

# 利用热带测雨卫星的测雨雷达资料对 1997/1998 年 El Niño 后期热带太平洋降水结构的研究

李 锐 傅云飞\* 赵 萍

中国科学技术大学地球与空间科学学院, 合肥 230026

**摘 要** 利用热带测雨卫星的测雨雷达 (TRMM PR) 的探测结果, 对 1997/1998 年 El Niño 后期热带太平洋的降水结构进行了研究, 并对比了非 El Niño 的 1999 年和 2000 年的同期降水情况, 取得如下结果: (1) 1997/1998 El Niño 后期与非 El Niño 期间相比, 1997/1998 El Niño 后期, 热带东、中太平洋层云降水和对流云降水的比例明显增大, 平均降水率也增大, 并且层云强降水的比例增多, 而层云弱降水比例减少。(2) 在非 El Niño 期间, 热带东、中太平洋对流云降水系统较为浅薄, 冻结层高度比西太平洋低约 0.5 km, 而在 1997/1998 El Niño 后期, 这种差异明显减小, 热带东、中太平洋对流云降水和层云降水都变得深厚, 对流云降水和层云降水的降水率随高度的变化也发生了变化。(3) 对大气环流的分析表明, 对应于降水结构的变化, 热带太平洋地区的高空辐合辐散分布也发生了改变, 导致 Walker 环流在 1997/1998 El Niño 后期减弱。

**关键词** 热带降水测量卫星 降水结构 El Niño

文章编号 1006-9895(2005)02-0225-11

中图分类号 P444

文献标识码 A

## Characteristics of Rainfall Structure over the Tropical Pacific during the Later Period of 1997/1998 El Niño Derived from TRMM PR Observations

LI Rui, FU Yun-Fei, and ZHAO Ping

School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026

**Abstract** Based upon the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Radar (PR) measuring data, the rainfall structures over the tropical Pacific Ocean during the later period of 1997/1998 El Niño are analyzed, and compared with those in the same period of the non-El Niño years in 1999/2000. Results indicate higher area fractions and averaged rainfall rates for both stratiform and convective rains over the tropical eastern and central Pacific Ocean in the later period of 1997/1998 El Niño than in the same period of non-El Niño in 1999/2000. Results also show the significant increase of heavy stratiform rain and decrease of weak stratiform rain over both the regions in the later period of 1997/1998 El Niño. During the non-El Niño period of 1999/2000, the vertical structures of precipitations show shallower convective rain, and lower brightband altitudes of stratiform rain over the eastern and central Pacific Ocean compared with those over the tropical western Pacific Ocean. However, during the later period of 1997/1998 El Niño, the convective rains become deeper and the stratiform brightband altitudes increase over both the regions due to SSTA increases over there. Results expose significant variations of the growth rate of both convective and stratiform rain with altitude in the later period of 1997/1998 El Niño compared with that in the non-El Niño period. Atmospheric circulations display the pattern changes of convergences and divergences in the upper atmosphere layer, and a weaker Walker circulation over the tropical Pacific Ocean in the later period of 1997/1998 El Niño as resulted from SSTA and precipitation structure changes over there.

**Key words** TRMM, precipitation structure, El Niño

收稿日期 2003-10-17 2004-06-10 收到修定稿

资助项目 中国科学院知识创新工程重要方向项目基金 ZKCX2-SW-210, 国家自然科学基金资助项目 40175015、40375018 和 40233031, 中国科学院知识创新工程重点项目基金 KZCX2-208 和国家教育部留学归国人员科研启动基金

作者简介 李锐, 男, 1974 年出生, 博士研究生, 现主要从事卫星遥感云和降水方面的研究。E-mail: rl@ustc.edu

\* 通讯作者 fyf@ustc.edu.cn

## 1 引言

1997/1998 年发生了上个世纪最强的一次 El Niño 事件。海表温度异常 (SSTA) 升高始于 1997 年 4 月至 6 月的赤道东太平洋, 于 1997 年底升到最高值, 随后开始减弱, 直至 1998 年 5 月海表温度异常升高结束 (见图 1 中 Niño-3, Niño-4 区海表温度变化曲线)。此次 El Niño 过程, 热带太平洋的降水量亦有显著的不同反应。图 1 是 GPCP (Global Precipitation Climatology Project) 降水资料<sup>[1]</sup>所反映的热带东太平洋 (15°S ~ 15°N, 120°W ~ 90°W)、中太平洋 (15°S ~ 15°N, 170°W ~ 140°W)、西太平洋 (15°S ~ 15°N, 160°E ~ 180°E) 自 1997 年至 2000 年逐月降水量异常变化和据美国大气海洋管理局 (NOAA) 的气候诊断中心 (Climate Diagnostics Center) 资料<sup>[2]</sup>所反映的 Niño 3, Niño 4 区 (5°S ~ 5°N, 170°W ~ 120°W) 海表温度异常变化。它清楚地表明此次 El Niño 开始至强盛过程中 (1997 年

6 月至 1997 年 12 月) 热带东、中太平洋降水强度随着 SSTA 的升高而增大; 且在 El Niño 强度减弱、SSTA 减小过程中 (1997 年 12 月至 1998 年 4 月) 热带东、中太平洋降水强度滞后变化的趋势。随后, 当海表温度开始恢复正常时, 热带东、中太平洋降水强度迅速减小。而热带西太平洋降水异常的变化趋势与 Niño 3, Niño 4 区 SSTA 演变的相关关系不明显。El Niño (或 ENSO) 与降水异常分布之间的关系, 已有很多研究<sup>[3-9]</sup>。然而, El Niño 过程中海表温度异常变化对热带太平洋降水垂直结构的影响, 受探测手段的限制, 尚未详尽研究。

降水的垂直结构反映了降水云的热力和动力结构, 以及降水云中的微物理特征<sup>[10-14]</sup>。研究表明不同性质的降水因垂直结构不同, 在垂直方向上所释放的潜热对大气加热亦不同。如层云降水所释放的潜热主要位于对流层上部, 而对流云降水所释放的潜热几乎位于整个对流层<sup>[15]</sup>。因此, El Niño 期间不同性质降水 (如对流云降水和层云降水) 分布的异常, 将引起潜热

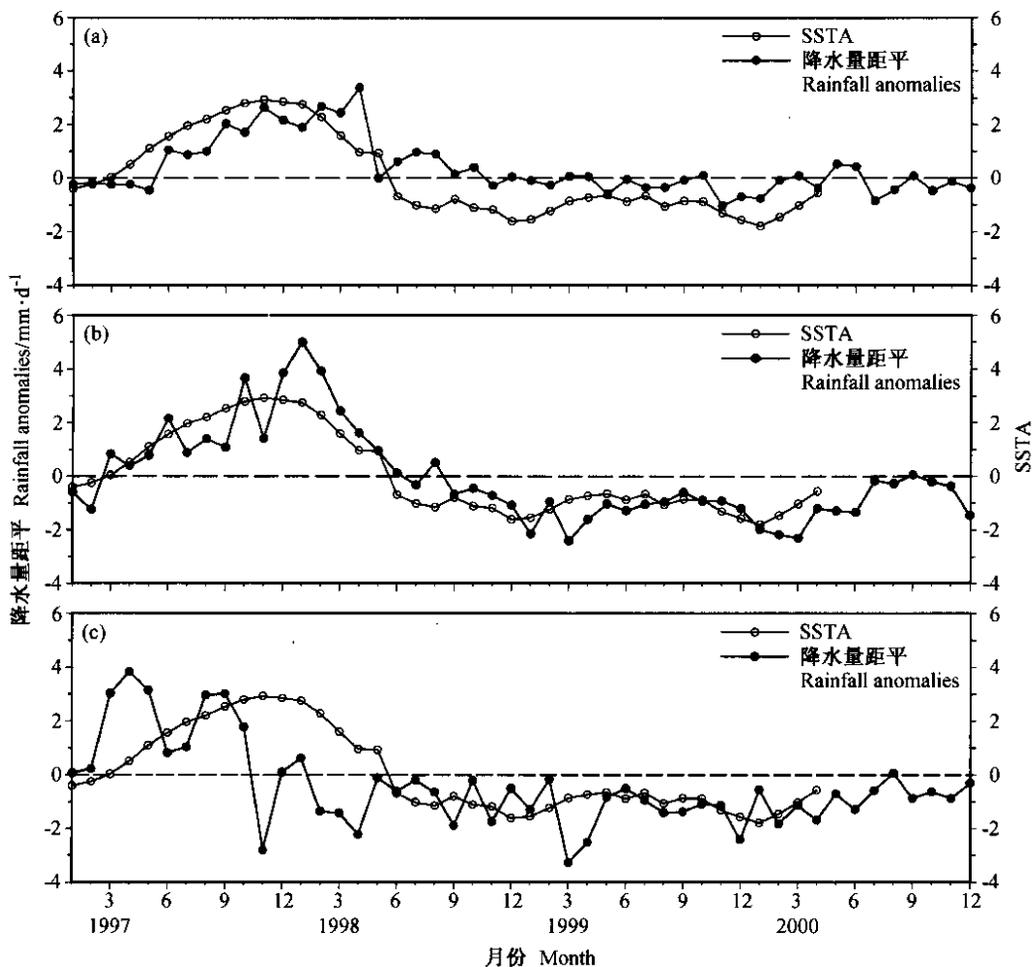


图 1 1997~2000 年热带东太平洋 (a)、中太平洋 (b) 和西太平洋 (c) 降水量距平和 Niño-3, Niño-4 区海表温度距平 (SSTA) 逐月变化

Fig. 1 Time series of average SST anomalies (SSTA) in the Niño-3, Niño-4 region and rainfall anomalies in the tropical (a) eastern Pacific (EP), (b) central Pacific (CP), and (c) western Pacific (WP) from 1997 to 2000

异常分布,从而进一步影响大气环流活动状况。为此,了解清楚 El Niño 过程中不同性质降水的分布和垂直结构,对进一步研究大气环流异常十分必要。

美日合作的热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission,简称 TRMM)携带了第一部测雨雷达(Precipitation Radar,简称 PR)及其他探测仪器于 1997 年 11 月 27 日发射升空,为我们细致研究热带洋面上的降水水平分布和垂直结构提供了珍贵资料。许多作者利用 PR 的资料对降水垂直结构和水平分布进行了研究<sup>[16-20]</sup>,如 Liu 和 Fu<sup>[17]</sup>指出热带降水垂直廓线受到某种统一的物理机制的制约,即给定雨型(对流云降水或层云降水)和近地面降水率 80% 以上的降水廓线也就确定了其形状,且其形状与它们的平均降水廓线很相近;另外,不同性质降水的水平分布表明,热带层云降水面积大于对流云降水面积,但一般而言,后者对总降水量的贡献稍大于前者。

本文利用 TRMM PR 的探测结果,就 1997/1998 El Niño 后期(1998 年 1 月至 4 月)的热带太平洋平均降水结构进行了研究,并对比了 1999 和 2000 年同期的平均降水结构。在此基础上,探讨了 1997/1998 El Niño 后期热带太平洋平均大气环流状况与 1999 和 2000 年同期平均大气环流状况的差别。

## 2 资料

本文研究使用的 TRMM PR 标准资料(2A25)由日本空间发展署(NASDA)的地球观测研究中心(EORC)提供。TRMM 卫星是一颗极轨卫星,轨道倾角约 35°,轨道高度为 350 km(2001 年 8 月 7 日后改为 400 km),它环绕地球一周的时间约为 91.6 min。PR 探测的扫描宽度约为 220 km,每天在 38°S 至 38°N 之间约有 16 条轨道。2A25 给出的是逐条轨道上降水率( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )的三维分布,它的水平分辨率是 4.3 km(星下点),垂直分辨率是 250 m(星下点),垂直探测高度自地表至 20 km<sup>[21-23]</sup>。根据 TRMM V 方法<sup>[24]</sup>,2A25 还提供了降水类型的信息。降水分为对流云降水、层云降水和其他类型降水。如果 PR 回波在 0°C 层附近出现亮带,则相应的降水垂直廓线定义为层云降水廓线;如果 PR 回波无亮带,但回波中一旦出现超过 39 dBZ 的信号,则相应的降水垂直廓线定义为对流云降水廓线。另外,还有两种情况,也被视为对流云降水:在 0°C 层高度以上,有 12 个或更多反射率超过 30 dBZ,或反射率超过 30 dBZ,且它的附近出现反射率在 40 dBZ 以上的强对流云降水。非对流云和层云降水情况的降水定义为其他降水类型。由于其他降水类型出现数量少,

平均降水率小,所以,本研究不考虑该类降水。考虑 PR 的灵敏度(为 17 dBZ,相当于  $0.4\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  降水率<sup>[25]</sup>),本研究忽略近地表降水强度在  $0.5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  以下的降水。

用于本文研究的样本见表 1,表中给出的是 1997/1998 El Niño 后期(1998 年 1 月至 4 月, JFMA)PR 在热带东太平洋(15°S ~ 15°N, 120°W ~ 90°W)、中太平洋(15°S ~ 15°N, 170°W ~ 140°W)、西太平洋(15°S ~ 15°N, 160°E ~ 180°)探测的像素个数(即样本数)和平均降水率。为便于对比,表 1 中还相应列出了 1999 年 1 月至 4 月与 2000 年 1 月至 4 月(JFMA)像素个数和平均降水率。

表 1 中显示,在非 El Niño 年份的 1999 年与 2000 年 1 月至 4 月,热带东、中太平洋层云平均降水率均小于热带西太平洋层云平均降水率。而在 1997/1998 El Niño 事件的后期(1998 年 1 月至 4 月),热带东、中太平洋层云平均降水率均超过热带西太平洋层云平均降水率。层云降水的像素比较表明,1998 年 1 月至 4 月热带东(中)太平洋层云降水像素分别是该区域 1999 年同期的 2.04(2.32)倍、2000 年同期的 2.02(2.24)倍。而 1998 年 1 月至 4 月热带西太平洋层云降水像素数量与该区域 1999 年同期和 2000 年同期的层云降水像素数量相当(1.09 倍和 1.12 倍)。

从表 1 可以看出,对于对流云降水,不论 El Niño 是否发生,热带西太平洋的对流云平均降水率均比热带东、中太平洋对流云平均降水率大,只是 1998 年 1 月至 4 月热带西太平洋与热带东、中太平洋对流云平均降水率的差异减小。但是,1998 年 1 月至 4 月热带东、中太平洋对流云降水出现的数量,与非 El Niño 年份的 1999 年和 2000 年同期相比,发生较大变化。1998

表 1 降水的样本统计

Table 1 Statistics of sample radar precipitation

		对流云降水		层云降水	
		Convective rain		Stratiform rain	
		像素 (个数) Pixel number	降水率 Mean rain rate ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )	像素 (个数) Pixel number	降水率 Mean rain rate ( $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )
1998	东太平洋 EP	151006	8.24	873388	1.85
	中太平洋 CP	211447	8.32	1396526	1.78
	西太平洋 WP	123862	8.36	710503	1.68
1999	东太平洋 EP	99053	7.25	429031	1.52
	中太平洋 CP	147723	7.06	601427	1.50
	西太平洋 WP	137983	7.48	649447	1.64
2000	东太平洋 EP	97974	7.13	432137	1.48
	中太平洋 CP	145472	7.00	623731	1.46
	西太平洋 WP	149672	7.74	636127	1.65

年 1 月至 4 月热带东(中)太平洋对流云降水像素分别是该区域 1999 年同期的 1.52 (1.43) 倍、2000 年同期的 1.54 (1.45) 倍。而 1998 年 1 月至 4 月热带西太平洋对流云降水像素数量与该区域 1999 年和 2000 年同期相比均减少, 1998 年 1 月至 4 月热带西太平洋对流云降水像素数量分别是该区域 1999 年同期的 0.90 倍和 2000 年同期的 0.83 倍。这些结果表明, 1997/1998 El Niño 后期热带东、中太平洋对流云降水出现的数量比非 El Niño 年份的 1999 年和 2000 年同期增加, 而热带西太平洋对流云降水出现的数量则有所减少。

上述统计表明, 1997/1998 El Niño 后期热带中、东太平洋对流云降水和层云降水的样本数量和平均降水率与非 El Niño 年份的 1999 年和 2000 年同期相比, 发生了很大的变化, 热带中、东太平洋在非 El Niño 年份的 1999 年和 2000 年同期, 对流云降水和层云降水的样本数量和平均降水率差异较小。

本文所用的 NCEP (National Centers for Environmental Prediction) 资料为 17 层气压坐标系再分析资料, 水平分辨率为  $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。NCEP 资料详见文献 [26] 中网址。

### 3 结果

#### 3.1 降水的水平分布

图 2 是测雨雷达给出的热带太平洋地区近地面 1998, 1999 和 2000 年 1 月至 4 月 (图 2a, b, c) 平均的降水率水平分布。图 2 清楚地表明, 1997/1998 El Niño 后期整个热带太平洋平均降水率分布与 1999 年、2000 年同期的平均降水率分布有很大不同, 而 1999 年和 2000 年 1 月至 4 月的平均降水率分布非常接近。在 1997/1998 El Niño 后期的 1998 年 1 月至 4 月, 赤道太平洋从  $90^\circ\text{W}$  至  $150^\circ\text{E}$  出现了一条平均降水率大于  $8 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$  的东西向雨带; 而在非 El Niño 的 1999 年和 2000 年 1 月至 4 月, 降水区主要位于赤道外的热带西太平洋和西南太平洋地区。由于 1999 年和 2000 年 1 月至 4 月的降水分布和样本统计特征相近, 同时为了强调 1997/1998 El Niño 事件对热带太平洋降水结构的影响, 以及方便比较分析, 本文将 1999 年和 2000 年 1 月至 4 月的情形合在一起考虑。

在 El Niño 发生的后期, 海表温度异常分布不仅造成图 2 中平均降水率的异常水平分布, 而且还引起相应降水性质(对流云降水和层云降水)的异常水平分布。图 3 给出的是热带太平洋地区 1997/1998 年 El Niño 后期 (1998 年 1 月至 4 月) 和非 El Niño 的 1999/2000 年同期平均的对流云降水 (图 3a, b) 和层云降水 (图 3c, d) 的比面积水平分布 (比面积是指发生某类型降水的像素与总

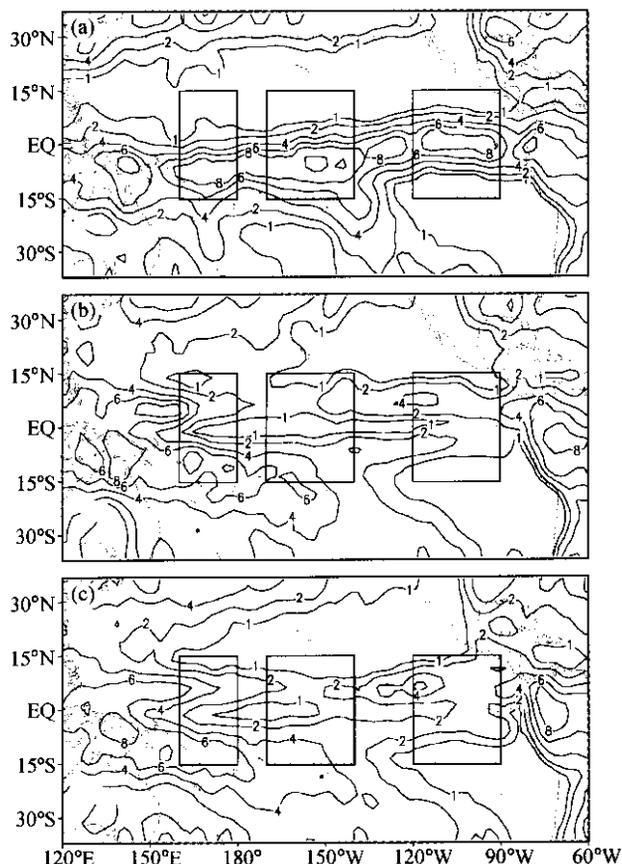


图 2 测雨雷达给出的太平洋 ( $37^\circ\text{S} \sim 37^\circ\text{N}$ ) 近地表平均降水率 (单位:  $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$ ) 三个矩形框分别为所选择的西、中、东太平洋区域 (从左至右)。(a) 1998 年 1~4 月 (b) 1999 年 1~4 月 (c) 2000 年 1~4 月

Fig. 2 Mean precipitation from TRMM PR during January - April (JFMA) 1998 (a), JFMA 1999 (b), and JFMA 2000 (c). Boxes indicate the selected regions of the western, central and eastern Pacific area

观测像素的比值, 它反映了某类型降水出现的概率)。图 3 表明, 在非 El Niño 的 1999/2000 年 1 月至 4 月, 这两种降水主要发生在赤道以外的热带西太平洋和西南太平洋, 而在 1997/1998 年 El Niño 后期, 整个赤道中、东太平洋层云降水和对流云降水的比面积显著增加, 两层云降水和层云降水的比面积平均值分别增加了 1.5 倍和 0.4 倍, 赤道西太平洋对流云降水的比面积平均值稍有减小 (减少了 0.2 倍), 层云降水的比面积平均值稍有增加 (增加了 0.1 倍)。

通过计算对流云降水和层云降水的比降水量 (比降水量是指某类型降水量与观测到的总降水量的比值, 它反映了某类型降水对总降水的贡献) 发现 (见表 2): 在 1997/1998 年 El Niño 后期, 热带东、中太平洋和热带西太平洋层云降水对总降水量的贡献 (56.5%, 58.6% 和 53.5%) 均高于对流云降水对总降水量的贡

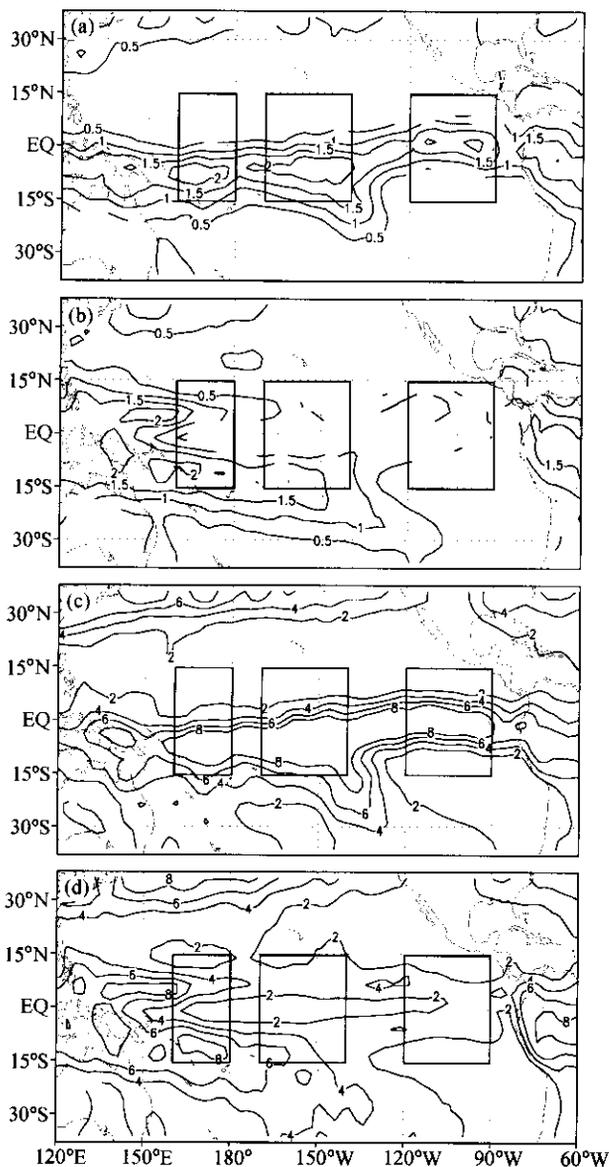


图3 太平洋(37°S~37°N)降水比面积分布(%),三个矩形框分别为所选择的西、中、东太平洋区域(从左至右)(a)1998年1~4月对流云降水(b)1999年和2000年1~4月对流云降水(c)1998年1~4月层云降水(d)1999年和2000年1~4月层云降水  
Fig. 3 Averaged area fraction of TRMM PR convective rain during JFMA 1998 (a) and JFMA 1999 and 2000 (b), and stratiform rain during JFMA 1998 (c) and JFMA 1999 and 2000 (d). Boxes are the same as those in Fig. 2

献(43.5%、41.4%和46.5%),其中热带东、中太平洋层云降水比对流云降水对总降水量的贡献多出13%和17%,而热带西太平洋层云降水比对流云降水对总降水量的贡献仅多7%。在非El Niño的1999/2000年同期,热带东、中太平洋的层云降水对总降水量的贡献(47.7%和46.8%)均小于对流云降水对总降水量的贡献(52.3%和53.2%)。热带西太平洋两种降水对总降

表2 不同类型降水的比降水量

	1998			1999/2000		
	东太平 洋 EP	中太平 洋 CP	西太平 洋 WP	东太平 洋 EP	中太平 洋 CP	西太平 洋 WP
层云比降水量(%) Stratiform rainfall fraction	56.5	58.6	53.5	47.7	46.8	49.1
对流云比降水量(%) Convective rainfall fraction	43.5	41.4	46.5	52.3	53.2	50.9

水量的贡献相当(49.1%和50.9%)。由此可见,在1997/1998年El Niño后期,热带中、东太平洋层云降水对总降水量的贡献比非El Niño的1999/2000年同期增加了10%有余。

为考察1997/1998年El Niño事件后期不同强度降水对海表温度异常变化的响应,对近地表(2km)降水率进行了4个不同强度的划分。对流云降水0.5~5 mm·h<sup>-1</sup>、5~10 mm·h<sup>-1</sup>、10~20 mm·h<sup>-1</sup>、大于20 mm·h<sup>-1</sup>、层状云降水0.5~2 mm·h<sup>-1</sup>、2~5 mm·h<sup>-1</sup>、5~10 mm·h<sup>-1</sup>、大于10 mm·h<sup>-1</sup>。图4给出的是1997/1998年El Niño后期4种不同强度降水像素个数与非El Niño的1999/2000年同期4种不同强度降水的平均像素个数之比。

图4表明,在1997/1998年El Niño后期,热带东、中太平洋层云降水中,强降水对总降水量的贡献明显增大,而弱降水的贡献减小。如热带东太平洋层云降水中,大于10 mm·h<sup>-1</sup>的降水增加了84%,5~10 mm·h<sup>-1</sup>的降水增加了55%,2~5 mm·h<sup>-1</sup>的降水增加了18%,0.5~2 mm·h<sup>-1</sup>的弱降水却减小了23%。热带中太平洋的情况与东太平洋类似。热带西太平洋的变化幅度较小,都在10%以内。但是,对于对流云降水,不同强

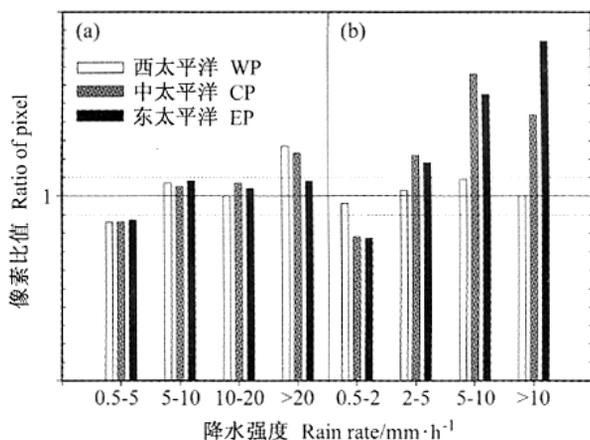


图4 1998年1~4月和1999年、2000年同期,不同强度降水的平均像素比(a)对流云降水(b)层云降水

Fig. 4 The ratio of rain pixels during JFMA 1998 to those during JFMA 1999/2000 for convective rain (a) and stratiform rain (b) in the Pacific

度降水对总降水的贡献程度变化不明显。

### 3.2 降水垂直结构的特点

为了从整体上把握热带太平洋降水系统中对流云降水和层云降水的垂直结构,我们采用了类似于文献[27]的高度频率分布图(Counter Frequency Attitude Diagram,简称CFAD)技术,绘制了热带东、中、西太平洋对流云降水(图5(见图版1))和层云降水(图6(见图版1))的标准化降水率随高度的分布图(Normalized Counter Rainrate Altitude Diagram,简称NCRAD)此标准化是分别针对对流云降水廓线和层云降水廓线的总数量进行标准化。该方法一方面可以克服CFAD方法中降水云上部虚假的等值线高频现象,另一方面,可以很好地表现对流云降水与层云降水垂直结构的差别和各自的特点<sup>[28]</sup>。

图5表明,在非El Niño的1999/2000年1月至4月(图5d,e,f),东、中太平洋和西太平洋对流云降水垂直结构之间存在明显的差异,主要表现在:东、中太平洋对流云降水系统比西太平洋浅薄。而在1997/1998 El Niño后期(图5a,b,c),由于东、中太平洋海表温度的上升,使得东、中太平洋对流云降水系统变得深厚,与西太平洋相类似。此外,从图5a和b中还可推断1997/1998年El Niño后期,东、中太平洋对流云降水系统上部(5~7 km)的冰相粒子含量也明显的高于1999/2000年同期。

层云降水的NCRAD见图6,图中的紫色直线对应层云降水亮带的平均高度(大约对应平均冻结层高度)。在非El Niño的1999/2000年1月至4月(图6d,e,f)热带西太平洋的层云降水亮带平均高度比热带东、中太平洋高0.5 km(热带东、中太平洋约为4 km,热带西太平洋约为4.5 km),而在El Niño后期的1998年1月至4月热带东、中太平洋层云降水亮带平均高度升高了0.5 km,与热带西太平洋亮带高度基本一致。如果大气温度递减率按 $6.5^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 计算,那么,可以推算出非El Niño期间热带东、中太平洋海表温度约为 $26^{\circ}\text{C}$ ,而在El Niño期间约为 $29^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,东、中太平洋海表温度的异常升高,直接导致大气中 $0^{\circ}\text{C}$

层高度升高,降水变得深厚。

为了更细致地了解1997/1998年El Niño事件对热带太平洋降水垂直结构的影响,图7给出了1997/1998年El Niño后期与1999/2000年同期热带东太平洋(图7a,b)、热带中太平洋(图7c,d)和热带西太平洋(图7e,f)不同强度的对流云降水( $0.5\sim 5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $5\sim 10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $10\sim 20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 大于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )和层云降水( $0.5\sim 2\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $2\sim 5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $5\sim 10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ , 大于 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )平均廓线。结果表明,1997/1998年El Niño的后期与非El Niño的1999/2000年同期相比,热带东、中太平洋降水垂直廓线发生了明显的变化,表现为对流云降水变得深厚、层云降水亮带升高,这些特点与图5和图6的结果一致。另一方面,图7表明热带西太平洋降水平均廓线受此次El Niño事件的影响很小。图5、图6和图7均揭示一个重要现象,即1997/1998年El Niño后期,热带东、中太平洋降水垂直结构与热带西太平洋的差异减小。

另外,图7中还表明,1997/1998年El Niño后期与非El Niño年同期相比,热带东、中太平洋降水系统的平均降水率随高度变化速率( $\partial R/\partial H$ )有所不同。根据平均降水廓线斜率的变化,可将对流云降水廓线分为三层,分别是2~5 km, 5~6.5 km, 6.5~10 km;层云降水廓线分为四层,分别是:亮带层(约0.5 km厚),亮带层以下至地面、亮带层以上至6.5 km以及6.5~10 km。

为定量讨论,我们通过线性拟合计算了上述各层的 $\Delta\log R/\Delta H$ 值,并对El Niño和非El Niño期间的计算结果进行比较。表3是对热带东太平洋 $5\sim 10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 对流云降水率和 $2\sim 5\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 层云降水平均廓线的计算结果(热带中太平洋的情况类似于东太平洋)。由于平均降水率一般随着高度的减小而增大,所以表中计算结果均为负值,而绝对值的大小则对应于降水率增长速度的快慢。表3表明,不论El Niño期间或非El Niño期间,5~6.5 km和亮带层分别是对流云降水率和层云降水率变化速率最大的层次,且层云降水在 $0^{\circ}\text{C}$ 层高度以下增长率几乎为零(参见图7)。在1997/1998年El Niño后期,对流云降水率在5 km以下的变率小

表3 平均降水廓线的斜率( $\Delta\log R/\Delta H$ )

Table 3 Characteristic slopes ( $\Delta\log R/\Delta H$ ) of mean profiles

对流云降水 Convective rain			层云降水 Stratiform rain		
层次 Layer	1998	1999/2000	层次 Layer	1998	1999/2000
2.0~5.0 km	-0.06	-0.11	2.0 km~亮带层底 Bottom of brightband	~0	~0
5.0~6.5 km	-0.45	-0.42	亮带层 Brightband layer	-0.55	-0.39
6.5~10 km	-0.26	-0.23	亮带层顶 Top of brightband ~6.5 km	-0.40	-0.38
			6.5~10.0 km	-0.30	-0.27

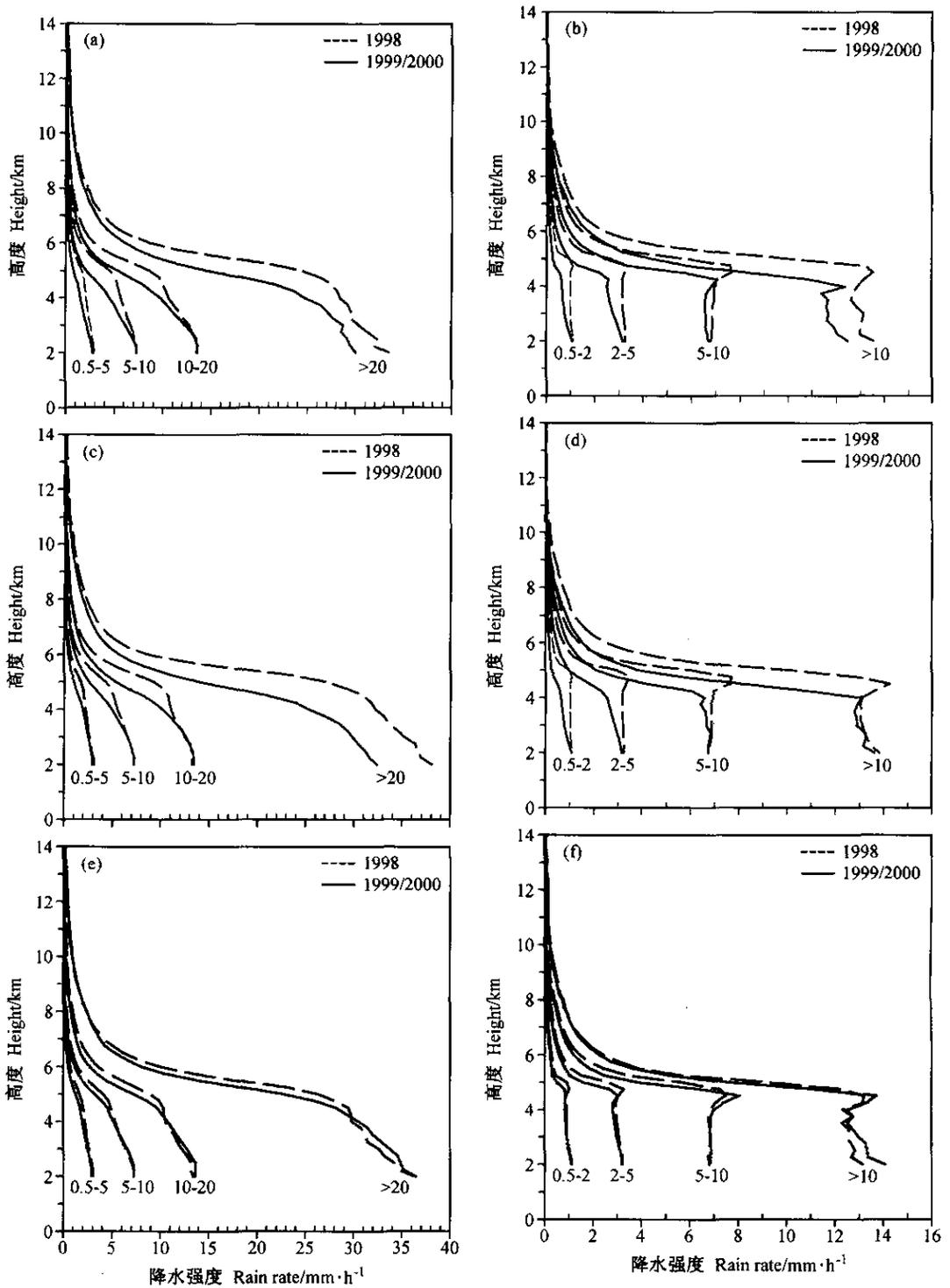


图 7 热带太平洋 1998 年 1~4 月与 1999 年、2000 年同期平均降水廓线 (a) 东太平洋对流云降水 (b) 东太平洋层云降水 (c) 中太平洋对流云降水 (d) 中太平洋层云降水 (e) 西太平洋对流云降水 (f) 西太平洋层云降水

Fig. 7 Mean vertical profiles for convective(left panel) and stratiform rain(right panel) in the eastern Pacific(a, b), the central Pacific(c, d), and the western Pacific(e, f) during JFMA 1998 and 1999/2000

于 1999/2000 年同期,而在 5 km 以上对流云降水率的变率均大于 1999/2000 年同期,对于层云降水,亮带层及以上,其降水率变率都超过 1999/2000 年同期。降水率随高度变化速率的改变,表征了云中降水粒子随高度增

长快慢的变化,它在一定程度上反映了云中微物理过程和动力过程的变化。因此,从表 3 可以得出 1997/1998 年 El Niño 后期,热带东、中太平洋降水云中微物理过程和动力过程较 1999/2000 年同期有很大改变。

### 3.3 大气环流分布

为了解大气环流对 1997/1998 年 El Niño 后期的响应情况,我们利用 NCEP 资料计算了热带太平洋地区 200 hPa 等压面上的速度势分布,沿赤道纬向垂直剖面上纬向环流,以及 120°W ~ 90°W, 170°W ~ 140°W, 160°E ~ 180°范围的平均经向环流,并对比分析了 1999/2000 年同期平均的大气环流状况。结果如图 8、图 9

和图 10 所示。

从图 8b 可以看到,1999 年 1 月至 4 月与 2000 年 1 月至 4 月平均的 200 hPa 等压面上,热带西太平洋高空为强辐散区(中心强度达到  $9 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),而热带东、中太平洋高空基本上为辐合区,相应的垂直环流必然是热带西太平洋为上升气流、热带东、中太平洋为下沉气流的 Walker 环流(图 9b)。但是,在 1997/1998

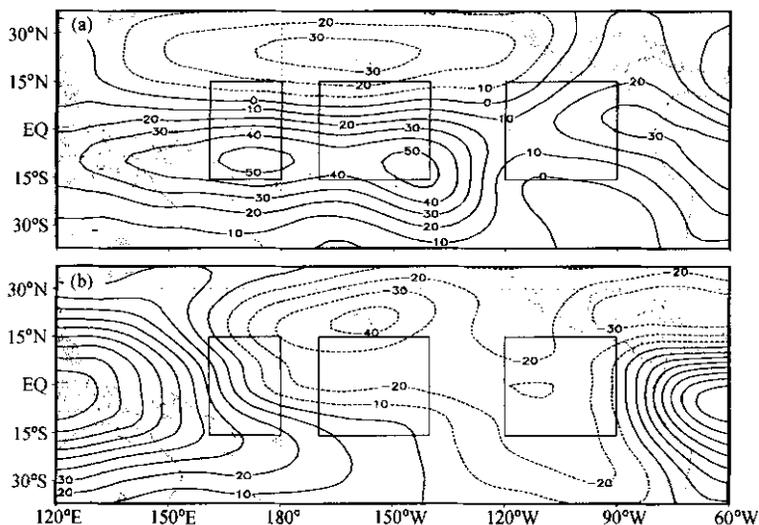


图 8 热带太平洋 200 hPa 平均速度势分布(单位:  $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ),三个矩形框分别为所选择的西、中、东太平洋区域(从左至右)。(a)1998 年 1~4 月平均 (b)1999/2000 年 1~4 月平均

Fig. 8 Horizontal distribution of averaged velocity potential (units:  $10^5 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ) in the tropical Pacific at 200hPa during JFMA 1998 (a) and JFMA 1999/2000 (b)

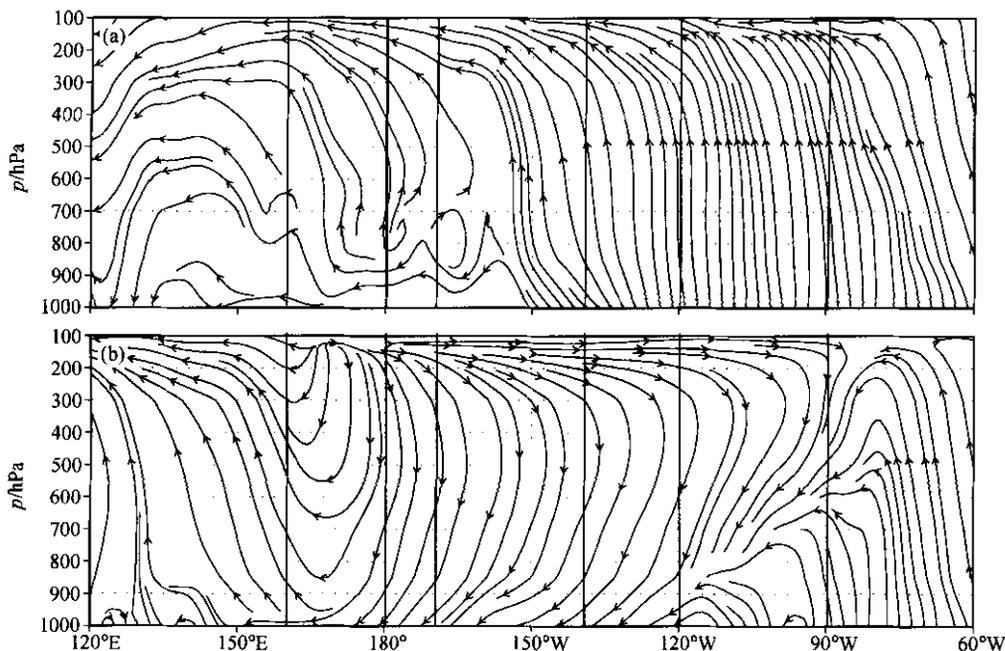


图 9 热带太平洋沿赤道平均纬向环流,三个矩形框分别为所选择的西、中、东太平洋区域(从左至右)。(a)1998 年 1~4 月平均 (b) 1999/2000 年 1~4 月平均

Fig. 9 Averaged zonal circulation along the equator during JFMA 1998 (a) and JFMA 1999/2000 (b). Boxes are the same as those in Fig. 2

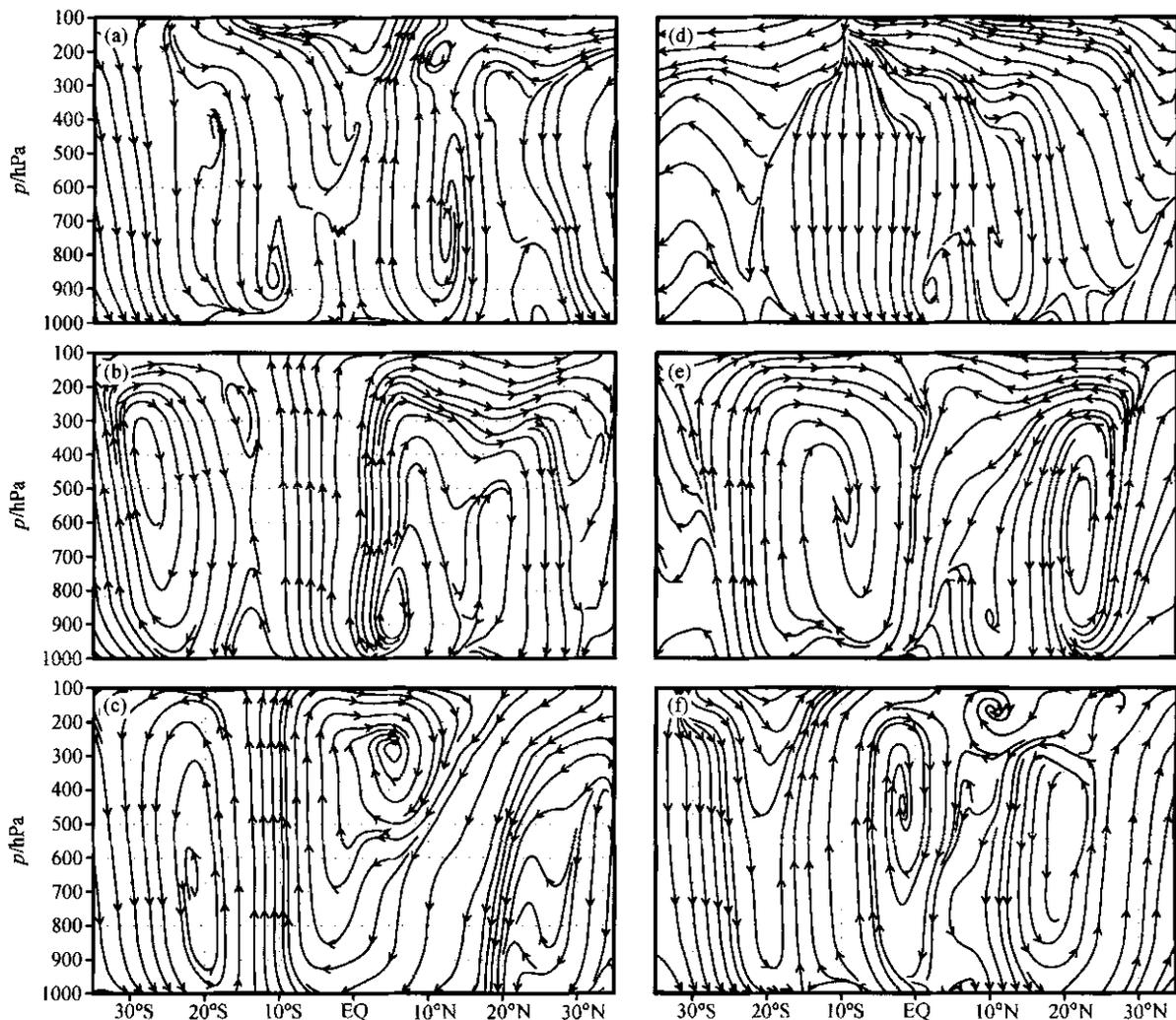


图 10 太平洋 120°W ~ 90°W (a, d)、170°W ~ 140°W (b, e)、160°E ~ 180°(c, f)范围的平均经向环流。左边代表 1998 年 1~4 月平均, 右边代表 1999/2000 年 1~4 月平均

Fig. 10 Averaged meridional circulation during JFMA 1998 (left panel) and JFMA 1999/2000 (right panel) in the eastern Pacific (a, d), central Pacific (b, e) and western Pacific (c, f)

年 El Niño 后期 (图 8a、图 9a) 这一环流分布发生了很大的改变, 图 8b 所示的位于 120°E 200 hPa 的强辐散中心明显向东移动至热带中太平洋, 即在 170°E 至 145°W 出现了一宽广的辐散区 (有两个辐散中心, 强度达到  $5 \times 10^6 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 同时, 在热带东太平洋 200 hPa 也出现了一宽广的弱辐散区, 而热带西太平洋 200 hPa 辐散强度减弱。1997/1998 年 El Niño 后期高空辐合辐散场的这种分布, 必然导致正常的 Walker 环流减弱。因此, 图 9a 赤道太平洋上空出现了一反 Walker 环流。

与 1999/2000 年 1 月至 4 月的平均状况相比, 不仅 1997/1998 年 El Niño 后期热带太平洋纬向环流减弱, 而且, 1997/1998 年 El Niño 后期太平洋的 Hadley 环流也发生了很大变化。在非 El Niño 的 1999/2000 年 1 月至 4 月, 热带东太平洋为一致的下沉运动 (图 10d),

Hadley 环流位于南半球的中太平洋 25°S ~ 赤道之间 (上升运动位于 15°S 以南, 见图 10e) 和西太平洋 15°S ~ 5°N 之间 (上升运动位于 15°S ~ 5°S, 见图 10f)。而在 1997/1998 年 El Niño 后期, 热带东太平洋出现了 Hadley 环流, 它的上升运动位于热带东太平洋 5°N ~ 15°N 之间 (图 10a), 而中太平洋 Hadley 环流的上升运动向北移至 10°S ~ 10°N 之间 (图 10b), 在西太平洋 10°S 附近两侧的 Hadley 环流比非 El Niño 年更明显。由上可见, 1997/1998 年 El Niño 后期太平洋的 Hadley 环流加强, 它的加强很可能与 Walker 环流减弱有关。

以上事实表明, 在 1997/1998 年 El Niño 后期, 伴随着降水结构的变化, 热带太平洋地区的大气环流也发生了明显的变化, 即 Walker 环流减弱、经向环流加强, 这是 1997/1998 年 El Niño 后期的热带东、中太平洋地

区降水增加和降水垂直厚度增厚的必然结果。

## 4 结论

本文利用热带降水测量卫星( TRMM )的测雨雷达( PR )探测结果,分析研究了 1997/1998 年 El Niño 后期( 1998 年 1 月至 4 月 )热带太平洋降水结构的特点,并对比分析了 1999 年 1 月至 4 月与 2000 年 1 月至 4 月平均的降水结构。

研究表明,与 1999/2000 非 El Niño 的降水分布相比,在 1997/1998 El Niño 后期,整个热带东、中太平洋层云降水和对流云降水的比面积显著增加,而在热带西太平洋,这两种类型的降水的比面积变化不太明显。与非 El Niño 的 1999 年与 2000 年 1 月至 4 月平均相比,1997/1998 年 El Niño 后期热带东、中太平洋层云降水像素增加了 1 倍以上,对流云降水像素增加了近 0.5 倍,热带西太平洋层云降水像素仅增加了 0.1 倍,对流云降水像素却减少了 0.1 倍;热带东、中太平洋层云平均降水率增加 20% 以上,对流云平均降水率增加 15% 以上。结果还表明,在 1997/1998 El Niño 后期,热带东、中太平洋层云不同强度降水的分布发生明显变化,体现为弱的层云降水比例减少,而强的层云降水比例增加。表明 El Niño 事件对不同强度层云降水具有不同程度的影响。

降水的垂直结构分析表明,热带西太平洋降水垂直结构受 1997/1998 年 El Niño 事件的影响较小,而热带东、中太平洋降水垂直结构在 1997/1998 年 El Niño 后期发生了较大变化。与非 El Niño 年同期相比,热带东、中太平洋降水垂直结构在 1997/1998 年 El Niño 后期的特点可概括为:对流云降水系统变得深厚,层云降水的亮带高度升高了约 0.5 km,对流云降水率在 5 km 以下的变率减小,在 5 km 以上增大;层云降水在亮带层及其以上的降水率变率都超过 1999/2000 年同期。造成 1997/1998 El Niño 后期热带东、中太平洋降水垂直结构的上述变化,是该地区海表温度的异常升高,大气稳定度下降,对流活动加强的结果。

太平洋区域 200 hPa 等压面速度势和沿赤道纬向环流,及东、中、西太平洋平均经向环流分析表明,1997/1998 El Niño 后期,东、中太平洋由非 El Niño 年的高空辐合区变成辐散区,西太平洋的辐散减弱,东、中太平洋大气垂直运动由下降变成上升,而西太平洋上升运动减弱,从而造成 Walker 环流明显减弱和太平洋的 Hadley 环流加强。导致上述环流变化的主要原因,是热带东、中太平洋地区海表温度的异常升高,引起该地区降水增加和降水垂直厚度增厚,特别是该地区出

现大量层云降水,它释放的凝结潜热主要集中于对流层上层,使大气获得净浮力,致使热带太平洋地区的大气环流发生明显改变。

致谢 日本国家空间发展署( NASDA )的地球观测研究中心( EORC )为本研究提供了 TRMM PR 资料( IP 206 )。审稿人对本文提出很好的建议,在此表示感谢。

## 参考文献

- [ 1 ] Huffman G, Adler R, Arkin P, et al. The Global Precipitation Climatology Project ( GPCP ) combined precipitation dataset. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78**: 5 ~ 20
- [ 2 ] ftp://ftp. atmos. washington. edu/mantua/pnw\_ impacts/INDICES/nino34. long. latest
- [ 3 ] Yulaeva E, Wallace J M. The signature of ENSO in global temperature and precipitation fields derived from the Microwave Sounding Unit. *J. Climate*, 1994, **7**: 1719 ~ 1736
- [ 4 ] 吴国雄,孙凤英,王敬方,等. 降水对热带海表温度异常的领域响应 II. 资料分析. 大气科学, 1995, **19**: 663 ~ 676  
Wu Guoxiong, Sun Fengying, Wang Jingfang, et al. Neighbourhood responds of rainfall to tropical sea surface temperature anomalies, Part II. Data analysis. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ( in Chinese ), 1995, **19**: 663 ~ 676
- [ 5 ] 刘永强,丁一汇. ENSO 事件对我国季节降水和温度的影响. 大气科学, 1995, **19**: 200 ~ 208  
Liu Yongqiang, Ding Yihui. Reappraisal of the influence of ENSO events on seasonal precipitation and temperature in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ( in Chinese ), 1995, **19**: 200 ~ 208
- [ 6 ] 龚道溢,王绍武. ENSO 对中国四季降水的影响. 自然灾害学报, 1998, **7**: 44 ~ 52  
Gong Daoyi, Wang Shaowu. Impacts of ENSO on the seasonal rainfall in China. *Journal of Natural Disasters* ( in Chinese ), 1998, **7**: 44 ~ 52
- [ 7 ] 金祖辉,陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究. 大气科学, 1999, **23**: 663 ~ 672  
Jin Zuhui, Tao Shiyang. A study on the relationships between ENSO cycle and rainfalls during summer and winter in eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* ( in Chinese ), 1999, **23**: 663 ~ 672
- [ 8 ] Smith C, Adler R. ENSO indices based on patterns of satellite-derived precipitation. *J. Climate*, 2000, **13**: 2786 ~ 2793
- [ 9 ] Mason S J, Goddard L. Probabilistic precipitation anomalies associated with ENSO. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2001, **82**: 619 ~ 638
- [ 10 ] Houze R A Jr. Structure of atmospheric precipitation system-A global survey. *Radio Science*, 1981, **16**: 671 ~ 689
- [ 11 ] Szoke E J, Zipser E J, Jorgensen D P. A radar study of convective cells in mesoscale systems in GATE. Part I: Vertical profiles statistics and comparison with hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43**: 182 ~ 197
- [ 12 ] Hobbs P V. Research on clouds and precipitation past, present, and future. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1989, **70**: 282 ~ 285
- [ 13 ] Liu G, Takeda T. Two types of stratiform precipitating clouds associated with cyclones. *Tenki* ( in Japanese ), 1989, **36**: 147 ~ 157
- [ 14 ] Zipser E J, Lutz K R. The vertical profile of radar reflectivity of convective cells: A strong indicator of storm intensity and lightning

- probability? *Mon. Wea. Rev.* , 1994 , **122** : 1751 ~ 1759
- [ 15 ] Houze R A Jr. Stratiform precipitation in regions of convection : A meteorological paradox? *Bull. Amer. Meteor. Soc.* , 1997 , **70** : 282 ~ 285
- [ 16 ] Harris G N Jr , Bowman K P , Shin Dong-Bin. Comparison of freezing-level altitudes from the NCEP reanalysis with TRMM precipitation radar brightband data. *J. Climate* , 2000 , **13** : 4137 ~ 4148
- [ 17 ] Liu G , Fu Y. The characteristics of tropical precipitation profiles as inferred from satellite radar measurements. *J. Meteor. Soc. Japan* , 2001 , **79** : 131 ~ 143
- [ 18 ] Fu Y , Liu G. The variability of tropical precipitation profiles and its impact on microwave brightness temperatures as inferred from TRMM data. *J. Appl. Meteor.* , 2001 , **40** : 2130 ~ 2143
- [ 19 ] Berg W , Kummerow C , Morales C A. Differences between East and West Pacific rainfall systems. *J. Climate* , 2002 , **15** : 3659 ~ 3672
- [ 20 ] Fu Y , Lin Y , Liu G , et al. Seasonal characteristics of precipitation in 1998 over East Asia as derived from TRMM PR. *Adv. Atmos. Sci.* , 2003 , **20** : 511 ~ 529
- [ 21 ] Iguchi T , Meneghini R. Intercomparison of single-frequency methods for retrieving a vertical rain profile from airborne or spaceborne radar data. *J. Atmos. Oceanic Technol.* , 1994 , **11** : 1507 ~ 1516
- [ 22 ] Kummerow C , Barnes W , Kozu T , et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission ( TRMM ) Sensor Package. *J. Atmos. Oceanic Technol.* , 1998 , **15** : 809 ~ 817
- [ 23 ] Kummerow C , Simpson J , Thiele O , et al. The status of the Tropical Rainfall Measuring Mission ( TRMM ) after two years in orbit. *J. Appl. Meteor.* , 2000 , **39** : 1965 ~ 1982
- [ 24 ] Awaka J , Iguchi T , Okamoto K. Early results on rain type classification by the Tropical Rainfall Measuring Mission ( TRMM ) precipitation radar , Pro. 8th URSI commission F Open Symp. , Avenir , Portugal , 1998 , 134 ~ 146
- [ 25 ] Schumacher C , Houze R A Jr. Stratiform rain in the Tropics as seen by the TRMM precipitation radar. *J. Climate* , 2003 , **16** : 1739 ~ 1756
- [ 26 ] <http://wwwt.ncep.noaa.gov>
- [ 27 ] Yuter S E , Houze R A Jr. Three-dimensional kinematic and microphysical evolution of Florida cumulonimbus , Part III : Vertical mass transport , mass divergence , and synthesis. *Mon. Wea. Rev.* , 1995 , **123** : 1964 ~ 1983
- [ 28 ] 傅云飞 , 宇如聪 , 徐幼平 , 等. TRMM 测雨雷达和微波成像仪对两个中尺度特大暴雨降水结构的观测分析研究. *气象学报* , 2003 , **61** : 421 ~ 431
- Fu Yunfei , Yu Rucong , Xu Youping , et al. Analysis on precipitation structures of two heavy rain cases by using TRMM PR and TMI. *Acta Meteorologica Sinica* ( in Chinese ) , 2003 , **61** : 421 ~ 431

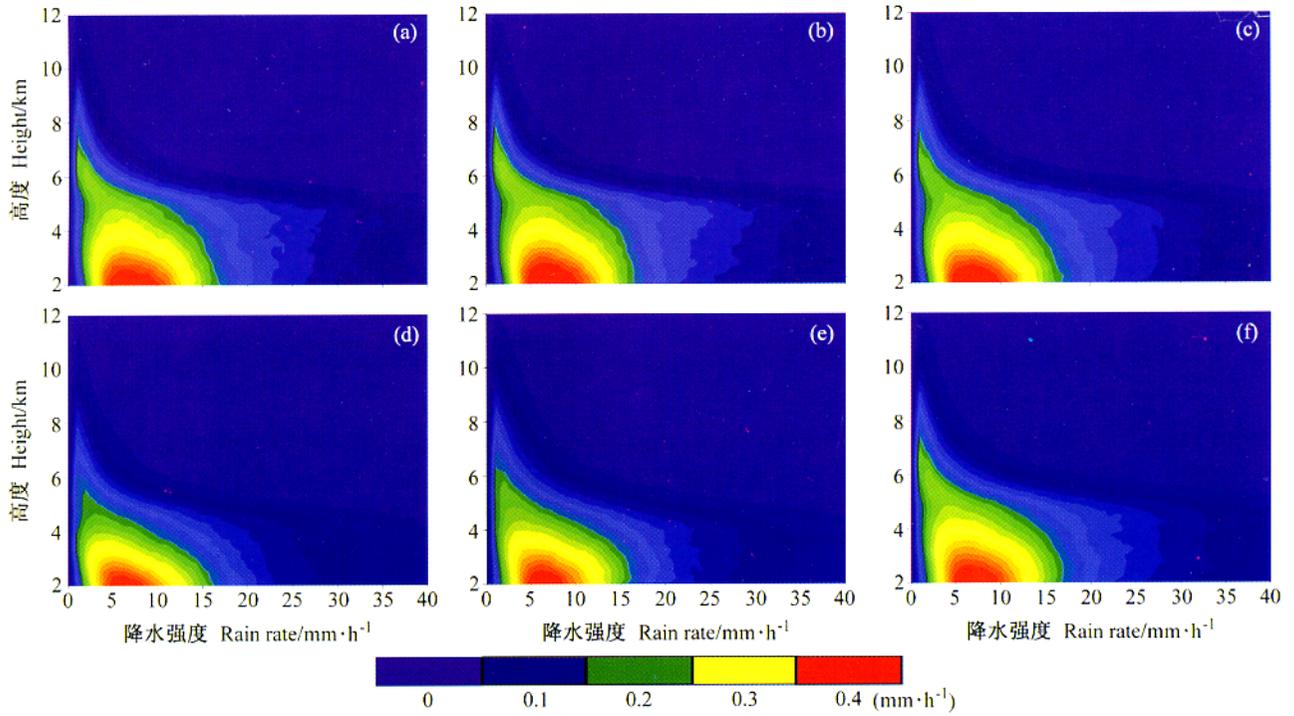


图5 标准化的对流降水率随高度的分布。(a)、(b)、(c) 分别代表1998年1~4月东、中、西太平洋；(d)、(e)、(f) 分别代表1999和2000年1~4月平均的东、中、西太平洋

Fig. 5 Normalized Counter Rainrate Altitude Diagrams (NCRADs) for convective rain

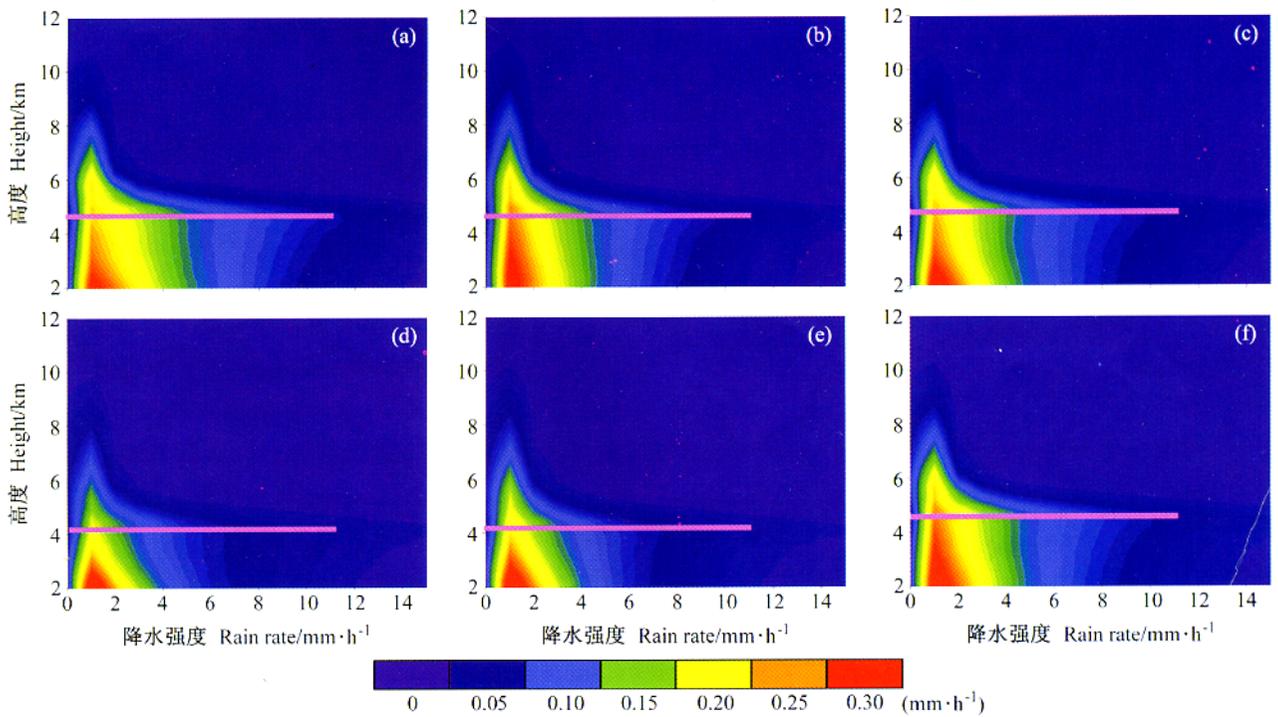


图6 同图5, 但为层云降水率  
Fig. 6 NCRADs for stratiform rain