

# 西北太平洋威马逊台风结构的卫星观测同化分析

张 华 丑纪范 邱崇践

( 兰州大学大气科学系, 兰州 730000; 中国气象科学研究院, 北京 100081; 中国气象局培训中心, 北京 100081.

E-mail: [zhangh@cma.gov.cn](mailto:zhangh@cma.gov.cn))

**摘要** 以 0205 号台风威马逊为个例, 采用经过三维变分同化分析的 AMSU 微波资料研究西北太平洋台风结构. 分析结果表明, AMSU 微波同化资料能够更加合理地反映台风三维结构特征, 增强了与强台风相对应的暖心结构, 台风中、下层的气旋性环流明显加大, 台风顶部出现强盛的反气旋性环流, 反映了台风本身所携带的水汽和水汽供应; 微波同化资料可以部分地弥补热带洋面上常规观测资料的不足.

**关键词** 台风结构 微波资料 变分同化

台风指发生在西太平洋地区的热带气旋, 台风结构是台风研究的基础. Palmén<sup>[1]</sup>最早给出飓风的温度和气压分布模式, 显示了飓风中心的暖心结构; Koteswaram<sup>[2]</sup>根据大西洋飓风气压场分析, 指出闭合低压中心向上伸展的高度与飓风强度有关; Palmén 等人<sup>1)</sup>概括了较完整的热带气旋结构模式; 包澄澜<sup>[3]</sup>研究表明, 台风自身结构变化对其强度突变有直接影响; Chen 等人<sup>[4]</sup>、徐祥德等人<sup>[5]</sup>和雷小途<sup>2)</sup>的研究进一步表明, 台风结构的变化不仅影响台风的强度变化, 而且还会影响到台风的路径, 暴雨的落区和雨强, 甚至风暴潮的强弱. 此外, 陈联寿等人<sup>[6]</sup>、刘式适等人<sup>[7]</sup>、罗哲贤<sup>[8]</sup>、陈联寿<sup>3)</sup>和 Meng<sup>[9]</sup>研究了各种尺度系统、环境和不同物理因子对台风结构和结构变化的影响, 获得了许多有意义的结果. 由于受观测资料的限制, 上述大部分工作偏重于理论研究, 对观测事实的分析相对较少, 对西北太平洋台风结构的观测研究则更少. 事实上, 人们对热带气旋的知识主要来源于大西洋飓风密集的飞机侦察资料, 如飓风 Hilda(1964) 的温度距平垂直剖面图作为成熟热带气旋暖心结构的典型案例至今还被广泛地引用.

热带气旋内部及其邻近区域观测资料稀少, 制约了人们对热带气旋结构的分析及其认识. 传统上对热带气旋观测资料的获取主要有两条途径: (1) 常规探空和地面观测资料, 为了增大资料的空间密度, 人们开始在一个以气旋为中心的网格上综合许多个例的观测资料做“合成”分析<sup>[10~12]</sup>, 该方法为早期科

学家对台风的大尺度结构及其不同发展阶段强度变化的认识做出了重要的贡献, 但是这种方法的一个重大缺陷是丧失了各个气旋的相异性信息; (2) 利用飞机侦察报告. 有关热带气旋位置和强度的飞机侦察报告被认为是最可靠的, 许多有关热带气旋结构的知识都是根据这种资料得到的. 由于飞机侦察的花费太过于昂贵, 目前专用于热带气旋观测的侦察飞机仅部署在北大西洋地区.

气象卫星的发射加深了人们对大气的认识特别是热带气旋的认识. 过去人们对气象卫星的应用主要集中在定性的图像判识方面, 其中以 Dvorak<sup>[13]4,5)</sup>发展的图像识别技术最具代表性, 即根据台风云的特征及其强度变化来估计台风的强度, 目前该项技术已广泛地应用于日常业务, 对台风的观测和预报发挥了重要的作用. 其不足之处在于无法对台风进行更为客观的诊断分析, 提高人们对台风内部结构及其运动物理机制的认识.

近 20 年来, 从定性的气象卫星图像研究到定量地卫星遥感信息数字化研究, 卫星探测技术在大气科学中的应用又有了新的进展, 特别是高分辨率微波辐射探测器的发展进一步促进了定量卫星资料反演技术的进步. 装载于极轨气象卫星的微波辐射探测器不仅能够探测大气温度和湿度垂直廓线, 还具有穿透除降水云以外浓密云层探测台风内部结构的独特能力. Kidder 等人<sup>[14,15]</sup>首次使用中心频率为 55 GHz 微波通道透过云层探测到热带气旋的暖心结构,

1) Palmén E, Newton C W. Atmospheric circulation systems. New York and London: Academic Press, 1969

2) 雷小途. 热带气旋的结构对其路径偏折的分析. 第十一届全国热带气旋科学讨论会论文摘要文集. 中国气象科学研究院, 1999, 58~60

3) 陈联寿. 台风科学试验及其主要成果. 中美减轻自然灾害研讨会. 1997, 64

4) Dvorak V F. A technique for the analysis and forecasting of tropical cyclone intensities from satellite picture. NOAA Tech Memo, 1973, NESS 45, Washington, DC, 19

5) Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data. NOAA Tech Rep, 1984, NESDIS 11, Washington, DC, 47

发现其强度与其地面中心气压和外围风速有关并在随后对其进行了进一步的研究. Velden等人<sup>[16]</sup>和Velden等人<sup>[17,18]</sup>通过对大量的微波反演资料和飞机侦查资料的统计分析,建立了热带气旋的暖心强度与其中心气压和外围风速统计关系. 随后, Spencer<sup>[19]</sup>, Kidder等人<sup>[20]</sup>也在这方面做了大量的工作,他们利用微波反演资料探讨了微波探测器对热带气旋结构的观测能力及其局限性. 该做法不足之处有二,一是反演资料误差较大<sup>[21]</sup>;二是无法充分利用其他来源的资料以弥补热带洋面观测资料的缺乏.

为了克服上述这一困难,国际上一些业务气象中心如欧洲中期天气预报中心(ECMWF)、美国国家环境预报中心(NCEP)等开始采用变分方法对卫星资料进行直接同化<sup>[22,23]</sup>. 卫星资料变分同化方法的基本思路是对辐射率资料直接应用以避免计算复杂的不适定问题所带来的反演计算误差,实现用正演方法求解反演问题,从方法论上避开反演问题的复杂性. 变分同化方法不仅能够分析与模式变量有着复杂非线性关系的卫星辐射率资料,集反演、分析为一体,而且能将各种不同来源、不同种类和不同误差特性的观测资料有效地融合在一起. 1992年ECMWF实现一维变分同化系统<sup>[24]</sup>的北半球区域业务化;1996年三维变分同化系统成为ECMWF的业务分析系统<sup>[25]</sup>;1997年ECMWF实现四维变分同化系统业务化<sup>[26]</sup>. 一些影响试验表明<sup>[27,28]</sup>,NOAA极轨卫星TOVS(TIROS, operational vertical sounder)特别是AMSU(advanced microwave sounding unit)微波辐射率资料可以明显地减小数值预报误差;Bouttier等人<sup>[29]</sup>检验了各种来源的观测资料对欧洲中心中期数值预报模式预报水平的影响,指出极轨气象卫星TOVS辐射率资料对模式预报水平的影响已经达到或超过传统的探空观测资料. 这些研究表明,利用三维或四维变分方法对卫星观测辐射直接同化可以得到对大气状况的更精确的描写,利用同化产生的资料来研究天气系统的结构是一个有效的途径. 正是基于这种考虑,与前述采用单一微波反演资料分析台风结构的作法不同,为了充分利用各种来源资料,特别是应用好具有“穿透”能力的微波探测资料. 本文以GRAPeS三维变分同化系统<sup>1)</sup>为工作平台,对AMSU辐射率微波资料直接同化,通过个例分析,考察以AMSU微波资料为主的同化资料对台风三维结

构描述能力.

## 1 AMSU 微波资料的特点及其同化分析方法

### 1.1 三维变分同化方法

GRAPeS 三维变分同化系统是由中国气象科学研究院数值预报研究中心发展的气象资料同化系统. 三维变分同化方法的基本思想是将资料同化归结为一个表征分析场与观测场、分析场与背景场偏差的二次泛函极小值问题. 该泛函一般定义为:

$$J = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(Hx - y^o)^T O^{-1}(Hx - y^o), \quad (1.1)$$

其中, 向量  $x$  是长度为  $N$  的分析变量, 上标  $b$  表示背景场, 向量  $y^o$  是长度为  $M$  的观测,  $B^{-1}$  是阶数为  $N \times N$  的背景误差协方差矩阵的逆,  $O^{-1}$  是阶数为  $M \times M$  的观测误差协方差矩阵的逆,  $N$  是分析场的自由度数目,  $M$  是观测数目.  $H$  为观测算子, 它代表模式空间向观测空间的一种映射. 当  $y^o$  与  $x$  为相同类型的物理变量时, 观测算子简化为一个简单的插值算子, 否则  $y^o$  和  $x$  具有不同的物理属性, 这时观测量为分析变量的一些泛函信息, 算子  $H$  为模式空间向观测空间的具有某种复杂结构的映射算子, 如对卫星辐射率资料来说, 算子  $H$  即为辐射传输模式.

对  $H(x)$  在  $x^b$  作泰勒展开, 截取前两项:

$$H(x) = H(x^b + \delta x) \approx H(x^b) + H' \delta x, \quad (1.2)$$

其中,  $H' = \frac{\partial H}{\partial x}$ ,  $\delta x = x - x^b$ , 令

$$d = H(x^b) - y^o. \quad (1.3)$$

此时  $J$  可以表示为:

$$J = \frac{1}{2} \delta x^T B^{-1} \delta x + \frac{1}{2} (H' \delta x + d)^T O^{-1} (H' \delta x + d), \quad (1.4)$$

其梯度为:

$$\nabla_{\delta x} J = B^{-1} \delta x + H'^T O^{-1} (H' \delta x + d). \quad (1.5)$$

用下降算法对目标函数求极值时, 由于背景误差协方差矩阵的逆  $B^{-1}$  往往是病态的且其规模巨大, 计算困难且收敛性差. 为了解决这一困难, 本方案通过变量变换方式对目标函数进行预调节, 为此定义

1) 薛纪善, 庄世宇, 朱国富, 等. GRAPeS 3D-Var 系统的科学设计方案. 中国气象科学研究院数值预报研究中心技术档案, 2001

新控制变量  $w$ :

$$X = \sqrt{B}w, \quad (1.6)$$

将其代入(2.4)式和(2.5)式, 可求得变换后的目标函数及其梯度:

$$J = \frac{1}{2}w^T w + \frac{1}{2}(H'\sqrt{B}w+d)^T O^{-1}(H'\sqrt{B}w+d), \quad (1.7)$$

$$\nabla_w J = w + \sqrt{B}^T H'^T O^{-1}(H'\sqrt{B}w+d). \quad (1.8)$$

(1.7)和(1.8)式即为 GRAPeS 三维变分同化方案的目标函数及其梯度. 对于卫星辐射率微波资料来说, 观测算子  $H$  由水平插值算子  $H_H$ 、垂直插值算子  $H_V$ 、辐射传输算子  $H_{RT}$  和通道选择算子  $H_S$  组成, 即:

$$H = H_S H_{RT} H_V H_H.$$

以上()为切线形算子,  $()^T$ 为相应的伴随算子.

## 1.2 资料及其数据处理

试验所用的观测资料包括极轨卫星 NOAA-16 的 AMSU 辐射亮温资料和常规探空观测资料, 背景场采用 T213 全球谱模式的预报场.

( ) 极轨卫星 NOAA-16 的 AMSU 辐射亮温资料. NOAA-16 是第五代极轨业务环境系列卫星. 新型微波探测器(AMSU)是微波探测器(MSU)的改进型, 由两个仪器组成: (1)先进的微波探测器 A 型(AMSU-A)和(2)先进的微波探测器 B 型(AMSU-B). AMSU-A 有 15 个通道, AMSU-B 有 5 个通道, 主要用于改进大气温度和湿度垂直探测, 同时也具备探测地表参数的能力. 与 MSU 相比, AMSU 具有探测通道多, 空间分辨率高等特点, 而且增加一个专门用于探测大气湿度的高分辨率微波探测器 AMSU-B, 从而将大大改进大气湿度的探测水平; 与传统的红外、可见光探测器相比, 微波探测器具有独特的穿透浓密云层探测大气温度、湿度结构的能力.

试验用的 AMSU 辐射亮温资料取自国家卫星气象中心的 1 d 数据集, 该数据集经数据解码、定位、定标、亮温计算、亮温订正及多种仪器数据的相互匹配等处理生成<sup>1)</sup>. 在同化分析过程中还需要进行质量控制, 即极值检查、背景场估计值偏差检查和云检测. 此外对微波探测器还要进行通道选择, 去掉受地表反照率影响较大的通道和模式顶层以上的通道.

( ) 常规探空观测资料. 仅采用 06UTC 和

18UTC 的高空风场资料.

( ) 背景场资料. 背景场采用 T213 全球谱模式 6 h 预报场资料, 其要素为高空和地面的位势高度、温度、水平风和比湿.

时间窗设定为 2 h, 同化时对观测资料进行预处理, 舍弃非同化窗和非同化区域内的资料.

## 2 个例简介

本文以 2002 年 6 月底至 7 月初发生在西北太平洋地区的 0205 号威马逊台风为个例, 研究 AMSU 微波同化资料对台风结构的分析效果. 根据台风报告, 0205 号威马逊台风在 7 月 2 日 18UTC 达到最强, 台风中心位于 22.3 °N, 127.3 °E, 中心地面气压为 940 hPa, 最大风速为 50 m/s, 中国中央气象台将这一热带气旋定为强台风.

静止卫星红外云图(图 1)显示, 成熟期的威马逊台风已发展成为具有一个很圆的、色调很白的密蔽云区, 直径达 15 个纬度; 台风眼结构清晰, 表现为一个小圆黑点; 有一个明亮白色的圆环围绕着它, 为台风的云墙区, 有强烈的上升运动, 云区主要由一些高大的对流云组成; 在中心密蔽云区内, 可见到一些弯曲的纹线, 表明有螺旋云带存在, 至少有 3 条浓密的积云对流带向台风中心卷入, 云带完整, 结构对称; 在中心密蔽云区的边界上有许多向外辐射而弯曲的卷云纹线, 说明高空有很强的反气旋辐散气流.

## 3 影响试验分析

图 2 为 0205 号威马逊台风沿 22.5 °N 的温度距平垂直剖面图, 其水平范围从 116 °~138 °E, 垂直范围从 925~70 hPa; 图 2(a)显示, 未考虑卫星观测资料时, 威马逊台风虽然也有暖心结构, 但明显偏弱, 其最大温度距平值仅为 7 °, 所在高度为 300 hPa; 加入 AMSU 微波辐射亮温资料后(图 2(b)), 台风的暖心结构更加清楚, 暖核显著增强, 强度达到 12 °, 其所处位置为 200 hPa. 台风的暖心结构由两部分组成: (1)位于台风上部的大尺度暖核, 可在图中清楚地观测到; (2)台风中下部、位于台风眼区内中小尺度暖核, 温度水平梯度较小, 但这并不一定代表真实的情况, 由于 AMSU 微波资料星下点分辨率仅为 48 km, 难以分辨台风眼区内的结构.

1) 张凤英. 新型大气探测器 ATOVS 性能特征及其数据处理方法简介. 国家卫星气象中心技术报告, 2002

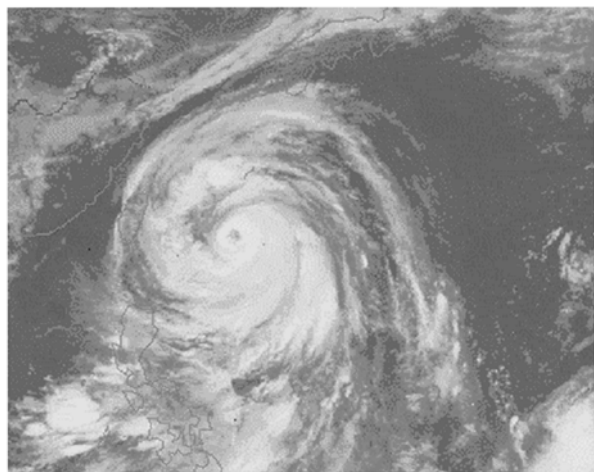


图1 2002年7月2日18UTC静止卫星红外云图

图3为威马逊台风沿环向平均的切向风垂直剖面,其水平范围从 $128^{\circ}\sim 138^{\circ}\text{E}$ ,其他与图2相同.对于背景场(图3(a)),环绕着眼区,在台风的中下层仅有较弱的气旋性环流,最大风速为 $20\text{ m/s}$ ;强风带(大于 $20\text{ m/s}$ )中心距眼区中心3个经距以上;加入微波资料后(图3(b)),在台风的中下层的气旋性环流明显增强,最大风速达 $28\text{ m/s}$ ,强风带中心明显向内收缩,距眼区中心仅1.5个经距.在台风的顶部出现强盛的反气旋性环流,2002年7月2日18UTC静止卫星红外云图(图1)观测结果证实了这一点.这里需要说明的是,AMSU资料所包含的信息是大气的温、湿结构,变分同化过程只是通过动力约束关系间接地、不完全地反映风场;尽管如此,加入AMSU微波辐射亮温资料后的分析结果与背景场相比也显得合理.

图4为 $600\text{ hPa}$ 相对湿度水平分布图.对于背景场(图4(a)),台风区域内的湿度与周围环境的湿度几乎是一样干燥,难以分辨出台风;加入AMSU微波辐射亮温资料后(图4(b)),与周围环境的湿度相比,台风区域内的湿度明显加强,相对湿度高值区形如逗号“,”.区域内大部分地方相对湿度超过 $90\%$ ,其南部有大片的水汽向台风中心卷入,这表明台风本身是湿润的且有充沛的水汽供应,与同一时刻的NOAA-16极轨卫星AMSU-B第4(水汽)通道云图(图4(c))对比,可以看出二者是相当一致的.

由于威马逊台风属于强台风,根据有关热带气旋方面的知识,作者认为加入AMSU微波资料后的台风结构更加合理,结果也与Kidder等人<sup>[20,21,26]</sup>和

Velden等人<sup>[22~24]</sup>有关热带气旋中心最大温度距平、最大近地面风速有较好的相关性的结论是一致的.

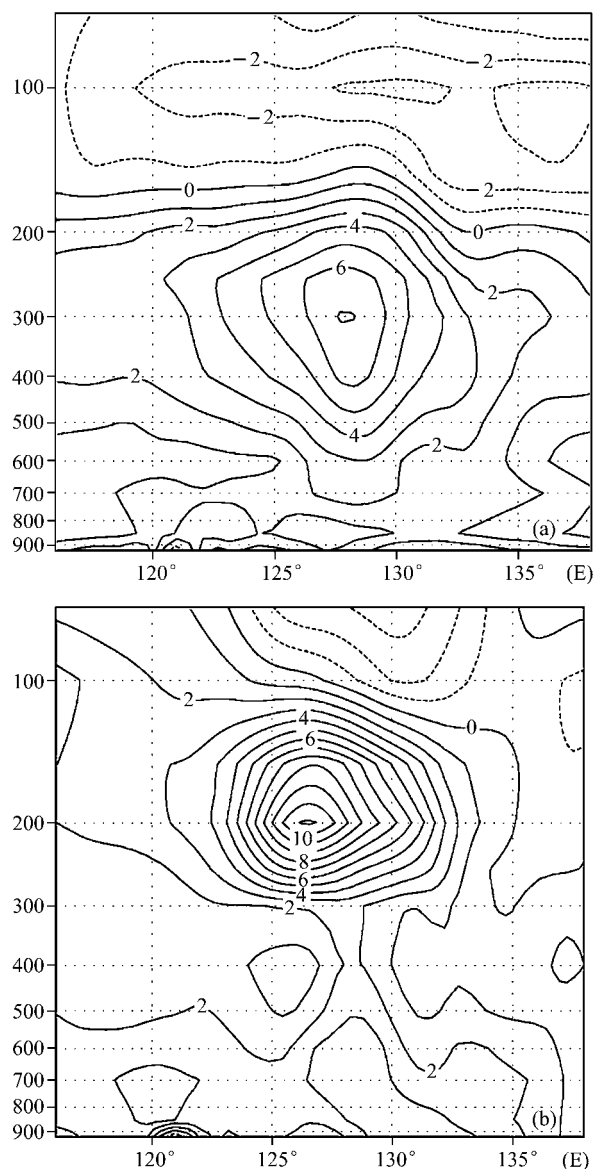


图2 2002年7月2日18UTC威马逊台风沿 $22.5^{\circ}\text{N}$ 的温度距平( $\text{hPa}$ )垂直剖面

(a)为背景场;(b)为加入AMSU微波辐射亮温资料后同化分析结果  
(单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

#### 4 小结

长期以来,由于缺乏足够的观测资料来精确地确定热带气旋结构和邻近环流的特征,阻碍了人们对热带气旋、特别是西北太平洋台风的认识和预报水平的提高.卫星遥感资料特别是受云影响较小的微

波资料的运用有望改善这种状况. 三维变分同化技术具有将不同类型、不同误差特性的资料(如常规探

内收缩, 台风顶部出现强盛的反气旋性环流; 反映出了台风本身所携带的水汽和水汽供应.

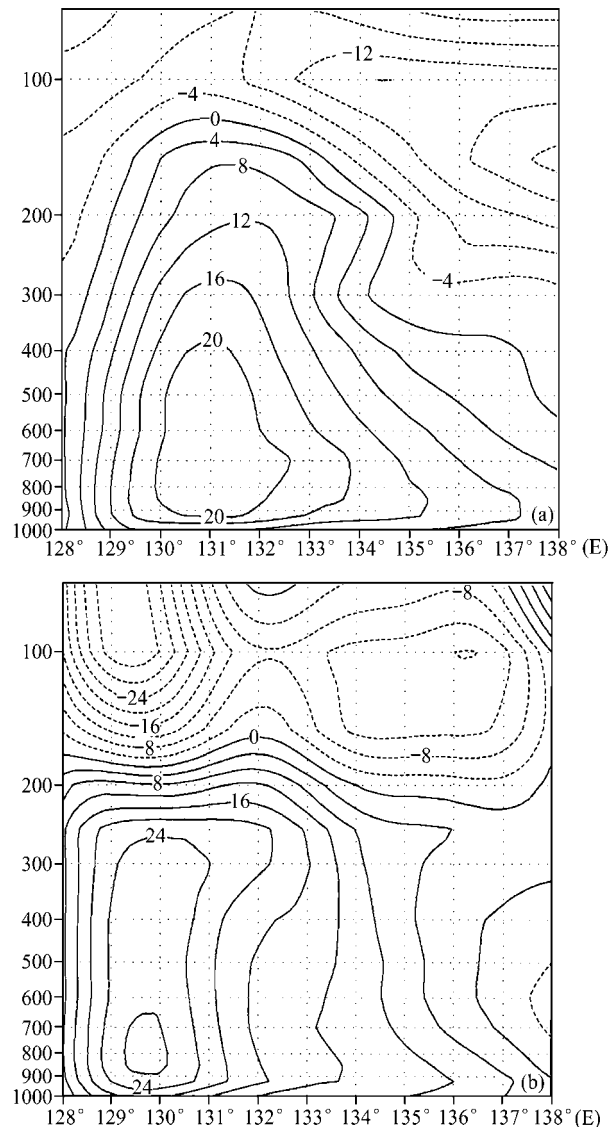


图 3 2002 年 7 月 2 日 18UTC 威马逊台风沿 22.5°N 的柱平均切向风(hPa)垂直剖面  
(a)为背景场; (b)为加入 AMSU 微波辐射亮温资料后同化分析结果  
(单位: m/s)

空观测资料和卫星辐射率观测资料)以及模式输出相互融合的功能, 为我们提供了一种有力的分析手段.

本文以 0205 号台风威马逊为例, 利用 AMSU 微波同化资料对西北太平洋台风成熟期结构特征的分析表明, 加入微波资料能够更加合理地反映台风的主要特征, 增强了与强台风相对应的暖心结构; 台风中下层的气旋性环流明显加大, 强风带中心明显向

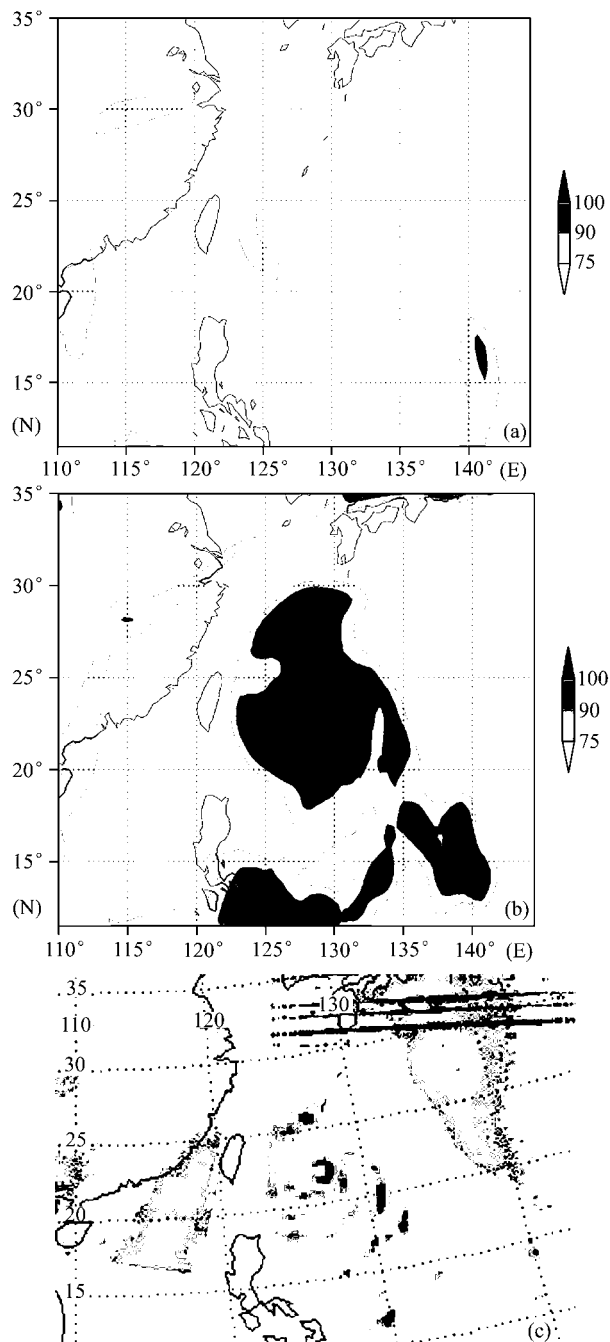


图 4 600 hPa 相对湿度水平分布图  
(a)为背景场 600 hPa 相对湿度; (b)加入 ATOVS 资料的 600 hPa 相当湿度(单位: %); (c) NOAA-16 极轨卫星 AMSU-B 第 4 通道云图; 时间为 2002 年 7 月 2 日 18UTC

应指出, 尽管卫星资料不直接提供有关流场的

信息,但是通过变分同化过程中的动力约束关系得到的流场分析也有参考意义.此外,由于受到资料种类、数量特别是卫星资料分辨率的限制,现有的分析还不能准确描写台风的细致结构,所作的工作还是比较初步的,关于 AMSU 微波同化资料对预报的影响作者也作了初步试验,所得结果将另文介绍.

致谢 薛纪善研究员对本文提出了许多宝贵的建议,吴雪宝副研究员、张凤英研究员和赵刚工程师、万丰高级工程师、陶士伟高级工程师提供了资料,作者表示感谢.本工作受“十五”国家重点科技攻关计划项目(2001BA607B)和国家自然科学基金(批准号:40375009)的资助.

### 参 考 文 献

- 1 Palmén E. On the formation and structure of tropical hurricanes. *Geophysica*, 1948, 3: 26~38
- 2 Koteswaram P. On the structure of hurricanes in the upper troposphere and lower stratosphere. *Mon Wea Rev*, 1967, 95(8): 541~564
- 3 包澄澜. 西南低涡发展成南海台风的全例分析. *气象学报*, 1981, 39(1): 123~127
- 4 Chen L, Luo Z. Some relations between asymmetric structure and motion of typhoons. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 9(4): 412~419
- 5 徐祥德, 陈联寿, 解以扬, 等. 环境大尺度锋面系统与变性台风结构特征及其暴雨的形成. *大气科学*, 1998, 22(5): 744~752
- 6 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论. 北京: 科学出版社, 1979. 420~423
- 7 刘式适, 杨大升. 台风的螺旋结构. *气象学报*, 1980, 38(2): 193~204
- 8 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): 1~8
- 9 Meng Z, Masashi N, Chen Lianshou. 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
- 10 Hughes L A. On the low level structure of tropical typhoons. *J Meteor*, 1952, 9: 442~428
- 11 Jordan E S. An observation study of the upper wind circulation around tropical storm. *J Meteor*, 1952, 9(5): 340~346
- 12 Gray W M. Global view of the origin of tropical disturbances and storm. *Mon Wea Rev*, 1968, 96: 669~770
- 13 Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery. *Mon Wea Rev*, 1975, 103: 420~430
- 14 Kidder S Q, Gray W M, Vonder T H. Estimating tropical cyclone central pressure and outer winds from satellite microwave data. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 1458~1464
- 15 Kidder S Q, Gray W M, Vonder T H. Tropical cyclone outer surface winds derived from satellite microwave data. *Mon Wea Rev*, 1980, 108: 144~152 [\[DOI\]](#)
- 16 Velden C S, Smith W L. Monitoring tropical cyclone evolution with NOAA satellite microwave observations. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22: 714~724 [\[DOI\]](#)
- 17 Velden C S. Observational analysis of North Atlantic tropical cyclones from NOAA polar-orbiting satellite microwave data. *J Appl Meteor*, 1989, 22: 714~724
- 18 Velden C S, Goodman B M, Merrill R T. Western North Pacific tropical cyclone intensity estimation from NOAA polar-orbiting satellite microwave data. *Mon Wea Rev*, 1991, 119: 159~168 [\[DOI\]](#)
- 19 Spencer R W. Global oceanic precipitation from the MSU during 1979-91 and comparisons to other climatologies. *J Climate*, 1993, 6: 1301~1326 [\[DOI\]](#)
- 20 Kidder S Q, Goldberg M D, Zehr R M, et al. Satellite analysis of tropical cyclones using the advanced microwave sounding unit (AMSU). *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81: 1241~1259 [\[DOI\]](#)
- 21 Andersson E, Hollingsworth A, Kelly G, et al. Global observing system experiments on operational statistical retrievals of satellite sounding data. *Mon Wea Rev*, 1991, 119: 1851~1864 [\[DOI\]](#)
- 22 Le Dimet F, Talagrand O. Variational algorithms for analysis and assimilation of meteorological observations. *Tellus*, 1986, 37A: 97~110
- 23 Eyre J R, Lorenc A C. Direct use of satellite sounding radiances in numerical weather prediction. *Meteor Mag*, 1989, 118: 13~16
- 24 Eyre J R, Kelly G A, McNally A P, et al. Assimilation of TOVS radiance information through one-dimensional variational analysis. *Q J Roy Meteor Soc*, 1993, 119: 1427~1463 [\[DOI\]](#)
- 25 Andersson E, Pailleux J, Thepaut J N, et al. Use of cloud-clear radiances in three/four-dimensional variational data assimilation. *Q J Roy Meteorol Soc*, 1994, 120: 627~653 [\[DOI\]](#)
- 26 Rabier F, Jarvinen J, Klinker E, et al. The ECMWF implementation of four-dimensional variational assimilation. . Experimental results with simplified physics. *Q J Roy Meteorol Soc*, 2000, 126: 1143~1170
- 27 Kelly G. Impact of observations on the operational ECMWF system. *Tech. Proc. 9th international TOVS study conference*, Igl, Austria, Feb 1997. 20~26
- 28 English S J, Renshaw R J, Dibben P C, et al. A comparison of the impact of TOVS and ATOVS satellite sounding data on the accuracy of numerical weather forecasts. *Q J Roy Meteor Soc*, 2000, 126: 2911~2931 [\[DOI\]](#)
- 29 Bouttier F, Kelly G. Observing-system experiments in the ECMWF 4D-Var data assimilation system. *Q J Roy Meteorol Soc*, 2001, 127: 1469~1488 [\[DOI\]](#)

(2003-10-30 收稿, 2003-12-01 收修改稿)