

文章编号: 1000-2022(2006)01-0041-07

## 9914 号台风降水云系雨强的三维结构初探

钟 敏<sup>1</sup>, 吕达仁<sup>2</sup>, 杜秉玉<sup>1</sup>

(1. 南京信息工程大学 电子工程系, 江苏 南京 210044;

2 中国科学院 大气物理研究所 LAGEO, 北京 100029)

**摘 要:** 利用 TRMM 卫星的测雨雷达资料, 研究了 9914 号台风降水云系在 3 个不同时次雨强的水平和垂直结构。结果表明: 3 个时次层状云降水在像素数量上及对总降水量的贡献上均比对流性降水大; 3 个时次层状云降水和对流性降水的平均雨强均随台风强度加强有较大的增幅; 对流性降水与层状云降水的雨强的垂直廓线有明显的差别, 但两类降水廓线本身在 3 个时次差别不大。对流性降水廓线按斜率不同大致分为 3 段, 雨强均随高度减小, 5~6 km 高度段减速最快。层状云降水廓线大致分为 4 段, 在 4.5 km 高度附近出现明显的亮带结构。

**关键词:** TRMM PR; 台风; 降水云系; 雨强; 三维结构

**中图分类号:** P412.27; P426.621 **文献标识码:** A

## A Primary Study on Three Dimensional Structure of Rainfall Rates of Typhoon Danyang's Precipitation Cloud Systems

ZHONG Min<sup>1</sup>, LYU Da-ren<sup>2</sup>, DU Bing-yu<sup>1</sup>

(1. Department of Electronic Engineering, NUIST, Nanjing 210044, China

2 LAGEO, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

**Abstract** Horizontal and vertical structure of rainfall rates of Typhoon Danyang's precipitation cloud systems at three different times during its life period is studied based on the data from TRMM Precipitation Radar (PR). Results show that stratiform is precipitation occupied more area and contributed more rainfall to the total than convective precipitation at the three times. The average rainfall rate of stratiform is precipitation at the three times varied little while that of convective precipitation had a considerable increase with the intensification of typhoon. In vertical, the profiles of convective and stratiform is precipitation were obviously different while the profiles of them self at the three times had small differences. Convective profiles can be divided into three sects according to the slope; the rainfall rate decrease with altitude and the rapilest decreased occurred within the altitude range from 5 to 6 km. Stratiform is profiles can be divided into four sects, and there was a distinct bright band structure near the altitude of 4.5 km.

**Key words** TRMM PR; typhoon; precipitation cloud system; rainfall rate; three-dimensional structure

收稿日期: 2004-06-24 改回日期: 2004-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40333034); 科技部重大基础前期专项 (2001CCA02200)

作者简介: 钟 敏 (1980-), 女, 江西南昌人, 硕士, 研究方向: 大气探测和遥感资料应用. E-mail: zhongmin29@sohu.com.

## 0 引言

台风是发生在热带洋面上的灾害性天气系统。随着观测技术的日益完善,对台风详细三维结构的认识正在逐步加深。Centy 等<sup>[1]</sup>在 1970 年第一次把宇宙飞船上所拍照片、飞机观测资料、地面雷达资料、卫星资料以及常规观测资料结合起来,演绎出飓风的三维环流特征并提出了飓风发展机制的新观点。Maks 等<sup>[24]</sup>利用机载多普勒雷达资料首先开展了对飓风内核三维风场结构的研究。Geerts 等<sup>[5]</sup>利用机载 X 波段多普勒雷达提供的及时精确的资料,研究了飓风登陆时与山地相互影响下的降水 and 气流三维结构及变化。Heymsfield 等<sup>[6]</sup>将高分辨率的 GOES 卫星资料, EDOP 飞机雷达资料和其它实测资料相结合研究了飓风在对流爆发期的内部结构并探讨了对流爆发与暖心结构的关系。Li 等<sup>[7]</sup>利用 QuikSCAT 的海表面风资料与 TRMM 的降水资料,揭示了飓风动力和水过程的相互影响。毛冬艳等<sup>[8]</sup>利用 TRMM 资料对 Sam 台风做了初步分析。在这些观测研究中,针对台风降水云系雨强的三维结构还没有详细的描述。傅云飞等<sup>[9]</sup>曾指出,研究降水水平结构和垂直结构的重要性在于:降水的水平结构,如降水性质(对流性降水或层状云降水)水平分布、地表雨强水平分布等在一定程度上反映了降水云团的性质及其所处的状态,而降水的垂直结构反映了降水云的热力和动力结构,以及云中降水的微物理特征。可见,台风降水作为造成台风灾害的主要因子之一,对其三维结构的深入了解是很有必要的。本文利用 TRMM 的测雨雷达资料详细分析了 9914 号台风降水云系在三个不同时次雨强的水平和垂直结构特征。

## 1 资料

TRMM 卫星于 1997 年 11 月升空,卫星高度 350 km,轨道范围位于 35°S~35°N,轨道周期约 96 min,卫星上的测雨雷达 PR 工作频率 13.8 GHz,扫描宽度 215 km,星下点水平分辨率 4.3 km,也即文中所指像素的水平尺度,垂直分辨率 250 m<sup>[10]</sup>。本文研究 9914 号台风所用的是 PR 的标准资料 2A25 它提供了近地面雨强(单位: mm/h),衰减订正后的 20 km 高度范围内 80 层的雨强<sup>[11]</sup>及降水类型<sup>[12]</sup>的信息。降水类型分为对流性降水、层状云降水和其他类型降水。

## 2 9914 号台风分析

9914 号台风于 1999 年 10 月 2 日 12 时(世界时,下同)在菲律宾以东洋面上由热带低压稳定地向偏西方向移动,强度不断加强,于 4 日 12 时达到台风强度。7 日 12 时,强度达到最强,中心气压 955 hPa 中心最大风速 41.2 m/s。9 日 02 时台风登陆,9 日 18 时台风减弱为低气压。本文在这一过程中选取了 3 个时次资料,分别是 3 日 02 时 25 分 3 8 秒(以 PR 在 129.293°E, 19.0834°N 的探测为准),7 日 08 时 50 分 46 4 秒(以 PR 在 119.135°E, 22.0843°N 的探测为准)和 8 日 01 时 10 分 1 8 秒(以 PR 在 117.872°E, 23.4660°N 的探测为准)。为了叙述方便,以下简称 A 时, B 时和 C 时。3 个时次在整个台风生命史的位置见图 1。需要说明的是,由于 PR 扫描宽度只有 215 km,而台风的直径约为 500 km,所以本文只针对 PR 扫描范围内的降水做详细的分析和比较。

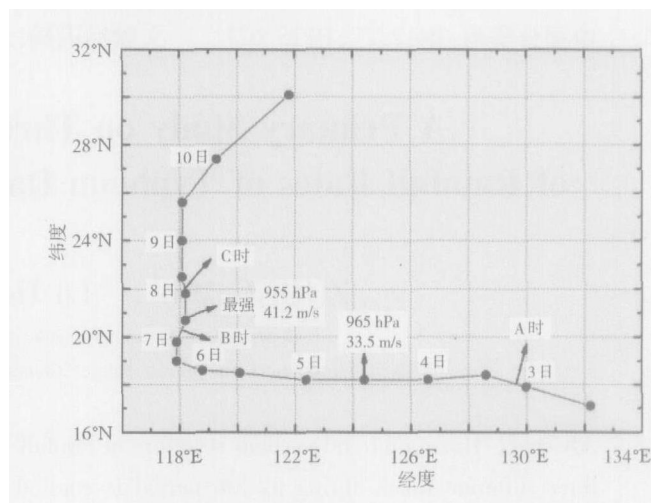


图 1 3 个时次在整个台风生命史的位置示意图

Fig 1 Track of Typhoon Dan and 3 positions (A, B, C) observed by the precipitation radar on TRMM satellite

### 2.1 台风降水云系雨强水平结构

本文分析台风降水云系雨强水平结构时,利用了 2A25 近地面雨强资料。图 2 给出了 3 个时次 PR 扫描范围内近地面雨强的分布。从图中可以看出:台风降水雨强的水平分布是不均匀的,台风眼内几乎无雨,眼墙区和螺旋雨带区分布着多个强降雨团和强降雨带,最大雨强超过 100 mm/h,它们并不是孤立存在的,而是镶嵌在面积较大的层状云降水之中。另外,强降雨一般都分布在台风前进方向的右侧,具有不对称性,这与台风风场的不对称性<sup>[4]</sup>一致。

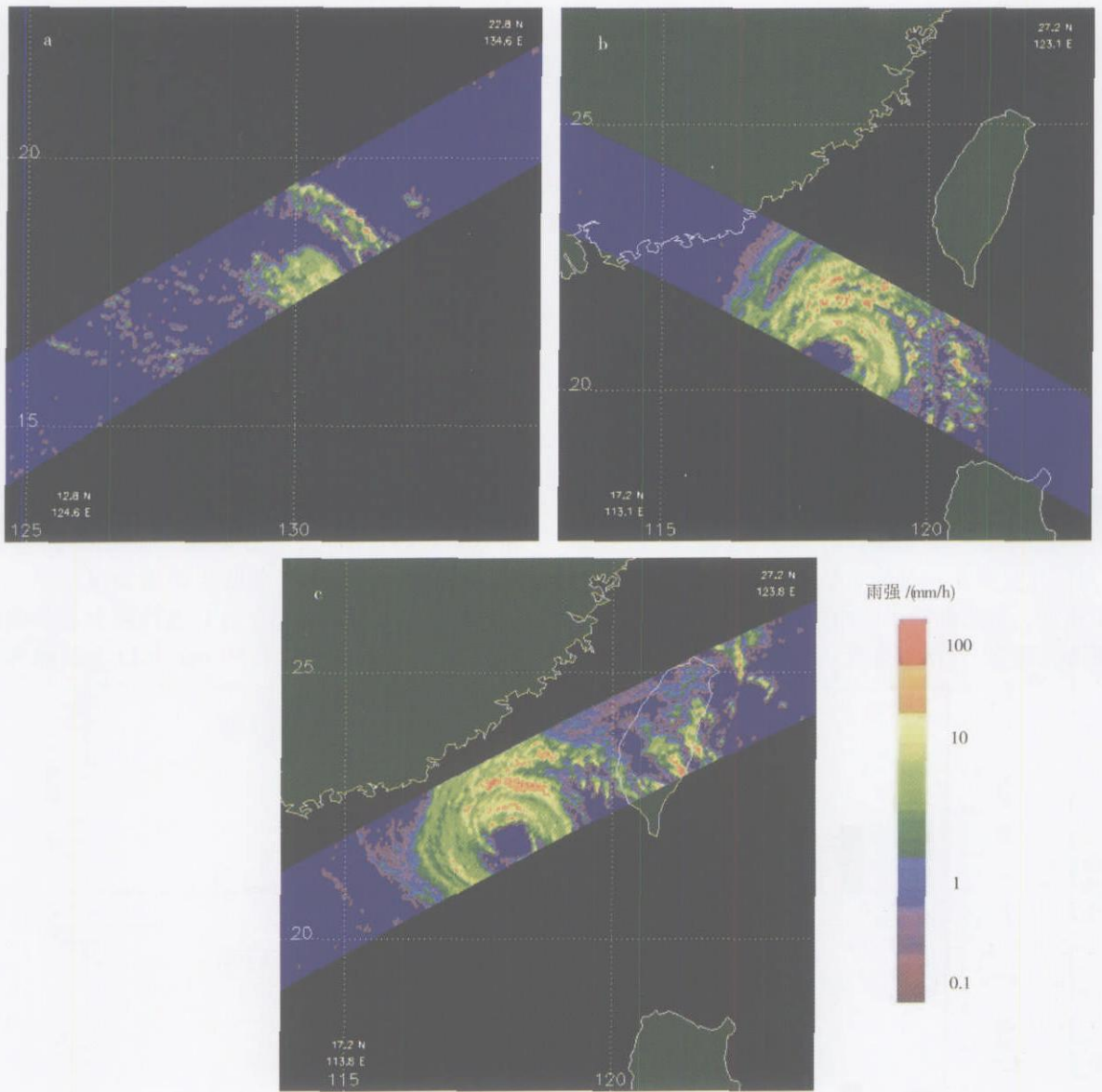


图 2 3 个时次 PR 扫描范围内近地面雨强 (单位: mm/h)

a A 时; b B 时; c C 时

Fig 2 Rainfall rates near the ground surface within the swath of Precipitation Radar scan at 3 times (units mm/h)

a time A; b time B; c time C

表 1 给出了 3 个时次 PR 扫描范围内近地面降水像素数量及降水量。由表 1 可见: 其他类型降水的像素数量及对总降水量的贡献均很少, 所以本文仅针对对流性降水和层状云降水来研究。3 个时次对流性降水像素数量占总降水像素数量的比例有递减的趋势, 而对流性降水对总降水量的贡献, A 时和 B 时略大于 C 时, 且在这个过程中, 层状云降水总量一直大于对流性降水总量。由此可见, 在台风降水中, 层状云降水的水平面积较对流性降水的大很多, 尽管层状云降水的平均雨强比对流性降水的小很

多, 但是它对总降水量的贡献却比对流性降水要大。当然这一结果可能会因为雷达扫描到台风的部位而受到一定影响。3 个时次层状云降水和对流性降水的平均雨强从 A 时到 B 时、C 时均有一较大的增幅, 这可能也是台风强度加强的体现。

从 9914 号台风在 3 个时次对流性降水和层状云降水的雨强谱分布 (图 3) 可以看出: 层状云降水的雨强谱谱型较为简单, 3 个时次雨强主要集中在 10 mm/h 以下, 这与陆面的中尺度降水个例相似, 谱型呈递减趋势。在 A 时, 0~5 mm/h 的降水在像

表 1 3 个时次 PR 扫描范围内近地面降水像素数量及降水量

Table 1 Numbers of pixels and rainfall near the ground surface within the swath of Precipitation Radar scan at 3 times

时次	降水类型	像素数量	占总像素		近地面		占总降水量		平均雨强 / (mm/h)
			数量比例 / (%)	比例 / (%)	总雨强 / (mm/h)	比例 / (%)			
A 时	对流性降水	408	16.1	43.7	4109	43.7	10.07		
	层状云降水	2079	82.1	56.1	5275	56.1	2.54		
	其他降水	44	1.7	0.2	20	0.2			
B 时	对流性降水	836	15.0	44.4	14757	44.4	17.65		
	层状云降水	4704	84.3	55.5	18436	55.5	3.92		
	其他降水	39	0.7	0.1	18	0.1			
C 时	对流性降水	786	10.6	38.1	14298	38.1	18.19		
	层状云降水	6487	87.5	61.7	23168	61.7	3.57		
	其他降水	137	1.8	0.2	66	0.2			

素数量和对层状云降水总量的贡献上均最大。随着台风的发展, 5~10 mm/h 的降水像素数量有所增加, 对层状云降水总量的贡献也与 0~5 mm/h 相当甚至稍强。对流性降水的雨强谱比层状云降水的雨强谱要宽得多, 且谱型也复杂些, 在发展过程中变化

也更为明显, 主要表现为: 在 A 时, 5 mm/h 以下的降水像素数量最多, 随着台风强度的加强, 在 B 时和 C 时 10~20 mm/h 的降水像素数量最多。在 A 时, 10~20 mm/h 的降水对对流性降水总量的贡献最大, 到了 B 时和 C 时, 50 mm/h 以上的降水贡献

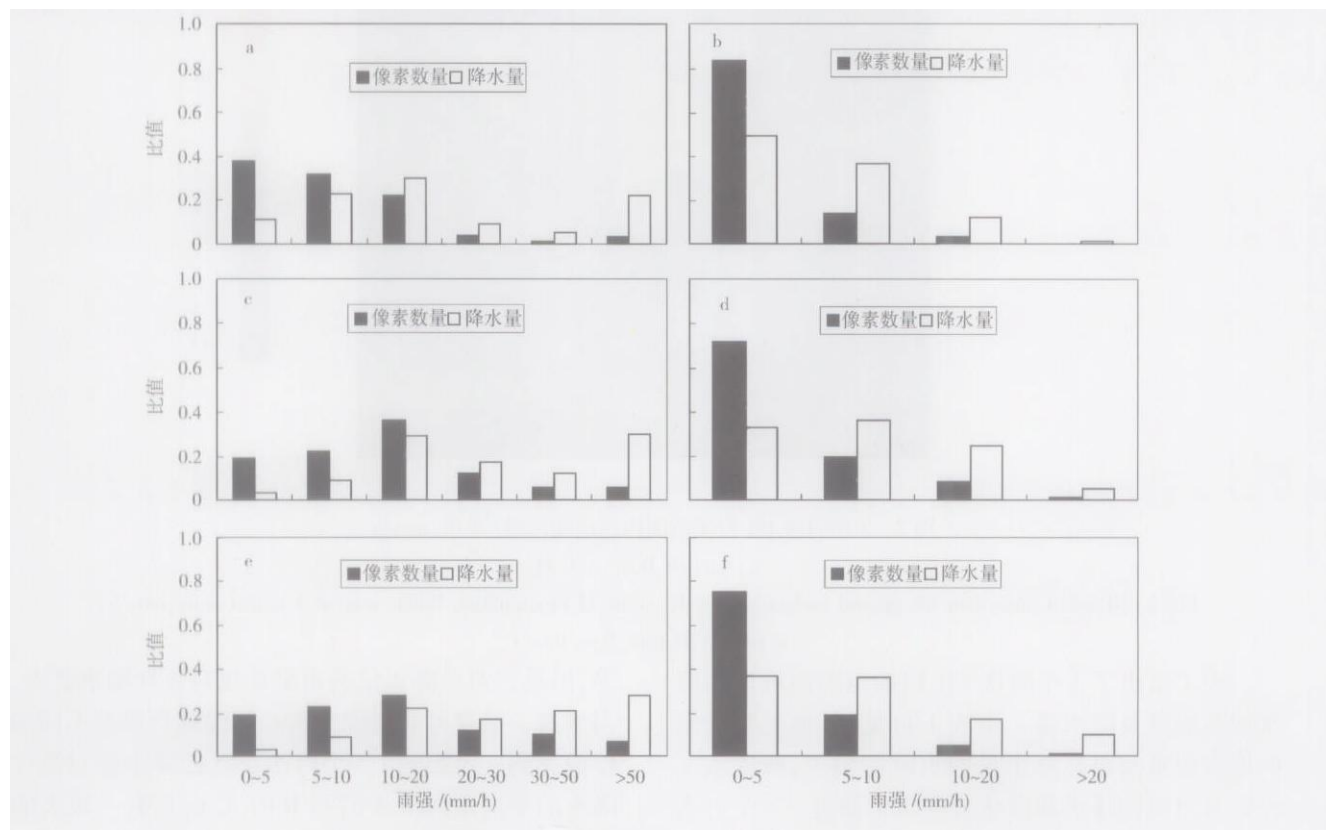


图 3 3 个时次对流性降水和层状云降水的雨强谱

a A 时对流性降水; b A 时层状云降水; c B 时对流性降水;  
d B 时层状云降水; e C 时对流性降水; f C 时层状云降水

Fig 3 Distributions of rainfall rates of the convective (a, c, e) and stratiform (b, d, f) precipitation at 3 times (A, B, C), respectively

最大。

### 2.2 台风降水云系雨强垂直结构

分析台风降水云系雨强垂直结构时用 20 km 高度以下 80 层的雨强资料。为了获得直观印象,以 B 时为例给出了沿离台风眼不同距离处的 6 条直线

(图 4a)做的垂直剖面(图 4b), 分析表明: 从云顶来看, 云墙区的 EF 剖面回波顶最高, 达到 12 km, 其他剖面回波顶都在 10 km 左右, 其中处于台风螺旋雨带区的 AB 剖面的回波顶最低。从 6 个不同位置的

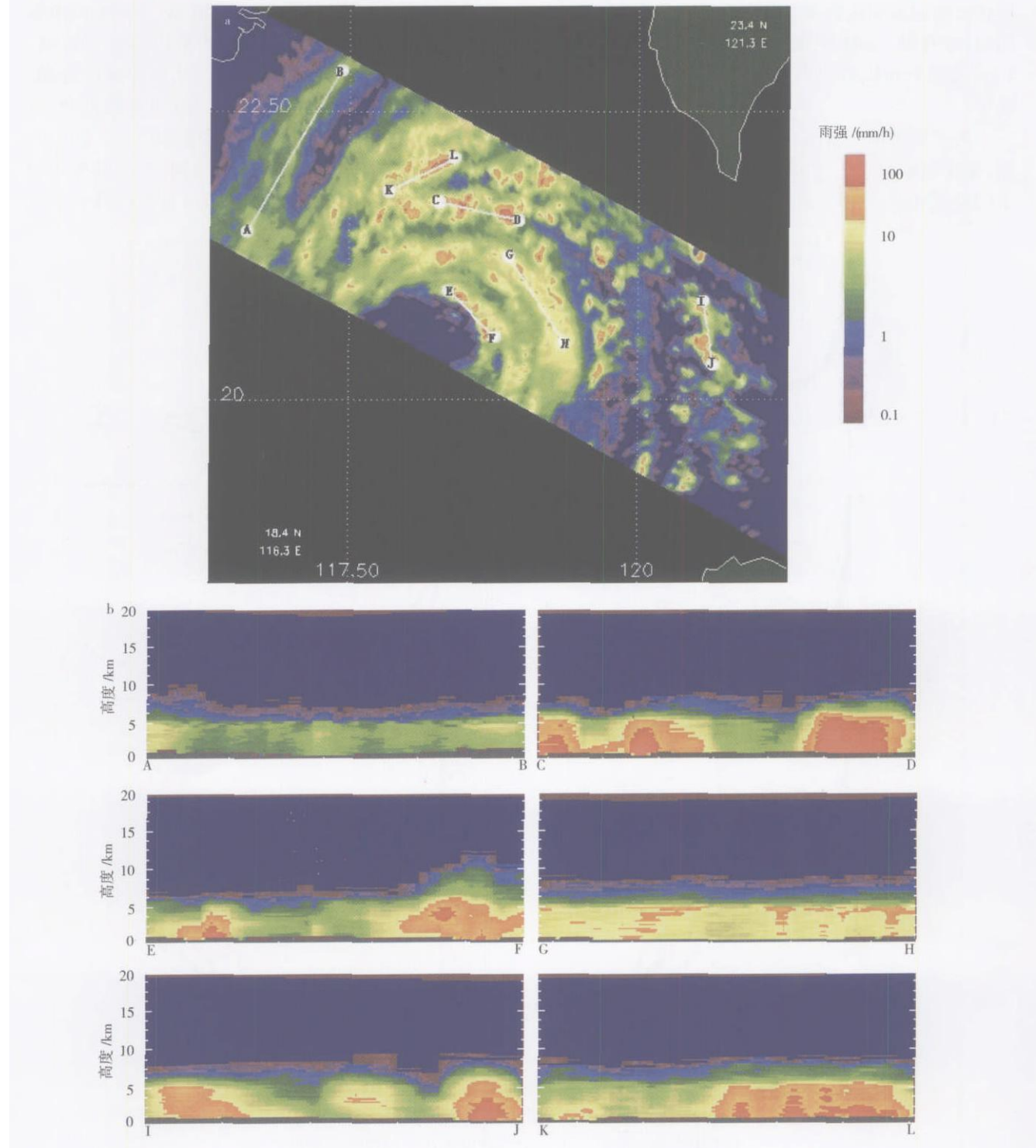


图 4 6 条直线所处台风中的位置 (a) 及沿 6 条直线所做雨强垂直剖面 (b) (单位: mm/h)

Fig 4 Locations of the six lines in the typhoon(a) and vertical cross sections of rainfall rates along the six lines(b) (units mm/h)

剖面图上可以看出,对流降水回波呈柱状,最大雨强超过 100 mm/h 强回波的最大高度在 5 km 左右。强对流降水云中雨强随高度的分布也有非均匀分布的情况,例如在 EF 和 KL 剖面上都能看到强回波悬于云体中,雨强并不是完全随云体高度增加而减小。层状云的回波顶比较平,雨强随高度的分布也比较均匀,成片状,云体中雨强在 10 mm/h 以下,在约 5 km 高度处可以看到一平整的高亮度带,即零度层亮带。

为了从整体上看出台风降水云系雨强的垂直结构,本文还给出了 3 个时次对流性降水和层状云降水的垂直廓线。由于受到地表对 PR 回波的干扰,

2 km 以下的资料均受到不同程度的影响,因此,给出了 2 km 到 12 km 高度间的降水廓线,见图 5。首先将样本按雨强进行分类,对流性降水分为 0~5、5~10、10~20、20~30、30~50 和 >50 mm/h 6 档,层状云降水分为 0~5、5~10、10~20 mm/h 3 档,将这些分档样本在各高度层(间隔 250 m)上的平均雨强分别与 2 km 高度处各档样本的平均雨强做比值,亦即图中横坐标所代表的含义。从图 5 可以看到,对流性降水与层状云降水的廓线有明显的差别,但两类降水廓线本身在 3 个时次均差别不大。同一时次各档样本的降水廓线虽有所差别,但是其变化趋势基本一致。从廓线的斜率上看,对流性降水廓线

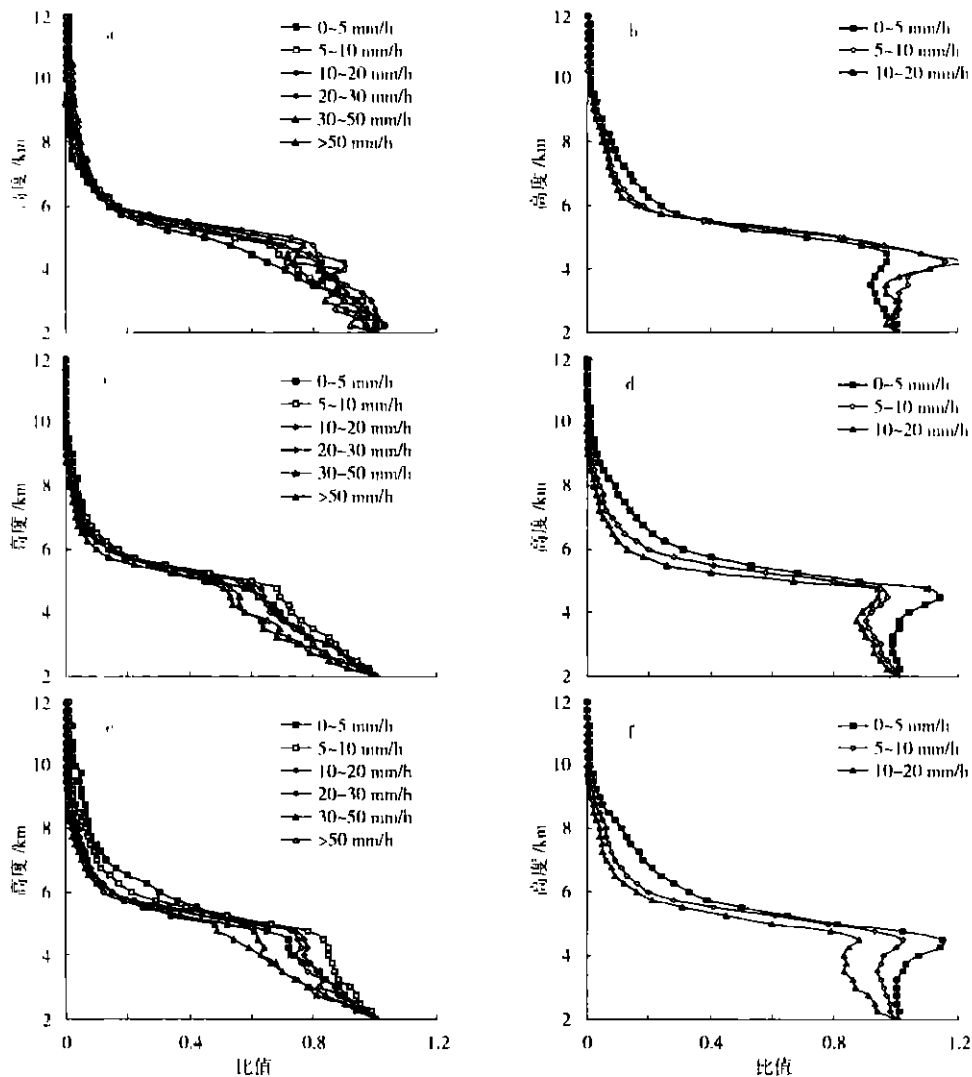


图 5 3 个时次对流性降水与层状云降水廓线

a A 时对流性降水; b A 时层状云降水; c B 时对流性降水;  
d B 时层状云降水; e C 时对流性降水; f C 时层状云降水

Fig 5 Vertical profiles of the rain fall rate of convective (a c e) and stratiform (b d f) precipitation at 3 times (A, B, C), respectively

大致分为 3 段, 第 1 段从 2 km 到 5 km 左右, 雨强随高度减小, 减速中等, 雨滴在这一段经历碰并增长过程<sup>[10]</sup>, 强回波集中在降水云体的下部; 第 2 段为 5 km 左右到 6 km 左右, 这一段雨强随高度迅速减小; 第 3 段从 6 km 直到雨顶, 雨强继续减小直至 0。第 2 段和第 3 段均是在冻结层以上, 为冰晶和过冷水混合层<sup>[10]</sup>。层状云降水廓线按斜率不同大致分为 4 段, 从 2 km 到 3.75 km 附近雨强随高度减小很慢, 有的几乎不变; 第 2 段从 3.75 km 到 4.5 km 附近, 雨强随高度增大, 达到整个廓线雨强的最大值, 这也是雷达回波的亮带位置; 第 3 段是这个高度向上至 6 km 处, 雨强随高度迅速减小; 6 km 以上直至雨顶, 减速降低。

### 3 结论与讨论

(1) 9914号台风在 3 个不同时次, 层状云降水在像素数量及对总降水量的贡献上均比对流性降水大。

(2) 对 3 个时次雨强谱的分析表明, 层状云降水雨强主要集中在 10 mm/h 以下, 谱型呈递减趋势。对流性降水在发展过程中, 强降水在像素数量和对总降水量的贡献上均呈上升趋势。3 个时次对流性降水和层状云降水的平均雨强均随台风强度加强有较大的增幅。

(3) 在垂直结构上, 对流性降水与层状云降水的廓线有明显的差别, 但两类降水廓线本身在 3 个时次均差别不大。对流性降水廓线按斜率不同大致分为 3 段, 雨强均随高度减小, 5 到 6 km 段减速最快。层状云降水廓线大致分为 4 段, 在 4.5 km 高度附近表现出明显的亮带结构。

以上只是通过一个台风个例得出的结果, 由于 PR 扫描宽度的局限, 结果可能受到扫描样本的影响。在今后的工作中, 我们还将做大量个例的统计分析以及利用 TRMM 卫星上另两个传感器 TMI 和 VIRS 几乎同时观测的资料与 PR 结合, 以弥补 PR 扫描宽度的局限。另外, 由于 PR 回波在衰减订正和利用  $Z-I$  关系计算雨强时不可避免地存在误差, 这也可能对本文的结果有一定影响。

致谢: Goddard DAAC 提供了 PR 的全部资料, 台风路径和强度资料来自日本国家情报学研究所 (<http://agora.ex.nii.ac.jp>), 国家海洋局三所的孙强为资料的获取提供了极大的帮助, 在此一并表示衷心的感谢!

### 参考文献:

- [1] Gentry R C, Fujita T T, Sheets R C. Aircraft spacecraft satellite and radar observations of Hurricane Gladys 1968 [J]. *J Appl Meteorol* 1970, 9(6): 837-850.
- [2] Marks F D, Houze R A. Airborne Doppler radar observation in Hurricane Debby [J]. *Bull Amer Meteorol Soc* 1984, 65(6): 569-582.
- [3] Marks F D, Houze R A. Inner core structure of Hurricane Alicia from airborne Doppler radar observations [J]. *J Atmos Sci* 1987, 44(9): 1296-1317.
- [4] Marks F D, Houze R A, Gamache J F. Dual-aircraft investigation of the inner core of Hurricane Norbert [J]. *J Atmos Sci* 1992, 49(11): 919-942.
- [5] Geerts B, Heymsfield G M, Tian L, et al. Hurricane Georges land-fall in the Dominican Republic. Detailed airborne Doppler radar imagery [J]. *Bull Amer Meteorol Soc* 2000, 81(5): 999-1018.
- [6] Heymsfield G M, Halverson J B, Simpson J, et al. Doppler radar investigations of the eye wall of Hurricane Bonnie during the convection and moisture experiment-3 [J]. *J Appl Meteorol* 2001, 40(8): 1310-1330.
- [7] Liu W T, Hu H, Yueh S. Interplay between wind and rain observed in Hurricane Floyd [J]. *Eos Trans AGU*, 2000, 81(23): 253-257.
- [8] 毛冬艳, 程明虎. 用 TRMM 资料研究 1999 年 San 台风 [J]. *气象科技*, 2001, 29(2): 37-40.
- [9] 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 [J]. *气象学报*, 2003, 61(4): 421-431.
- [10] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. Tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package [J]. *J Atmos Technol* 1998, 15(3): 809-817.
- [11] Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, et al. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar [J]. *J Appl Meteorol* 2000, 39(12): 2038-2052.
- [12] Awaka J, Iguchi T, Okamoto K. Early results on rain type classification by the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) Precipitation Radar [R]. *Proc 8th URSI Commission F Open Symp Aveiro, Portugal* 1998 143-146.