垂直涡 度,其中对流带的弯曲程度最大处对应相对系统后 部入流最大值处(图略)。到4h时,对流上升带水 平尺度继续增大,但强度开始减弱,后侧出现许多 分散的下沉区域,此时,飑线的弓形结构呈折尺 状,呈现准二维特征(图 5a)。在试验 W-SIGN 中, 与W-CTRL相比,在2h时,系统发展较弱,对流 带南北伸展范围较小,对流发展对周围环境场的调 整不够明显,这显然与初始扰动的水平尺度与强度 有关(图略)。到4h时,系统已发展为深对流系 统,系统进入成熟时期,这时中层流场特征与试验 W-CTRL比较类似,但系统水平尺度较小(图 5b)。而在试验 W-EWLN 中, 在 2 h 时, 初始扰动 所触发形成的对流带在环境风场的作用下, 走向逐 渐由东西走向向南北走向调整,初始扰动的影响逐 步消除(图略)。在随后的发展中,环境风场的影 响使得飑线系统逐渐向环境场决定的飑线结构演 变,但与W-CTRL相比,其系统对流的强度、位置 与水平尺度仍然有较大的差异(图 5c)。对于"冷 泡启动"中的 C-CTRL 试验, 在系统发展的早期, 其对流运动较 W-CTRL 的明显偏弱, 水平风场的 扰动相对较小(图略),同样到4h时,系统进入成 熟时期,但对流的水平尺度、强度仍然要比 W-CTRL 情况下的弱 (图 5d)。

由上述分析可知,在不同的初始扰动情况下, 飑线发展并不同步,系统所经历的演化过程也不尽 相同,但由于环境场的作用,对流系统到达成熟时 期,其中层流场表现一定的相似性,主要是对流 带的弓状结构、系统后侧较大的垂直涡度调整出 现。

3.4 低层冷池特征

线状对流系统的低层冷池对其发展、演变与成 熟结构形成十分重要。冷池的冷出流与低层环境风 的辐合作用使得对流运动长时间维持。冷池中与浮 力梯度有关的水平涡度和与垂直风切变相关的环境



图 5 3 km 高度处模拟 4 h 垂直速度(等值线间隔: 1 m/s) 与系统相对水平风场(风矢量)分布: (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN; (d) C-CTRL

Fig. 5 Vertical velocity (contour intervals are 1 m/s) and system-relative horizontal wind vector at 3 km MSL at 4 h: (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN; (d) C-CTRL

水平涡度的相对大小决定了上升流的倾斜结构^[6]。 但低层冷池是对流的产物,其发展不可避免地受初 始扰动、对流运动的影响。

图 6 为不同初始扰动情况下低层(0.2 km)4 h 时的位温扰动的分布。在试验 W-CTRL 中,由于 对流系统发展较快,强度较大,相应冷池水平尺度 要较其他试验中的大,冷池最强处位于对流带的北 段,来自对流系统中部和南部的降水物质在风切变 的作用下,汇集于该处,与该处降水共同加强了低 层冷池(图 6a)。与试验 W-CTRL 相比,试验 W-SIGN 中的冷池水平范围与强度相对要小,表明该 方案下飑线系统的发展相对缓慢(图 6b)。而在试 验 W-EWLN 中,由于初始扰动为东西走向,风切 变(包括低层和高层)对低层冷池的调整作用体现 得更为明显,表现在冷池前缘的随时间逐渐向北伸 展(图 6c)。而在试验 C-CTRL 中其冷池范围和强 度与其他试验相比都要小和弱,这与系统初始对流 较弱有关(图 6d)。随后,由环境风场的决定作用, 不同扰动试验中的冷池状态逐渐趋于一致,特别是 在冷池前缘伸展方向和加强区域特征上表现得较为 类似(图略)。

如引言中所述,"低层冷池-垂直风切变"相 互作用是飑线系统重要的发展和维持机制,而冷池 的形成与早期对流活动存在密切的联系。因此,不 同扰动方案下模拟所得的冷池在形成及发展阶段存 在较大的差异,必然会影响飑线的演变过程,而飑



图 6 0.2 km 高度处模拟 4 h 位温扰动 (等值线间隔: 1 K) 分布: (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN; (d) C-CTRL Fig. 6 Potential temperature perturbation (contour intervals are 1 K) at 0.2 km MSL at 4 h; (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN; (d) C-CTRL

线成熟时期的冷池及降水、中层流场的相似性则说 明了环境风场对飑线成熟结构的决定性作用。

3.5 飑线成熟垂直结构特征

在 3.1 节的讨论中可知,对于不同初始扰动所 触发的系统在其成熟时刻具有一定的相似性,本节 进一步讨论不同初始扰动情况下飑线系统成熟状态 的异同。为了消除南北方向上的不均匀性,突出强 对流区内的特征,下面所有剖面图都是在强对流区 范围内沿南北方向取平均所得。

观测表明,飑线在成熟时,其上升流相对于系 统移动方向随高度向后倾斜,这一特征在不同初始 扰动方案的模拟中均得到再现。由图7可知,飑线 垂直运动在垂直方向主要有两个垂直运动大值区: 低层对流带前缘附近的大值区与高层上升流大值 区,两个垂直运动区自前向后排列,构成明显的后倾结构。其中,位于低层的上升中心主要由低空暖湿空气在对流带前缘附近的辐合所致,上层垂直速度大值区则与高层辐散、上升流中水汽凝结潜热释放造成的浮力作用有关。在上升区后下方,均存在弱的下沉流,这种云砧下的中尺度下沉运动主要与层状云区降水的蒸发冷却以及降水物质的拖曳作用有关,它们对飑锋后侧表面冷池的形成和发展具有重要的作用。试验W-EWLN中的上升流结构虽然与观测及其他模拟结果比较一致,但上层上升中心较散乱,后倾程度稍大(图7d)。

就飑线成熟时的气压扰动垂直分布而言,一般 说来,在飑线后部存在一个与低层冷池相对应的低 层中尺度冷高压扰动,它是导致飑线由线形发展成



图 7 系统成熟时跨飑线方向上平均垂直速度 (等值线间隔: 1 m/s) 垂直剖面: (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN; (d) C-CTRL Fig. 7 Vertical cross section of averaged vertical velocity (contour intervals are 1 m/s) normal to the mature squall line: (a) W-CTRL; (b) W-SING; (c) W-EWLN; (d) C-CTRL

为弓形的重要因素之一^[18]。从本文模拟结果看, 不同方案中,该冷高压都能较好地被模拟出,它与 冷池结构相联系,主要是蒸发冷却效应^[19]以及悬 浮水的重量导致^[20]。位于冷高压上方,存在一个 中低压中心。此中低压的形成与上升凝结、下沉蒸 发所造成的垂直浮力梯度有关^[12],它的存在能够 促进低层空气水平加速进入对流系统,带来低层空 气的动量上传^[21],中低压的分布状况对水平流出 场、上升流动具有重要的影响(图略)。

综上分析,不同初始扰动方案的模拟中,飑线 系统在其成熟期,不仅在结构上比较相似,而且均 能再现飑线观测的主要特征,说明控制此类深对流 系统成熟结构,其环境场起着决定性作用。但是, 系统成熟时其结构仍然要受到初始扰动的部分影 响,表现为不同初始扰动方案模拟的成熟结构存在 一定的差别。

4 分析与讨论

通过对在同一背景场中不同初始扰动方案下的 热带飑线模拟结果分析可知,一方面,启动对流的 初始扰动对热带飑线模拟具有不可忽略的影响作 用,扰动必须具备一定的强度才能有效地激发对 流,使得飑线得以充分发展,并且,不同有效的启 动方案下飑线的演变过程存在较大差异;另一方 面,不同扰动方案下的飑线进入其成熟时期后,飑 线系统的水平尺度、形态以及垂直结构均趋于一 致,这体现了环境场对于飑线系统的决定性作用。 本节将着重就这两个问题进行分析与讨论。

不同扰动方案下的飑线演变过程中,最重要的 差异在于系统发展、演变存在时间差,而这一点在 试验 W-CTRL 与试验 C-CTRL 中体现得最为明 显。图 8 为试验 W-CTRL 与 C-CTRL 中降水物质 含量随时间变化的曲线。在对流触发、调整阶段, W-CTRL 中初始对流上升运动较强,相应空气携 带较多的水汽进入上层,产生大量的降水物质,在 初始 20 min 时,水物质最大值已达 32 g/kg。大量 的降水物质加强了下沉流,与降至地面处的降水共 同作用,导致低层温度迅速减小,使得飑线系统伴 生低层冷池迅速成型,而冷池的出流与低层环境风 产生强辐合,使得飑线系统发展强烈。而在C-CTRL 中,初始时刻的上升流相对弱,相应降水物质产生 较少,在 1~2 h 内,冷池强度发展相对缓慢,相应 飑线系统发展相对迟缓。对流与冷池扩张的相互作 用使得对流活动得到加强,而加强了的对 流又会产生更多的降水对冷池产生正反馈作用,冷



图 8 试验 W-CTRL 与 C-CTRL 降水物质最大值时间演变 Fig. 8 Time series of the maximum of total water mixing ratio in W-CTRL and C-CTRL

池强度直接决定了系统所处的生命周期状态^[22]。 这体现了初始扰动性质对于飑线系统的生命周期的 显著影响。

在试验 W-EWLN 中, 触发对流的初始扰动的 强度、尺度均与 W-CTRL 相同, 但扰动排列方向 与 W-CTRL 不同, 模拟的飑线系统演变仍存在明 显的差异,而且其系统成熟结构与状态也表现出一 定的差别。这种差异性在飑线发展过程中逐步减 小,这主要得益于环境场对飑线的决定性的调整作 用。图 9 为试验 W-CTRL、W-EWLN 模拟 2 h 时 高层(5 km)水物质与相对风场的水平分布。在这 两个试验中,水物质及其对应的低层冷池均呈带状 分布,但在试验 W-EWLN 中,该层风场垂直于降 水物质带的分量较 W-CTRL 大得多, 相应水物质 的扩散倾向显著,降水物质的分散导致低层冷池的 加强速度较缓。同时,该层风场使得降水物质较多 地向北输送, 这就决定冷池前缘扩展方向, 突出表 现了风场对系统调整作用。由上述分析可知,飑线 系统发展、结构不仅取决于低层风切变与冷池相互 作用, 高层风对降水物质的重新分布进而对冷池的 调整,也是其重要影响因素之一。

在飑线系统长生命史的发展过程中,不同初始 扰动出发的强度和形态迥异的对流活动及其诱发的 低层冷池通过环境风场的一系列调整,形成多个对 流单体沿与环境低层风切变矢量相垂直的方向排列 的弓状对流带,实现飑线对流的组织化。可见,本



图 9 5 km 高度处模拟 2 h 降水物质 (等值线间隔: 1 g/kg) 与系统相对风场分布: (a)W-CTRL; (b)W-EWLN Fig. 9 Total water mixing ratio (contour intervals are 1 g/kg) and system-relative wind vector at 5 km MSL at 2 h: (a) W-CTRL; (b) W-EWLN

次飑线的组织化形式与 Bluestein 等^[23]和 Bluestein 等^[24]所总结的中纬度飑线的四种组织化模式中的 back-building 类型相似。需要指出的是,除了环境 风场决定性的动力学调整作用外,环境场中充足的 水汽和对流有效位能(CAPE)是飑线系统发展、调 整与组织化的必要条件^[25]。

5 主要结论

本文利用 TOCA-COARE 试验期观测到一次 热带海洋飑线过程的数值模拟,着重研究了启动与 触发对流的不同初始扰动对飑线系统的生成、演变 过程及其成熟结构模拟的影响作用。结果表明: (1)自由性深对流系统的成熟结构对初始扰动不很 敏感,主要依赖于环境场,环境风场决定了系统的 组织化;(2)初始扰动触发的初始上升流的强度、 尺度对强对流系统的生命史、演变影响较大;(3) 线状初始扰动与环境风场的不同配置会影响到系统 的演化过程与成熟结构;(4)采用线状、垂直于低 层环境风垂直切变的"热泡启动"要比"冷泡启动" 更有效。

自由性深对流系统发展、演变与成熟结构主要 依赖于环境场条件,从这一点来说,此类自组织深 对流系统的可预报性得到保证,所以,只要数值模 式的初始条件中具有一定的触发机制,这类系统就 能得到较好的模拟或者预测。但初始扰动触发的 "初始对流"的强度、尺度要对系统演变、生命史产 生一定的影响,例如,采用"冷泡启动"或"热泡启 动",可能对它们产生的早期低层冷池的强度和结 构产生影响,从而导致飑线的发展过程出现差异, 从这一点来讲,这类强对流系统的可预报性将受到 较大的影响,所以,对于这类强自由性深对流系 统,初始扰动能否比较准确地触发、启动对流,相 应能否正确地模拟或预报是早期冷池提高模拟与预 测这类强对流系统能力的关键过程。需要指出的 是,虽然本文通过多种初始扰动方案来启动对流, 研究了不同初始扰动对飑线的形成、发展和成熟结 构的影响,讨论了启动对流的初始扰动在热带飑线 模拟中的作用,但在实际大气中启动对流的初始扰 动是多种多样的,本文仅仅讨论了其中几种典型扰 动形式,需进一步探讨强对流系统的对流系统启动 机制和初始扰动特征。

参考文献 (References)

- [1] Rickenbach T M, Rutledge S A. Convection in TOGA COARE: Horizontal scale, morphology, and rainfall production. J. Atmos. Sci., 1998, 55: 2715~2729
- [2] Houze R A. Cloud cluster and large-scale vertical motions in the tropics. J. Atmos. Sci., 1982, 41: 553~574
- Barnes G M, Sieckman K. The environment of fast- and slow-moving tropical mesoscale convective cloud lines. Mon. Wea. Rev., 1984, 112: 1782~1794
- Chong M, Amayenc P, Scialom G, et al. A tropical squall line observed during the COPT 81 experiment in West Africa. Part I: Kinematic structure inferred from dual-Doppler radar data. Mon. Wea. Rev., 1987, 115: 670~694
- [5] Thorpe A J, Miller M J, Moncrieff M W. Two-dimensional convection in nonconstant shear. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1982, 108: 736~762
- [6] Rotunno R J, Klemp B, Weisman M L. A theory for strong, long-live squall lines. J. Atmos. Sci., 1988, 45: 463~485
- Brooks H E, Wilhelmson R B. Numerical simulation of a low-precipitation supercell thunderstorm. *Meteor. Atmos. Phys.*, 1992, **49**: 3~17
- [8] Lilly D K. Numerical prediction of thunderstorms—Has its time come? Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 1990, 116: 779~ 798
- [9] Jorgensen D P, Matejka T J, LeMone M A. Structure and momentum fluxes within a TOGA/COARE squall line system observed by airborne Doppler radar. Preprints, 21st Conf. On Hurricanes and Tropical Meteorology, Miami, FL, Amer. Meteor. Soc., 1995. 579~581
- [10] Jorgensen D P, LeMone M A, Trier S B. Structure and evolution of the 22 February 1993 TOGA CORAE squall line: Aircraft observations of precipitation, circulation, and surface energy fluxes. J. Atmos. Sci., 1997, 54: 1961~1985
- Parker M D, Johnson R H. Organizational modes of midlatitude mesoscale convective systems. Mon. Wea. Rev., 2000, 128: 3413~3436
- Trier S B, Skamarok W C, LeMone W C. Structure and evolution of the 22 February 1993 TOGA CORAE squall line: Organization mechanisms inferred from numerical simulation.
 J. Atmos. Sci., 1997, 54: 396~407
- Sun T K, Tan Z M. Numerical simulation study of the structure and evolution of tropical squall line, Adv. Atmos. Sci., 2001, 18: 117~138
- [14] Xue M, Droegemeier K K, Wong V. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2000, 75: 161~193

- [15] Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. The Advanced Regional Prediction System (ARPS)—A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part II: Model physics and applications. *Meteor. Atmos. Phys.*, 2001, 76: 143~165
- Lin Y-L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow filed in cloud model. J. Climate Appl. Meteor., 1983, 22: 1065~1092
- [17] Moeng C H. A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary layer turbulence. J. Atmos. Sci., 1984, 41: 2052~2062
- [18] Trier S B, Skamarok W C, LeMone M A, et al. Structure and evolution of the 22 February 1993 TOGA CORAE squall line: Numerical simulations. J. Atmos. Sci., 1996, 53: 2861~2886
- [19] Chin H N, Wilhelmson R B. Evolution and structure of squall line elements within a moderate CAPE and strong low-level jet environment. J. Atmos. Sci., 1998, 51: 2046~2074
- [20] Sanders F, Emanuel K A. The momentum budget and tem-

poral evolution of mesoscale convective system. J. Atmos. Sci., 1977, **34**: 322~330

- [21] Fujtia T T. Precipitation and cold air production in mesoscale thunderstorm systems. J. Atmos. Sci., 1959, 16: 454~466
- [22] LeMone M A. Momentum transport by a line of cumulonimbus. J. Atmos. Sci., 1983, 40: 1815~1834
- [23] Bluestein H B, Jain M H. Formation of mesoscale lines of precipitation: Severe squall lines in Oklahoma during the spring. J. Atmos. Sci., 1985, 42: 1711~1732
- [24] Bluestein H B, G T Marx, Jain M H. Formation of mesoscale lines of precipitation: Nonsevere squall lines in Oklahoma during the spring. Mon. Wea. Rev., 1987, 115: 2179 ~2727
- [25] 张铭, 徐敏. 对流凝结加热对飑线生成和演变的数值实验. 大气科学, 1989, 13 (1): 44 ~51
 Zhang Ming, Xu Min. A simulation study on impacts of convective latent heating on initiation and evolution of squall lines. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (*Scientia Atmospherica Sinica*) (in Chinese), 1989, 13 (1): 44 ~51