

南海季风爆发前后大气层结 和混合层的演变特征^{*}

柳艳菊 丁一汇

(国家气候中心, 北京 100081)

摘 要 根据南海季风试验期间“科学 1 号”和“实验 3 号”在加密观测期间所得到的 1 天 4 次的探空观测资料, 分析了南海季风爆发前后大气层结和混合层的演变特征。结果表明: (1) 南海北部季风爆发的日期是 5 月 17 日, 而南海南部季风爆发的日期是 5 月 21~22 日左右, 季风爆发在南海北部表现出与南部明显不同的特征, 其突然的爆发性更为显著。(2) 南海季风爆发前后, 混合层高度的变化在南海南部与南海北部有明显的不同。在季风爆发前, 都存在着明显的混合层, 但其厚度不同。南海南部混合层的高度变化在 930~970 hPa 范围内, 而南海北部偏高, 约为 900~980 hPa。随着季风的爆发, 混合层厚度减小, 甚至消失。(3) 南海季风爆发前后对流层中低层表现出明显不同的层结结构。季风爆发前, 空气比湿较小, 大气稳定, 混合层顶高度较高, 在对流层中存在一个明显的干层。随着季风的爆发, 干层逐渐减弱, 或趋于消失。这主要是由于季风爆发后, 西南季风把大量暖湿空气输送到南海地区, 对流活动增强, 大气呈现不稳定层结并伴有降水发生的结果。

关键词: 南海季风爆发; 大气层结; 混合层

1 引言

动量、热量和水汽的海气交换是研究气候物理学和气候变化的重要内容之一。在许多外场试验中都包含有海气交换的观测试验, 例如在 TOGA-COARE 试验(热带海洋全球大气-耦合海洋大气响应试验)期间进行了专门的海气界面通量观测, 获得了大量西太平洋暖池区有关海气通量的资料和信息^[1,2]。由于资料的缺乏, 在中国东部季风区尤其是南海地区, 这方面的研究还比较少。1998 年 5 月 1 日~8 月 31 日进行的南海季风试验(SCSMEX)曾在科学考察船“科学 1 号”和“实验 3 号”和海岛(如西沙)附近进行了连续的通量观测, 获得了大量的海气交换资料, 在试验期间共施放了近 500 个 GPS 探空设备, 测得每隔 10 秒的大气要素垂直分布。试验结束后, 阎俊岳等^[3]利用西沙海气通量观测塔脉动资料分析了季风爆发期动量、感热通量及湍流强度等一些统计特征; 孙即霖等^[4]分析了 1998 年夏季风爆发前后南海海气热通量主要特征; 白学志等^[5]研究了南海季风爆发前后南海南部 SST 和海表热通量变化机制分析。上述这些研究, 为了解南海季风爆发期间海气相互作用的过程提供了一定的科学依据。为了进一步揭示南海季风爆发的特征, 本文利用观测期间“科学 1 号”(南海南部)与“实验 3 号”(南海北

部)考察船所获得的1天4次的高分辨率探空资料,从大气热力学变化的方面着重分析了南海季风爆发前后大气层结与混合层的时空演变特征,揭示了一些有意义的结果。

2 资料及混合层的定义

本文所用的资料包括1998年南海季风试验期间(1998年5月5日~5月25日,6月5日~6月25日)“实验3号”(20°29'39"N, 116°57'48"E)和“科学1号”(6°15'N, 110°E)科学考察船所观测到的1天4次间隔10秒的高分辨率探空资料,其中包括气压、温度、位势高度、相对湿度、露点温度、风向、风速。

边界层中的空气明显地受地面摩擦或热力作用的影响,因而在某个高度的稳定层下会出现显著的垂直混合,造成混合层,其特征是此层中的一些物理量如位温(θ)、比湿(q)、虚位温(θ_v),假相当位温(θ_{se})保持随高度近于不变。一般混合层顶为云底,上述要素表现明显的不连续性^[6]。用虚位温可以很好地说明水汽密度对浮力的影响,而 θ_{se} 则包含了水汽潜热的影响^[7]。Nitta和So^[8]认为混合层可以进一步分为两层,其中上层为云层,位温垂直梯度较小,而在低层位温保持随高度近似不变^[6]。在云层的顶部是逆温层, θ 、 θ_{se} 、干静力能(s)和湿静力能(h)随高度的增加迅速增加,而 q 则随高度增加迅速减小。一般在有降水云及热带扰动的情況下,混合层的厚度显著减小。Bond^[7]曾用虚位温(θ_v)来确定混合层,认为在混合层中 θ_v 是一常数。吴晓曦等^[9]用 q 、 θ_v 、 θ_{se} 讨论了1991年江淮暴雨期地气通量与混合层结构。本文正是在前人工作的基础上,综合讨论了1天4次 θ 、 q 、 θ_v 、 θ_{se} 、 s 、 h 和 h_s (饱和湿静力能)的变化来研究南海季风爆发前后大气层结和混合层的结构及演变特征。

3 南海季风爆发前后风场的演变特征

图1为850 hPa南海南部与北部纬向风的高度-时间剖面图。对于南海南部,从图1a可以清楚看到,5月12~13日对流层上层随着高层反气旋向北建立,西风气流明显地转变为东风气流。而在低层,东风气流向西风气流的转变要晚些,大约发生在5月15日,完全转变成西风的时间是在21~22日左右。由于季风爆发一般是与低层气流的活动相联系,因此,5月21~22日左右(5月第4候)可以作为1998年南海南部季风爆发的日期。季风爆发在南海北部表现出明显不同于南部的特征,其突然的爆发性更为显著(图1b)。在5月上旬,低层是弱的东风,中层是西风,这代表了冬季的风场特征。从13日开始,随着对流层上部南亚高压的建立和北上,在南海地区北部,在高压的下游建立起一个深槽,槽前盛行强西风。可以看到高层的西风明显加强并迅速地向下游伸展,结果在15日前后基本上整层盛行西风气流,特别是17日以后,高层西风再次下伸。与此同时,受孟加拉湾和中印半岛东伸的热带西风影响,低层迅速地建立了较强的热带季风西风层,这个时刻被认为是南海北部季风爆发时期。但可以知道,由于整层的西风层是由来自中纬度副热带的高层西风与低层热带季风相结合的结果,因而南海北部季风的爆发是一种中低纬相互作用的混合性爆发过程。5月22日以后季风曾有短暂的中断,到25日又建立了深厚的西风层,季风完全在南海盛行。

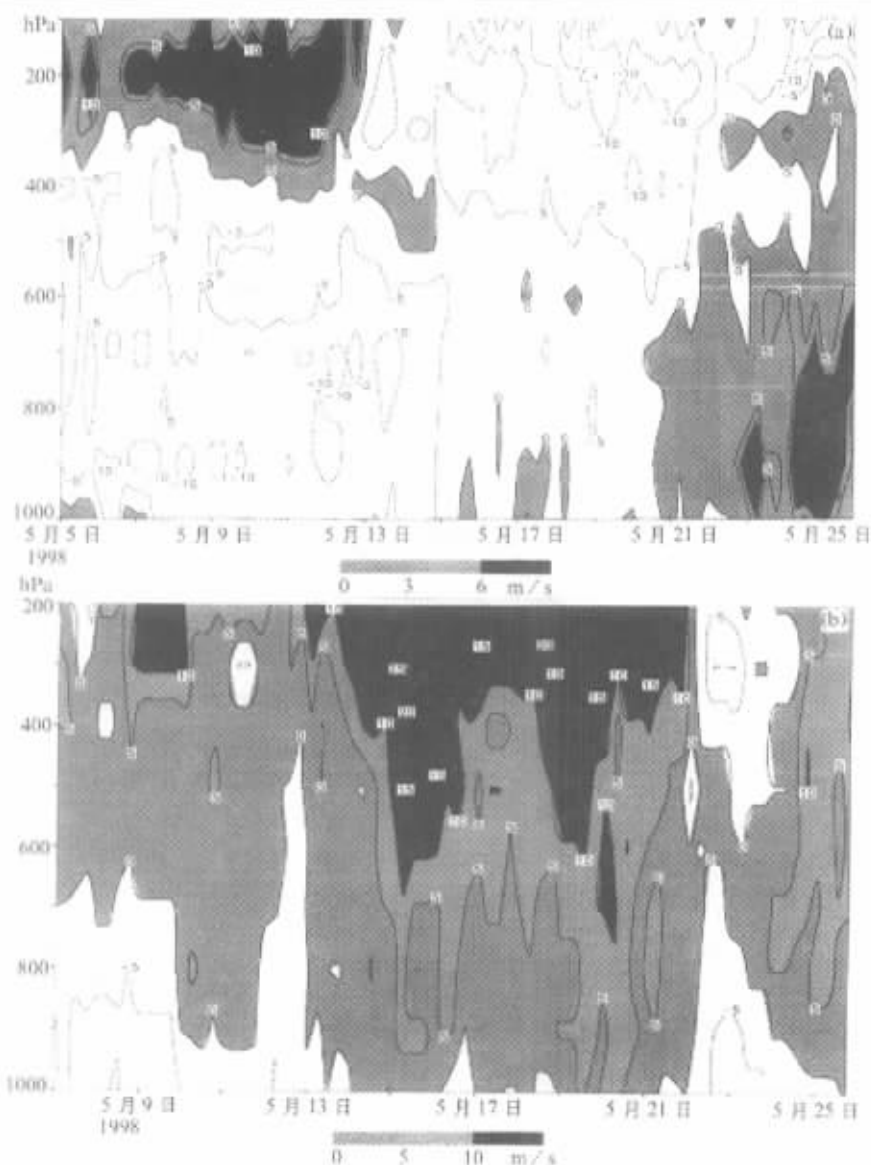


图1 850 hPa 南海南部 (a) 与北部 (b) 纬向风的高度-时间剖面图
阴影区代表西风, 单位: m/s

4 南海季风爆发前后混合层的结构分析

我们分析了南海季风爆发前后“科学1号”与“实验3号”1天4次的探空资料, 计算了每个时刻大气层结的分布并分析了每6小时的演变。得到了十分有意义的结果。但由于图量很大, 不能详细显示, 这里选择有代表性的图例给以说明。图2与图3给出了5月14、17和23日00时南海南部与5月12、15和17日00时南海北部 θ 、 θ_v 、 θ_{se} 随高度变化曲线。对于南海南部, 从5月14日00时图上可以看到, 混合层顶高度为约920~930 hPa, 此时对应南海南部对流层低层的东风状态。在930 hPa以下混合层中,

θ 、 θ_v 保持随高度不变。 θ_{se} 除在近地面层保持不变外, 一般则随高度递减, 在 600 hPa 达最小值, 因而在此层以下为位势不稳定层结。5 月 17 日左右在南海南部, 低层有微弱的西南风出现, 混合层的高度从 930 hPa 降低到 950 hPa, 这在 5 月 17 日 00 时的 θ 、 θ_v 、 θ_{se} 曲线上有很好的反映。5 月 23 日以后, 西南季风开始在南海南部地区盛行, 混合层高度由 950 hPa 降低到约 960~970 hPa 左右。对比图 2, 从图 3 可以清楚看到, 南海北部 5 月 12 日 00 时在 890 hPa 以下, θ 、 θ_v 几乎不随高度而变化, 这表明此时存在着一个明显的混合层。在混合层中, θ_{se} 随高度递减直到 600 hPa, 说明这里中低层的大气是位势不稳定的。5 月 15 日 00 时, 可以清楚地看到混合层的高度为 910 hPa, 这与风场的变化情况相对应。随着季风在南海北部的爆发, 该地的对流活动与降水明显发展, 这在 5 月 17 日 00 时 θ_{se} 曲线上有很好的反映, 这时只在 980 hPa 以下存在一浅薄的混合层。上述分析表明, 混合层高度的变化明显受风场改变的影响, 当东风气流转变为西南风气流时, 混合层明显减弱。这表明随着西南季风入侵南海地区, 把大量暖湿空气输送到该地, 对流活动较强并伴有降水的发生。由于大气中的能量迅速释

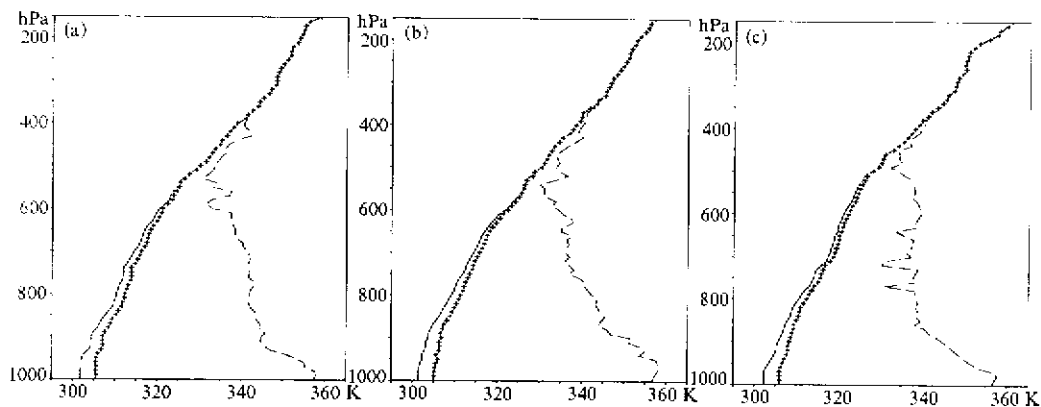


图 2 南海南部 5 月 14 日 00 时 (a)、5 月 17 日 00 时 (b)、5 月 23 日 00 时 (c)
 θ (实线)、 θ_v (+线)、 θ_{se} (虚线) 随高度变化曲线

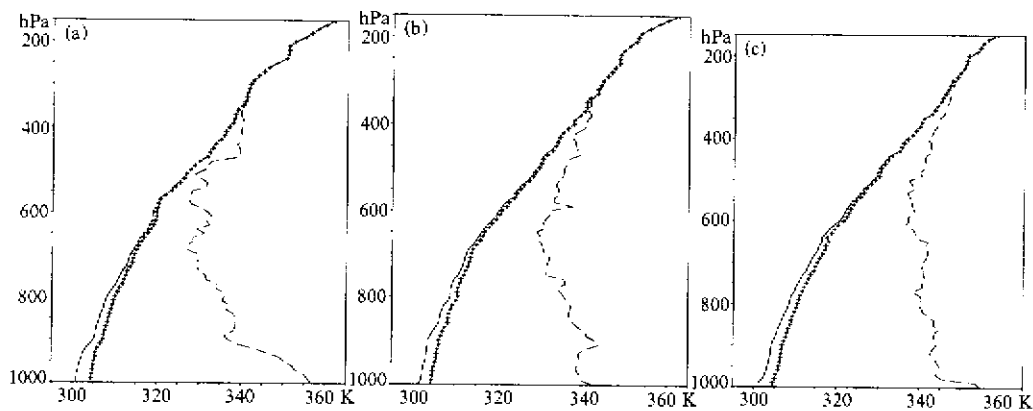


图 3 南海北部 5 月 12 日 00 时 (a)、5 月 15 日 00 时 (b)、5 月 17 日 00 时 (c)
 θ (实线)、 θ_v (+线)、 θ_{se} (虚线) 随高度变化曲线

放, 混合层高度减弱甚至消失。

图 4 与图 5 为南海南部与南海北部假相当位温 θ_{se} 与比湿 q 的时间-高度剖面图。从图 4a 可以清楚地看到, 早在 5 月上旬, 南海的南部对流层中低层就有一小于 320 K 的低值中心, 这个干层与副热带高压的控制有关。以后干层逐步向上抬升到 600~500 hPa, 这种不稳定层的抬高是由什么环流系统的变化造成的, 目前还不清楚。5 月 19 日以后, 这种干层又降低到 750~700 hPa, 这是南部季风爆发前的特征。5 月 23 日以后干层在中、低层消失, 标志着季风的全面爆发。对比 q 的变化, 不难发现 5 月上旬, 南

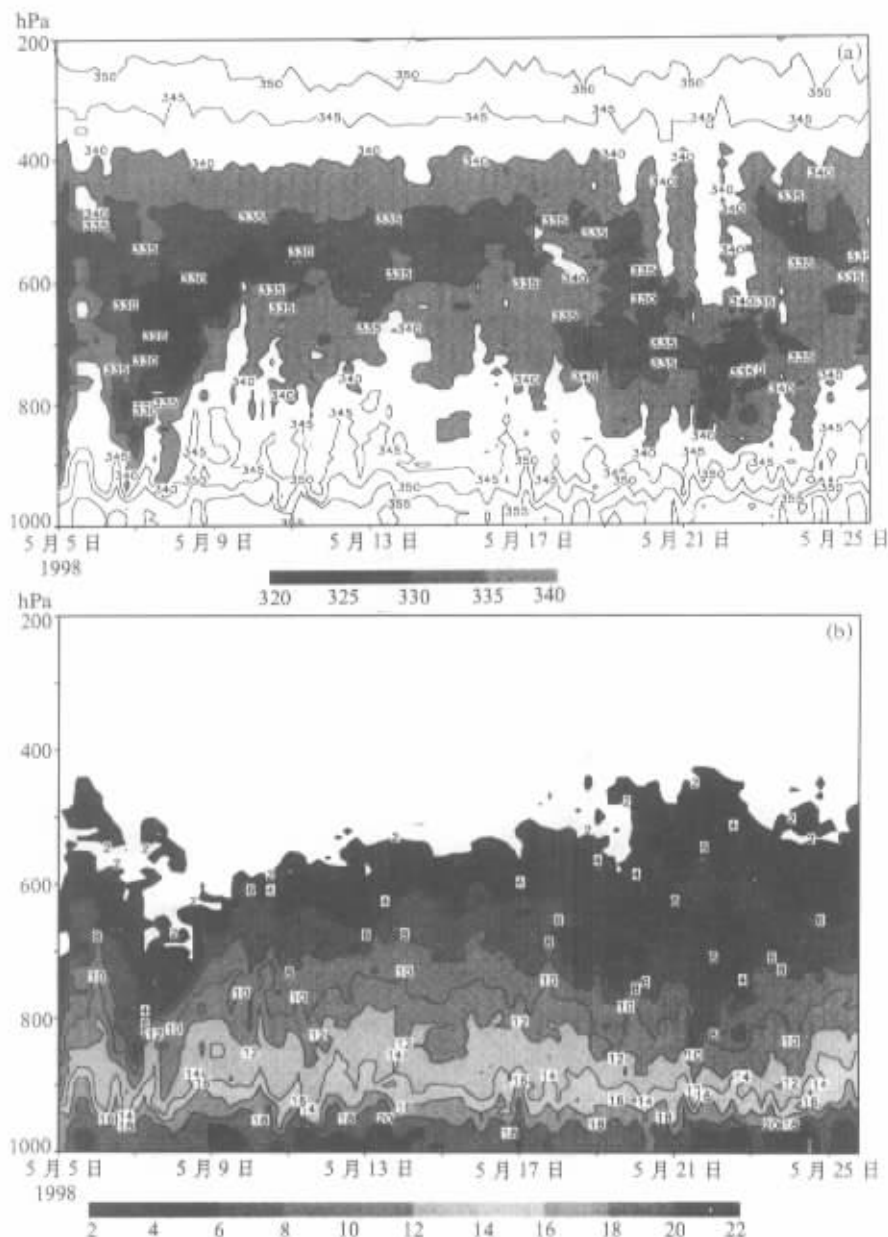


图 4 南海南部 θ_{se} (a, 单位: K) 与 q (b, 单位: g/kg) 的时间-高度剖面

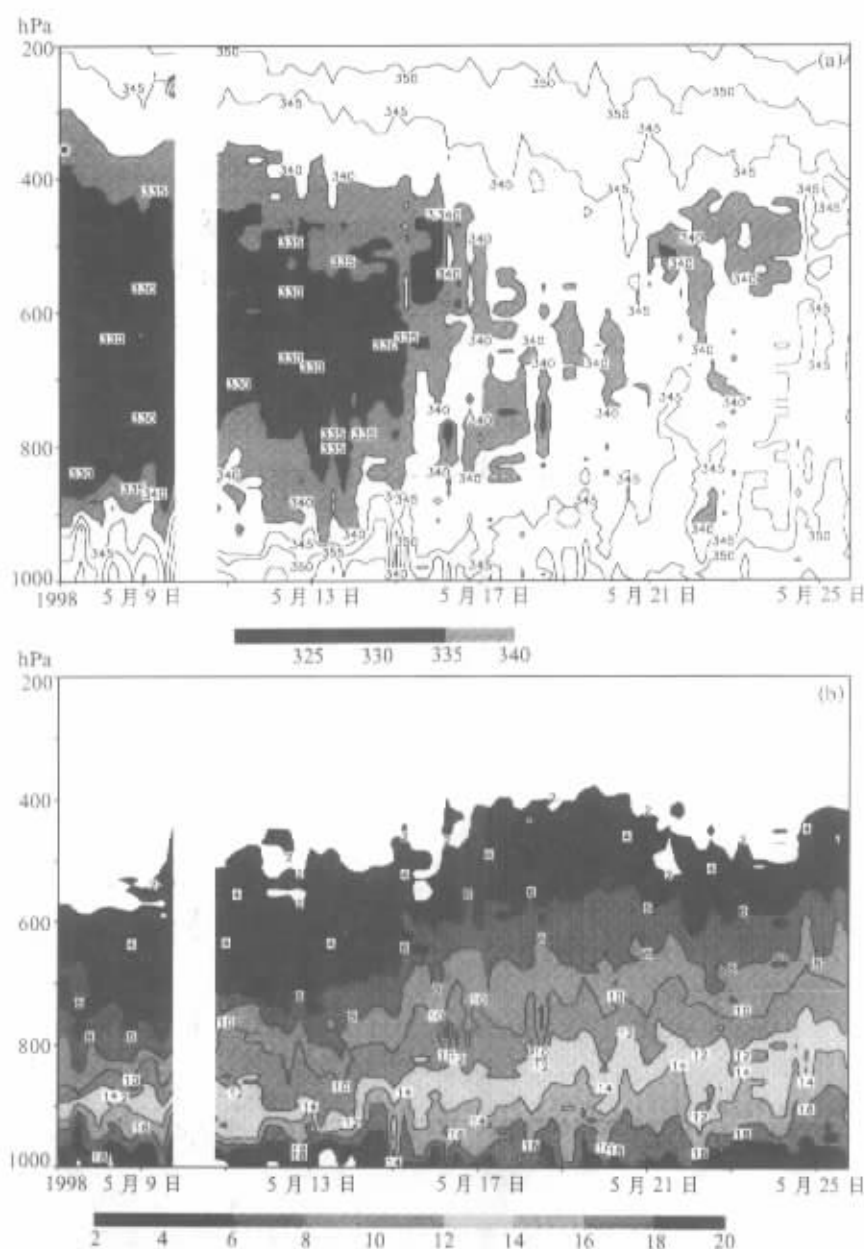


图5 南海北部 P (a, 单位: K) 与 q (b, 单位: g/kg) 的时间-高度剖面

海南部对流层中低层有一个 q 的低值区, 中心值小于 2 g/kg , 说明此时大气十分干燥, 此后 q 低值区即干层逐渐向高层发展, 低层的湿度值越来越大, 在17日前后在中低层大气达到最湿。此后干层曾一度下降, 但不久又恢复到深厚湿层的状态, 5月22日左右, q 为 4 g/kg 的等值抬升到500 hPa, 这对应于南部季风的爆发。5月23日以后, q 低值又下降。注意边界层中混合层的变化(低层 q 近似不变或少变的层次), 在15日以前, 混合层较高, 近地面层湿度 q 高, 但季风爆发前后不久混合层降低, 近地面湿

度减小, 直到 21 日以后又有短暂的恢复。在南海北部, 假相当位温的分布较南部有明显的不同。5 月 5 日至 5 月 17 日左右南海北部季风爆发前, 对流层中低层附近维持一个 θ_{se} 低值中心, 中心值小于 330 K, 说明此时在南海北部存在一个明显的干层, 这是冬季风影响下的大气结构特征。5 月 17 日后, 这种干层降低到 800~700 hPa, 并明显减弱或趋于消失, 这是南海北部季风爆发的特征。5 月 25 日以后, 干层在对流层中低层彻底消失, 表明季风已全面爆发。从 q 的分布图上可以明显看出, 随着季风的爆发, q 值逐渐向高层发展, 混合层水汽含量逐渐减小。

5 混合层的能量特征分析(干、湿及饱和湿静力能的变化)

图 6 与图 7 为 5 月 14 日、17 日和 23 日 00 时南海南部 s 、 h 、 h_s 和 q 随高度的时间变化曲线。对于南海南部, 5 月 14 日混合层顶高度为 940~950 hPa, 其下是一湿层, 其上为较干的层次, 这是典型的混合层垂直结构。5 月 17 日混合层高度升高, 约为 900

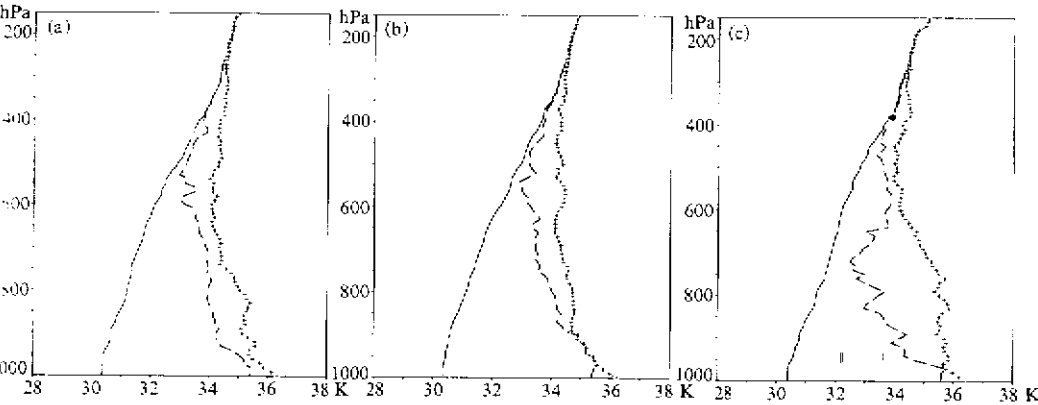


图 6 南海南部 5 月 14 日 00 时 (a)、17 日 00 时 (b) 和 23 日 00 时 (c)
 s (实线)、 h (虚线)、 h_s (+线) 随高度的时间变化曲线
单位: 10 J/g

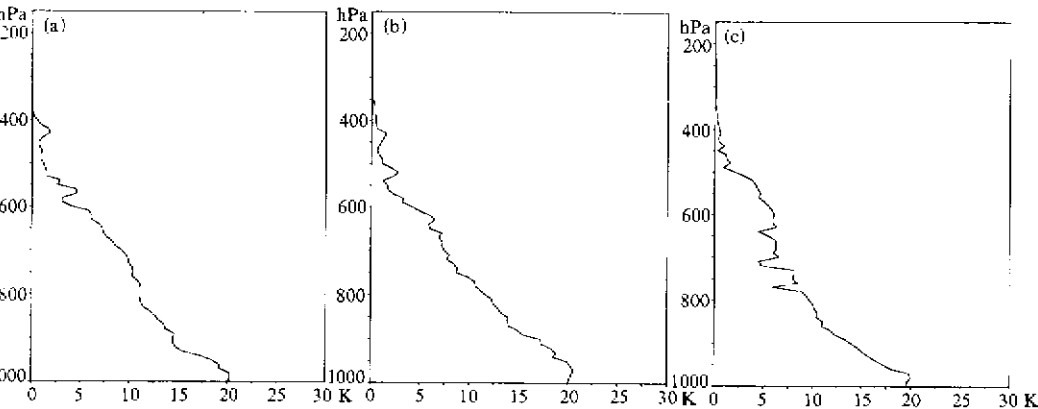


图 7 南海南部 5 月 14 日 00 时 (a)、17 日 00 时 (b) 和 23 日 00 时 (c) q 随高度的时间变化曲线
单位: g/kg

hPa 附近, 在混合层顶之下为近饱和层, h 与 h_s 差值最小。5 月 23 日, 随着季风的爆发, 强西风和降雨在南海南部开始盛行, 海洋混合层的厚度减弱。在混合层之上, 干层显著加强, 这可能是由于天气尺度系统或局地条件的影响。另外, 请注意位势不稳定层高度的降低。季风爆发前, 在 600 hPa 为位势不稳定层 (5 月 12 日与 15 日)。季风爆发后, 位势不稳定层基本消失, h 的廓线更趋近 h_s 廓线的分布。

南海北部混合层的能量的变化较南部有明显的不同。图 8 与图 9 为南海北部 5 月 12 日、15 日和 17 日 00 时 s 、 h 、 h_s 和 q 随高度的时间变化曲线。5 月 12 日 00 时混合层顶高度为 900 hPa, 此高度以下 h 与 h_s 差值很小, 为近饱和层, 但在混合层之上气层十分干燥, 这种层结的配置使气层呈现明显的不稳定性。5 月 15 日 00 时, 混合层高度有所下降, 这是由于南海北部西南风开始出现。在混合层中 s 、 h 、 q 几乎不随高度而变化。随着西南季风在南海北部的爆发, 对流活动加强, 西南风把大量的水汽带入该地, 因而混合层明显减弱, 5 月 17 日 00 时混合层顶高度降低到 980 hPa 附近, h 与 h_s 之差越来越小, 干层逐渐减少, 整层开始增湿, 这是季风爆发后的大气层结特征。

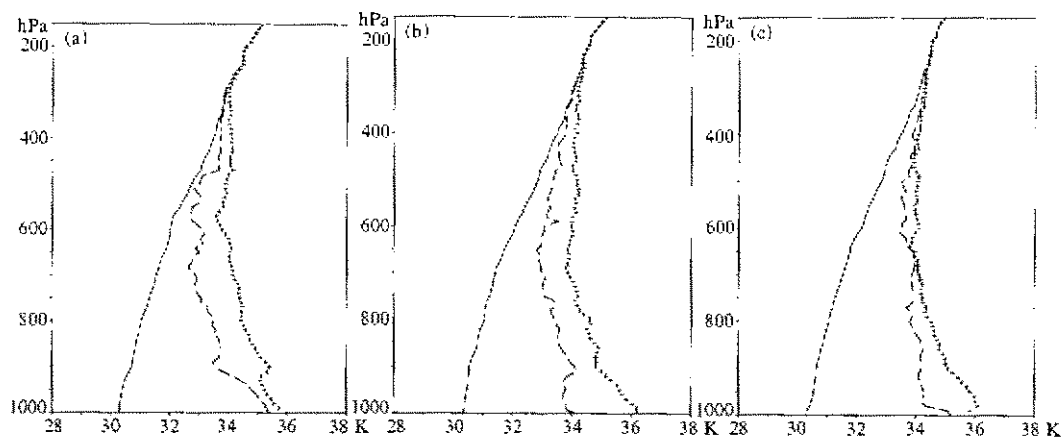


图 8 南海北部 5 月 12 日 00 时 (a)、15 日 00 时 (b) 和 17 日 00 时 (c)

s (实线)、 h (虚线)、 h_s (+线) 随高度的时间变化曲线

单位: 10 J/g

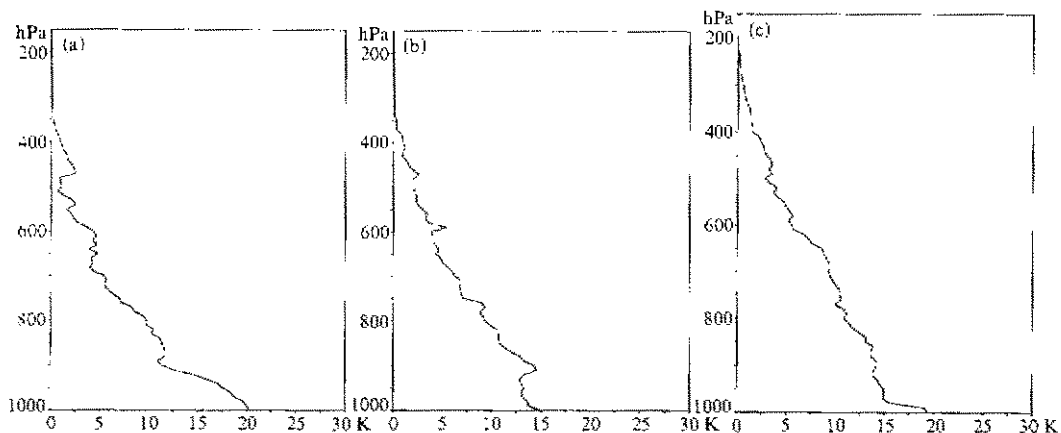


图 9 南海北部 5 月 12 日 00 时 (a)、15 日 00 时 (b) 和 17 日 00 时 (c) q 随高度的时间变化曲线

单位: g/kg

6 结论

通过上述对季风爆发前后南海南部与北部大气层结及混合层结构的分析, 可以得到以下结论。

(1) 从大气层结与混合层分析可以看到, 南海南部季风爆发的日期为 5 月 21~22 日左右, 南海北部季风爆发的日期为 5 月 17 日。季风爆发在南海北部表现出明显不同于南部的特征, 其突然的爆发性更为显著, 这在热力层结上表现得也很清楚。

(2) 南海季风爆发前后, 混合层高度的变化在南海南部与南海北部有明显的不同。在季风爆发前, 都存在着明显的混合层, 但其厚度不同。对于南海南部混合层的高度变化在 930~970 hPa 范围内, 而南海北部偏高, 约为 900~980 hPa。造成南海北部、南部明显差异的原因主要是南海北部的西风层是由来自中纬度副热带的中高层西风与低层热带西风相结合的结果, 因而是一种混合性爆发过程。

(3) 南海季风爆发前后对流层中低层表现出明显不同的结构主要是受西南季风的影响。季风爆发前, 混合层顶高度较高, 在低层是不断增湿, 高湿空气被限于混合层顶之下, 大气的位势不稳定性高。随着季风的爆发, 干层逐渐减弱, 混合层厚度减弱并趋于消失, 中低层明显变湿, 位势不稳定减小或消失, 这主要是由于季风爆发后, 西南季风把大量暖湿空气输送到南海地区, 对流活动增强, 大气呈现不稳定层结并伴有降水发生。随着能量的释放, 混合层会明显减弱或消失。以上这些结论与 Ding 等^[1,6]研究的结论相类似。

参 考 文 献

- 1 Ding Y. H., Akimasa Sumi and Shen X. S., Structure of the mixed layer and estimates of sea surface fluxes during TOGA-COARE IOP, Part II: Estimates of sea surface fluxes, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1995, 73(2B), 585~596.
- 2 徐天真, 陈伯海, 西太平洋暖池区海-气通量计算分析, 青岛海洋大学学报(特刊), 1993 年 12 月, 23, 99~107.
- 3 闫俊岳, 姚华栋, 王 强和杨志勇, 西沙海气通量观测资料的初步分析, 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, 147~151.
- 4 孙即霖, 刘秦玉, 张秀芝, 1998 年夏季季风爆发前后南海海气热通量主要特征, 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, 152~156.
- 5 白学志, 吴爱明, 赵永平, 南海季风爆发前后南海南部 SST 和海表热通量变化机制分析, 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, 157~165.
- 6 Ding Y. H., Akimasa Sumi and Shen X. S., Structure of the mixed layer and estimates of sea surface fluxes during TOGA-COARE IOP, Part I: Structures of the mixed layer, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1995, 73(2B), 569~583.
- 7 Bond, N. A., Observations of planetary boundary layer structure in the eastern equatorial Pacific, *J. Climate*, 1992, 5, 699~706.
- 8 Nitta, T. and S. S. So, Structure and heat, moisture and momentum budgets of a convective mixed layer during AMTEX'75, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1980, 58, 378~393.
- 9 吴晓曦, 丁一汇, 马淑芬, 1991 年江淮暴雨期地气通量与混合层结构的研究, 中尺度天气和动力学研究, 北京: 气象出版社, 1996, 269~280.

Evolution of the Atmospheric Stratification and Mixed Layer before and after Monsoon Onset over the South China Sea

Liu Yanju and Ding Yihui

(National Climate Center, Beijing 100081)

Abstract Based on the sounding data four times a day observed on R/V "Kexue 1" and R/V "Shiyan 3" during the South China Sea Monsoon Experiment (SCSMEX), the evolution of the atmospheric stratification and mixed layer before and after monsoon onset over the South China Sea (SCS) were analyzed. The results was as follows: (1) The date of monsoon onset over the northern SCS was on May 17, whereas the date over the southern SCS was on May 21 to 22 or so. The monsoon onset over the northern SCS was greatly different from the southern SCS and its abrupt onset was more prominent. (2) Before and after monsoon onset over the SCS, the height of the mixed layer over the southern SCS was obviously different from northern SCS. Before the monsoon onset, the mixed layer existed on both parts of the SCS, but the height was different. For the southern SCS, the mixed layer varied from 940 to 975 hPa, while for the northern SCS, the height of the mixed layer was a bit higher, about 900 to 980 hPa. With the monsoon onset, the height weakened and even disappeared. (3) Before and after monsoon onset over the SCS, the evident different stratification structure appeared in the middle and low troposphere. Before monsoon onset, the humidity of air was relatively low, the atmosphere was stable and the ceiling height of the mixed layer was relatively high, which suggested an obvious dry layer existed in the middle troposphere. With the monsoon onset, the dry layer gradually weakened or even tended to disappear. After the monsoon onset, the southwesterly monsoon transported the volume of warm and wet air to the SCS and the convection enhanced. So, the stratification was unstable and precipitation was also falling.

Key words: monsoon onset over the South China Sea; atmospheric stratification; mixed layer.