

0302 号(鲸鱼)台风降水和水粒子 空间分布的三维结构特征

何会中¹ 程明虎² 周凤仙³

1 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

2 中国气象科学研究院, 北京 100081

3 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

摘 要 由于缺乏关于台风结构信息的高分辨率资料, 即探测台风云系内部结构特征的技术限制, 造成了进一步理解台风的动力传送特征的困难。作者用热带测雨卫星(TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission)的测雨雷达(PR, Precipitation Radar)和 TRMM 微波图像仪(TMI, TRMM Microwave Imager)资料详细研究了“鲸鱼”台风(0302 号)于 2003 年 4 月 16 日 1105 UTC 的降水和降水云系中各种水粒子的三维结构特征。通过分析发现该时刻: (1) 台风降水中大部分区域为层性降水(占总降水面积的 85.5%), 对流性降水占总降水面积的 13.1%, 但对流性降水的贡献却达到 41.8%, 所以, 虽然对流性降水所占面积比例很少, 但是它对总降水量的贡献却很大。(2) 60%降水主要集中在距离台风中心 100 km 以内的区域, 约占总降水量的 60%。(3) 各种水粒子含量随着与台风中心距离的增加而减少。降水云系中水粒子最大含量出现高度与水粒子的种类和与台风中心的距离有关。最后, 分析了台风降水和降水云系中三维分布的成因。

关键词 热带测雨卫星 台风 降水 水粒子 三维结构

文章编号 1006-9895(2006)03-0491-13

中图分类号 P457

文献标识码 A

3D Structure of Rain and Cloud Hydrometeors for Typhoon Kujira (0302)

HE Hui-Zhong¹, CHENG Ming-Hu², and ZHOU Feng-Xian³

1 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080

Abstract Predicting rainfall associated with tropical cyclones is a major challenge. Due to lack of high resolution data on typhoon structure, i. e. the technical limitation of detecting the cloud structure of inner-typhoon, it is difficult to further understand its dynamic transportation characteristics. A number of case studies have shown that the precipitation structures in tropical cyclones are quite complex and vary from case to case. Early radar images revealed that the typhoon cyclone rainfall is usually organized in bands spiraling toward the storm center, commonly referred to as rainbands. In this paper, the case of super Typhoon Kujira (0302) occurring in April 2003 is chosen. It is located over open water to the north of Papua New Guinea, steadily intensified during the period of TRMM observations and reaches a maximum sustaining wind of 67 m/s identified as class 4.

The 3D structure of rain and hydrometeors in rain cloud is studied by use of Visible and Infrared Scanner (VIRS), Precipitation Radar (PR) and TRMM Microwave Imager (TMI) data. The rain type is studied by use of PR data 2A23. It is found that the stratiform rain covers 85.5% area and contributes 58.1% rainfall, the convective

收稿日期 2005-03-25, 2005-08-26 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40375007 和中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室专项 2004DA141123

作者简介 何会中, 男, 1971 年出生, 硕士, 副研究员, 目前主要从事大气遥感和大气物理研究。E-mail: hhz@cams.cma.gov.cn

rain only covers 13.1% area but contributes 41.8% rainfall. Though the convective rain only covers smaller area of typhoon rain, it is important for the typhoon rainfall. At the same time, the average rain rate of convective rain is 19.78 mm/h, but is only 4.22 mm/h for stratiform rain. The former is about 4.7 times of the latter. This ratio is more than the average ratio for stratiform and convective over the tropical sea area (average ratio is 3.3). The mean rainfall distribution is analyzed by using 2B31 data, which is retrieved from combining of PR and TMI products. The mean rainfall distribution is computed using 5-km annulus from the storm center to a 300-km radius. It is found that the rain rate decreases as the distance from the typhoon center increases. It is about 60% rain which comes from the region within 100 km from typhoon center, but the region covers only 40% of the total typhoon rain area. The vertical profiles of rainfall are studied by using 2A25 retrieved from PR data. The stratiform rain reaches its maximum at different heights for the different distances from typhoon center. The maximum of stratiform rain appears at 5 km height in the region within 50 km from typhoon center and 4.5 km height over the other area. The convective rain rate fluctuates under 3.0 km height in the region within 50 km and increases as the height decreases over the other area. The hydrometeor profiles are studied by using 2A12 data, which are produced by combining models and TMI data. Hydrometeors in typhoon rain cloud decreases as the distance from typhoon center increases. The different types of hydrometeors in rain cloud reach their maximum values at different heights. Most rain cloud water is distributed at the heights of 2–8 km, and reaches its maximum at 5 km. Most cloud ice is located in the region within 100 km from the typhoon center, and reaches its maximum at 14 km height in this region and 7 km height in the other region. The precipitation water reaches its maximum at 2 km height within 100 km from the typhoon center, but the height increases to 4 km in the region 200 km out from center. Most precipitation ice is concentrated above 7 km height. The studies of the different types of rainfall and hydrometeors 3D structure for tropical cyclone should be helpful in improving the tropical cyclones rainfall forecasting.

Key words tropical rainfall measuring mission, typhoon, rainfall, cloud, 3D structure

1 引言

我国是世界上受热带气旋影响最为严重的国家之一,热带气旋登陆十分频繁。平均每年我国登陆台风 7~8 个,是世界上台风登陆最多、灾害最重的国家^[1]。虽然对台风路径预报的准确性在不断提高,但由于一直没有热带海洋上详细的台风资料,缺乏准确的热带气旋定位及其强度测量,因此,对于台风强度变化和台风降水定量预报的准确性在过去的二十年中一直处于徘徊状态^[2, 3]。而台风暴雨是台风所造成的多种严重的天气现象之一,台风的降水分布形式非常复杂,其降水的三维分布特征对更进一步了解台风是一个非常重要的要素。

由于受观测资料的限制,大部分有关台风结构方面的研究工作偏重于理论方面,对观测事实方面的分析较少,对西北太平洋台风结构的观测研究则更少^[4]。自 20 世纪 60 年代以来,学术界提出了多种关于台风螺旋云带结构和传播特征问题的理论与观点^[5~8],尤其是提出关于螺旋雨带形成的理论解释,其中主要观点有:认为螺旋雨带实际上是一种重力波,从波动理论的角度讨论台风螺旋雨带的产

生和传播。余志豪^[9]阐述了与台风结构有关的涡旋 Rossby 波成波理论。刘式适和杨大升^[10]分别讨论了行星波和台风的螺旋结构,着重从波的传播角度去分析螺旋图样。有些研究人员^[11]进行一些数值试验,表明螺旋雨带是由随机扰动形成的,其必要条件是有有一个基本态的旋转,即认为旋转也能把稳定扰动组成条状分布。罗哲贤^[12]提出了台风轴对称-非对称-精细结构理论进展趋势。另外,陈联寿等^[13]、罗哲贤^[14]和 Meng 等^[15]研究了不同尺度系统、环境和不同物理因子对台风结构和结构变化的影响,获得许多有意义的结果。但是,由于缺乏台风精细高分辨率结构信息,或者说由于台风系统内部云结构探测手段的局限,很难深入认识台风螺旋云带传播动力学特征,相关理论模型的建立始终遇到难以逾越的“瓶颈”问题^[16]。自热带测雨卫星 (TRMM, Tropical Rainfall Measuring Mission) 成功发射以来,已积累了大量有关热带气旋的资料,这使准确预报热带气旋的路径和强度成为可能^[2, 17]。本文利用热带降雨测量卫星所搭载的多种探测仪器的观测资料,研究 2003 年的 0302 号“鲸鱼”台风在海面上降水和云中水粒子的三维结构特

征。

2 TRMM 及“鲸鱼”台风简介

2.1 TRMM 简介

TRMM(美日两国于 1997 年 11 月 27 日发射的)轨道周期约为 91.5 min, 每天有 15.77 轨, 卫星经过同一地点的地方时不同, 这是为了便于研究降雨的日变化情况。由于 TRMM 的使命是观测热带和副热带降水, 所以卫星的轨道倾角为 35° , 它的测量区域为约南北纬 35° 之间的热带和亚热带区域^[3, 17]。卫星上共携带五种遥感仪器, 其中三种专门用于测量降水, 分别是: 可见光和红外扫描仪(VIRS, Visible and Infrared Scanner)、TRMM 微波图像仪(TMI, TRMM Microwave Imager)、降水雷达(PR, Precipitation Radar)。VIRS 的五个通道工作波长为 0.63 μm 、1.6 μm 、3.75 μm 、10.8 μm 和 12.0 μm 。由于卫星高度只有 350 km, 故 VIRS 的扫描宽度仅为 720 km, 星下点的分辨率为 2 km。TMI 为五波段 9 通道, 其微波通道的工作波长为 10.65 GHz、19.35 GHz、21.0 GHz、37.0 GHz和 85.5 GHz。除 21.0 GHz 以外, 其他通道都是双极化。不同通道具有不同的分辨率, 最高分辨率为 7 km $\times$ 5 km(85.5 GHz), 最低分辨率为 63 km $\times$ 37 km(10.65 GHz), 扫描宽度略大于 VIRS 为 758.5 km^[18]。PR 是气象卫星上搭载的第一部主动式遥感仪器, 其工作频率为 13.8 GHz, 扫描宽度不到 VIRS 和 TMI 的三分之一为 220 km, 星下点的分辨率为 4.3 km, 它的特点是能够穿过降水和云层观测其内部结构, 提供详细的降雨三维结构信息^[19]。

TRMM 的设计寿命为三年, 但经三年多运行后其工作状态良好, 为使其继续服役并节省燃料, 卫星高度于 2001 年 8 月 7 日被提升到约 400 km, 为此各种仪器的扫描宽度均有所增大, 而分辨率则略为降低^[17]。

2.2 使用的资料

本研究使用的 TRMM 资料是由美国宇航局 Goddard 空间飞行中心数据分发中心 DAAC (Distributed Active Archive Center) 提供的第 5 版数据资料, 包括 PR 资料 (2A25, 2A23)、TMI 资料 (1B11, 2A12)、VIRS 资料 (1B01) 和 TMI/PR 联合反演的海平面降水资料 (2B31)。DAAC 提供的

2A25 产品是 PR 资料反演的降水, 它含有降水三维分布信息, 资料的水平分辨率为 4.3 km, 垂直分辨率为 250 m。通过把 PR 资料反演的降水和经雨量计标定的地面雷达估测的降水率进行对比, 两者之间的相关系数大于 0.9, 系统偏差小于 7%^[20, 21], 这表明 TRMM/PR 反演的降水可以很好地反映降水实际情况。2A23 产品中含有降水类型、暴雨高度(暴雨高度是指暴雨顶部的海拔高度)、凝结高度(凝结高度指从气候平均温度估计的零度等温线的海拔高度)、亮带高度和亮带强度等资料, 它的水平分辨率也是 4.3 km。2B31 产品是 TMI 和 PR 联合反演的海平面位置的降水平面分布信息, 它与 2A25 资料有相同的水平分辨率。TMI 资料包括 1B11 和 2A12 产品, 其中 1B11 产品是 TMI 第九通道微波亮温资料, 2A12 产品含有海平面附近降水量资料和降水云系中水粒子(包括: 云水、云冰、可降水粒子和可降冰粒子)三维结构信息, 它们的水平分辨率约为 7 km $\times$ 5 km, 资料的每层高度分别为 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5、4.0、5.0、6.0、8.0、10.0、14.0 和 18.0 km, 共 14 层。Hirohiko 等^[22]把 TRMM 的 TMI 资料估算的低层水粒子含量与 PR 估算的值进行对比, 结果表明在热带海洋地区两者非常一致, 因此 TMI 估算的降水和水粒子反映了降水的实际情况。本文选用 2003 年 4 月 16 日 1104 UTC 的 TRMM/PR、TMI 和 VIRS 资料(轨道号: 30884), 详细研究分析了“鲸鱼”台风降水和降水云系中水粒子(云水、云冰、可降水 and 可降冰)的三维结构。

2.3 0302 号“鲸鱼”台风简介

TRMM 的微波和红外探测器在 4 月 12~23 日共 12 次探测到“鲸鱼”台风, 它基本包括了 0302 号“鲸鱼”台风从发展到衰退的大部分生命历程。在 4 月 12~15 日, “鲸鱼”台风强度不断增强并达到超级台风的强度, 在其最旺盛时期中心附近持续最大风速达到约 67 m/s (NASA: http://trmm.gsfc.nasa.gov/publications_dir/kujira.html)。图 1 为利用 TRMM 的 TMI 资料结合模式估算的 2A12 产品绘制的“鲸鱼”台风海面附近降水分布图。

0302 号台风是 2003 年 4 月 9 日生成于巴布亚新几内亚北部的开阔水域 [中心位于 (3°N , 160°E)], 此时的台风还只是一些分布相对集中的强降水区, 但降雨分布已经出现一些螺旋结构的特征。到 12

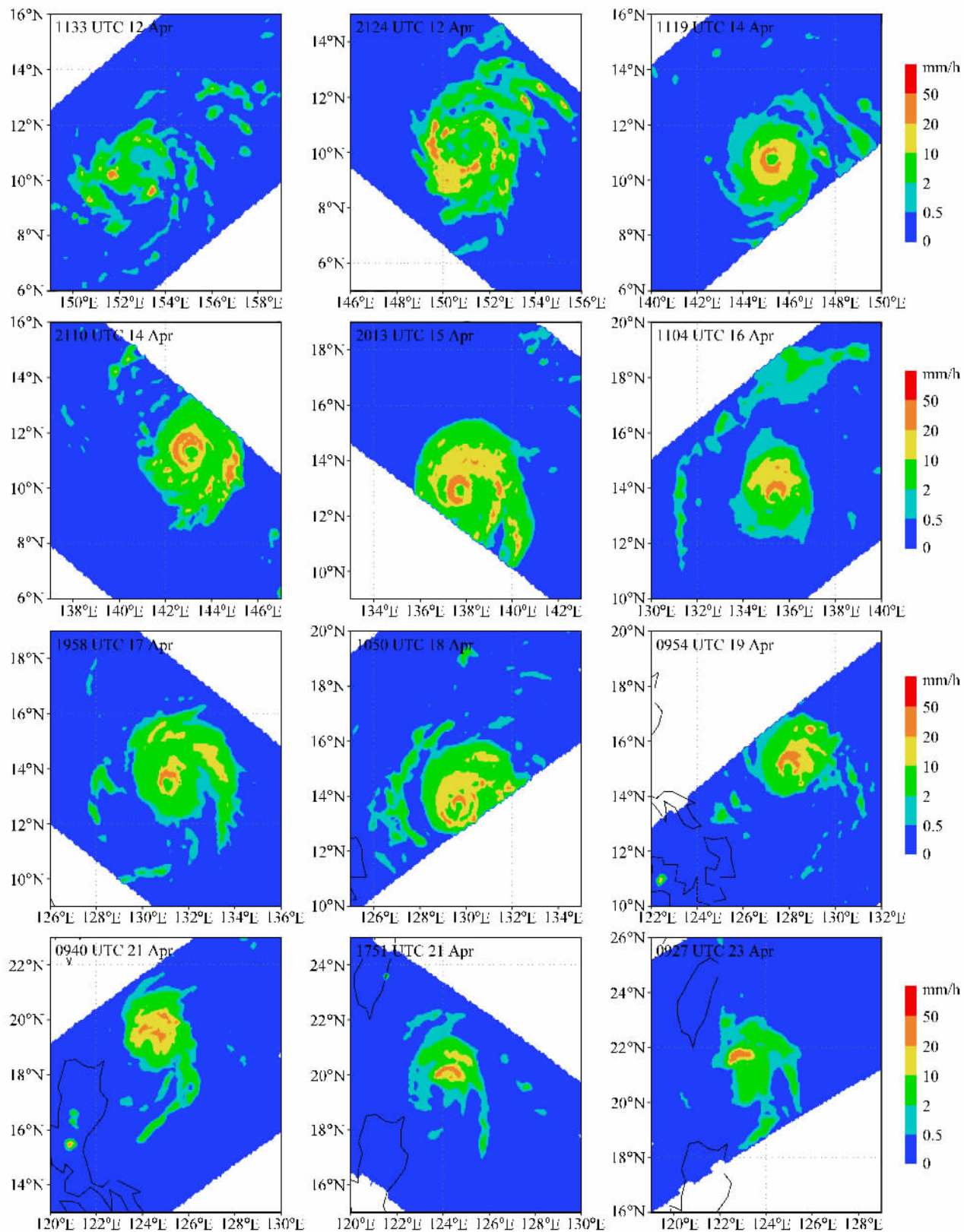


图 1 用 TMI 资料反演的 4 月 12~23 日“鲸鱼”台风海面降水分布

Fig. 1 The near surface rain series retrieved from combining model and TMI data on 12 - 23 Apr 2003, which shows the life cycle of typhoon Kujira (0302)

日 2124 UTC, “鲸鱼”台风已经初步形成, 降水区域已经连成一片, 在大面积的降水中有带状强降水分布, 并且强降雨带有明显螺旋结构特征, 但是此时从图中还看不到有台风眼。到 14 日 1119 UTC, 台风已经正式形成, 此时雨带不但有明显的螺旋状结构, 而且还有接近于圆形的眼状结构, 台风的强度逐步增强。几小时以后, 即 14 日 2110 UTC, 台风降水的面积明显增大, 台风眼壁具有双重结构(见图 1), 在里面的环形眼壁被嵌套在外面更大的环形眼壁中。像“鲸鱼”台风这样的强台风经常会出现“眼壁环形结构更迭”, 即一个新的环形眼壁形成并取代原来的眼壁现象, 当这种“更迭”现象出现时台风的强度经常会发生剧烈的变化^[23]。

15 日 2013 UTC, 此时台风进入成熟期, 台风眼壁结构又恢复到单一的圆形, 台风降水区域已经扩展到很大的范围, 在台风眼南部有明显的环形降水带出现。但是到 16 日 1105 UTC, 台风半径明显小于 15 日 2013 UTC 的半径, 在其西北方向有一条很长的降水带从台风降水中分离出去, 并且此时台风的强度也有减弱的趋势, 台风眼为椭圆形。此后, 台风在向西北方向移动的过程中逐渐减弱, 但一直到 19 日, “鲸鱼”台风都还具有完整的结构, 包含螺旋状雨带和眼状结构。到 21 日, “鲸鱼”台风结构已经不完整了, 台风眼已经不是完整的环形结构, 但在其东北方向还有降水分布。在 23 日 1133 UTC, “鲸鱼”台风仅为一条弯曲的降水带了, 然后, “鲸鱼”台风又有所增强, 并向西北偏北方向移动, 并最终于 25 日在东海海域消散。

3 “鲸鱼”台风降水的三维结构特征

3.1 降水的水平结构

3.1.1 降水的水平分布、红外和微波亮温特征

图 2 (见文后彩图) 为 2003 年 4 月 16 日 1105 UTC TRMM 的 VIRS 第五通道观测的红外亮温分布、TMI 第九通道观测的微波亮温分布、PR 和 TMI 联合反演的降水以及 TMI 资料和模式共同反演的降水分布。图 2 的“鲸鱼”台风都有明显眼区, 但是图 2b、c 的台风眼区范围要明显大于图 2a, 这是由于有气流从眼壁的云墙顶部流向眼区, 并在眼区下沉^[24], 这样就会从云墙中带一些云粒子到眼区, 造成台风眼区中的部分区域被云层覆盖。红外云图仅反映云顶的亮温, 而 PR 和 TMI 能够穿透没

有降水的云层, 从而出现红外云图的眼区较小的现象, 因此微波和 PR 更能反映台风眼区的大小和结构的实际情况。另外, 从图 2b~d 可以看出, 此时“鲸鱼”台风眼区形状为椭圆形, 它的长短轴分别约为 60 km 和 40 km。

“鲸鱼”台风云和降水分布具有明显的不对称性, 云和降水主要分布在台风中心以北区域, 在其以南区域只有较少降水和云分布。从图 2a 可以看出, 在台风眼周围有大片云层分布, 部分区域云顶的红外亮温要低于 200 K, 最低亮温值仅为 185 K。台风眼附近区域的红外亮温要低于外围, 它说明台风眼附近区域的云顶要比周围高。另外, 对比图 2a 和 2c 可以明显看出, 红外低亮温区域面积要明显大于降水区域, 这是因为红外亮温反映的只是台风云系的云顶亮温, 它说明在台风云系的外围有大面积的非降水云系存在。但是, 红外亮温和降水有一定的对应关系, 强降水区域一般对应于较低的红外亮温区, 这是因为台风降水中强降水区域一般都在对流旺盛的区域, 云顶高度较高。图 2b 为 TMI 的微波亮温分布, 在图上有相当大区域的微波亮温值要低于 200 K, 其中最低微波亮温值仅为 138 K。图 2b 的微波亮温和图 2c、d 的降水分布有很好的对应关系, 在微波亮温低的区域有降水分布, 并且微波亮温越低的区域对应的降水越强。

从图 2c 中可以看出, 在台风的东北方向有两条强降水带, 一条位于台风眼壁附近位置, 另外一条距台风中心约 100 km 区域, 其中位于台风眼壁附近降水带强度较强。眼壁周围降水带的宽度约 10~15 km, 长度约为眼区周长的一半, 即 100~150 km; 而与台风中心距离较远区域的螺旋状降水带是由三条降水带汇合而成的, 其中包含有许多相互独立的对流性降水。从以上的分析可以看出, 台风降水有很大不均匀性, 在大范围低强度降水中包含有多条强降水带, 并且这些降水带中包含有很多相互独立的对流性降水区域。台风所造成的强降水主要分布在台风眼壁附近区域, 在距离台风中心距离较远地方的降水强度要明显小于附近的降水。在强度较小的层性降水区内包含有数量众多, 但范围很小、强度稍强的降水。图 2d 中两条线之间为 PR 扫描区域。对比图 2c 和 d 可以看出, 在海面附近位置, 在台风眼壁位置都有一条明显的弧形强降水带分布; 对于较远位置的强降水带, 图 2c 中要比图

2d (只有 4 片强度相对较强的降水区) 明显。从图 2c、d 的对比可以看出, 两者水平分布形势比较接近, 能够比较直观地反映出“鲸鱼”台风降水的螺旋状结构。但是, PR 资料更能反映降水的细微结构, 这是因为 PR 有更高的水平分辨率。

3.1.2 平均降水量水平分布

图 3 为台风平均降水量随着与台风中心距离增加的变化曲线, 它是从台风中心开始以每 5 km 为半径, 计算不同半径圆环形区域内的平均降水率。从图 3 可以看出, 在距离台风中心约 30~40 km 处的平均降水量达到最大(36.8 mm/h), 然后, 降水量随着距离的增加迅速减小, 在距离台风中心 200 km 平均降水量仅为 1.9 mm/h。这与 Lonfat 等^[3] 利用 TRMM 资料研究热带气旋降水水平分布的结果基本一致。区域平均降水量在距离台风中心约 50 km 处出现一个极低值, 然后, 随着距离台风中心的增大平均降水量有所增加, 在 75~100 km 又出现一个的极大值。在 100 km 以外区域的平均降水量随着与台风中心距离的增加虽然有一点波动, 但在总体上还是逐渐减小的。这种波动是由于台风降水区域内分布有多条强降水带。另外, 台风造成的降水有 60%集中在距离台风中心 100 km 以内的范围, 但这部分降水面积大约只占台风总降水面积的 40%。

3.1.3 不同类型降水在“鲸鱼”台风降水中所占比例

Marks 和 Houze^[25] 的研究表明在台风眼壁的外围有大量层性降水存在。而降水中的层性降水比例也许是最重要的, 因为它能间接表明大气中潜热释放的垂直廓线^[26~28]。降水系统的最大加热高度和加热的垂直廓线主要取决于对流性和层性降水所

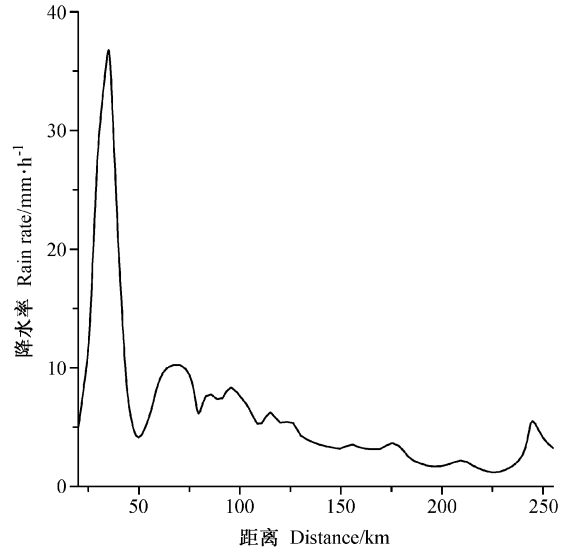


图 3 利用 PR 和 TMI 联合反演的 2B31 资料计算的“鲸鱼”台风平均降水量随与台风中心距离增加的变化曲线

Fig. 3 Near surface rain rate of typhoon Kujira retrieved from 2B31 product varying with the distance from typhoon center

占的比例^[29]。PR 观测的瞬时对流性和层性降水在总降水中所占比例与众多空基和地基雷达的观测结果一致^[20, 30, 31]。表 1 给出用 TRMM 的 PR 资料反演的台风降水中各种类型降水所占区域比例和它们分别对应的平均降水量及其对总降水的贡献率。

从表 1 可以看出, 在台风的降水区域内主要是层性降水, 它占总面积的 85.5%, 其次为对流性降水, 所占比例为 13.1%, 而其他降水约占 1.4%。“鲸鱼”台风中层性降水所占区域面积要明显高于热带降水中层性降水面积 (平均为 72%^[29])。在总降水量中有 58.1%来自层性降水, 41.8%来自对流性降水。“鲸鱼”台风中层性降水的贡献率要明显高于热带海洋地区的层性降水贡献率 (平均为 43%^[29])。

表 1 用 TRMM 的 PR 资料反演的 2003 年 4 月 16 日 1105 UTC 台风降水中各种类型降水所占比例、平均降水量和对总降水的贡献率

Table 1 Statistics of rain rate and percentage contributed by stratiform and convective rain etc. caused by Typhoon Kujira

降水类型 Rain type	平均降水量 Mean rain rate/ mm · h ⁻¹	面降水百分比 Rain total fra- ction/%	降水面积百分比 Rain area frac- tion/%	各种降水样本数 Number of precipi- tation pixels	样本总数 Total precipitation pixels
层性降水 Stratiform rain	4.22	58.1	85.5	2893	3383
对流性降水 Convective rain	19.78	41.8	13.1	444	
其他降水 Other rain	0.78	0.1	1.4	46	

注: 降水类型和降水量资料分别来自 2A23 和 2B31

Note: The data of rain type and rain rate come from 2A23 and 2B31, respectively

另外, 三种类型降水所对应的平均降水量也有很大的差别, 平均降水量最大的为对流性降水, 达到 19.78 mm/h, 其次为层性降水, 平均降水量为 4.22 mm/h, 台风降水的对流性和层性降水的平均降水量明显大于热带海洋地区的平均值(对流性降水为 5.8 mm/h, 层性降水为 1.8 mm/h^[29])。对流性降水的平均降水量为层性降水的 4.7 倍, 要明显大于热带海洋地区平均值(对流性降水是层性降水的 3.3 倍^[29])。其他降水的平均降水量仅为 0.78 mm/h。

造成这种现象的原因是: (1) 在台风的强降水带中有更强烈的上升气流, 所以会产生强对流性降水, 从而造成“鲸鱼”台风中的对流性降水的平均值要大于热带海洋地区的平均对流性降水的平均降水量。(2) 在台风的外围由于有很强的风切变和大范围的高相对湿度的存在^[29], 所以会形成大范围并且降水强度较大的层性降水区域。

3.2 “鲸鱼”台风降水的垂直结构

3.2.1 台风降水的三维结构

图 4(见文后彩图)为“鲸鱼”台风在 2 km 高度处的降水的水平分布、垂直剖面 and 台风降水的三维立体图(降水强度阈值为 2 mm/h)。对比图 2c 和图 4a 可以看出, 在 2 km 高度上和海平面降水的水平分布形式基本一致, 因此 2 km 高度上的降水水平分布可以代表降水在海平面位置的水平分布。图 4b 为沿图 4a 中直线位置垂直剖面图, 图 4b 中的 A 和 B 分别与图 4a 中的 A 和 B 相对应, 从图 4b 中可以看出在台风眼壁位置降水出现的最大高度接近 15 km。对比图 4a 和 b 可以看出, 这两张分图的每条强降水带都有很好的对应关系。图 4c 为降水的三维立体分布图和与其对应的降水水平分布图, 阈值为 2 mm/h。从图 4c 可以看出, 台风降水中有三条降水带中降水量大于 2 mm/h 所达到的高度要明显高于周围其他部分降水所达到的高度, 每条达到较高高度的降水都对应一条海平面附近强降水带, 而这些强降水带以外区域达到 2 mm/h 降水出现高度基本一致。虽然在台风降水中有突起降水带, 但是在台风降水中不具有梅雨锋降水所包含的在上部是分开但在底部却是连结在一起的降水塔结构^[32]。

3.2.2 平均降水量的垂直分布

图 5 为 TRMM/PR 所测量距离台风中心 50 km 以内(简称内区)和 50 km 以外区域(简称外区)层性和对流性降水平均降水量随高度的变化。从图 5

可以看出, “鲸鱼”台风的层性降水出现高度约 12 km。6 km 以上的层性降水在内区的平均降水量要略大于外区, 而 6 km 以下则恰恰相反。另外, 在 6 km 以上位置的层性降水的平均降水量基本不随高度而改变, 这说明在 6~12 km 这个高度范围内形成的降水量很少, 基本与雨滴下落过程中的蒸发^[33]持平。从 6 km 开始一直到 4.5~5 km 位置, 层性降水的平均降水量迅速增加, 说明在这个位置是层性降水的形成区域, 这是因为在此区域的上方有一个上升气流层存在^[34]。但是, 在内区的层性降水平均降水量的最大值出现在 5 km 高度处, 而外区的平均降水量最大值出现高度约 4.5 km, 从图 6b 可以看出的亮带高度也同样在 4.5~5 km, 同样为内区亮带高度高于外区。在 2.5 km 以下层性降水随高度的降低而增加, 在台风的层性降水区域中的亮带下面有一个气流下沉层, 但是在这个下沉层下面又有一个上升层^[34], 所以在亮带下方的层性降水会出现先降后升的现象。

在内区的对流性降水出现高度约 15 km, 外区则为 12 km。在所有高度上对流性降水的平均降水量都是内区大于外区。对流性降水的平均降水量在内区从 10 km、外区从 8 km 开始随高度的降低而增加。但两者都是在 4~6 km 高度上随高度的降低迅速增加, 这也是云水含量最为集中的高度。在内区的对流性降水的平均降水量在距地高度 3 km

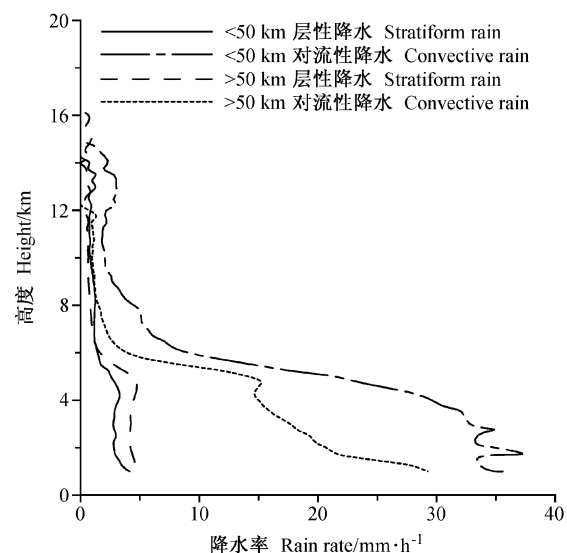


图 5 TRMM/PR 资料反演的“鲸鱼”台风降水在距台风中心 50 km 以内及以外区域的层云和对流性降水垂直分布图
Fig. 5 Vertical profiles of rain rate contributed by stratiform and convective rain of typhoon Kujira

以下随距地高度的降低出现一定振荡,但是没有增大的趋势。从对流性降水的降水量不断增大可以推断出:对流性降水造成的潜热释放在内区主要集中在 3~10 km 高度,而外区则存在于从海面附近一直到 8 km。造成内区的降水平均值出现振荡的原因是 PR 的波长只有 2.17 cm,因此在测量特别强的降水时会有很强衰减作用,这样在进行衰减订正后反演的降水量就会出现一定程度的不稳定性^[35]。

从以上分析可以得出,台风的对流性降水主要分布在台风的几条强降水带中(图略),强降水带中有很强的上升气流,而在层性降水区域内则没有这种强上升气流。对于其他类型的降水来说,由于仅占很小一部分,且降水量很小,所以图 5 中未列出。

3.3 降水所达到的高度特征

利用 2A23 产品提供的数据绘制暴雨高度、亮带高度、凝结高度及亮带强度平均值随着与台风中心距离增加的变化(图 6)。从图 6a 可以看出暴雨高度平均值随着与台风中心距离的增加开始是迅速上升,并在距离台风中心约 35~45 km 达到最大值 10 km 以上,这个位置与最大平均降水出现的位置基本一致(见图 3)。然后,随着距离的增加暴雨高度迅速降低,在 80~90 km 处出现一个高度极小值,之后随着距离的增加有所增加,在 130~140 km 又出现一个极大值,然后再逐渐下降,在距

离台风中心 200 km 以外的平均暴雨高度仅为 4100 m 左右。对比图 6a 和图 2 可以看出,暴雨高度的波动与平均降水量的波动有很好的对应关系。图 6b 和 c 为亮带高度和凝结高度的平均值,可以看出两者均随着与台风中心距离的增加而减小,但是亮带高度的变化值要远大于凝结高度的变化值,亮带平均高度从台风中心附近的 5000 m 到最后的 4200 m 左右,而凝结高度的平均值虽说有一点下降,但是这种变化很小,从 4685 m 到 4670 m,可以认为基本没有变化。图 6d 为亮带强度平均值随着与台风中心距离的增加变化曲线,从图中可以看出在台风中心附近亮带强度随着与台风中心的距离增加而增加,在距离台风中心约 60~70 km 时达到最大值 37.32 dBZ,主要因为在这个位置有面积强度稍强的层性降水存在,而在距离更近和稍远的位置有较强对流性降水存在,所以在这个位置会出现亮带强度最大。然后,随着与台风中心的距离增加基本不变,在距离台风中心大于 150 km 时,亮带强度的值随着距离的增加迅速减小,这是因为在此区域的平均降水很小,并且随着距离的增加而减小。以上结果说明“鲸鱼”台风眼壁里有很强的上升气流活动,所以会出现强对流性降水。在台风的降水区域中还有几条较强的对流性降水带,在这些对流性降水带之间有很多降水量相对较小的层性降水分布。

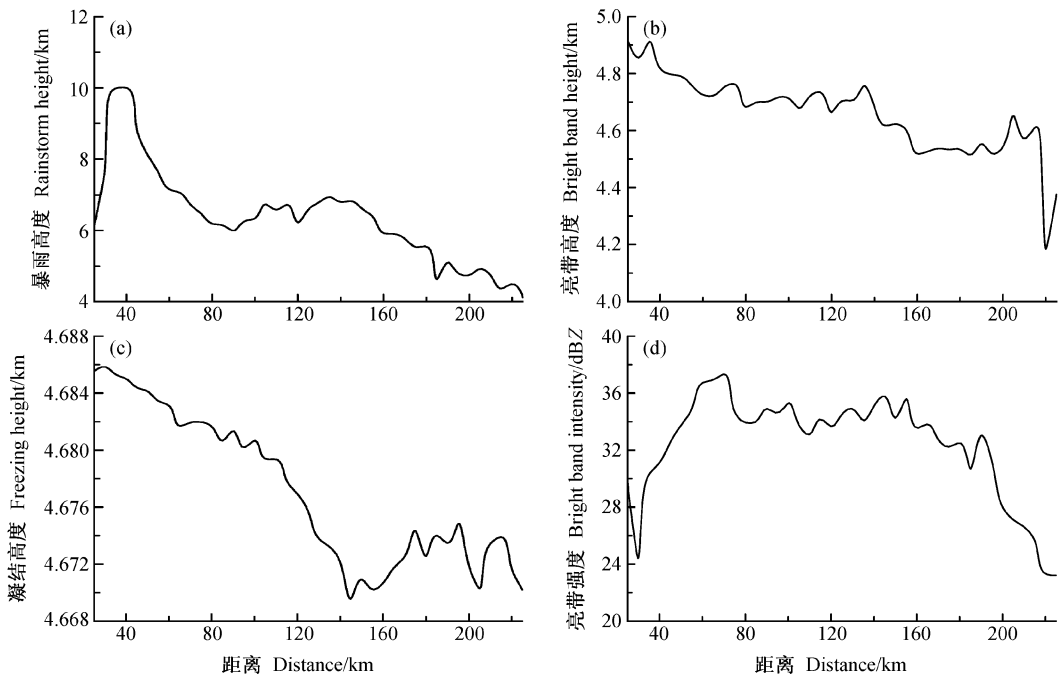


图 6 “鲸鱼”台风降水的暴雨高度 (a)、亮带高度 (b)、凝结高度 (c) 和亮带强度 (d) 随与台风中心距离的变化曲线

Fig. 6 Variations of storm height (a), bright band height (b), freezing height (c) and bright band intensity (d) with distance from typhoon center

4 “鲸鱼”台风降水云系中水粒子三维

台风降水云系中液态水和固态水的分布和总量跟台风的发展有密切关系。Rao 等^[36]和 Cecil 等^[37]研究表明热带气旋中的液态水和固态水的总量和台风的未来强度有正相关的关系。本文研究台风降水云系中液态和固态水所使用的资料是 DAAC 提供的 2A12 产品, 该资料是采用辐射传输模式和云模式结合 TRMM 微波资料估算的降水云系中水粒子的三维分布信息^[38]。

4.1 水粒子的水平分布

从图 7 可以看出, 云水和可降水含量的最大值出现在距离台风中心约 40 km 处, 而云冰和可降冰含量最大值则出现在距离台风中心 30 km 位置。在距离台风中心 60 km 以外区域, 除了可降水以外, 其他水粒子含量的变化很小, 而可降水总量在距离台风中心 60~120 km 区域相对稳定, 在这之后迅速下降。结合图 7 和图 6a 可以看出, 云冰和可降冰含量最大值和降水达到最大高度及平均降水量最大的位置基本一致。但是云水和可降水含量最大值出现的位置要离台风中心稍远。同时, 在距离台风中心 80 km 以外的区域柱体中云冰含量要低于云水的含量, 而当距离小于 80 km 时正好相反。与降水的水平布一样, 降水云系中的水粒子主要分布在距离台风中心 100 km 以内区域。

4.2 水粒子的垂直分布特征

图 8 分别为云中各种水粒子平均值在与台风中心不同距离(50 km、50~100 km、100~200 km、200~300 km)上环形区域随高度的变化。从图 8a 中可以看出, 云水主要分布在 2 km 到 8 km 的高度区间内, 云水含量最大值都出现在 5 km 高度处, 并且随着台风中心距离而增大云水含量迅速减小, 在距台风中心 50 km 以内的区域达到 0.215 g/m^3 。云水在 100 km 以内的含量变化不是很大, 而在 100~200 km 区域的含量要明显小于 100 km 以内的含量, 后者约为前者的一半。在 200 km 以外区域的云水含量基本可以忽略不计。台风降水云系的云水粒子主要集中在距离台风中心 100 km 以内区域, 与降水主要集中区域基本一致。图 8b 显示了云冰主要分布在 8 km 以上空域, 在距台风中心 50 km 以内云冰含量要远大于其他距离上的云冰含量。云冰含量的最大值出现高度有很大变化, 例如在距离

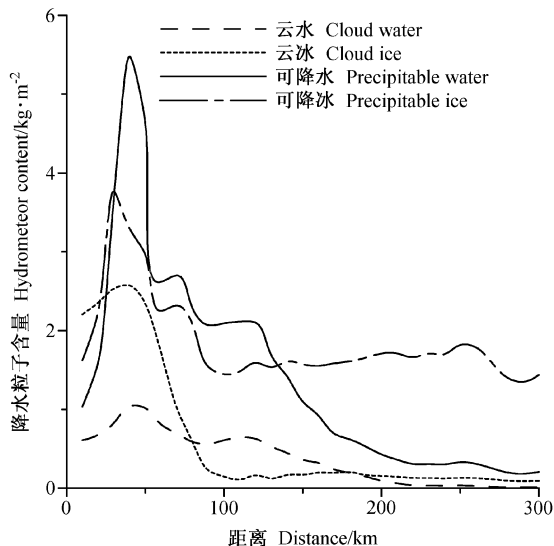


图 7 “鲸鱼”台风降水云系中各种水粒子在单位面积空气柱中总含量随与台风中心距离的变化分布图

Fig. 7 Total amount per unit area of hydrometeors (cloud water, cloud ice, precipitation water and precipitation ice) within air column varying with the distance from typhoon center

台风中心 100 km 以内平均最大值出现的高度为 14 km, 达到 0.32 g/m^3 。而在 100 km 以外位置平均最大值出现的高度为 7 km, 仅为 100 km 以内的一半高度。这是由于在台风眼壁位置有很强的对流系统产生大量的大的固态粒子^[39], 而眼壁外围层性降水区域的固态粒子是由从眼壁位置向外辐散的气流带出^[25], 并且随着与台风中心距离的增加逐渐下降。所以 100 km 以外的云冰最大含量高度要低于 100 km 以内。另外, 从不同距离的云冰含量来看, 云冰主要集中在距离台风中心 50 km 以内, 高度 10 km 以上的区域。

图 8c 为可降水的垂直廓线, 可降水的平均最大值出现的高度在 100 km 以内区域为 2 km, 而在 200 km 以外区域则高达 4 km, 这可能与在距离台风中心 200 km 以外区域主要是层性降水有关。另外, 在距台风中心 50 km 以内区域的平均值最大达到 0.86 g/m^3 , 随着与台风中心距离的增加单位体积内可降水含量迅速减小。与降水及云水一样, 可降水主要集中在与台风中心 100 km 以内区域。图 8d 为可降冰的垂直廓线, 单位体积内可降冰含量也随着与台风中心距离的增加而减小, 但是减小的幅度很小, 同时, 单位体积内可降冰含量最大值出现的高度在距离台风中心位置小于 50 km 时为

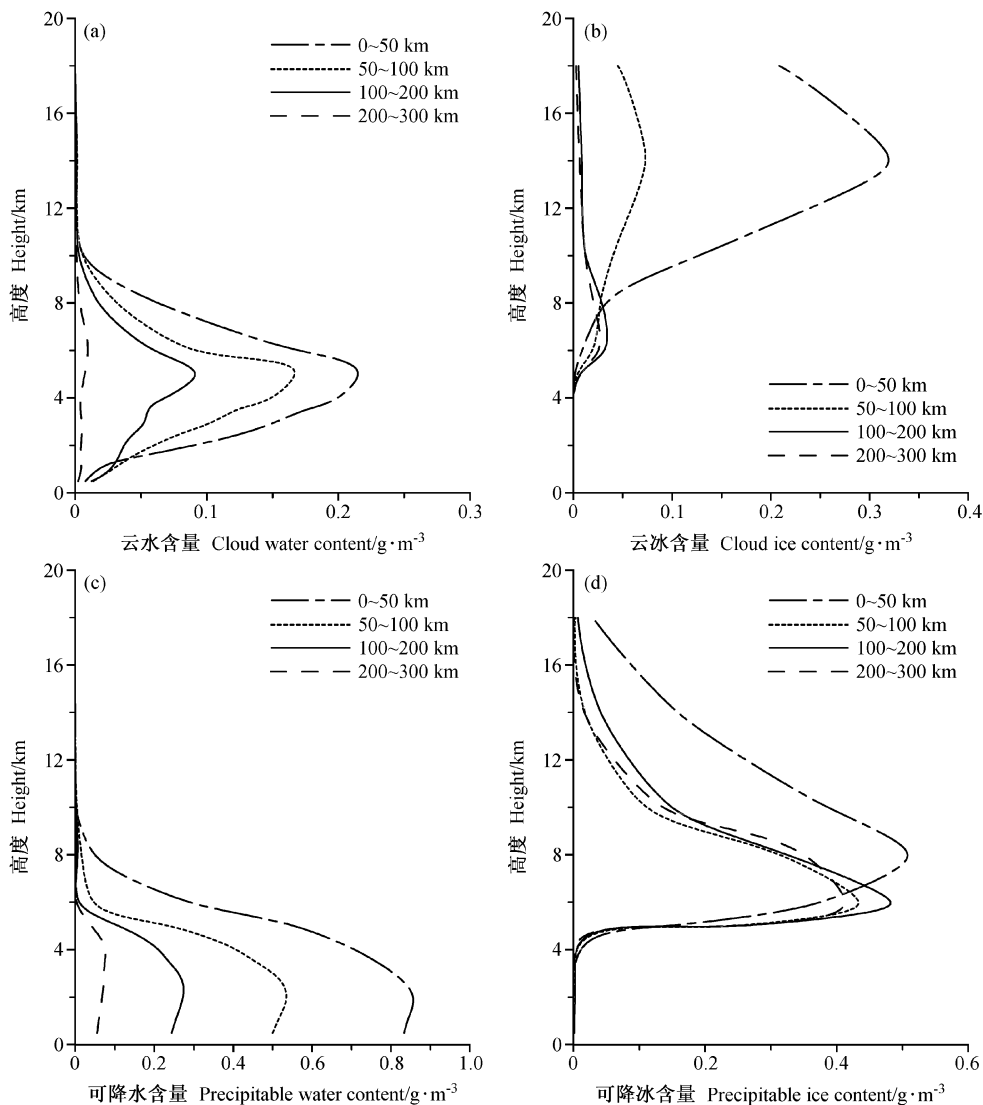


图8 “鲸鱼”台风降水云系中各种水粒子在与台风中心不同距离的环形区域内平均含量垂直分布图：(a) 云水；(b) 云冰；(c) 可降水；(d) 可降冰

Fig. 8 Vertical distributions of average amount of hydrometeors varying with the distance from typhoon center: (a) Cloud water; (b) cloud ice; (c) precipitable water; (d) precipitable ice

8 km、大于50 km时约为6 km。并且在7 km以上位置，50 km以内的可降冰含量要远高于其他区域的可降冰含量。这是由于在50 km以外区域在8 km以上有大量云冰分布。同时在50 km以内区域有很强烈的上升气流，所以在7 km以下区域反而要小于其他区域的可降冰含量。另外，结合图8d和图7中可以看出，在台风降水云系中，可降冰的水平分布要比其他水粒子更为均匀。

结合台风降水云系的云水和云冰及降水三维分布，可以看出，台风内部的运动为底层有较强的辐合而在台风的上层有明显的辐散现象。这种底层辐

合高层辐散作用，造成在台风中心附近有强烈的上升运动，而在距离台风中心较远处层性降水区域有下沉的现象^[40]。并且这种抬升运动随着与台风中心距离的接近逐渐抬升和逐步加快，在距离台风中心壁附近达到最高，同时上升速度也达到最快。

5 结论

用TRMM的PR、TMI和VIRS资料，详细研究0302号“鲸鱼”台风于2003年4月16日1105 UTC的降水和降水云系中水粒子的三维分布特征。主要研究了降水的水平分布形式、台风降水中不同类型

降水所占的比例及其平均降水量,降水云系中各种水粒子(云水、云冰、可降水、可降冰粒子)的三维分布形式。研究表明:

在距离台风中心约 30~40 km 处的平均降水量最大,然后降水量随着距离的增加迅速减小。由于在“鲸鱼”台风降水中含有强降水带,所以随着与台风中心距离的变化,平均降水量会出现波动。另外,“鲸鱼”台风降水主要集中在距离台风中心 100 km 以内,这里只占 40% 的降水面积,却集中了 60% 的降水。在“鲸鱼”台风降水中,有 85.5% 面积为层性降水,而对流性降水面积所占比例仅为不到 13.1%,但它却贡献了 42% 的总降水量,剩下的 1.4% 为其他降水。层性降水对总降水的贡献要高于热带海洋地区的平均值。“鲸鱼”台风降水中主要是层性降水,对流性降水虽然占的面积很小,但是对总降水量却有很大的贡献。对流性降水的平均降水率为层性降水的 4.7 倍,要高于热带海洋地区的平均值。从“鲸鱼”台风降水的三维立体图中可以看出,降水凸起的部分对应于下面的强降水带,它的顶部包络面不象陆地暴雨的起伏那么明显,不具有陆地暴雨所包含的降水塔结构。层云和对流性降水的垂直结构也有明显差异,层云最大降水出现高度约为 5 km,在 5 km 以下位置,由于台风中上升和下沉气流的作用,降水量是先降后升。对流性降水的降水量不断增大,对流性降水造成的潜热释放在内区主要集中在 3~10 km 高度,而外区则存在于从海面附近一直到 8 km。

台风降水云系中云水、云冰、可降水和可降冰含量都随着与台风中心距离的增加而减少。云水和可降水的最大含量值分别出现在距地高度约 5 km 和 2 km 处。但是云冰和可降冰含量最大值出现高度在距离台风中心 50 km 以内的要明显高于 50 km 外的高度。

为了更进一步理解台风在不同发展阶段的结构特征,将用遥感资料研究台风从发展到最后消亡不同阶段的降水和降水云系中水粒子的三维结构。

致谢 朱福康教授给予了大力的帮助和指导,美国宇航局 Goddard 空间飞行中心数据分发中心 (DAAC) 提供了 TRMM 资料,在此一并致谢。

参考文献 (References)

[1] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展. 大气科学,

2001, **25** (3): 420~432
Chen Lianshou, Meng Zhiyong. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2001, **25** (3): 420~432
[2] Simpson J, Kummerow C, Meneghini R, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) progress report. *Earth Observation and Remote Sensing*, 2000, **4C**: 71~90
[3] Lonfat M, Marks F D, Chen S. Precipitation distribution in tropical cyclones using the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) microwave imager: A global perspective. *Monthly Weather Review*, 2004, **132** (7): 1645~1660
[4] 张华, 丑纪范, 邱崇岭. 西北太平洋威马逊台风结构的卫星观测同化分析. 科学通报, 2004, **49** (5): 493~498
Zhang Hua, Chou Jifan, Qiu Chongjian. Assimilation analysis of Rammasun typhoon structure over Northwest Pacific using satellite. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2004, **49** (5): 389~395
[5] Tepper M. A theoretical model for hurricane radar bands. Proceeding of Seventh Weather Radar Conference. Miami, Florida, Nov. 17-20, 1958, K56~K65
[6] Macdonald N J. The evidence for the existence of Rossby like waves in the hurricane vortex. *Tellus*, 1968, **20**: 138~150
[7] Willoughby H E. A possible mechanism for the formation of hurricane rainbands. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35** (5): 838~848
[8] Willoughby H E. The vertical structure of hurricane rainbands and their interaction with the mean vortex. *J. Atmos. Sci.*, 1978, **35** (5): 849~858
[9] 余志豪. 台风螺旋雨带——涡旋 Rossby 波. 气象学报, 2002, **60** (4): 502~507
Yu Z H. The spiral rain bands of tropical cyclone and vortex Rossby waves. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (4): 502~507
[10] 刘式适, 杨大升. 台风的螺旋结构. 海洋学报, 1980, **38** (3): 193~204
Liu S S, Yang D S. Spiral structure of typhoon. *Acta Oceanologica Sinica* (in Chinese), 1980, **28** (3): 193~204
[11] Diercx J W, Anthes R A. A study of spiral bands in a linear model of cyclonic vortex. *J. Atmos. Sci.*, 1976, **33** (9): 1714~1729
[12] Luo Zhexian. Nonlinear interaction of axisymmetric circulation and nonaxisymmetric disturbances in hurricanes. *Science in China* (Ser. D), 2004, **47** (1): 58~67
[13] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科技出版社, 1979. 193~204
Chen L S, Ding Y H. *An Introduction to the West Pacific Typhoon* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1979. 420~423
[14] 罗哲贤. 边缘区域扰动演变对台风结构的影响. 大气科学, 1994, **18** (5): 513~519
Luo Z X. Influence of the disturbance evolution in the edge

- area on the typhoon structure. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica)* (in Chinese), 1994, **18** (5): 513~519
- [15] Meng Z, Masashi N, Chen L. A numerical study on the formation and development of island-induced cyclone and its impact on typhoon structure change and motion. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, **10** (4): 430~443
- [16] 徐祥德, 张胜军, 陈联寿, 等. 台风涡旋螺旋波及其传播动力学特征: 诊断分析. *地球物理学报*, 2004, **47** (1): 33~41
Xu Xiangde, Zhang Shengjun, Chen Lianshou, et al. Dynamic characteristics of typhoon vortex spiral wave and its translation; a diagnostic analyses. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2004, **47** (1): 33~41
- [17] 何会中, 崔哲虎, 程明虎, 等. TRMM 及其数据产品应用. *气象科技*, 2004, **32** (1): 14~18
He Huizhong, Cui Zhehu, Cheng Minghu, et al. TRMM satellite and application of its products. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 2004, **32** (1): 14~18
- [18] Kummerow C, Barnes W, Kozu T, et al. The Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) sensor package. *J. Atmos. Oceanic Tech.*, 1998, **15** (3): 809~817
- [19] Iguchi T, Kozu T, Meneghini R, et al. Rain-profiling algorithm for the TRMM precipitation radar. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39** (12): 2038~2052
- [20] Liang L, Meneghini R, Iguchi T. Comparisons of rain rate and reflectivity factor derived from the TRMM precipitation radar and the WSR-88D over the Melbourne, Florida, site. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, **18** (12): 1959~1974
- [21] Tufa D, Emmanouil N. Regional differences in overland rainfall estimation from PR-calibrated TMI algorithm. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, **44** (2): 189~205
- [22] Hirohiko M, Iguchi T, Oki R, et al. Comparison of rainfall products derived from TRMM microwave imager and precipitation radar. *Journal of Applied Meteorology*, 2002, **41** (8): 849~862
- [23] Willoughby H E. Temporal changes of the primary circulation in tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, **47** (2): 242~264
- [24] William M F. The Structure and energetics of the tropical cyclone II. Dynamics and energetics. *Monthly Weather Review*, 1977, **105** (9): 1136~1150
- [25] Marks D F Jr, Houze R A Jr. Inner core structure of hurricane Alicia from airborne Doppler radar observation. *J. Atmos. Sci.*, 1987, **44** (9): 1296~1317
- [26] Houze R A Jr. Cloud clusters and large-scale vertical motions in the tropics. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1982, **60**: 396~410
- [27] Houze R A Jr. Observed structure of mesoscale convective systems and implications for large-scale heating. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1989, **115**: 425~461
- [28] Houze R A Jr. Stratiform precipitation in regions of convection: A meteorological paradox? *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1997, **78** (10): 2179~2196.
- [29] Schumacher C, Houze R A Jr. Stratiform rain in the tropics as seen by the TRMM precipitation radar. *J. Climate*, 2003, **16** (11): 739~1756
- [30] Heymsfield G, Geerts B, Tian L. TRMM precipitation radar reflectivity profiles as compared with high-resolution airborne and ground-based radar measurements. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39** (12): 2080~2102
- [31] Schumacher C, Houze R A Jr. Comparison of radar data from the TRMM satellite and Kwajalein oceanic validation site. *J. Appl. Meteor.*, 2000, **39** (12): 2151~2164
- [32] Cheng M, He H, Mao D, et al. Study of 1998 heavy rainfall over the Yangtze River basin using TRMM data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2001, **18** (5): 387~396
- [33] 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** (4): 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** (4): 421~431
- [34] Teshiba M, Hashiguchi H, Fukao S, et al. Typhoon 9707 observations with the MU radar and L-band boundary layer radar. *Annales Geophysicae*, 2001, **19**: 925~931
- [35] Hitschfeld W, Bordan J. Errors inherent in the radar measurement of rainfall at attenuating wavelengths. *J. Meteor.*, 1954, **11**(1): 58~67
- [36] Rao G V, MacArthur P D. The SSM/I estimated rainfall amounts of tropical cyclones and their potential in predicting the cyclone intensity changes. *Mon. Wea. Rev.*, 1994, **122** (7): 1568~1574
- [37] Cecil D J, Zipser E J. Relationships between tropical cyclone intensity and satellite-based indicators of inner core convection: 85-GHz ice scattering signature and lightning. *Mon. Wea. Rev.*, 1999, **127** (1): 103~123
- [38] Bauer P, Amayenc P, Kummerow C D, et al. Over-ocean rainfall retrieval from multisensor data of the tropical rainfall measuring mission. Part II: Algorithm implementation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001, **18** (11): 1838~1855
- [39] Black R A, Hallett J. Observations of the distribution of ice in hurricanes. *J. Atmos. Sci.*, 1986, **43** (8): 802~822
- [40] Houze R A Jr, Marks F D Jr, Black R A. Dual-aircraft investigation of the inner core of hurricane Norbert. Part II: Mesoscale distribution of ice particles. *J. Atmos. Sci.*, 1992, **49** (11): 943~963

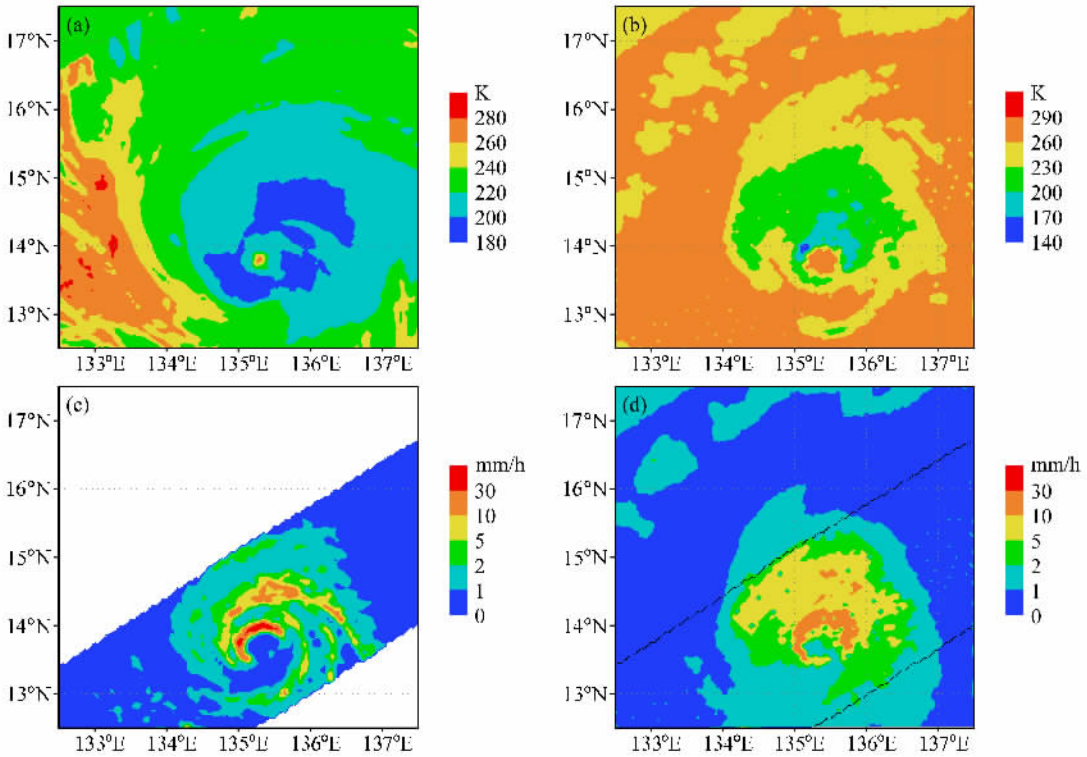


图 2 2003 年 4 月 16 日 1105 UTC 观测的“鲸鱼”台风：(a) VIRS 第五通道观测的红外亮温分布；(b) TMI 第九通道观测的微波亮温分布；(c) PR/TMI 观测的台风近海面降水分布；(d) TMI 资料和模式相结合反演的近海面降水分布

Fig. 2 Typhoon Kujira observed by TRMM/PR, VIRS and TMI (1105 UTC 16 Apr 2003): (a) Brightness temperature image observed by VIRS channel 5; (b) brightness temperature image observed by TMI channel 9; (c) near sea surface rain rate from 2B31 product (PR/TMI rainfall retrieval); (d) near sea surface rain rate from 2A12 product (obtained from combining TMI data and models)

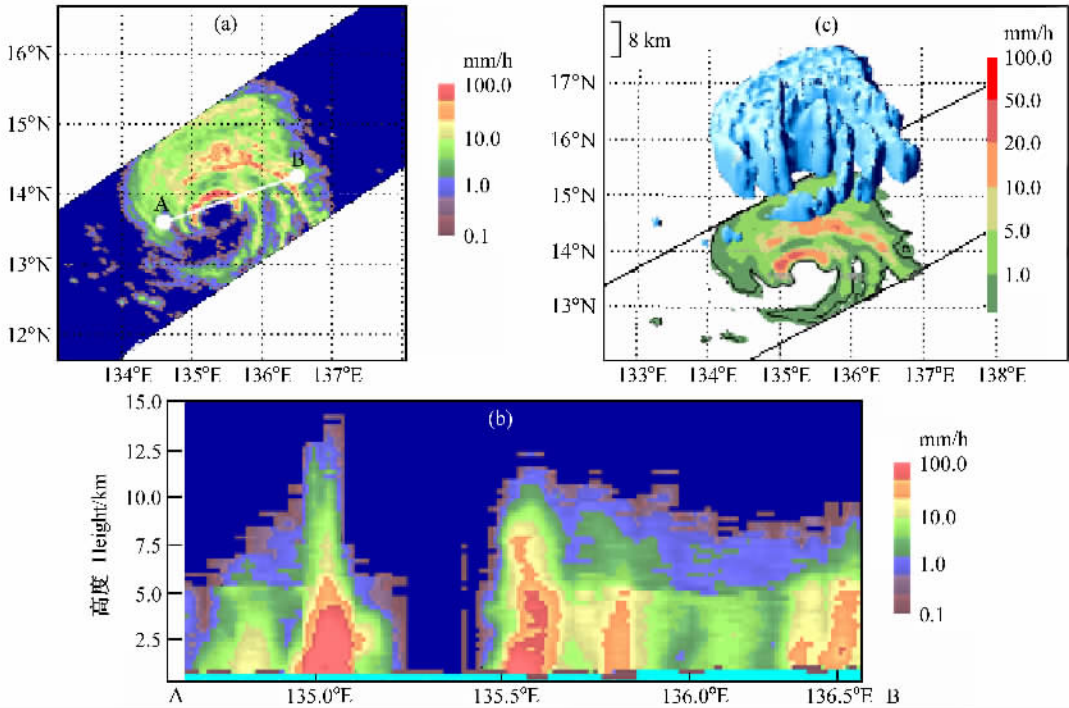


图 4 用 TRMM/PR 绘制的“鲸鱼”台风在 2 km 高度的降水水平分布 (a)、垂直剖面 (b) 和三维立体 (c) 图

Fig. 4 Rain rate at 2 km height, vertical cross-section and 3D-stereo displays of typhoon Kujira