

海峡两岸及邻近地区暴雨试验(HUAMEX) 期间暴雨过程及环流特征研究^{*}

陈 红 赵思雄

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘 要 对 1998 年 5~6 月海峡两岸及邻近地区暴雨试验(HUAMEX)期间的 6 次暴雨过程及其环流特征进行了分析。发现:(1) 6 次暴雨过程均与锋面活动有关, 每次锋面过程都与锋生区对应。锋面的特征既不同于冬季的冷锋, 又不同于夏季长江流域的梅雨锋。(2) 对视热源和视水汽汇作了计算, 发现暴雨过程中华南地区为视热源和视水汽汇的大值区, 降水产生的凝结加热作用很重要。(3) 华南前汛期暴雨与南海季风有密切关系。1998 年华南前汛期偏南气流多次增强, 与暴雨过程有直接的联系。(4) 对四次降水过程的水汽来源作了分析, 发现对应不同个例, 水汽的供应源地并不相同, 孟加拉湾、南中国海和西太平洋都可能是重要的水汽供应源地。(5) 对云顶黑体温度(T_{BB})的分析表明, 华南上空的对流云团为暴雨的发生提供了有利条件。(6) 将 HUAMEX 暴雨过程与第一次全球大气研究计划试验(FGGE)期间的华南暴雨过程及“94·6”近百年一遇的华南暴雨过程作了比较。

关键词: 暴雨; 锋面活动; 对流云团; 季风环流; 华南地区

文章编号 1006-9895 (2004) 01-0032-16 **中图分类号** P445 **文献标识码** A

1 引言

我国位于世界最大的季风区——亚澳季风区。夏季风爆发和盛行的时期(输送大量水汽至中国大陆)为我国的暴雨季节。5~6 月初暴雨区出现在南岭以南, 即所谓的华南前汛期。随着季节的推移, 6~7 月雨带移至江淮流域, 即梅雨期降水, 7~8 月雨带推至华北, 形成了我国夏季三条主要的雨带。华南是我国的主要雨区之一。早在 20 世纪 70 年代末, 我国就开展了首次华南前汛期暴雨实验。通过这次观测实验, 取得了一批较完整的暴雨过程资料, 揭示了一些新的观测事实, 同时加深了人们对华南前汛期暴雨系统, 尤其是对环流背景的了解。1987 年, 我国台湾地区的气象工作者, 对华南前汛期暴雨(按台湾地区的定义, 常称“梅雨”)开展了“台湾地区中尺度试验(TAMEX)”, 取得了新的进展。

应当指出, 虽然国内外学者对梅雨及华南前汛期暴雨已有不少研究^[1~5], 但仍有若干问题有待进一步研究。例如, 与暴雨相联系的锋面的中尺度特征与动力机制, 华南暴雨的环流背景及多尺度系统相互作用, 较复杂海陆分布及地形对降水的影响等。同

2002-07-04 收到, 2002-12-18 收到修改稿

^{*} 国家重点基础研究规划项目 G1998040908、国家科技部攀登专项 95-专-03 以及国家自然科学基金资助项目 49735180 共同资助

时还应看到, 华南暴雨不是一个孤立的现象, 它与夏季风环流之间存在着十分密切的关系。因此, 华南暴雨的研究应与更大范围内环流系统的活动相联系。离开了这一方面的研究, 不可能真正弄清华南前汛期暴雨的规律, 更谈不上对预报的改进。1979 年的华南前汛期试验缺乏南海等广大洋面的背景资料, 但所幸的是, 1979 年正值第一次全球大气研究计划试验 (FGGE) 开展, 事后欧洲中期天气预报中心再分析和同化了 FGGE 期间的相关资料。这份资料包括了大量热带地区, 尤其是南海地区的信息。在某种意义上, 弥补了当时观测资料 (尤其是海洋区域资料) 缺乏所造成的缺陷。陈红等^[6]利用上述资料对 1979 年 5~6 月的暴雨过程和环流特征进行了诊断研究。

为了深入了解华南暴雨的机理, 以揭示其更为本质的特征, 1998 年我国和有关国家及地区陆续开展了南海季风试验 (SCSMEX) 和海峡两岸及邻近地区暴雨试验 (HUAMEX) (也称为第二次华南前汛期暴雨试验), 获得了大量中国南部和南中国海地区的资料。对于 HUAMEX 的中尺度对流系统及暴雨物理过程等, 已有一些研究^[7, 8]。但是, 从整体上, 即着眼于 HUAMEX 期间环流及整个前汛期多次暴雨过程特征的综合分析等方面的工作, 尚不多见。为此, 本文利用试验期间的外场观测资料和广州区域中心同化的 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 格点资料及雨量资料, 对 1998 年前汛期暴雨过程及其环流特征作了研究, 以深入探讨这些暴雨过程发生发展的特征, 本文将涉及: (1) 1998 年 5~6 月这一时期大尺度环流背景, 尤其是夏季风的推进与间隙。(2) 中纬度冷空气的活动及其影响。(3) 低纬地区和热带洋面的水汽供应和输送。(4) 同时, 为了了解 20 世纪 90 年代与 20 世纪 70 年代环流与降水之间存在的异同 (即可能的年代际变化), 还将 HUAMEX 的研究结果与 1979 年的华南前汛期暴雨进行了对比。(5) 此外, 同处 20 世纪 90 年代的近百年一遇的“94·6”华南前汛期暴雨洪涝的气候异常与 HUAMEX 的暴雨过程有何异同。本文将对上述这些问题作一探讨。

2 暴雨天气过程

1998 年 5 月中旬至 6 月 11 日印度季风爆发以前, 西太平洋副热带高压维持在 15°N 左右, 属于华南前汛期暴雨阶段, 尚未入梅。在这段时间内华南共有 6 次主要的降水过程: 5 月 13~15 日、5 月 16~18 日、5 月 22~25 日、5 月 29~31 日、6 月 2~6 日、6 月 8~11 日。每次降水过程雨带均是由北向南推进, 最后移出华南地区, 暴雨结束。本文选择其中 4 次降水过程中雨区范围较大、暴雨较强的时段 (个例 I: 5 月 14~15 日, 个例 II: 5 月 22~24 日, 个例 III: 6 月 2~5 日, 个例 IV: 6 月 9~11 日) 进行了较为仔细的分析。

2.1 天气形势

这里对 1998 年华南前汛期主要的 4 次暴雨过程的环流形势演变作一简要分析, 用 850 hPa 代表对流层低层的环流形势, 500 hPa 代表对流层中层的环流形势。

500hPa 大尺度特征: 欧亚中高纬西风带均为两槽一脊环流型 (图略), 一脊位于中亚地区, 乌拉尔以东的西西伯利亚和贝加尔湖至亚洲东岸一带分别为低槽, 形势稳定。在西风带气流的偏南一支, 不断有槽东移并在高原东侧发展, 槽可南伸至长江流域及华南地区, 槽后冷空气南下, 侵入华南。与此同时, 副高脊稳定在 15°N 左右。我国华

南沿海处于副高西北侧，西南低空急流较为活跃，高空槽后南下的冷空气与华南暖湿空气对峙交绥，十分有利于暴雨的形成。在上述 4 次过程中，地面均有锋面开始形成于中高纬地区，随后南下至华南，停滞或缓慢移动，引起华南暴雨，后移出华南地区，华南暴雨结束。

对流层低层（850 hPa）切变线随冷空气的南下而南移，降水发生在切变线南移期间。

2.2 降水实况

这几次降水过程中，由于副热带高压位置比较偏南，降水区域的位置也相应偏南，主要集中于华南南部沿海。4 次降水过程均是由华南南部低层切变线或其上低涡发展移动引发暴雨的。个例 I：暴雨的集中时段为 14 日 07 时到 15 日 02 时，是华南冷锋降水，暴雨区在锋面附近。暴雨区（大于 50 mm）分三个部分：粤中、北，粤东北至闽西，福建沿海至粤东汕头，后两部分呈东北—西南带状分布，范围均超过 200 km。其中粤中、北的暴雨是区域性的，东西宽达 200 km；而另外两个暴雨区中的大暴雨区局地性明显，一般不超过 50 km 范围。个例 II：5 月 23 日 12 时到 24 日 12 时为锋际及锋面暖区暴雨并存。暴雨集中在 23 日 13 时至 24 日 08 时之间，主要在珠江入海口。过程雨区相对集中，汕尾以东及阳江以西降水很小。暴雨同时出现在冷锋附近及锋前 200 km 范围的暖区中。22 日华南西北部出现降水，然后雨区逐渐向南部沿海扩大，24 日阳江附近出现了 174 mm 的强降水中心，25 日降水结束。这次降水过程雨区偏西，华南东部没有太大的降水出现。个例 III：雨区位置偏南，主要位于广东、广西、福建沿海，2 日 00 时~3 日 00 时五华站日雨量达 126 mm。个例 IV：9 日 11 时之前，暴雨主要出现在珠江口及以东的沿海地区，大暴雨和特大暴雨均分布在沿海，呈东西带状，南北宽不足 50 km，是典型的暖区暴雨；6 月 9 日之后，雨区范围较大，几乎整个华南均有降水。6 月 10 日 00 时，随冷空气的南下，雨区也向东南移动，梧州日降水量达 118 mm。随后雨区进一步南移，12 日华南暴雨结束，长江梅雨开始，华南前汛期结束。

2.3 中尺度对流系统的云系特征

在这 4 次降水过程中，雨量分布很不均匀，均存在一系列强降水中心。我们知道，强降水中心与中尺度对流云团有密切的关系。因此，在本节中我们利用云顶黑体温度（TBB）图所得云顶温度对降水过程中对流云团的发生、发展、移动等进行分析。对这 4 次降水过程中的对流云团进行了统计（表 1），第一次降水过程大约有 4 个对流云团影响华南，第二、三、四次降水过程华南上空分别有 6、15、9 个对流云团发生、发展，这些对流云团都发生在 105°E 以东，25°N 以南地区，除个别对流系统呈准静止外，大多数云团缓慢移动，这些中尺度系统有明显的自西向东移动的特征。这一特点与 1994 年华南特大暴雨期间对流云团的较稳定的特性，有明显的差异。由于云团的缓慢移动，从而造成了雨带的缓慢东南移。比较这 4 次过程中的对流云团，6 月的强对流云团数量远远多于 5 月份的对流云团数量，且 5 月份的对流云团强度也比 6 月的弱，这可能是由于 5 月至 6 月属季节过渡，冷空气影响逐渐减弱，积云对流发展，从而使 6 月的对流活动比 5 月旺盛。

我们挑选表 1 中 6 月初这次降水过程的中尺度对流系统（第 12 个），给出它生成、发展的演变过程。从图 1 可见，6 月 4 日 04 时位于两广交界地区的一个对流云团迅速

表 1 4 次暴雨过程中对流云团活动情况

暴雨过程	序号	生成时间	生成地区	移动情况	空间尺度
个例 I	1	5 月 14 日 04 时	(23.5°N, 111°E)	东南移	β 中尺度
	2	5 月 14 日 04 时	(22.5°N, 114°E)	东北移	β 中尺度
	3	5 月 14 日 05 时	(25.5°N, 114°E)	静止	β 中尺度
	4	5 月 14 日 22 时	(23°N, 117°E)	东南移	β 中尺度
个例 II	1	5 月 22 日 08 时	(24°N, 107°E)	东南移	α 中尺度
	2	5 月 22 日 15 时	(25°N, 110°E)	东北移	α 中尺度
	3	5 月 22 日 17 时	(24°N, 107°E)	东南移	α 中尺度
	4	5 月 22 日 21 时	(22°N, 111°E)	静止	α 中尺度
	5	5 月 23 日 12 时	(22.5°N, 113°E)	东北移	α 中尺度
	6	5 月 24 日 06 时	(19°N, 110°E)	东南移	α 中尺度
个例 III	1	6 月 2 日 06 时	(23.5°N, 110°E)	静止	α 中尺度
	2	6 月 2 日 06 时	(24°N, 105°E)	东南移	α 中尺度
	3	6 月 2 日 06 时	(23.5°N, 115°E)	东北移	α 中尺度
	4	6 月 2 日 12 时	(23.5°N, 114°E)	准静止	β 中尺度
	5	6 月 2 日 16 时	(23°N, 112°E)	东移	β 中尺度
	6	6 月 2 日 22 时	(20°N, 112°E)	静止	α 中尺度
	7	6 月 2 日 23 时	(22°N, 109°E)	东移	β 中尺度
	8	6 月 3 日 08 时	(20°N, 110°E)	静止	α 中尺度
	9	6 月 3 日 14 时	(23°N, 107°E)	东南移	α 中尺度
	10	6 月 3 日 20 时	(22°N, 115°E)	东南移	α 中尺度
	11	6 月 3 日 20 时	(20°N, 113°E)	静止	β 中尺度
	12	6 月 4 日 04 时	(22.5°N, 110°E)	东南移	α 中尺度
	13	6 月 4 日 07 时	(23°N, 106°E)	东移	α 中尺度
	14	6 月 4 日 10 时	(20°N, 110°E)	静止	α 中尺度
	15	6 月 4 日 16 时	(20.5°N, 107°E)	东南	α 中尺度
个例 IV	1	6 月 9 日 05 时	(22.5°N, 114.5°E)	东移	α 中尺度
	2	6 月 9 日 11 时	(20°N, 110°E)	东北移	β 中尺度
	3	6 月 9 日 23 时	(22.5°N, 114°E)	东南移	β 中尺度
	4	6 月 10 日 06 时	(22°N, 111°E)	东—东北移	α 中尺度
	5	6 月 10 日 07 时	(20°N, 110°E)	静止	β 中尺度
	6	6 月 10 日 18 时	(22°N, 113°E)	东移	α 中尺度
	7	6 月 11 日 05 时	(22.5°N, 111°E)	东北移	α 中尺度
	8	6 月 11 日 08 时	(20°N, 110.5°E)	东北移	β 中尺度
	9	6 月 11 日 15 时	(22.5°N, 116.5°E)	东北移	β 中尺度

发展起来，到 07 时它的尺度已达到 α 中尺度。其冷云盖位于两广沿海，给两广交界地区带来暴雨。然后该对流系统沿着华南沿海向东移动，强度逐渐减弱。13 时系统西南

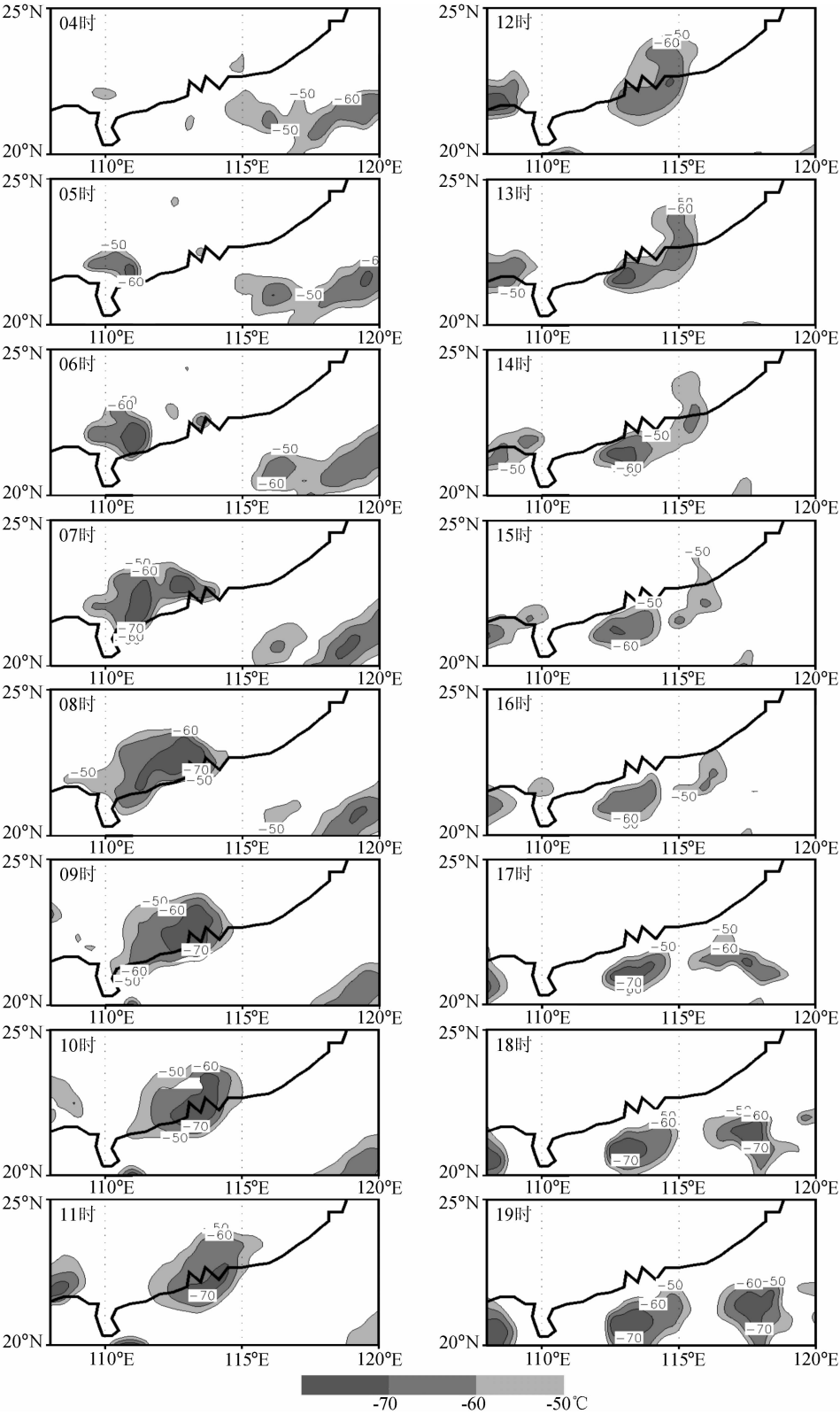


图 1 1998 年 6 月 4 日 04~19 时逐时的 TBB 云顶温度分布图

部有一冷中心开始发展，并逐渐从母系统中分离出来，原对流系统分离成两个较小尺度的对流系统。分离后的两个系统均往南移动，到 17 时已移至海上，对华南没有影响。从 TBB 图上的结果看，对流云团的分布与雨区的分布是比较一致的，表明暴雨过程与中尺度对流系统有关，而且还表明这些暴雨过程都具有移动性的特征。

3 HUAMEX 暴雨过程的动力学诊断

3.1 锋区剖面分析

为了了解华南地区锋面的垂直结构和它的动力、热力性质，本文对 1998 年华南前汛期逐日的沿 110°E 的剖面图作了分析。图 2 给出了 1998 年 6 月 8 日 00 时沿 110°E 的剖面作为代表。从剖面图上可看出，低层锋面南侧有明显的暖舌，为西南暖湿气流区域，北侧为冷空气控制区，锋区两侧风切变明显。华南上空为位势不稳定区，不稳定区随锋区的南移而缓慢南移。由其他剖面图（图略）上还可以看出，这几次暴雨过程中均有冷锋不断向南推进，从而使锋前的高温、高湿空气抬升，并使位于对流层中低层的位势不稳定能量释放出来，有利于暴雨的发生。

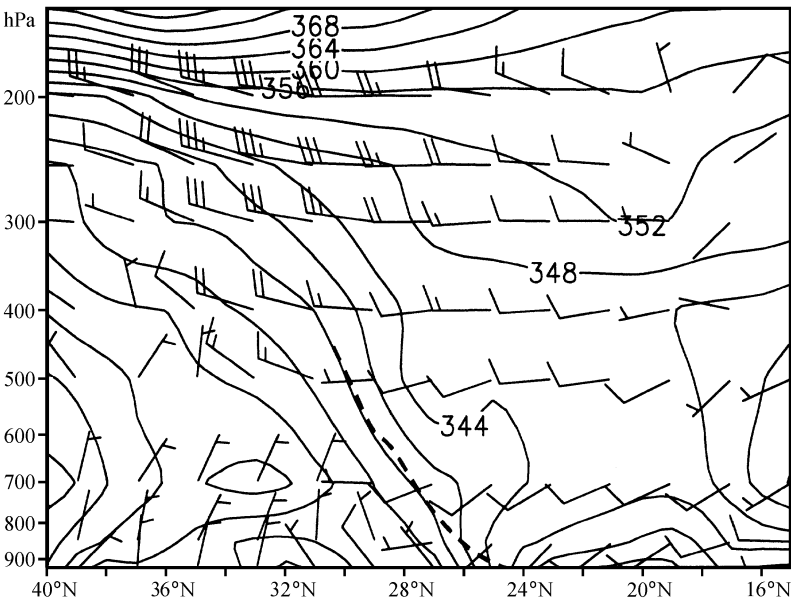


图 2 1998 年 6 月 8 日 00 时沿 110°E 的锋区剖面图
实线：假相当位温 θ_{se} 的等值线（单位：K）；粗虚线：切变线

3.2 锋生函数的计算

为了进一步了解冷暖空气的作用以及华南地区锋面的性质，对锋生函数作了计算。锋生函数 F 定义为位温梯度的个别变化，表示形式^[9]如下：

$$F = \frac{d}{dt} |\nabla \theta| = F_1 + F_2 + F_3 + F_4.$$

这里，公式右边四项分别为

$$\begin{aligned} F_1 &= \frac{1}{|\nabla \theta|} \left[(\nabla \theta) \nabla \left(\frac{d\theta}{dt} \right) \right], \\ F_2 &= -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} (\nabla \theta)^2 D, \\ F_3 &= -\frac{1}{2} \frac{1}{|\nabla \theta|} \left\{ \left[\left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \right)^2 - \left(\frac{\partial \theta}{\partial y} \right)^2 \right] A + 2 \frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \theta}{\partial y} B \right\}, \\ F_4 &= -\frac{1}{|\nabla \theta|} \frac{\partial \theta}{\partial p} \left(\frac{\partial \theta}{\partial x} \frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{\partial \theta}{\partial y} \frac{\partial \omega}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

其中， θ 是位温， D 是水平散度， $A = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$ 和 $B = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$ 是变形项。 F_1 是非绝热加热项， F_2 和 F_3 是水平辐散和形变项， F_4 是与垂直运动有关的倾斜项。由于要精确地计算非绝热加热和垂直运动比较困难，本文仅对 850 hPa 上的 F_2 和 F_3 作了计算。

由图 3 可以看到，4 次暴雨过程华南上空 $F_2 + F_3$ 均大于 0，为锋生区。个例 I、II 中，850 hPa 的锋生函数大于 7，后两次仅为 3 左右，随时间的向前推移，中心值逐渐减小。6 月的锋生过程比 5 月的弱，这可能是由于 5 至 6 月冷空气南下过程中强度逐渐减弱，因而使锋生减弱所致。当然，锋生过程与冬季的冷锋相比，要弱得多^[10,11]。这表明，对于华南前汛期暴雨而言，弱冷空气活动的确有一定的作用。但是，与冬季的强斜压过程的强迫不能相比。这一结果支持了陈红等^[6]对 FGGE（1979 年）华南前汛期暴雨两个例分析所得的结果。从逐日的锋生图（图略）上可见，锋生区中心位置与地面

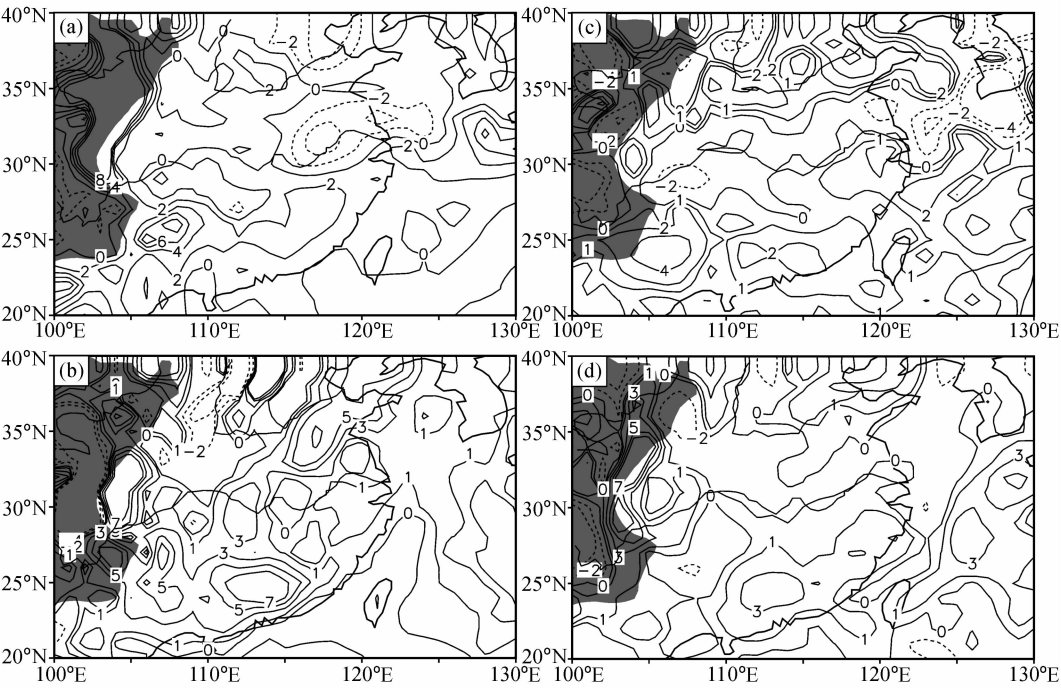


图 3 850 hPa 上的锋生函数 (F_2 、 F_3 两项之和) 分布

单位: $K (1000 \text{ km})^{-1} \text{ d}^{-1}$; 阴影区: 地形高度大于 1500 m 的区域

- (a) 1998 年 5 月 14 日至 15 日 2 天平均; (b) 1998 年 5 月 22 日至 24 日 3 天平均;
(c) 1998 年 6 月 02 日至 05 日 4 天平均; (d) 1998 年 6 月 09 日至 11 日 3 天平均

锋区位置对应，雨区主要位于锋生区的前方。这也许说明暴雨不仅与冷空气南下活动有关，还与其他因素，如暖空气的活动有关；随着锋生区的南移，雨带也随之南移。

3.3 视热源 Q_1 和视水汽汇 Q_2 的计算

利用大尺度资料对降水过程中的视热源 Q_1 与视水汽汇 Q_2 进行诊断，可以了解暴雨区大气加热的特性。

Q_1 与 Q_2 的定义如下：

$$Q_1 = c_p \left[\frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{v} \cdot \nabla T + \left(\frac{p}{p_0} \right)^\kappa \bar{\omega} \frac{\partial \theta}{\partial p} \right] = Q_{1t} + Q_{1h} + Q_{1w},$$
$$Q_2 = -L \left(\frac{\partial q}{\partial \tau} + \nabla \cdot q \vec{v} + \frac{\partial q \bar{\omega}}{\partial p} \right) = Q_{2t} + Q_{2h} + Q_{2w},$$

其中，等式的右边第一项 Q_{1t} 与 Q_{2t} 为时间变化项，第二项 Q_{1h} 、 Q_{2h} 分别为水平平流项、水平通量项，第三项 Q_{1w} 与 Q_{2w} 分别为垂直平流与垂直通量项。

本文对 1998 年 4 次降水过程分别计算出整层的 Q_1 和 Q_2 分布，由图 4 可以看到，4 次降水过程华南均为 Q_1 、 Q_2 的大值区域，存在明显的视热源和视水汽汇。这两项不管从分布的形态、中心值的位置以及量级上都非常相似，且与 500 hPa 上垂直速度的分布（图略）也是比较一致的，这说明暴雨期间大气的加热是与大气的上升运动密切有关的，大气热源主要是降水过程中的凝结潜热。但 4 次过程的具体形式又有差别。前两次过程，华南地区 Q_1 与 Q_2 比较相近，说明加热来自锋区，由于层积云内水汽凝结导致潜热释放。而后两次过程， Q_2 大于 Q_1 ，这是因为 5 月至 6 月属季节过渡，6 月份后冷空气势力逐渐减弱，锋面降水也逐渐减弱，积云对流发展，对流活动旺盛。但两者的差值不是太大，说明 6 月梅雨开始前冷空气的势力还不是很弱。

4 大尺度环流背景的特征分析

4.1 夏季风的推进与间隙

850 hPa 的假相当位温特征线的分布可反映夏季风活动情况，这里将 340 K 线设为特征线，大体上代表夏季风控制区的前沿。当然，这和西南季风或南海季风主体从源地的推进是既有联系，且又有差别的。从 5~6 月 850 hPa 上的假相当位温分布图可发现，华南前汛期暴雨试验期间主要有 6 次西南气流前沿线的增强北进和南退徘徊过程，暖湿的西南气流与高纬南下的冷空气在华南交汇，造成华南的几次暴雨过程，诸如：（1）5 月 13 日以前冷空气控制华南地区，13 日后，西南气流开始活跃起来，14 日开始与中高纬的冷空气相遇在华南，形成 HUAMEX 试验期间的第一场暴雨（图 5a）。16 日华南为冷空气控制，随之西南气流活跃北进与冷空气作用形成 16~18 日的降水。（2）19 日后华南又为暖湿气流控制，22 日冷空气南下，华南开始第 3 次降水，24 日 340 K 线退至华南南部（图 5b），25 日退至南海，暴雨结束。（3）28 日后暖湿气流又开始活跃，与南下的冷空气交汇在华南，形成 HUAMEX 期间的第 4 场降水。这次过程冷空气势力较弱，31 日开始华南又为暖湿气流控制。6 月 2 日开始冷空气南下，与暖湿气流交汇（图 5c），形成华南第 5 场暴雨。6 月 6 日华南为冷空气控制，暴雨结束。（4）6 月 8 日后，北推的暖湿气流再次与南下的冷空气在华南相遇，华南开始了前汛期

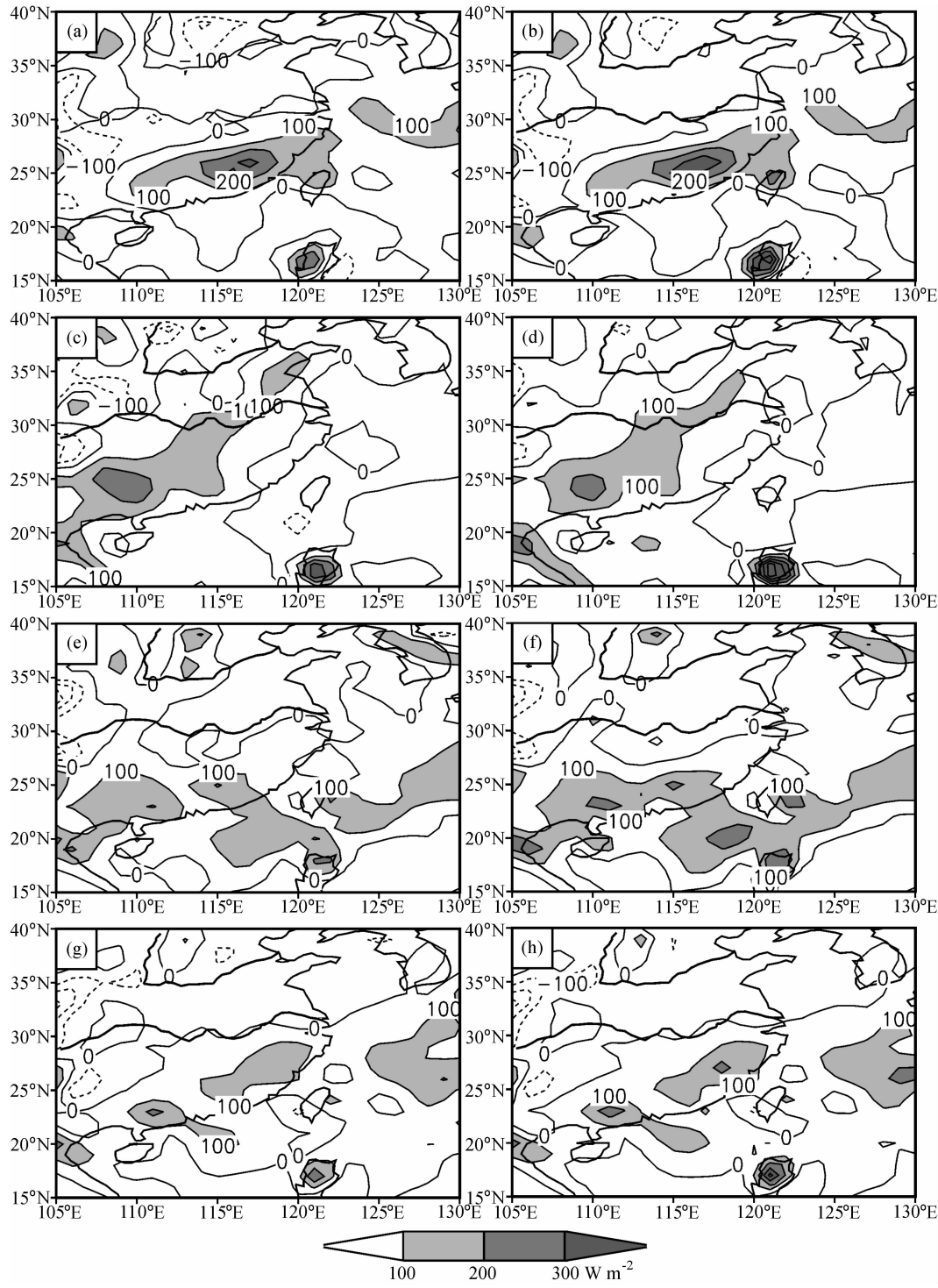


图 4 视热源 Q_1 和视水汽汇 Q_2 整层积分的分布 (单位: W m^{-2})

(a) Q_1 , 1998 年 5 月 14 日至 15 日 2 天平均; (b) Q_2 , 1998 年 5 月 14 日至 15 日 2 天平均;
(c) Q_1 , 1998 年 5 月 22 日至 24 日 3 天平均; (d) Q_2 , 1998 年 5 月 22 日至 24 日 3 天平均;
(e) Q_1 , 1998 年 6 月 02 日至 05 日 4 天平均; (f) Q_2 , 1998 年 6 月 02 日至 05 日 4 天平均;
(g) Q_1 , 1998 年 6 月 09 日至 11 日 3 天平均; (h) Q_2 , 1998 年 6 月 09 日至 11 日 3 天平均

的第 6 场暴雨（图 5d）。6 月 11 日以后，南海季风向北推进，340 K 线迅速推移到长江流域，与南下的冷空气作用形成梅雨，华南上空完全为暖湿气流控制，前汛期暴雨结束。

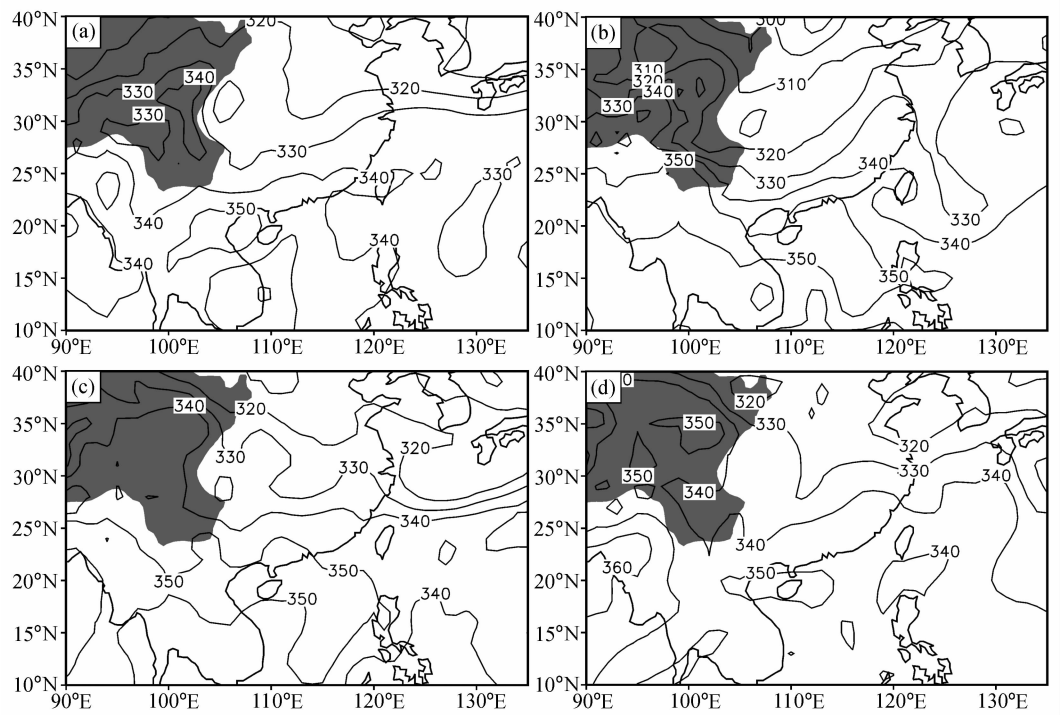


图 5 850 hPa 假相当位温，阴影区为地形高度大于 1500 m 的区域
(a) 1998 年 5 月 15 日 00 时；(b) 1998 年 5 月 24 日 00 时；
(c) 1998 年 6 月 04 日 00 时；(d) 1998 年 6 月 09 日 00 时

在水汽沿 110~120°E 纬度—时间剖面图（图略）上也可发现，伴随西南气流的增强，华南至少有 6 次水汽的增强过程，与暴雨过程相对应。

从（23°N，114°E）（广州附近）经向风和雨量随时间的变化图（图 6）上发现，HUAMEX 试验期间，华南前汛期至少有 6 次以上的南风加强过程，每次过程均与暴雨相伴。从南海北部（17~22°N，110~120°E）的经向风随时间的变化图（图 7）上，可发现有 6 次南风的加强过程，对应华南的 6 次降水过程（已在图中横坐标上方用横线标出）。5 月 22~25 日这次暴雨过程南风加强幅度较弱。南海南部则没有这么规律的南风增强过程。

4.2 冷空气活动及影响

一般来说，对华南暴雨而言，它是冷暖空气相互作用的结果，除了暖湿空气的作用外，中高纬度冷空气的影响亦至关重要。为此，本节专门讨论冷空气的活动。图 8 是 1998 年 5~6 月 110°E、120°E、130°E 三个经度上地面锋位置的时间—纬度剖面图，图中黑点是由每日 00 时和 12 时地面锋在这三个经度上的位置（纬度）确定的。5~6 月，110°E 有 3 次锋面南侵过程，其锋面可到达 20°N 以南，其中 5 月份一次，6 月份 2 次，这说明 1998 年 6 月份冷空气的势力还是较强。120°E 只有 6 月有一次锋面到达

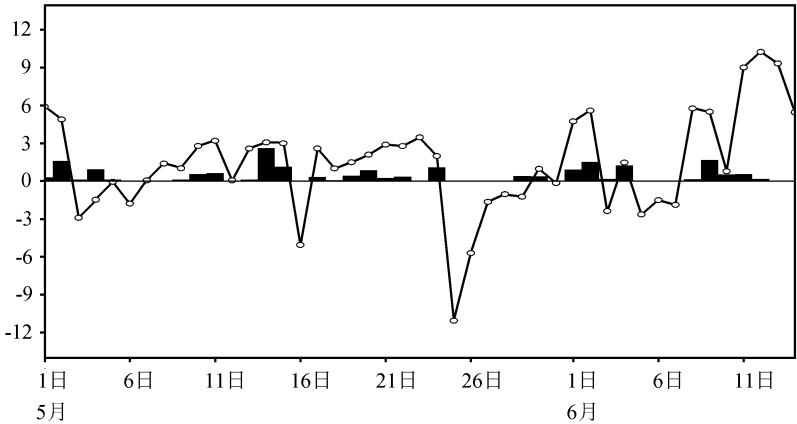


图 6 1998 年 5~6 月 (23°N, 114°E) (广州附近) 经向风 (实线, 单位: m s^{-1}) 和雨量 (阴影, 单位: mm h^{-1}) 随时间的变化图

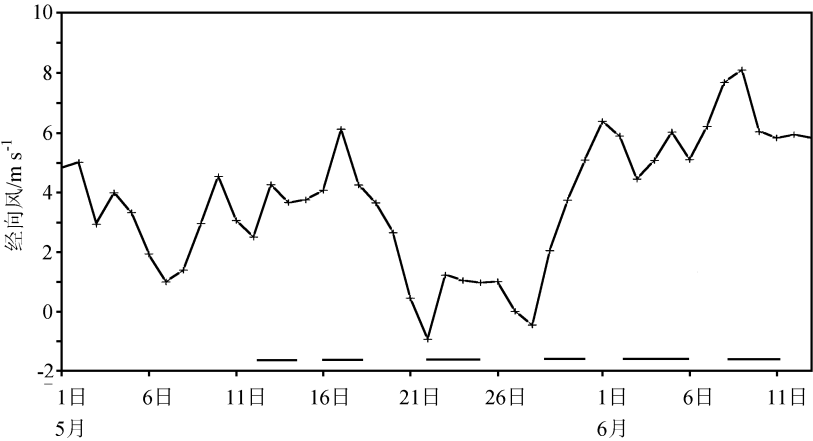


图 7 1998 年 5~6 月南海北部 850 hPa (17~22°N, 110~120°E) 经向风随时间的变化图
短横线对应于 6 次暴雨的发生时段

20°N 以南。对 130°E, 5~6 月锋面从未到达过 20°N 以南, 可见中高纬冷空气南下过程中在不同经度情况不尽相同。对 1998 年而言, 冷空气主要路径偏西, 在中国大陆上, 而不是在偏东的日本和朝鲜半岛等, 因而对我国的降水更为有利。

上述冷空气活动仅是 1998 年的情况, 其重要性和代表性如何? 对此, 我们应做些比较:

(1) HUAMEX 和 FGGE 期间冷空气活动之比较: 如上所述, 在 HUAMEX 期间, 5~6 月至少有 6 次冷暖空气相互作用形成华南降水, 但在 FGGE 期间, 5~6 月间只有三次冷空气向南移动^[6]。二者均属移动性的系统, 但 HUAMEX 的活动比 FGGE 的活动要更活跃。这可能是合理的, 这种差别也许是由于受到年代际变化的影响。对近半个世纪的统计表明, 20 世纪 70 年代属于南方少雨年代, 而 20 世纪 90 年代属南方多雨年代^[12]。

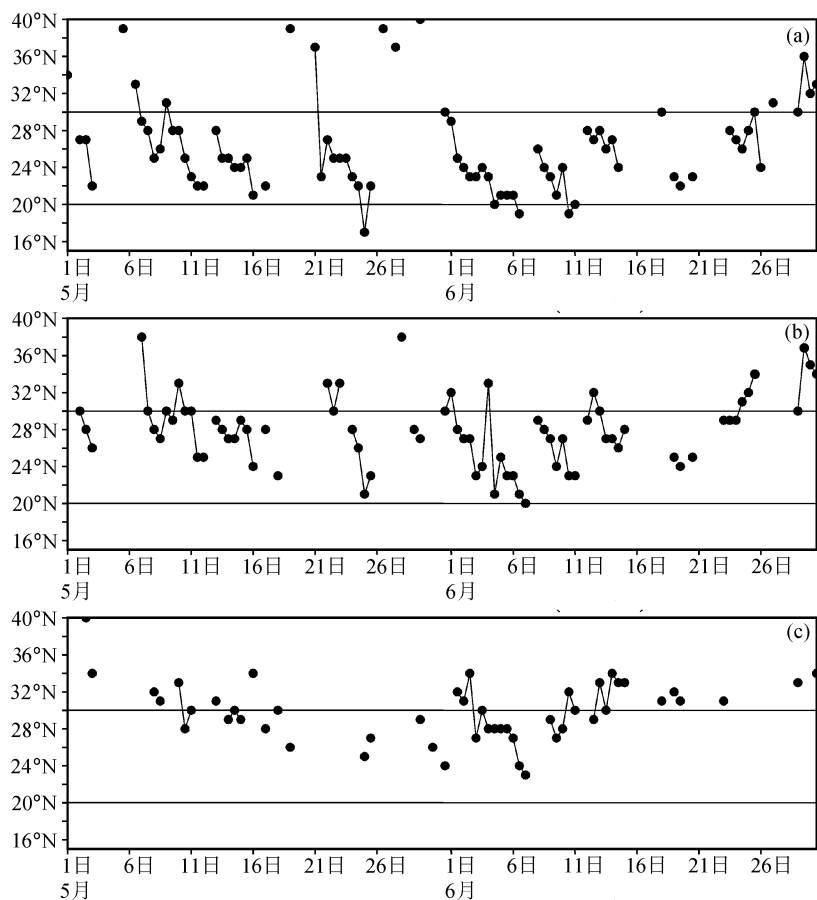


图8 1998年5~6月各经度上锋面位置的变化
(a) 110°E; (b) 120°E; (c) 130°E

表2中类型1、2、3分别代表北方、黄淮、南方三类，70年代正好是南方少雨，而90年代正好是南方多雨。HUAMEX的次数频次高于FGGE的频率，从气候背景看也是合理的。

(2) HUAMEX与“94·6”的比较：既然华南的降水存在着年代际的变化，20世纪90年代属于南方多雨期，那么同属于90年代的HUAMEX与“94·6”大暴雨之间的差异何在？1994年6月中旬，华南（尤其是西部）地区出现了自1915年以来最大的暴雨和洪水，给国家的经济发展和人民生命财产造成重大损失。对其环流异常和天气系统已进行了研究工作^[13,14]，而对其降水系统的数值模拟也进行了较为详细的研究^[15,16]。作为比较，这里引用了文献[14]中的图3。该图与本文的图略有差别，一是位置在115°E，因为“94·6”的雨区偏西，二是只讨论了6月份的情况。尽管如此，

表2 1951~1998各年代夏季降水类型
频次百分比（引自文献[12]）

	类型1	类型2	类型3
1951~1959	33%	22%	45%
1960~1969	50%	30%	20%
1970~1979	40%	40%	20%
1980~1989	30%	33%	40%
1990~1999	33%	22%	44%

我们仍能将它与本文 120°E 锋面活动作一些比较。可以看到,“94·6”期间,从 6 月 11 日以后一条准静止锋一直在华南维持着,稳定少动,从而引发了持续性的强降水,而在 1998 年 HUAMEX 期间主要是移动性系统引发的降水。

4.3 水汽来源

为了对 1998 年 HUAMEX 期间水汽来源作出估计,我们对中低层各层的水汽状况进行了计算。以下对 4 次暴雨过程 850 hPa 上的水汽通量(图 9)和水汽通量散度(图 10)进行了分析。

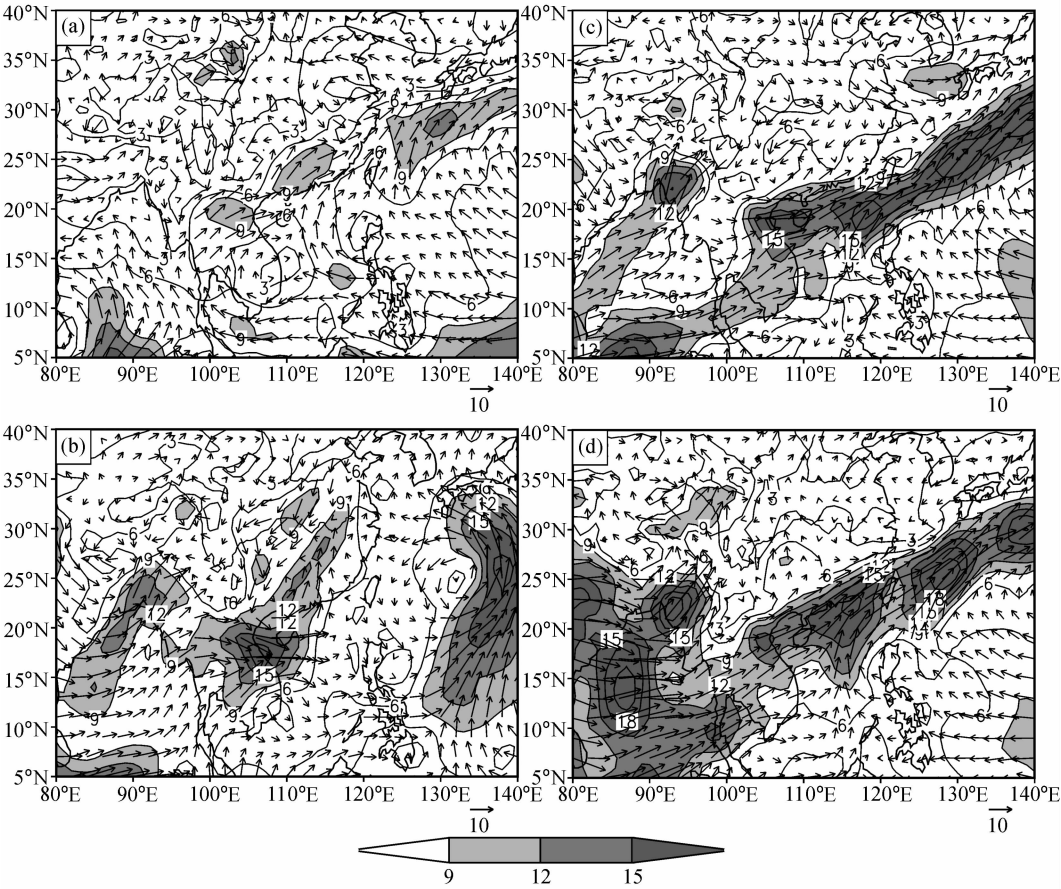


图 9 850 hPa 水汽通量分布 (单位: $\text{g s}^{-1}\text{kg}^{-1}$)

(a) 1998 年 5 月 14 日至 15 日 2 天平均; (b) 1998 年 5 月 22 日至 24 日 3 天平均;
(c) 1998 年 6 月 02 日至 05 日 4 天平均; (d) 1998 年 6 月 09 日至 11 日 3 天平均

850 hPa 水汽通量可估计水汽的来源。这 4 次暴雨个例中水汽通量大值区均位于南海、西太平洋和孟加拉湾等区域。前两次过程,华南沿海至南海为一水汽通量的大值区,水汽通量辐合中心位于华南,与雨区位置比较一致。第一次过程南海和西太平洋对华南的水汽输送比较重要,而孟加拉湾对华南的水汽输送不是很明显,第二次过程孟加拉湾和南海对华南的水汽输送很重要,西太平洋对华南水汽的输送不明显。而 6 月的两次过程,水汽通量输送带位于南海至西太平洋,整个华南为水汽通量辐合区。西太平洋对华南的水汽输送很明显,孟加拉湾和南海对华南的水汽输送也很重要,这

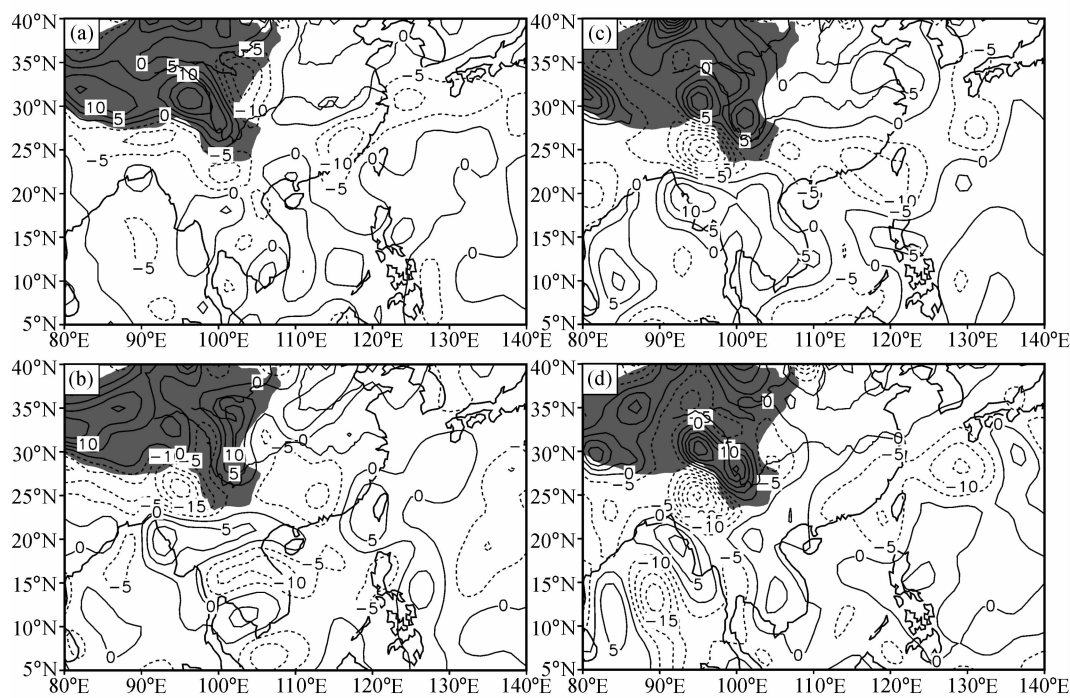


图 10 850 hPa 水汽通量散度 (单位: $10^{-6} \text{ s g m}^{-1} \text{ kg}^{-1}$), 阴影区为地形高度大于 1500 m 的区域
(a) 1998 年 5 月 14 日至 15 日 2 天平均; (b) 1998 年 5 月 22 日至 24 日 3 天平均;
(c) 1998 年 6 月 02 日至 05 日 4 天平均; (d) 1998 年 6 月 09 日至 11 日 3 天平均

说明在不同的时段, 西太平洋、孟加拉湾、南海对华南的水汽输送并不是完全相同的。这一水汽的分布也可以很好地解释为什么 5 月 23~24 日的暴雨主要集中于广东, 尤其是珠江三角洲至南海一带, 而 6 月 9 日~11 日的暴雨区呈东西带状分布, 从广东一直向东伸展至台湾地区。

5 结论与讨论

通过使用 1998 年南海季风试验资料和海峡两岸及邻近地区暴雨试验的资料, 对 1998 年 5~6 月夏季风爆发背景下的华南前汛期暴雨过程作了较为系统的研究, 得出以下结论:

- (1) 华南前汛期暴雨与季风环流及其锋前暖湿空气活动有很密切的关系。5 月份南海季风的爆发预示着华南前汛期暴雨的开始。这比印度季风爆发 (6 月) 的时间要早, 因此, 东亚季风与印度季风应属两个既相联系又相互独立的系统。1998 年南海季风活跃期间, 其前沿西南暖湿气流有 6 次向北推移, 而其间又多次出现间隙, 它们与 6 次暴雨过程的起始与结束有直接的联系。这种现象在南海北部尤其明显。
- (2) 诊断表明, 华南前汛期暴雨的水汽供应来源较为复杂。并不像一些研究者认为的那样, 水汽主要来自孟加拉湾等地区。事实上, 不同个例和不同的时段是很不相同的。应当注意到, 南中国海和西太平洋亦是重要的水汽供应源地。
- (3) 华南前汛期暴雨是一种中低纬系统相互作用的结果。除了热带季风环流的影响

响外, 中高纬冷空气也有明显的作用。5~6 月每日连续的地面锋位置分布揭示, 上述几次暴雨过程均不同程度地与锋面活动有关。每次锋面过程均发现与锋生区相对应, 暴雨位于锋生区前方。

(4) 由视热源和视水汽汇的计算显示, 4 个暴雨个例中, 华南地区均为视热源和视水汽汇的大值区, 降水产生的凝结加热作用是不可忽视的。

(5) TBB 云顶温度分布的结果表明, 华南上空的对流云团为暴雨的发生提供了有利条件。

(6) HUAMEX (1998 年) 与 FGGE (1979 年) 华南前汛期暴雨之间存在着差异: 南海季风与华南前汛期暴雨均存在着明显的年际变化。因此, 1998 年的情况, 是否能概括华南前汛期暴雨的主要特征? 它与第一次华南暴雨试验 (1979 年) 有何不同? 这些需作比较。

对 1998 年与 1979 年 5~6 月华南暴雨进行比较后发现, 相同之处是: (1) HUAMEX 和 FGGE 年的华南降水系统均具有移动性, 同属移动性系统, 随冷空气的南进而南移, 多属于锋面或锋前暖区暴雨; (2) 上述两年华南前汛期暴雨均与季风环流有很密切的关系。南海北部较南海南部似乎更明显, 与暴雨相伴, 有几次南风的加强过程; (3) 冷空气的作用都不可忽视; (4) 水汽供应来源都较为复杂, 孟加拉湾、南中国海和西太平洋都是重要的水汽供应源地。其不同之处为: (1) 1998 年 (HUAMEX) 华南前汛期冷空气的势力比 1979 年 (FGGE) 的强; (2) 1998 年暴雨过程更频繁, 达 6 次以上, 而 1979 年华南主要暴雨过程仅有 3 次, 这可能受年代际变化的影响; (3) 1998 年印度季风爆发时间 (6 月 12 日) 比 1979 年 (6 月 19 日) 早。 (4) 相对而言, 1998 年华南的暴雨落区更偏南, 这也可能与 1998 年冷空气偏强有关。

由上可知, 1998 年 5~6 月属于华南暴雨频次较高的、移动性系统较多的时期, 选择该时段进行海峡两岸及邻近地区暴雨试验 (HUAMEX), 能够获得更多个例的观测资料, 是很有意义的。

参 考 文 献

- 1 陶诗言, 中国之暴雨, 北京: 科学出版社, 1980, 225pp.
- 2 华南前汛期暴雨编写组, 华南前汛期暴雨, 广州: 广东科技出版社, 1986, 244pp.
- 3 马群飞、赵思雄, 台湾地区中尺度试验期间梅雨锋及其对流云团的研究, 大气科学, 1993, **17** (2), 173~184.
- 4 Chen, Y-L, Some synoptic-scale aspects of the surface front over southern China during TAMEX, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, **121** (1), 50~64.
- 5 周秀骥主编, 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究, 北京: 气象出版社, 2000, 370pp.
- 6 陈红、赵思雄, 第一次全球大气研究计划试验期间华南前汛期暴雨过程及其环流特征的诊断研究, 大气科学, 2000, **24** (2), 238~252.
- 7 赵思雄、贝耐芳、孙建华, 华南暴雨试验期间 (HUAMEX) 强对流系统的研究, 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究, 北京: 气象出版社, 2000, 251~260.
- 8 石定朴, 98 华南前汛期暴雨中尺度特征分析, 海峡两岸及邻近地区暴雨试验研究, 北京: 气象出版社, 2000, 175~185.
- 9 Kato, K., and Y. Kodama, Formation of the Quasi-stationary Baiu Front to the south of Japan Islands in early

May of 1979, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, **70** (1), 631~645.

10 李振军、赵思雄, 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究 I. 东亚春季强冷冷锋结构, 大气科学, 1996, **20** (6), 662~672.

11 李振军、赵思雄, 东亚春季强冷锋结构及其动力学诊断研究 II. 动力学诊断研究, 大气科学, 1997, **21** (1), 91~98.

12 陈兴芳、宋文玲, 年代际气候变化与 1998 年长江大水, 气候与环境研究, 1998, **3** (4), 358~367.

13 陶诗言, 1994 年东亚夏季风活动的异常与华南特大洪涝灾害 I. 大气环流的异常, 1994 年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 1996, 1~5.

14 李玉兰、杜长萱、陶诗言, 1994 年东亚夏季风活动的异常与华南的特大洪涝灾害 II. 1994 年两广特大暴雨的天气学分析, 1994 年华南特大暴雨洪涝学术研讨会论文集, 北京: 气象出版社, 1996, 6~13.

15 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 I. 引发暴雨的 β 中尺度对流系统的数值模拟研究, 大气科学, 2002, **26** (4), 541~557.

16 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, 大气科学, 2002, **26** (5), 633~646.

Heavy Rainfalls in South China and Related Circulation during HUAMEX Period

Chen Hong, and Zhao Sixiong

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Abstract During HUAMEX period of 1998, six heavy rainfalls occurred in South China. In this paper, diagnostic study and numerical simulation have been conducted. The conclusions are the followings: 1) The heavy rainfalls during HUAMEX period were the result of the interaction between middle and lower latitude systems. Except the influence of tropical summer monsoon, cold air from middle and higher latitudes also played an important role in the rainfall. 2) The eight rainfall processes were related with the activity of fronts. In each case, the front corresponds to the frontogenetical area, the heavy rainfall occurred near the front or during front passage or in the warm sector ahead of front. 3) Computations showed that, Q_1 and Q_2 contributed significantly to these rainfall processes at the area of South China, and the convective condensation heating resulted from columns convection also played an important role in rainfall. 4) Heavy rainfalls in South China associated closely with monsoon circulation. During pre-rainy season in 1998, the southwest current associated with South China Sea monsoon moved northwards several times, rainfall processes had a direct relationship with these activities. 5) The moisture source areas of these rainfall processes have been analyzed; it should be noticed that not only the Bay of Bengal, but also the South China Sea and the West Pacific were the important moisture source areas. 6) The analysis of the cloud systems indicated that the meso- β scale convective cloud clusters provided very favorable conditions to the occurrence of heavy rainfall.

Key words: heavy rainfall; frontal systems; convective cloud clusters; monsoon circulation; south China