1998 年南海季风爆发时期中尺度对流系统的研究：I 中尺度对流系统发生发展的大尺度条件*

柳艳菊

（中国科学院大气物理研究所，北京，100029；国家气候中心，北京，100081；
中国科学院研究生院，北京，100039）

丁一汇

（国家气候中心，北京，100081）

赵 南

（中国气象科学研究院，北京，100081）

摘 要

南海季风试验（SCSMEX）的观测表明，1998 年南海北部夏季风爆发（5 月 16～20 日）的主要特征是中尺度对流活动的突然爆发和降水迅速增加。文章通过讨论大尺度背景下中尺度对流活动及降水形成的物理条件，揭示了该时段中尺度对流系统与中尺度雨带形成的可能机制：（1）在季风爆发初期华南及南海北部地区对流层低层较高的假相当位温与对流不稳定性、低层西南风辐合和高层的辐散为该地区的中尺度对流系统的发展提供了有利的大尺度热力与动力条件；来自孟加拉湾与副热带高压西侧的西南气流为南海北部强降水区提供了大量水汽，形成了该区深厚的湿层和强水汽辐合；（2）来自东亚中高纬地区几次冷空气活动是对流活动发生的重要触发机制，其作用是使对流不稳定能量迅速释放和对流活动在大范围地区突然爆发；（3）通过对南海季风试验期间安装在东沙岛和实验 3 号科学考察船上的双多普勒雷达资料反演的降水量分析表明，活跃的对流在季风槽和相应的风场切变线作用下，不断地组织并形成一些中尺度对流雨带（MCSs）。1998 年 5 月 15～19 日季风爆发时段内，可观测到约 12 次中尺度降水过程，它们的生命期为 6～10 h 或更长；（4）南海季风槽与低层切变线的建立以及其中中尺度低涡的产生和发展是中尺度对流系统形成与维持的必要条件。

关键词：南海季风爆发，中尺度对流系统，降水。

1 引 言

中国处于东亚季风区，每年的天气气候深受季风活动的影响，特别是在 5～9 月的汛期，大范围地区的降水分布、降水带移动以及旱涝灾害在很大程度上受夏季风控制。亚洲季风可分为南亚季风和东亚季风两大系统[1]，南海季风作为东亚季风系统中重要的一个部分，由于其特殊的地理位置，不仅联系南半球季风和东亚中高纬天气，而且联系西太平洋和印度的季风，因而其发生、发展及演变对东南亚与东亚，尤其对中国的天气气候会产生很大影响。掌握并改善南海地区的天气气候预报对东亚和东南亚的一些国家和地区，尤其是中国、朝鲜和日本的农业和社会经济的发展都有重大的影响①。

南海独特的地理环境通过其热力和动力作用造成南海特殊的环流条件和天气气候特征。南海海面对流一般较强，积状云很多，尤其在夏季风时期，对流强烈发展，积云和积雨云迅速增多[2]。1998 年进

* 初稿时间：2004 年 10 月 10 日；修改稿时间：2005 年 1 月 4 日。
资助课题：中国科学技术部攀登项目 A“南海季风试验”。
作者简介：柳艳菊，女，1972 年生，山西人，博士研究生，主要从事东亚季风研究。
① SCSMEX 项目办公室. 南海季风试验科学报告. 1995.

行的南海季风外场观测试验，其主要目的就是为了更好地了解东南亚和中国南部地区季风的爆发、维持和变化的主要物理过程。第一个加强观测期 IOP (Intensive Observation Period)的重点是监测南海夏季风爆发前后季风的演变及其对华南降水的影响，尤其是南海北部季风槽以及相关的中尺度对流系统活动①。试验结束后，关于南海季风的爆发、演变等问题的研究再次受到科学家们的关注[3~7]。然而由于观测资料的局限性，对于南海季风爆发时期南海北部季风槽以及相关的中尺度对流系统活动的研究还比较有限。SCSMEX 外场观测及研究表明，5 月 15～17 日激烈的对流首先在南海北部突然爆发，相应降水迅速加强，季风雨季在这个地区开始建立[7~9]。Wang[10]根据雷达资料分析了南海季风爆发前期(5 月 15 日)一天的中尺度对流的结构及演变特点，指出中纬度锋系与热带季风气流共同作用对于中尺度对流的演变与结构起了非常重要的作用。Lin 等[11]根据 MM5 中尺度数值模式对南海季风爆发期间(5 月 15～25 日)整个时段中尺度对流系统的发生、发展进行了诊断研究，指出中尺度对流系统的潜热释放会进一步促成新的中尺度扰动的发展。但是上述研究都没有详细讨论南海北部季风爆发期间中尺度对流系统发生发展的全过程，尤其没有研究中尺度对流系统发生后对大尺度场产生的反馈作用及物理机制。这种反馈作用不但通过潜热释放可加强季风槽使副热带高压进一步东撤，而且可进一步引起季风槽以南西南季风的加强与水汽输送的增加，使夏季风的爆发达到盛期。

由于来自热带的西南气流与中纬度天气系统经常在南海北部交汇，因而该地具有与南海中部、南部不同的天气气候条件，从而使北部对流活动发生与发展及其影响条件较南海中、南部更加复杂。为了更详细地了解南海季风爆发期间的中尺度对流系统的发生、发展及反馈作用，本文利用南海季风试验期间高分辨率的再分析及探空等资料对 1998 年南海季风的爆发分 3 阶段进行了分析研究，5 月 11～15 日代表南海季风爆发前，5 月 16～20 日代表南海季风爆发第一阶段(北部爆发)，5 月 21～25 日代表整个南海地区季风大规模爆发时期。

2 资 料

本文主要使用了由日本气象厅(JMA)制作的 1998 年 GAME/HUBEX 一天 4 次的同化分析资料(分辨率为 2.5°×2.5°)与一天 8 次的 TBB 资料(分辨率为 0.25°×0.25°)，这个资料集同化了 SCSMEX 外场观测的大部分资料；1998 年 GPCP (Global Precipitation Climatology Project)逐日降水资料(分辨率为 1°×1°)；1998 年南海季风试验期间台站加密探空资料(一天 4 次或 2 次)；以及 SCSMEX 期间由安装在东沙岛的 C-Pol 多普勒雷达和实验 3 号科学考察船上的 TOGA 多普勒雷达反演的降水资料，该资料时间长度为 5 月 15 日 00:00Z～19 日 24:00Z，10 min 一次；观测范围为以雷达所在位置(20.70306°N，116.72056°E)为中心 200 km×200 km 的正方形区域，分辨率为 2 km×2 km，该资料主要由澳大利亚气象局的 Keenan 博士和中国气象科学研究院的赵南博士提供。

3 中尺度对流系统的分析

1998 年南海季风加密观测期间，实验 3 号科学考察船上的 TOGA 多普勒雷达与东沙 C-Pol 雷达在 IOPs 期间组成的双多普勒雷达观测阵，成功地观测到南海季风爆发和对流发展过程中多个对流系统的演变生命史，还获得了热带飑线、对流云团和水龙卷资料[12]。在季风槽及相应风场切变线的组织作用下，季风爆发时期形成的对流活动主要以中尺度对流系统(MCSs)或中尺度雨团的形式出现，从而造成该地持续性强降水的发生。

3.1 降水过程分析

图 1 给出了 1998 年 5 月 11～15 日、5 月 16～20 日、5 月 21～25 日 3 个时段过程降水量及候平均的 OLR 分布。从图 1a，d 可以看出，季风爆发前，主要的对流活动区(OLR 低值)和降水带集中在赤道附近、中国华东沿海及朝鲜半岛以南地区，南海及孟加拉湾地区则为无云少雨区。5 月 16～20 日，南海北部与中国华南沿海分别出现大范围的 OLR 低值区及强降水中心，说明季风首先在南海北部爆发，对流十分活跃，5 d 过程总降水量一般为 90～150 mm (图 1b，e)。与此同时，在孟加拉湾也出现强对流与降水区。5 月 21～25 日，强烈的对流活动及降水带主要集中在中南半岛、南海中南部及菲律宾以东的洋面上，对应着南海季风的全面爆发(图 1c，f)。

3.2 中尺度对流雨带的分析

根据 1998 年加密观测期间由安装在东沙岛的

C-Pol 雷达和实验 3 号科学考察船上的 TOGA 多普勒雷达反演的 5 月 15～19 日降水资料，分析了该时段中尺度对流雨带的主要特征。由于资料有限，所用资料的长度虽然不能覆盖整个研究时段，但仍不乏一定的代表性，为认识南海季风爆发期间中尺度对流系统的特征提供了一定的科学依据。图 2 是雷达反演的雨量分析，可以看出降水量具有很大的时变率。其中 5 月 15 日降水强度较大，最大雨强高达 9 mm/h，历时 12 h；5 月 18 日和 5 月 19 日降水振幅相对稳定，雨强为 2 mm/h 左右，历时较长，几乎 24 h 全部都有降水。根据每隔 1 h 的雷达反演降水场分析，1998年5月15～19日这段时间内，可观测到

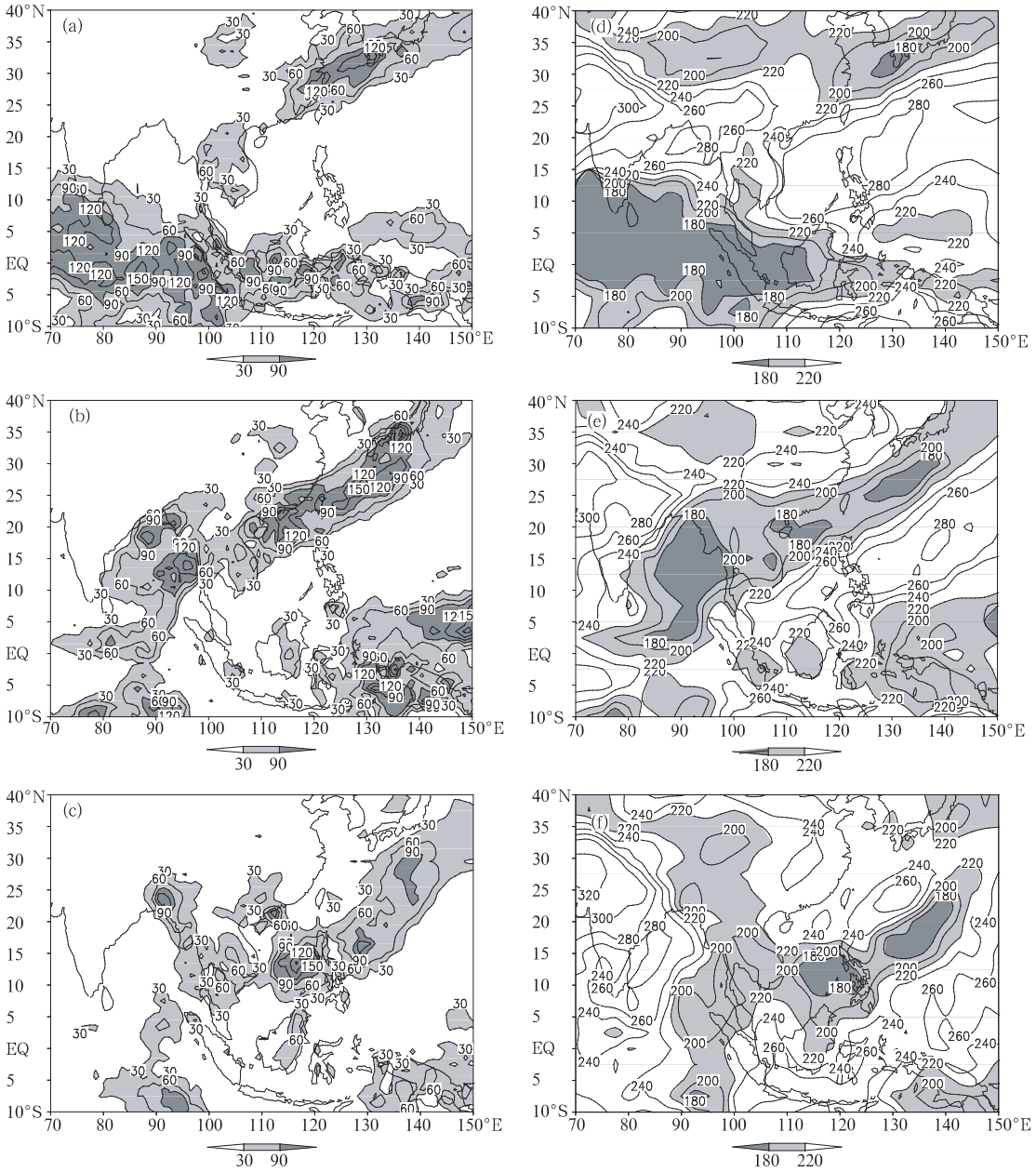


图 1　1998 年 5 月 11～15 日 (a, d)、5 月 16～20 日 (b, e)、5 月 21～25 日(c, f) 3 个时段过程降水量(单位：mm)及平均的 OLR (单位：W/m²) 分布(图 a, b, c：阴影区大于 30 mm，等值线间隔是 30 mm；图 d, e, f：阴影区小于 220 W/m²，等值线间隔是 20 W/m²)

Fig. 1　Distribution of total precipitation (unit: mm) and pentad mean out-going long wave (OLR) (unit: W/m²) for 11－15 (a, d), 16－20 (b, e), 21－25 (c, f) respectively in May 1998 (a, b, c. the values exceeding 30 mm are shaded and the contour interval is 30 units; d, e, f. the values bellow 220 W/m² are shaded and the contour interval is 20 units)

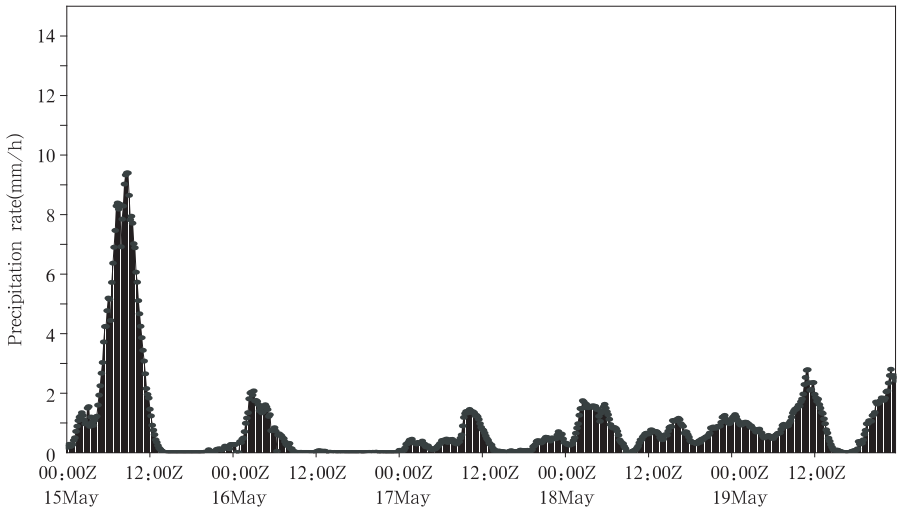


图 2 C-Pol 雷达反演的 1998 年 5 月 15～19 日每隔 10 min 的降水率的时间变化(单位:mm/h)

Fig. 2 Retrieved precipitation rate per ten minutes from C-Pol radar during 15－19 in May 1998 (unit:mm/h)

的降水过程约有 12 次(表 1),它们的生命期为 6～10 h 或更长,根据移向主要分为 3 个类型,即西北向东南移动型(1 号、2 号、3 号、4 号雨团);西南向东北移动型(5 号、6 号、7 号、8 号、9 号雨团)和静止型(10 号、11 号、12 号雨团)。根据雨团形成时间先后编号,把各条雨团的活动情况归纳如下(表 1)。每个类型只给出有代表性的雨团演变图(图 3 a,b),具体情况如下:

(1) 第一型:西北向东南移动型(图 3a,2 号雨团)

根据每小时的降水分布图,可以看出降水集中出现在 15 日 06:00Z～12:00Z,降水强度较大,范围较广,水平尺度最大可达 200 km(图 $3a_3$)。研究表明,5 月 15 日南海地区的降水主要是混合型降水过程,是由来自中纬度的冷空气与来自热带的暖湿气流共同作用的结果[11,12]。

(2) 第二型:西南向东北移动型(图 3b,8 号雨团)

西南向东北移动型雨团主要集中在 18 日 01:00Z～08:00Z,降水时间较短,强度较弱,水平范围较小,不到 100 km。说明南海北部季风爆发早期,南海北部地区西南季风比较小,对流活动和降水量也比较弱。

(3) 第三型:准静止型(10 号雨团)

10 号雨团主要集中在雷达观测区的南部,降水时间长、强度较强、范围广。此时,南海季风在南海

表 1 1998 年 5 月 15 日 00:00Z～19 日 24:00Z 的降水过程

Table 1 Percipitation processes during 00:00Z 15－24:00Z 19 May,1998

雨团序号	生命期(h)	移向	降水强度
1	15 日 00:00Z～06:00Z(6 h)	西北向东南移动	强
2	15 日 06:00Z～17:00Z(11 h)	西北向东南移动	较强
3	15 日 23:00Z～16 日 05:00Z(6 h)	西北向东南移动	弱
4	16 日 05:00Z～08:00Z(3 h)	西北向东南移动	较弱
5	16 日 23:00Z～17 日 09:00Z(10 h)	西南向东北移动	较弱
6	17 日 08:00Z～15:00Z(7 h)	西南向东北移动	弱
7	17 日 16:00Z～18 日 01:00Z(9 h)	西南向东北移动	较弱
8	18 日 01:00Z～08:00Z(7 h)	西南向东北移动	强
9	18 日 09:00Z～19:00Z(10 h)	西南向东北移动	弱
10	18 日 21:00Z～19 日 10:00Z(13 h)	准静止	较强
11	19 日 05:00Z～15:00Z(10 h)	准静止	较强
12	19 日 18:00Z～24:00Z(6 h)	准静止	强

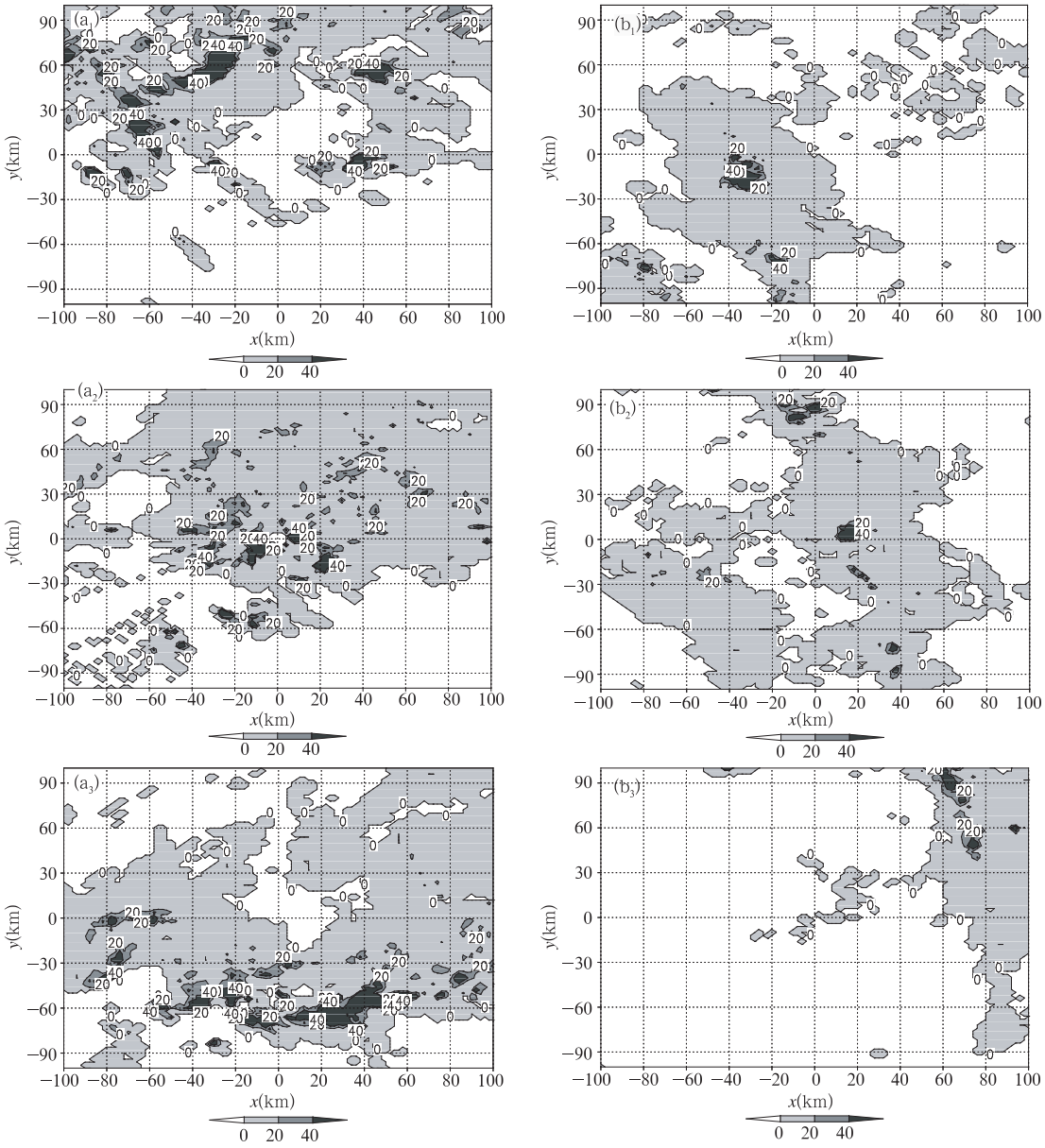


图 3　1998 年 5 月 15 日 2 号雨团和 8 号雨团的雨强分布(单位：mm/h)
(图中所示区域表示以东沙岛的 C-Pol 雷达为中心(20.70306°N,116.72056°E)，
范围为 200 km × 200 km 的正方形；阴影区表示雨强大于 0，等值线间隔为 20 mm/h；a_1～a_3 分别为
5 月 15 日 10:00Z,12:00Z,14:00Z；b_1～b_3 分别为 5 月 18 日 04:00Z,06:00Z,08:00Z)

Fig. 3　Distribution of intensity of main precipitation cells per two hours during 15－19 in May 1998 (unit: mm/h) (The range in the figure is not the real longitude and latitude, which signifies the 200 km multiple 200 km squares at the center of radar location (20.70306°N,116.72056°E). The values exceeding zero are shaded and the contour interval is 20 units. a_1－a_3 are at 10:00Z,12:00Z,14:00Z 15 May and b_1－b_3 are at 04:00Z,06:00Z,08:00Z May18 respectively)

北部大规模爆发，与中高纬南下的冷空气在这个地区交绥，同时强烈的水汽在该地汇合，从而使对流活动较强，因而造成该地持续长时间的降水(图略)。

本文分析的中尺度对流系统类型与 Johnson② 的结论是一致的。

② Johnson, Ding. Mesoscale and Synoptic Processes in Monsoons. The 3rd International Workshop on Monsoons (IWM-III), Hangzhou, 2004.

4 中尺度对流系统形成的大尺度条件

4.1 大尺度背景场的分析

分析5月16～20日850 hPa流场的候平均图(图4a)可见,原先位于斯里兰卡的低压中心已经北抬东伸,有利于越赤道气流在赤道东印度洋地区的加强并向东传经中南半岛到达华南及南海北部地区。西太平洋副热带高压已撤出南海北部地区,但其主体仍控制南海中南部地区,副热带高压南侧的偏东气流经南海中南部地区转向并吹向华南及南海北部地区,两支气流汇合,构成了明显的西南—东北向的辐合线,从而造成明显的低空辐合。200 hPa候平均流场上(图4b),南亚高压已经北上到中南半岛,高压中心值位于15°N,100°E。副热带西风急流入口区位于长江以南、华南上空,在南海北部上空形成偏西风与西北风的疏散流场,从而有利于低层辐合的加强。500 hPa高度场的候平均图上(图4c),在低纬东亚地区为一大范围宽槽区,这表明冷空气在华南和南海北部变得活跃,副热带高压脊线位于15°N附近仍控制着南海中南部与中印半岛地区。因此,副热带高压的这种位置有利于冷暖空气在副热带高压北侧的华南和南海北部地区交汇。上述高低空的动力场配置有利于在低层辐合线附近诱发出强对流天气,从而为对流活动的爆发提供了必要的大尺度环流条件。

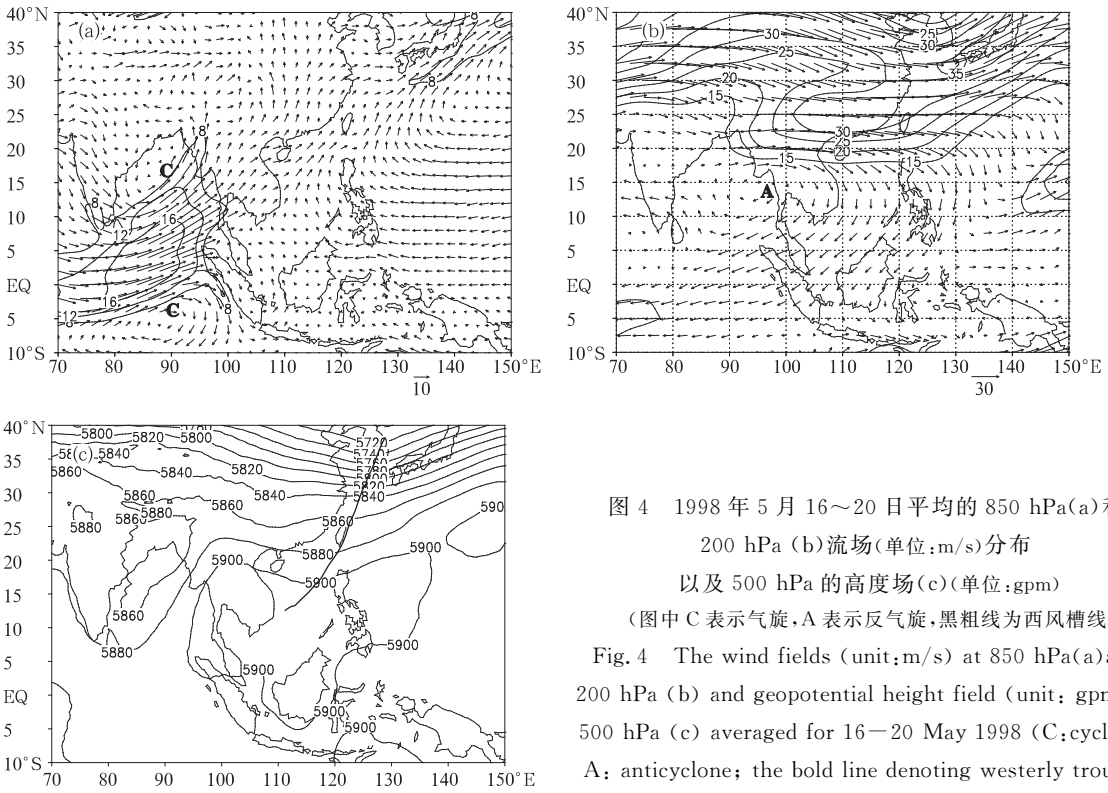


图4 1998年5月16～20日平均的850 hPa(a)和200 hPa(b)流场(单位:m/s)分布以及500 hPa的高度场(c)(单位:gpm)
(图中C表示气旋,A表示反气旋,黑粗线为西风槽线)

Fig. 4 The wind fields (unit: m/s) at 850 hPa(a)and 200 hPa (b) and geopotential height field (unit: gpm) at 500 hPa (c) averaged for 16－20 May 1998 (C: cyclone; A: anticyclone; the bold line denoting westerly trough)

4.2 水汽条件

充沛的水汽是强降水发生的必不可少的条件之一。图5为5月16～20日的水汽通量和水汽通量散度分布。从图5a可以看出,在孟加拉湾和西太平洋副高西侧分别有一水汽湿舌向南海北部地区输送,其中孟加拉湾地区的水汽输送非常强,南海北部地区强水汽中心达到300 kg/(m·s)以上。这表明热带西南季风与副热带高压西侧转向的西南风气流共同作用,在南海北部形成明显的水汽通量输送,为南海北部地区的对流活动爆发与强降水提供了充沛的水汽条件。对水汽通量散度的分析可以发现(图5b),5月16～20日,在孟加拉湾与南海中、北部分别有2个强的水汽通量辐合中心(<0),其值高达(4～5)×10^{-5} kg /(m^2 · s),这与降水场分布是对应的,水汽辐合较强的区域对应着强的降水区。

4.3 位势不稳定层结

对流云的形成除了有利的大尺度条件与丰富的水汽条件外,还必须具有不稳定层结。积云对流是

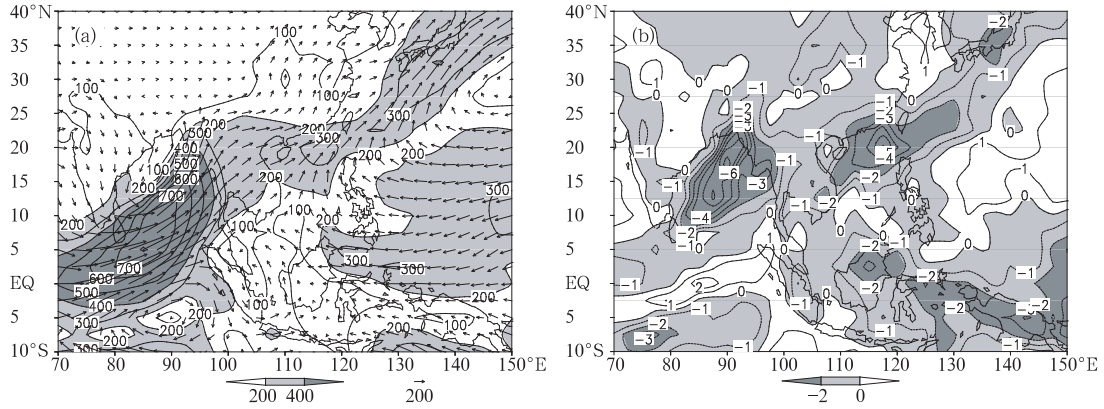


图 5　1998 年 5 月 16～20 日平均的(a) 整层积分的水汽通量(单位：kg/(m・s))及(b)水汽通量散度(单位：10^{-5} kg/(m^2・s))(a. 阴影区大于 200 kg/(m・s)，等值线间隔为 100 kg/(m・s)；b. 阴影区小于 0，等值线间隔为 1×10^{-5} kg/(m^2・s))

Fig. 5　The vertically integrated moisture flux (a. unit: kg/(m・s) and moisture convergence (b. unit: 10^{-5} kg/(m^2・s)) averaged for 16—20 May 1998 (a. the values exceeding 200 kg/(m・s) are shaded and the contour interval is 100 units; b. the values below zero are shaded and the contour interval is 1 units)

在对流不稳定层结下发生的，但是一旦对流发生，通过热量和水汽的垂直输送会改变原有的层结，使大气愈来愈接近湿中性层结。为了使对流进一步发展，大尺度场(如平流和辐射)必须克服积云对流对层结的稳定化作用，使不稳定层结重新建立。图 6 为南海北部(15°～22.5°N，110°～120°E)区域平均的假相当位温的高度-时间剖面。由图可见，5 月上旬在对流层中低层存在一个明显的 θ_{se}(<330 K)极小值，说明存在一明显的干层。在700 hPa以下是

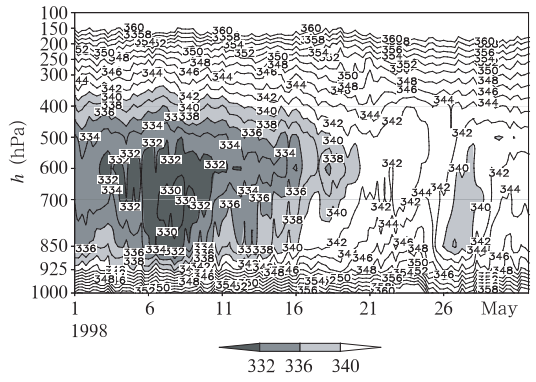


图 6　南海北部(15°～22.5°N，110°～120°E)区域平均的假相当位温的高度-时间剖面

(单位：K；阴影区小于 340 K，等值线间隔是 2 K)

Fig. 6　Height-time cross section of pseudo-equivalent temperature over the northern SCS

(15°—22.5°N，110°—120°E；unit：K；The values below 340 K are shaded and the contour interval is 2 K)

不稳定层、且不稳定度较强，这表明 5 月上旬南海北部大气层结是高度不稳定的，为以后对流的发生提供了有利的层结条件。随着南海北部季风的爆发，季风槽移入南海北部，由此造成的低层辐合(图 5b)触发了该区对流的发展，随着不稳定能量迅速的释放，使大气趋于中性或稳定层结。5 月 26 日，由于大尺度场的作用，南海北部的大气又开始向不稳定状态发展，不稳定层结重新建立。季风在北部爆发以后主要的对流带逐渐移到南海中、南部(图 1)。本文主要研究的是南海北部的情况，这里就不再对此详细讨论。

为了进一步揭示南海北部和华南季风爆发前后大气稳定度的局地特征变化，根据 1998 年南海季风试验期间海口、东沙、西沙、阳江、拉瓦格及香港 6 个具有代表性测站一天 4 次的高分辨率加密探空观测资料，分析了台站相对湿度以及假相当位温随高度的时间变化(图略)。可以看到这些个别台站的局地变化较区域平均的变化更为强烈。季风爆发前，在对流层中层干层的特征非常明显，说明不稳定层结深厚，从地面到 600 hPa 附近为不稳定层。这主要是由于季风爆发前受副热带高压的影响，空气下沉作用所致。随着大尺度季风的爆发，约在 5 月 15～17 日或 5 月 19～21 日左右，降水增强，湿层迅速增厚，地面到对流层高层 300～400 hPa，相对湿度达 80%，大气变得非常潮湿。对流层低层假相当位温剧增，干层迅速减弱，或趋于消失，大气不稳定度明显减

弱。对于东沙、西沙、拉瓦格，干层的消失基本上发生在5月15～17日，对于香港、阳江和海口，干层的消失要比前面3站略晚，大约为5月19～21日(图略)，总体看干层的消失都发生在南海北部夏季风爆发后。以上分析说明南海北部季风爆发前大气已经具备了高度的位势不稳定层结，为季风爆发时中尺度对流云系及降水的发生发展提供了有利的层结条件。

为了深入了解南海北部季风爆发时大气稳定度条件的变化及不稳定能量的释放状况，进一步计算了1998年5月1～31日对流有效位能的分布。对流有效位能 $CAPE$ 的定义为：

$$CAPE = -R\int_{p_0}^{p}(T_p - T_e)\mathrm{d}(\ln p)$$

其中，T_e 为环境温度，T_p 为气块温度。有效位能是 $T-\ln p$ 图中环境曲线和气块过程曲线所包围的正负面积之差，表示环境大气所具有的有效不稳定能量的大小[13]。

从图7中可以看出，对于南海北部，大约从5月11日开始，对流有效位能逐渐增加，到5月17～18日达到一个峰值，为2500 J/ kg。此后，对流有效位能迅速下降，大约在5月23日前后，已经降到最低，接近于零。这说明在季风爆发前，对流不稳定能量在该地区累积，非常有利于强对流天气的发生。季风爆发后，对流有效位能迅速降低，主要对流爆发，它是发生在地面温度降低以及冷空气入侵的时候。另外，根据110°～120°E和15°～22.5°N区域平均

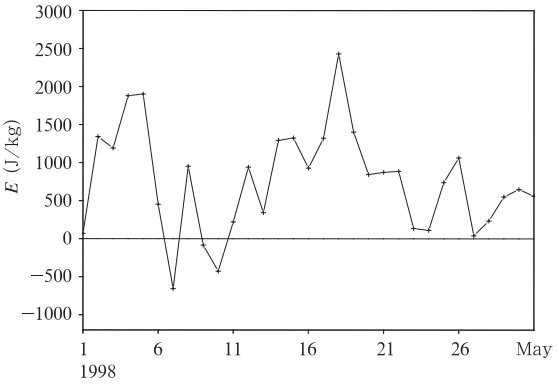


图7 南海北部15°～22.5°N，110°～120°E区域平均对流有效位能随时间的演变曲线
(单位：J/ kg)

Fig. 7 Evolution of convective available potential energy over the northern SCS (15°—22.5°N, 110°—120°E; unit: J/kg)

的对流有效位能的时间-纬度与时间-经度剖面(图8a，b)，可以清楚地看到，季风爆发前在南海北部地区对流有效位能的迅速累积是由热带季风气流的向东传播与中纬度气流的向南传播共同作用造成的，它们在南海北部汇合导致对流有效位能的增加，但由中纬度气流向南传播到南海北部地区造成的对流有效位能似乎贡献更大一些。另外，对流有效位能会受到局地条件的作用而进一步增强[14]。季风爆发后，对流有效位能的释放是非常迅速的，在以后短短的几天时间内，对流有效位能几乎降低为零。

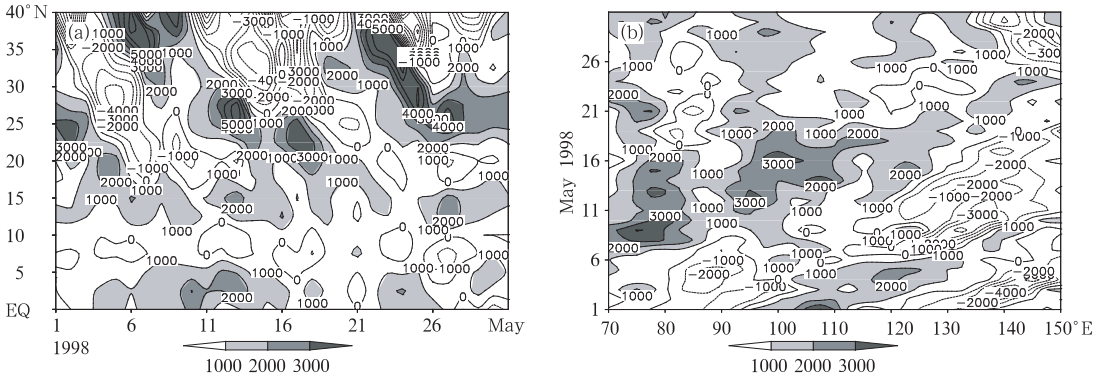


图8 区域平均的对流有效位能的(a)纬度-时间剖面(110°～120°E)和(b)经度-时间剖面(15°～22.5°N)(单位：J/kg；阴影区大于1000 J/kg)

Fig. 8 Latitude-time(a) and time-longitude(b) cross sections of convective available potential energy ($CAPE$) along 110°—120°E (a) and along 15°—22.5°N (b) (unit: J/ kg; the values exceeding 1000 J/kg are shaded)

4.4　上升运动

从南海北部区域平均的垂直速度 ω 的时空演变(图 9a)可以清楚看到 5 月 4 候，上升运动很强，对流层整层都为上升运动($\omega<0$)，最大上升运动值在对流层高层 250 hPa 附近，达 0.12 Pa/s 以上，从而为南海北部中尺度对流的发生、发展提供了动力条件。而在季风爆发前的大部分时段内，从对流层低层到高层 100 hPa 主要为下沉运动。在这种形势下，该地的大气层出现由下沉运动引起的干暖化现象，这可能是干层形成的一个重要原因，干层的形成会抑制不稳定能量的释放，并在对流层下部积累，为未来的强对流天气的发生创造条件[10]。对应水平散度的时空演变图看(图 9b)，5 月 15 日后，对流层呈现明显的低层辐合、中高层基本上为辐散的结构，450 hPa 高度呈一明显的无辐散层。19～20 日无辐散层达 250 hPa，对应着最强的上升运动和强降水的发生。5 月 21 日后，无辐散层高度明显降低，在 650 hPa 附近。此后，低层辐合、高层辐散场的配置一直持续到 5 月 30 日，这样的配置是对流持续发展并形成中尺度对流云系的必要条件。

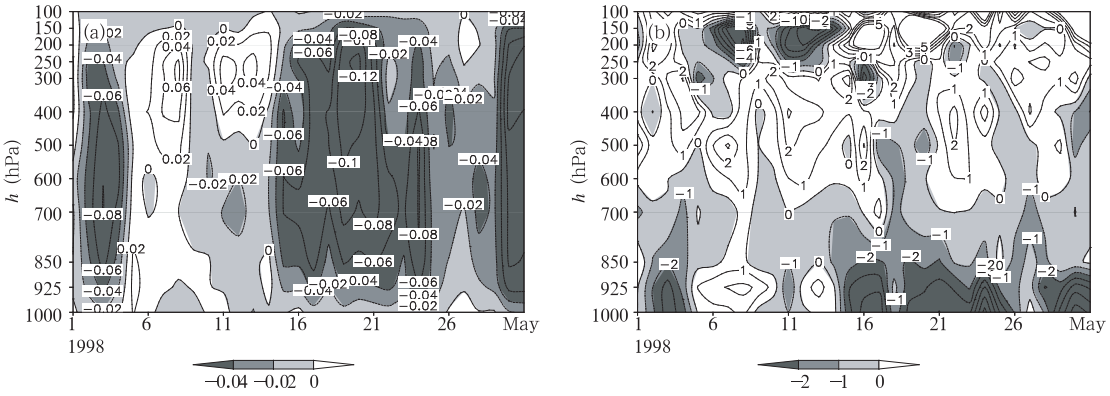


图 9　南海北部(15°～22.5°N，110°～120°E) 区域平均的(a) 垂直速度(单位：Pa/s，阴影区代表上升运动)和(b)水平散度(单位：10^{-6}/s，阴影区代表辐合)的高度-时间剖面

Fig. 9　The height-time cross sections of (a)vertical velocity (unit: Pa/s, the shaded areas denoting ascending motion) and (b) divergence (unit: 10^{-6}/s, shaded areas denoting convergence) over the northern SCS(15°－22.5°N，110°－120°E)

5　中尺度对流系统的触发条件

通过前面的分析可以认为，南海北部夏季风爆发时期已经具备了深厚对流云系发生发展的条件。那么，究竟是什么机制触发了南海北部季风的首先爆发与强对流天气的形成？Ding 等[7] 和 Chan 等[14]的研究表明来自中高纬的冷空气对 1998 年南海季风的爆发起到了明显的触发作用，冷空气侵入的主要作用是抬升了南海北部暖湿空气，导致对流有效位能的释放，触发南海北部夏季风的首先爆发和强对流天气的形成 。图 10 为 110°～120°E 区域平均的 500 hPa 高度场的纬度-时间剖面。从图中可以看出，季风爆发前期或爆发初期，500 hPa 有两次低槽东移进入华南沿海及南海北部地区。5 月 15 日 00:00Z，北半球中高纬有一西风槽东移到中国大陆的东部，槽底伸到华南沿海和南海中北部，西风槽后伴随着冷空气的爆发。5月15日12:00Z或16日 00:00Z，这个西风槽在南海的北部地区(槽底)又分裂出一小槽。由于中纬度冷槽的南侵，从而造成

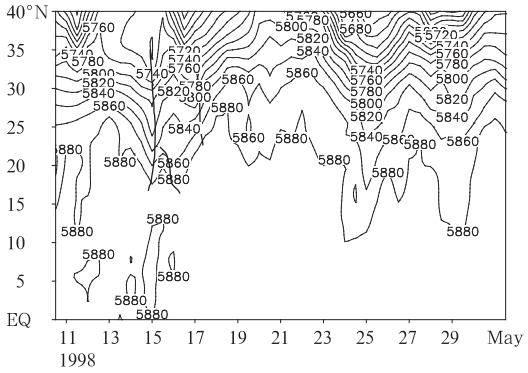


图 10　110°～120°E 区域平均的 500 hPa 高度场的纬度-时间剖面
(单位：gpm；图中粗线为西风槽)

Fig. 10　Latitude-time cross section of 500 hPa height field along 110°－120°E
(unit: gpm; the bold line denoting westerly trough)

南海北部季风爆发前混合型降水的发生(见第3节)。5月16日00:00Z来自中高纬的第二个西风槽再次进入中国大陆东部地区,这个西风槽较前一西风槽偏弱。5月17日,高空冷槽再次作用并向南伸到南海北部地区。这几次连续的冷空气向南侵入,促使不稳定能量释放及不稳定层结迅速消失(图6~8),对南海北部对流活动与降水的爆发起了重要的触发作用,因而中尺度对流系统的形成是中纬度冷空气与低纬热带季风气流相互作用的产物。Ding等[7]详细分析了这次冷空气南侵到南海北部的过程。

海平面气压季风槽的建立和维持与对流活动组成的中尺度对流系统(MCSs)有密切关系。在850 hPa风场、地面气压(SLP)及TBB合成的过程平均图(图11)上,可以看到5月16~20日季风槽已经建立,槽线呈西南—东北走向。南海北部、中南半岛及孟加拉湾均处在一季风槽低压区,华南及南海北部地区位于槽线附近。在季风槽线附近,中尺度对流云系非常活跃,并明显地组织成更大的对流系统。从1998年5月16日~20日地面流场与TBB的逐日演变(图12)可以看出,5月16日~20日在华南沿海及南海北部地区出现了多个中尺度对流云团的活动。这些对流云团的发展都与地面中尺度扰动有关,它们主要向东北和偏东方向移动,并在地面中尺度系统如切变线、辐合线和低涡的组织下形成中尺度对流系统。5月16日00:00Z(图12a),受来自中国大陆向东南沿海移动的地面中尺度低涡的影响,

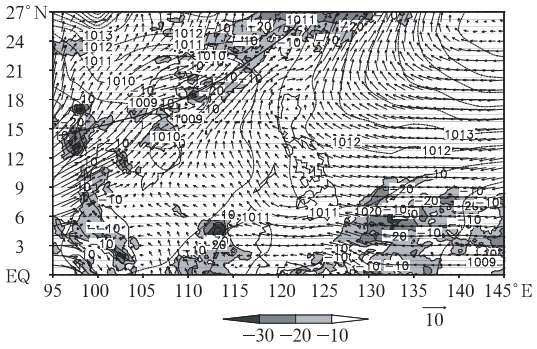


图11 1998年5月16~20日850 hPa风场(箭头)、地面气压场(虚线,单位:hPa)及TBB(阴影区,单位:℃)合成的候平均图
(虚线方框为南海北部区域,粗黑线为季风槽)

Fig. 11 850 hPa wind field (arrow), sea-level pressure (dashed line, unit: hPa) and TBB (shaded area, unit: ℃) during 16−20 in May 1998 (dashed box denoting the region investigated in the northern SCS and bold black line denoting monsoon trough)

在南海北部及华南地区形成一近于东西向的切变线,在切变线的附近都出现了强烈发展的中尺度对流云团,对流云团不断向东移动。17日00:00Z(图12b),随着来自中国大陆低涡移近华南沿海,南海北部切变线发展成近南北向,此时来自孟加拉湾的强暖湿西南气流与副热带高压南侧转向的西南气流辐合加强。相应,南海北部的对流云团达到最强,水平尺度达5个纬距左右,云团移动非常迅速,12 h

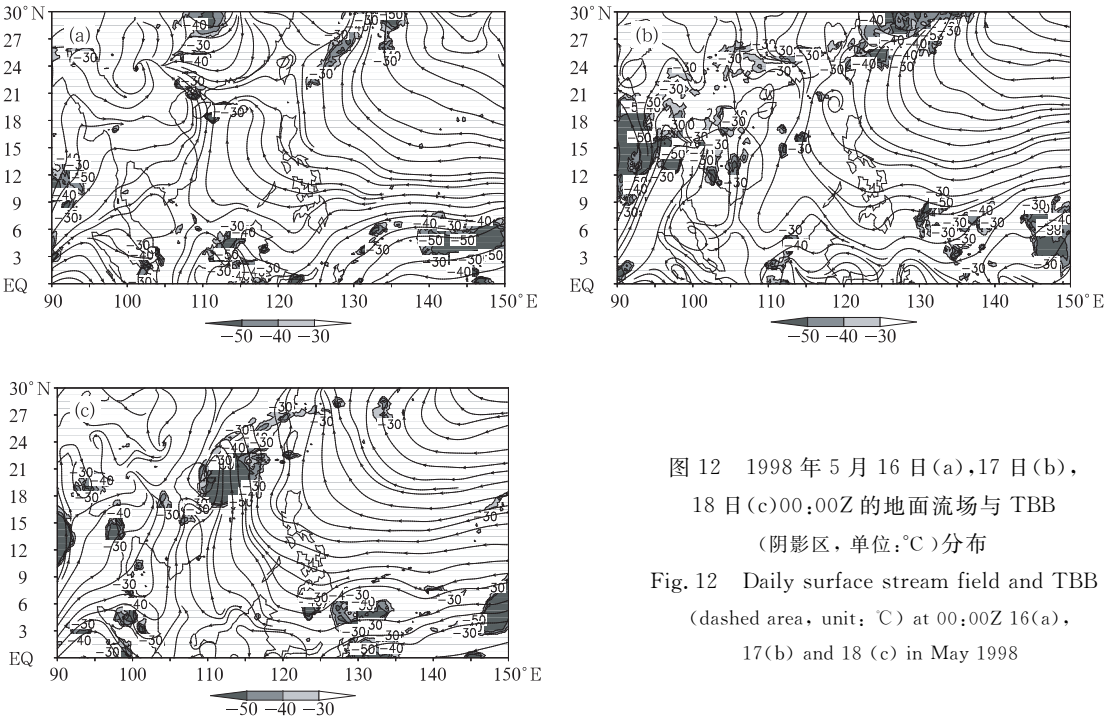


图12 1998年5月16日(a),17日(b),18日(c)00:00Z的地面流场与TBB(阴影区,单位:℃)分布

Fig. 12 Daily surface stream field and TBB (dashed area, unit: ℃) at 00:00Z 16(a), 17(b) and 18 (c) in May 1998

后很快进入海面并维持较长时间。18 日 00：00Z（图 12c），南海北部流场再次向气旋性发展，并伴有低槽出现，对流云团继续从中南半岛向南海北部及华南沿海移入并组织成强中尺度对流系统。

以上分析说明，在有利的大尺度天气形势下，南海季风槽建立，低层切变线与中尺度低涡形成并维持。在这些系统的作用下，对流云团可以组织成一系列的中尺度对流系统和中尺度雨团。

6　结　论

通过对 1998 年南海北部季风爆发时期（5 月 16～20 日）大尺度条件下中尺度对流系统活动及降水形成的物理条件的诊断分析，揭示了该时段中尺度对流系统与雨带形成的可能机制，得到了主要结论如下：

（1）在季风爆发前期的华南及南海北部地区，对流层低层较高的假相当位温与对流不稳定性、低层西南风辐合和高层的辐散为该地区中尺度对流系统的发展提供了有利的大尺度热力与动力条件；来自孟加拉湾与副高西侧的西南气流，形成了南海北部强降水区的主要水汽通道，造成了强降水区深厚的湿层和强水汽辐合；受中高纬两次冷槽的触发作用，南海北部地区中尺度对流爆发并伴有强降水发生。

（2）在北方干冷空气抬升和上升运动的作用下，不稳定能量迅速地释放，造成了大量的激烈对流活动，它们在季风气流中的季风槽与切变线的作用下，不断地组织成一些中尺度对流雨团。1998 年 5 月 15～19 日这段时间内，可观测到 12 次中尺度降水过程，它们的生命期为 6～10 h 或更长。这些中尺度雨团对应于中尺度对流系统，它们实际上是南海北部冷空气与季风气流相互作用的产物。

致　谢：在这里谨向国家气候中心 SCSMEX 资料中心表示感谢；另外，感谢孙颖博士提供了 1998 年 GPCP（Global Precipitation Climatology Project）降水资料；最后感谢张秀芝和阎俊岳研究员对本文提出了宝贵的建议。

参考文献

[1] Tao S Y, Chen L X. A review of recent research of the East Asian summer monsoon in China. In: Chang C-P, Krishnamurti T N, Eds. Monsoon Meteorology. Oxford: Oxford University Press, 1987. 60－92

[2] 梁必骐. 南海热带大气环流系统. 北京：气象出版社，1991. 244pp
Liang Biqi. Tropical Circulation System over the South China Sea. Beijing: China Meteorological Press, 1991. 244pp

[3] 丁一汇，李崇银. 南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用. 北京：气象出版社，1999. 423pp
Ding Yihui, Li Chongyin. Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 423pp

[4] 陈隆勋，刘洪庆，王文等. 南海及邻近地区夏季风爆发的特征及其机制的初步研究. 气象学报，1999，57(1)：16～29
Chen Longxun, Liu Hongqing, Wang Wen, et al. Preliminary study on the characteristics and mechanism of summer monsoon onset over South China Sea and region to it. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1999, 57(1): 16－29

[5] 张永生，吴国雄. 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机理诊断分析 I：季风爆发的阶段性特征. 气象学报，1998，56(5)：513～528
Zhang Yongsheng, Wu Guoxiong. Diagnostic investigations on the mechanism of the onset of Asian summer monsoon and abrupt seasonal transitions over the Northern Hemisphere. Part I: the phase characteristics of the monsoon onset. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1998, 56(5): 513－528

[6] 张永生，吴国雄. 关于亚洲夏季风爆发及北半球季节突变的物理机理诊断分析 II：青藏高原及邻近地区地表感热加热的作用. 气象学报，1999，57(1)：56～73
Zhang Yongsheng, Wu Guoxiong. Diagnostic investigations on the mechanism of the onset of Asian summer monsoon and abrupt seasonal transitions over the Northern Hemisphere. Part Ⅱ: the role of surface sensible heating over Tibetan plateau and surrounding regions. Acta Meteor Sinica (in Chinese), 1999, 57(1): 56－73

[7] Ding Y H, Liu Y J. Onset and the evolution of the summer monsoon over the South China Sea during the SCSMEX field experiment in 1998. J Meteor Soc Japan, 2001, 79(1B): 255－276

[8] Lau K M, Ding Y H, Wang J T, et al. A report of the field operations and early results of the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX). Bull Amer Meteor Soc, 2000, 81: 1261－1270

[9] Johnson R H, Ciesielsk P E. Characteristics of the 1998 summer monsoon onset over the northern South China Sea. J Meteor Soc Japan, 2002, 80: 561－578

[10] Wang J J. Evolution and structure of the meso-scale convection and its environment: A case study during the early onset of the southeast Asian summer monsoon. Mon Wea Rev, 2004, 132: 1104－1120

[11] Lin S C, Kueh M T. A modeling diagnosis of the development of mesoscale convective system over South China Sea during the summer monsoon onset in 1998. TAO, 2003, 14: 369－399

[12] 丁一汇，薛纪善，王守荣等. 1998 年亚洲季风活动与中国暴

雨/洪涝.见:丁一汇,李崇银主编.南海季风爆发和演变及其与海洋的相互作用.北京:气象出版社,1999.1～4
Ding Yihui, Xue Jishan, Wang Shourong, et al. Onset and activities of the Asian monsoon and heavy flooding in China in 1998. In:Ding Yihui, Li Chongyin. eds. Onset and Evolution of the South China Sea Monsoon and Its Interaction with the Ocean. Beijing: China Meteorological Press, 1999.1－4

[13] Peppler R A, Lamb P J. Tropospheric static stability and central North American growing season rainfall. Mon Wea Rev, 1989,117:1156－1180

[14] Chan J C L, Wang Y, Xu J. Dynamic and thermodynamic characteristics associated with the onset of the 1998 South China Sea summer monsoon. J Meteor Soc Japan,2000,78:367－380

A STUDY ON THE MESO-SCALE CONVECTIVE SYSTEMS DURING SUMMER MONSOON ONSET OVER THE SOUTH CHINA SEA IN 1998: Ⅰ ANALYSIS OF LARGE-SCALE FIELDS FOR OCCURRENCE AND DEVELOPMENT OF MESO-SCALE CONVECTIVE SYSTEMS

Liu Yanju

(*Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100029;
National Climate Center, *Beijing* 100081;
Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, *Beijing* 100039)

Ding Yihui

(*National Climate Center*, *Beijing* 100081)

Zhao Nan

(*Chinese Academy of Meteorological Sciences*, *Beijing* 100081)

Abstract

The summer monsoon onset over the northern South China Sea (SCS) in 1998 (May 16 to 20) was characterized by abrupt onset of meso-scale convective activities and rapid increase of precipitation. The possible mechanism for formation of the meso-scale rain belts was revealed through discussing the physical conditions of occurrence of meso-scale convective system and precipitation under the large-scale background: (1) The high pseudo-equivalent potential temperature and convective instability in the lower troposphere, low-level southwesterly confluence and high-level divergence over South China and the northern SCS provided favorable large-scale thermodynamic and dynamic conditions for development of the meso-scale convective systems. The southwest flow from the bay of bengal interacted with that from the subtropical high, which constituted the major moisture channel, thus bringing about deep wet layers and strong moisture confluence; (2) Trigged by two cold troughs from high and mid latitudes, the convective activities over the northern SCS broke out abruptly; (3)Analysis of retrieved precipitation based on the dual-Doppler radar during South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX) indicated that active convection influenced by the monsoon trough and corresponding wind shear line organized and formed continually some meso-scale convective rain belts. During May 15 to 19, about twelve precipitation processes with 6～12 hours life span or more were observed; (4) Under the favorable synoptic conditions, establishment of the monsoon trough and shear line in the low level, as well as occurrence and development of meso-scale low vortex were all necessary conditions for the continuous formation and maintenance of meso-scale convective systems.

Key words: South China Sea monsoon onset, Meso-scale convective system, Precipitation.