

文章编号: 1004-4965 (2005) 04-0368-09

凝结加热和地表通量对华南中尺度对流系统 (MCS) 发生发展的影响

蒙伟光^{1,2}, 李江南², 王安宇², 冯瑞权^{2,3},
古志明³, 闫敬华¹

(1. 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广东 广州 510080; 2. 中山大学大气科学系,
广东 广州 510275; 3. 澳门地球物理暨气象台, 澳门)

摘 要: 通过有无凝结加热和地表通量影响的数值模拟对比研究, 分析了非绝热过程对一次华南暴雨 MCS 发生发展过程的影响。结果表明: (1) 凝结加热对 MCS 的降水影响很大, 在 MCS 发展的各个时期, 如不考虑凝结加热, MCS 的降水强度很快减弱, 无法继续发展。(2) 凝结加热在 MCS 涡旋的形成期最为重要, 在涡旋形成之后, 影响相对减弱。(3) 凝结加热通过对 MCS 发展过程的影响从而也影响了 MCS 环境场中尺度低空急流、高层辐散等中尺度结构特征的形成。(4) 地表感热、潜热通量等边界层非绝热过程对 MCS 的形成也有重要影响; 在暴雨 MCS 发生前期, 地表非绝热过程造成气压下降, 导致华南南部来自海洋的偏南风加大, 辐合加强, 从而使低层的湿度增大, 气层变得更加不稳定, 有利于对流的启动。

关 键 词: 凝结加热; 地表通量; 中尺度对流系统(MCS); 华南暴雨; 数值模拟

中图分类号: P445

文献标识码: A

1 引 言

中尺度对流系统(MCS)是造成中尺度强暴雨灾害性天气最为重要的中尺度系统之一。观测事实表明, 我国南方地区特别是与梅雨锋相联系的暴雨天气过程, 大部分的降水来自锋面附近由中- 尺度和中- 尺度对流云团所组成的中尺度对流系统(MCS)^[1,2]。近年来国内气象工作者通过卫星云图分析和数值模拟方法等对 MCS 进行研究, 对 MCS 发生发展、结构和演变特征有了初步的认识^[3,4]。

应用中尺度数值模式 MM5, 我们曾对 1998 年 5 月 23~24 日发生在华南地区暴雨过

收稿日期: 2004-04-27; 修订日期: 2004-09-10

基金项目: 中国科学院知识工程重要方向项目(ZKXC2-SW-210); 珠江三角洲强对流天气监测预警技术研究项目(2003DIB4J145)资助

作者简介: 蒙伟光(1962-), 男, 广西人, 副研究员, 博士, 主要从事中尺度气象的数值模拟和预报技术研究。E-mail: wgmeng@grmc.gov.cn

程中的一个中尺度对流系统(MCS)进行了成功的数值模拟,得到了一些很有意思的结果^[5]。模拟的 MCS 产生于切变线上的涡旋中,维持了 10 多小时,属中- 尺度系统。其内部的对流活动很强,最大上升速度可达 90 cm/s 以上,并产生了 20 mm/h 以上的降水。MCS 的右侧低层有中尺度低空急流(mLLJ),高层有强的西南风区。整个垂直方向上,MCS 内表现为一个气旋性的涡柱,辐散中心位于 400 hPa 附近。

还有研究发现,除了有利的环境条件之外,MCS 形成和发展与凝结加热以及地表水、热通量等非绝热过程的变化有很密切的关系。关于凝结加热以及边界层非绝热等物理过程对一些包括 MCS 在内的天气系统的影响问题过去已开展了不少的研究^[6-9],如文献[9]在关于中尺度对流复合体(MCC)结构特征的研究中采用是否有积云加热的模拟揭示出一个由于对流凝结加热而在 MCC 上空形成的高压系统。与周围环境气压比较这一相对的高压系统可增大高空的辐散,并引起一种非补偿性的高空质量迁移,结果使低层气压降低,进而引起低空的辐合和气旋性涡度的发展,由此认为与 MCC 相联系的环流特征包括低层的气旋和高层的反气旋等都是对深对流的一种直接响应。其它的一些工作还对与 MCS 相联系的诸如中层涡旋、暖心结构以及后部入流等结构特征与凝结潜热加热的关系进行了研究^[10-12],所得到的结论也是很有意义的。在华南地区,这些物理过程又是如何影响 MCS 发生发展的,本文在原控制试验的基础上,主要通过有无凝结加热和地表水、热通量等非绝热过程影响的数值模拟对比研究,进一步对华南暴雨 MCS 发生发展的问题进行讨论。

2 凝结加热对 MCS 发生发展及结构特征的影响

2.1 敏感试验的方案设计

本文数值试验所使用的中尺度模式和原控制试验的方案设计如文献[5]。初始条件和边界条件以 NCAR/NCEP 的再分析资料作为背景场,通过把南海季风试验(SCSMEX)提供的观测资料客观分析到模式格点上后得到。为了讨论模式降水过程所引起的凝结加热作用,我们把模式方程中由可分辨尺度降水和不可分辨尺度降水所引起的对环境场的凝结加热作用项去掉,也即在模式积分的过程中,尽管两种尺度的凝结过程均可发生,但不考虑它们对环境所造成的增温。另外,针对很多以往在模式积分一开始就去掉凝结加热作用的做法,我们认为这并不能完全准确地描述凝结加热对一个中尺度系统发生发展过程的影响,特别是对于那些离模式积分初始时刻还有一段时间才发展起来的中尺度系统个例来说更是如此。为此在原控制试验(CNTLE)的基础上,我们根据所研究 MCS 的活动特征设计了三个敏感试验方案,分别用于考察凝结加热在 MCS 发展的初始、成熟和减弱阶段中的作用。在每一个方案中模式均从 1998 年 5 月 23 日 00 时(UTC,下同)($t=0$ h)开始重新积分,试验 1(NOCHE-1)积分到 23 日 21 时($t=21$ h)也即是该 MCS 开始发展时,去掉凝结加热作用。而试验 2(NOCHE-2)积分到 24 日 02 时($t=26$ h)和试验 3(NOCHE-3)积分到 24 日 08 时($t=32$ h)后才开始去掉凝结加热的作用,分别用以考察凝结加热在 MCS 发展成熟和减弱阶段的不同影响。

2.2 凝结加热对不同阶段 MCS 发展和结构特征影响的分析

2.2.1 初始发展阶段

分析结果表明, 凝结加热对暴雨 MCS 及其涡旋的发生发展有很重要的作用, 尤其是在涡旋发展的初始阶段, 这种作用更加明显。图 1 分别给出的是 CNTLE 和 NOCHE-1 积分到 $t=22$ h 和 $t=24$ h 的结果。从 $t=22$ h 开始, 伴随着 MCS 的发生, CNTLE 模拟出低层 850 hPa 切变线上有中尺度涡旋的形成 (图 1a, 1c), 表现为华南地区大尺度气旋性环流中有中尺度涡旋的发展。而无凝结加热影响的 NOCHE-1 则没能模拟出这一中尺度涡旋来。图 1b, 1d 是 NOCHE-1 中相应时次也即不考虑凝结加热作用 1 h 和 3 h 后的结果。可以看到, 没有了凝结加热的作用, 与 MCS 对应的中尺度涡旋没能形成, 说明凝结加热的作用对中尺度涡旋的形成是很重要的。值得指出的是由于不考虑凝结加热作用, 除了涡旋的发展受到限制外, MCS 的降水也受到很大影响。从图 b, 1d 可看到, 不考虑凝结加热作用 1 h 后, 尽管大于 10 mm/h 的降水区范围扩大, 但大于 20 mm/h 的降水区范围缩小, 强度也减弱。特别是不考虑凝结加热作用向前积分 2 h、3 h 后这种影响更加突出。从图 1d 可看到 3 h 后已没有大于 10 mm/h 的降水区出现, 降水强度大大减弱, MCS 无法发展。

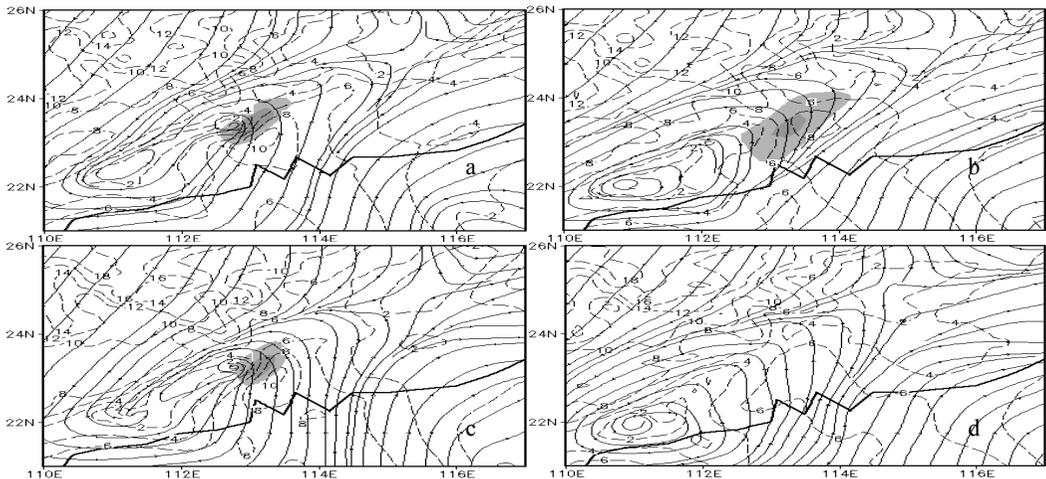


图 1 NOCHE-1 试验积分到 $t=22$ h(a)、 $t=24$ h(c)与 CNTLE 试验积分到 $t=22$ h(b)、 $t=24$ h(d)结果的比较
带箭头实线为 850 hPa 流线, 虚线为等风速线(单位: m/s), 阴影区为模拟雨量 >10、20 mm/h 的区域。

2.2.2 发展成熟和减弱阶段

当 MCS 发展成熟后再去掉凝结加热的作用时, 对 MCS 降水的影响情况与初始发展阶段相似, 降水量也很快减少, MCS 无法继续发展。但不完全相同的是, 凝结加热的作用对已经发展起来的涡旋的影响减弱。NOCHE-2 试验结果表明, 由于此时中尺度涡旋已发展起来, 并与大尺度涡旋合为一体, 水平尺度增大, 没有了凝结加热的作用后, 尽管涡旋的强度有所减弱, 但涡旋环流能保持发展。图 2 给出的是 NOCHE-2 试验在 $t=29$ h 也即不考虑凝结加热 3 h 后与原控制试验 CNTLE 的结果对比。

在 MCS 的减弱阶段, 由于此时 MCS 的降水已经大大减少, NOCHE-3 试验的结果与原控制试验 CNTLE 的结果相差不大, 凝结加热的作用影响变得更小 (图略)。

2.2.3 对 MCS 结构特征的影响

由于凝结加热对涡旋形成和发展所造成的影响, 成熟期在 MCS 右侧出现的中尺度低

空急流 (mLLJ) 的发展也受到了很大的限制。CNTLE 试验的结果表明, $t=22$ h MCS 右侧的 850 hPa 上已有相对强风区的出现 (图 1a), $t=29$ h 强风区的风速已增大到 14 m/s 以上, 形成一中尺度的低空急流 (图 2a), 为系统的持续发展提供了很好的能量来源。从相应的时次看, 如不考虑凝结加热的影响, NOCHE 试验没能模拟出 mLLJ 来 (图 1b,d 及图 2b)。另外, 在 MCS 发展成熟阶段, 无凝结加热作用时, 原在 MCS 上空出现的强辐散场也受到很大影响, 所对应的辐散流场结构大为减弱 (图略)。

图 3 给出的是地面和 400 hPa 上 CNTLE 试验与 NOCHE-1 试验在 $t=22$ h 气压或位势高度场以及风场的差值分布。可以更清楚地看到, 由于凝结加热的作用, MCS 附近低层出现了明显的降压区, 此时 MCS 前沿地面气压下降达到了 -2 hPa (图 3a), 低层等压面高度的下降也伸展到了 850 hPa 以上 (图略)。相应地在高层与 MCS 对应的位置等压面高度升高 (图 3b)。在这种情况下, 由于气压梯度力的作用, 低层形成了明显的风场辐合, 而在高层形成明显辐散, 这对于对流系统的持续发展是非常有利的。从图上可以看到, 低层地面上风场的辐合区主要位于 MCS 的前沿, 表现为一条辐合线。

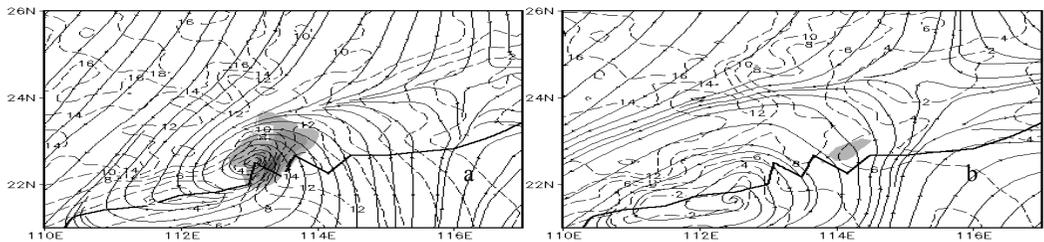


图 2 NOCHE-2 试验(a)与 CNTLE 试验(b)在 $t=29$ h 结果的比较

说明同图 1。

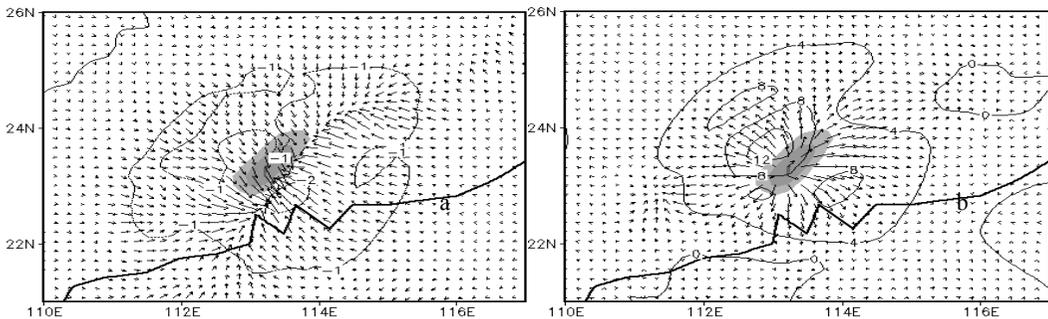


图 3 $t=22$ h 地面(a)和 400 hPa(b)上的气压(间隔: 1 hPa)或高度场(间隔: 4 gpm)以及风场在有/无凝结加热作用两种情况下的差(CNTLE 减 NOCHE-1) 阴影区说明同图 1。

比较 CNTLE 试验与 NOCHE-2 试验也可发现类似的结果。而且有趣的是, 与初始发展阶段的情况相似, 凝结加热所造成的低层辐合在 MCS 发展成熟期也是位于 MCS 的前沿, 也表现为一条辐合线。这与相应雷达回波图 (图略) 反映的强的对流区位于 MCS 前沿相一致。如此看来, 低层由凝结加热作用而在 MCS 前沿形成的辐合线并不是偶然的。

类似地位于风暴前沿低层的辐合区或辐合线在许多观测研究中都有发现, 一般认为是由于风暴下沉气流在低层流向风暴前方而形成的阵风锋表现^[13]。在一些强烈发展的风暴中, 由于其内部作倾斜上升气流中的水汽发生凝结后, 形成水滴落入风暴后部下沉气流中,

并在那里发生蒸发冷却,结果可在风暴后部的地表形成一个边界层中尺度高压,而由于高压中相对较冷空气的向前流出,抬升其前部较为暖湿空气,使上升气流得以再生,为系统持续发展提供了很好的机制。由于我们所研究的 MCS 形成于涡旋中,低层对应为中尺度低压,其后部没发现有明显的中尺度高压,系统后部的下沉气流也不明显,可以认为低层 MCS 前沿的辐合线或强对流区主要是 MCS 向前移动并得以持续发展的一种表现。

通过以上分析可以推断,由于凝结加热对 MCS 发生发展过程的影响,从而也影响系统中尺度结构特征的形成。而由于系统中尺度结构特征的改变,MCS 自身持续发展的条件也发生了变化。从这一角度可以说,MCS 的一些结构特征是系统持续发展所必需的。

3 地表通量对 MCS 发生发展的影响

除凝结加热的影响之外,地表通量等非绝热过程对暴雨 MCS 等中尺度系统的形成和发展也有着重要的影响。地表通量的改变,不仅影响地表能量和水分的平衡过程,也会引起其它一些影响到深对流活动的因子发生变化,从而影响到对流系统的发展。本节通过有地表感热、潜热通量影响的对比试验进一步了解非绝热过程对 MCS 发生发展的影响。

3.1 试验设计

原控制试验 CNTLE 中边界层物理过程采用的是 MRF 方案,地面温度的计算采用了 Dudhia 的 5 层土壤模式,成功的模拟结果说明这些物理过程方案对本次暴雨 MCS 的发生发展具有较好的描述能力。为了进一步研究地表通量在暴雨 MCS 发生发展过程中的作用,我们设计了以下两个试验: NOFLE-1 试验是在原控制试验物理过程方案的基础上,从模式积分一开始就去掉地表通量的作用,而 NOFLE-2 试验是在模式积分到 $t=21$ h 也即 MCS 开始发展时才去掉地表通量的作用。

3.2 与原控制试验的结果比较

对比试验的结果表明,总的来说,地表通量对暴雨 MCS 的发生发展有很大的影响,但这种作用是通过改变 MCS 发生前期环境场的改变,从而影响有利于对流发展的条件来完成的,对流发展起来后,地表通量的影响很小。图 4a, 4b 分别是 NOFLE-1 和 NOFLE-2 试验从 23 日 12 时 ~ 24 日 12 时($t=12 \sim 36$ h)的 24 h 累计降水量。NOFLE-1 的结果表明,如模式积分从一开始就不考虑地表通量,模拟的 24 h 雨量中心最大只有 80 mm 左右,与原 CNTLE 试验的结果(图 4c)相差很大。但如果在模式积分到 $t=21$ h 之后再去掉地表通量的作用,最后得到的结果与原 CNTLE 试验的结果却很相似。两个不同的试验结果说明地表通量在暴雨 MCS 发生发展不同阶段的相对重要性是不同的。类似结果在过去的研究中也发现,如孙建华等^[8]也是在对暴雨 MCS 及环境场进行研究时发现,边界层的物理过程对暴雨中对流系统的启动是不可缺少的,但对对流系统的发展影响却不太明显。

可以推测,由于 NOFLE-1 试验从一开始就不考虑地表通量的作用,影响了环境场的演变,使原有利于 MCS 发生发展条件的建立过程受到破坏,结果无法模拟出 MCS 来。但当模式积分到 $t=21$ h,有利于 MCS 发生发展的环境条件已经建立,对流已开始发展起来,此时再去掉地表通量的作用,对 MCS 的继续发展已影响不大。为了进一步说明这一问题,以下我们对地表通量的具体影响过程作更详细的分析。

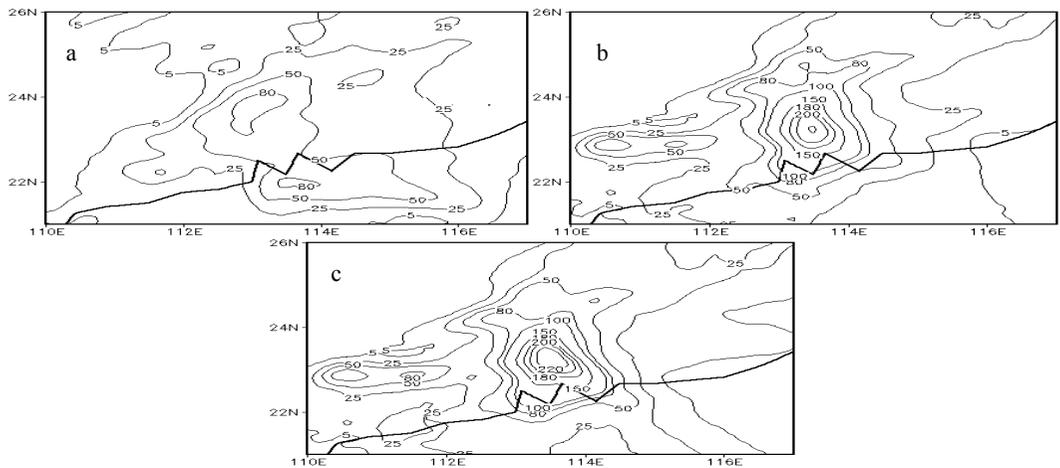


图4 不同试验的24 h (23日12时~24日12时) 累计雨量

a. NOFLE-1; b. NOFLE-2; c. CNTLE。单位: mm; 等值线为 5、25、50、80、100、150、180、200、220。

3.3 地表感热和潜热通量影响过程的分析

首先从图5可以看到5层土壤模式对地表感热和潜热通量日变化的模拟还是十分合理的。图中给出的是原控制试验CNTLE模拟的由MCS附近 3×3 个网格点平均得到的地表感热和潜热通量的时间演变。在夜间,地表感热起冷却作用, $t=24$ h(地方时08时)以后,感热加热有一明显的增长过程,至 $t=30$ h(地方时14时)达到最大(34 W/m^2),然后逐渐减弱(图5a)。地表潜热加热作用在 $t=12$ h之前曾有一个大值,夜间至清晨减小,但与感热加热相似,也是从 $t=24$ h后开始明显增大,最大时可达 57 W/m^2 (图5b)。

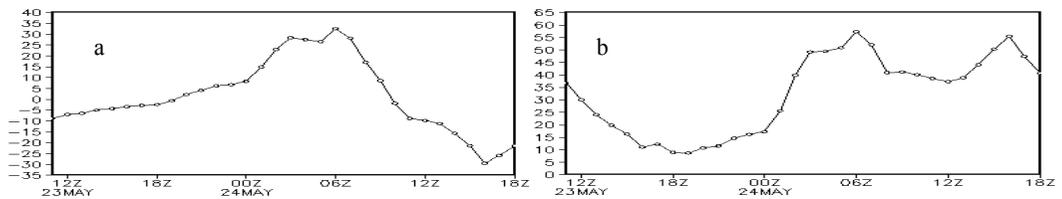


图5 CNTLE模拟的MCS附近 3×3 个网格点平均的地表感热、潜热通量强度的演变

a. 感热通量; b. 潜热通量; 单位: W/m^2 。

尽管看起来MCS是伴随着地表通量的增大而发展起来的,但这并不意味着这种非绝热过程在MCS的发展过程中一直是关键的。这从NOFLE-2对降水的模拟结果已经看到,在对流发展起来以后,即使不考虑地表通量的影响,MCS仍能继续发展。

地表通量主要是通过对前期气压场、流场、温湿场的影响,从而对对流的启动和MCS的形成起到了重要的作用。通过对地表通量水平分布及其对一些气象场影响的分析可以清楚地看到这一点。在 $t=22$ h,控制试验CNTLE模拟的结果表明,尽管此时珠江口附近及其南侧的海面上感热通量为负值,起冷却的作用,但潜热通量为正值,尤其海面上有比较大的潜热加热(图略),其结果是由南海北部伸向华南地区的西南倒槽得到加强(图6a)。图6b是由CNTLE减去NOFLE-1所得到的地面气压差,可以看到地表的非绝热加热作用

在珠江口附近及西部沿海形成了一个降压区，强度可达-3 hPa，倒槽的加深与此有关。进一步的分析表明，降压的形成与由地表非绝热过程引起的近地面层气温升高有联系。图6c是用CNTLE减去NOFLE-1所得到的2 m高度上的气温差，明显地看到与降压区对应，有一由地表非绝热加热而引起的升温区配合。这是合理的，近地面层气温的升高，可使空气膨胀，密度减小，气压下降。地表非绝热加热在华南沿海造成的这一降压作用，使得由海上指向华南地区的气压梯度增大，其结果是来自南海北部的南风增强，并在华南沿海一带形成了气流的辐合。从由CNTLE减去NOFLE-1得到的10 m高处的风场差和2 m高度上的比湿差分布来看(图6d)，由于南风增强而在华南沿海形成的气流辐合同时也使得空气的含水量增大。比湿的增加在华南南部以及南海北部均在2 g/kg以上，最大的地方可达到6~7 g/kg，图上的阴影区只标出了比湿增加大达到3、4、5 g/kg的区域。

近地层温度和湿度的这种变化影响了大气低层的垂直稳定性和垂直运动的发展。图7

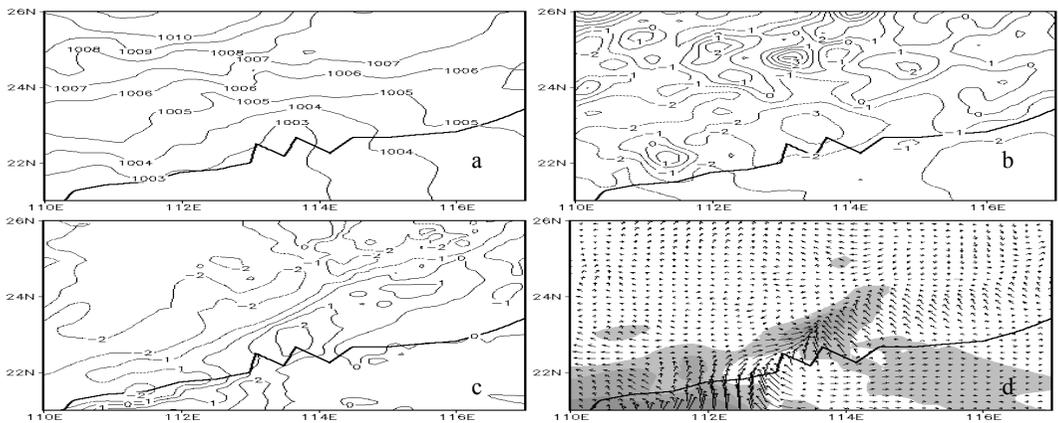


图6 $t=22\text{ h}$ CNTLE 模拟的气压场 (a) 和 $t=22\text{ h}$ CNTLE 减去 NOFLE-1 所得到的气压差 (b) (间隔 1 hPa)、温度差 (c) (间隔 $1\text{ }^\circ\text{C}$)、比湿差 (大于 3、4、5 kg/g) 和流场的差 (d)

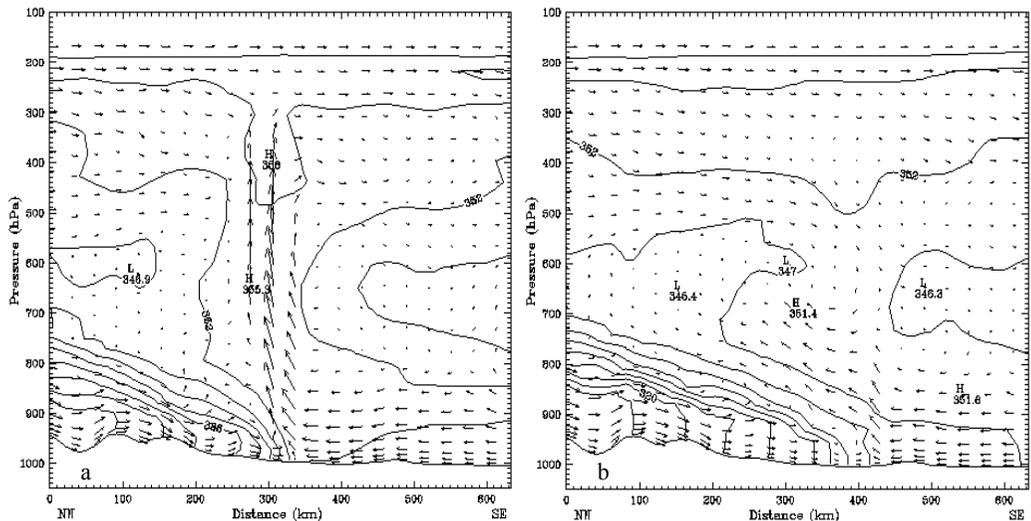


图7 CNTLE(a)和 NOFLE-1(b)试验 $t=22\text{ h}$ 沿暴雨 MCS 发展区域近于南北向的垂直空间剖面图
实线为相当位温 (间隔 $4\text{ }^\circ\text{K}$)，带箭头矢量为垂直环流。

分别给出了 CNTLE 和 NOFLE-1 两个试验在 $t=22$ h 沿暴雨和 MCS 发展区域近于南北向的垂直空间剖面图。原控制试验 CNTLE 中 (图 7a), 冷空气南侧暖区低层空气暖湿, 气层呈对流不稳定 ($\partial\theta_e/\partial p > 0$), 来自南边较强的暖湿空气在低层锋前与冷空气形成辐合, 促使对流启动和发展, 形成了明显的上升运动。MCS 正是在这一位置上发展起来的。不考虑地表感热和潜热通量的作用时, 由于没有了地表的加热增湿作用, 有利于对流发展的条件受到了很大的限制。从图 7b 看到原不稳定的层结已受到破坏, 而且冷空气南侧的偏南风减弱, 北侧的冷空气移动加快, 此时到达了更南的位置。这与前面的分析结果是一致的, 因为此时造成南风加强的因子消失了, 阻挡冷空气南下的阻力减小了, 结果由于南北冷暖空气辐合的减小, 锋前的上升运动发展受到了很大的限制。

4 结果和讨论

通过有无凝结加热和地表通量影响的数值模拟对比研究, 本文对这些非绝热过程对 1998 年 5 月 23 ~ 24 日发生在华南的一次暴雨 MCS 的影响进行了分析, 所发现的一些现象和得到的结果是有意义的, 对华南 MCS 发生发展过程和结构特征研究有一定的帮助。

(1) 凝结加热对 MCS 的降水影响很大, 在 MCS 发展的各个时期, 如不考虑凝结加热, MCS 的降水强度很快减弱, 无法继续发展。

(2) 在 MCS 发展的不同阶段, 凝结加热对与 MCS 相应涡旋的影响不完全相同。凝结加热在 MCS 涡旋的形成期最为重要, 在涡旋形成之后, 影响相对减弱。

(3) 凝结加热通过对 MCS 发展过程的影响从而也影响了 MCS 环境场中尺度低空急流 (mLLJ)、高层辐散等中尺度结构特征的形成。不考虑凝结加热作用时, 中尺度低空急流 (mLLJ) 无法模拟出来, 其上空的辐散场也受到很大影响。

(4) 地表感热、潜热通量等非绝热过程主要是通过对前期气压场、流场、温湿场的改变, 影响对流的启动和 MCS 的形成。在暴雨 MCS 发生前期, 地表非绝热过程造成气压下降, 导致华南南部来自海洋的偏南风加大, 辐合加强, 从而使低层的湿度增大, 气层变得更加不稳定, 有利于对流的启动。而当对流发展起来后, 地表通量的影响不明显。

当然, 数值模拟和对比试验所揭示的这些现象和结果有其局限性, 仍需要实际观测资料和其它个例研究结果来证实。但在目前较高分辨率观测资料缺乏的情况下, 数值试验的对比研究无疑有一定的启示作用, 可从另一角度帮助我们认识中尺度对流系统 MCS 发生发展和结构特征的形成过程。例如, 从试验的结果看, 珠江口附近及南海北部洋面上的潜热通量对本次暴雨 MCS 的形成有很大作用, 加热的结果使来自海洋上的南风加大, 对水汽的输送和华南沿海不稳定层结的形成很有利。对于华南地区的暴雨来说, 是否都是如此, 加强海洋及陆面过程影响的研究很有必要。

参 考 文 献:

- [1] 仪清菊, 徐祥德. 不同尺度云团系统上下游的传播与 1998 年长江流域大暴雨[J]. 气候与环境研究, 2001, 6(2): 139-145.
- [2] 薛纪善. 1994 年华南夏季特大暴雨研究[M]. 北京: 气象出版社, 1999. 68-69
- [3] 王立琨, 郑永光, 王洪庆, 等. 华南暴雨试验过程的环境场和云团特征的初步分析[J]. 气象学报, 2001, 59(2): 115-119.
- [4] CHEN S J, KUO Y H, WANG W, et al. A modeling case study of heavy rainstorms along the Mei-Yu front[J]. Mon Wea Rev,

- 1998, **126**(9): 2330-2351.
- [5] MENG Weiguang, WANG Anyu, LI Jiangnan, et al. Numerical simulation of a mesoscale convective system(MCS) during the first rainy season over South China[J]. *Acta Meteor Sinica*, **17**(1): 79-92.
- [6] 袁金南, 万齐林. 岛屿地形和对流凝结潜热对登陆台风“黄蜂”影响的数值研究[J]. *热带气象学报*, 2003, **19**(1): 81-87.
- [7] 薛洪斌, 钟中, 薛峰. 对流凝结加热的垂直分布与低纬大气的 30~60 天低频振荡[J]. *热带气象学报*, 2003, **19**(4): 397-404.
- [8] 孙建华, 赵思雄. 华南“94-6”特大暴雨的中尺度对流系统及其环境场研究 II——物理过程、环境场以及地形对中尺度对流系统的作用[J]. *大气科学*, 2002, **26**: 633-646.
- [9] PERKEY D J, MADDOX R A. A numerical investigation of a mesoscale convective system[J]. *Mon Wea Rev*, 1985, **113**(4): 553-566.
- [10] ZHANG D L, FRITSCH J M. Numerical simulation of meso-scale structure and evolution of 1977 Johnstown flood II: Inertially stable warm-core vortex and the mesoscale convective complex[J]. *J Atmos Sci*, 1987, **44**(18): 2593-2612.
- [11] ZHANG D L, GAO K, PARSONS D B. Numerical simulation of an intense squall line during 10-11 June 1985 PRE-STORM I: Model verification[J]. *Mon Wea Rev*, 1989, **117**(5): 960-994.
- [12] ROGERS R F, FRITSCH J M. Surface cyclogenesis from convectively driven amplification of midlevel mesoscale convective vortices[J]. *Mon Wea Rev*, 2001, **129**(4): 605-636.
- [13] KESSLER E. 雷暴形态学和动力学[M]. 北京: 气象出版社, 1991. 45-46.

EFFECTS OF CONDENSATION HEATING AND SURFACE FLUXES ON THE DEVELOPMENT OF A SOUTH CHINA MESOSCALE CONVECTIVE SYSTEM (MCS)

MENG Wei-guang^{1, 2}, LI Jiang-nan², WANG An-yu², FONG Soi-kun^{2, 3},
KU Chi-meng³, YAN Jing-hya¹

(1. Institute of Tropical and Marine Meteorology, CMA, Guangzhou 510080, China;

2. Department of Atmospheric Science, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China;

3. Geophysical and Meteorological Observatory Macao, Macao, China)

Abstract: A sensitive numerical simulation study is carried out to investigate the effects of condensation heating and surface fluxes on the development of a South China MCS that occurred during 23~24 May 1998. Results reveal that: (1) Condensation heating plays an important role in the development of MCS. In every different stage, without condensation heating, MCS precipitation is significantly reduced, and quickly dissipates; (2) Condensation heating demonstrates most importantly during the early development stages of MCS vortex, as the vortex develops stronger, the condensation heating effects reduces; (3) By affecting the MCS development processes, condensation heating also influences the formation of MCS mesoscale environment structure features such as low-level jet (mLLJ), upper-level divergence; (4) By changing the antecedent environmental circulation, the surface fluxes also play an important role in the development of MCS. Because of the surface heating, pressure declines over the heavy rainfall and MCS happening regions, which results in the intensification of southerly flows from the ocean along the South China coastline areas, and leads to the enhancement of horizontal convergence and increase of vapor amount in the lower layer. All these make the atmosphere becoming more unstable and more favorable for the convection.

Key words: condensation heating; surface fluxes; mesoscale convective system (MCS);
South China heavy rainfall; numerical simulation