

利用 ATOVS 反演产品分析“云娜”台风*

刘 喆¹⁾ 韩志刚²⁾ 赵增亮¹⁾²⁾ 张凤英³⁾ 李万彪¹⁾

¹⁾(北京大学物理学院大气科学系,北京 100871) ²⁾(北京应用气象研究所,北京 100029)

³⁾(国家卫星气象中心,北京 100081)

摘 要

ATOVS 能接收到穿透台风中心密实云区的微波辐射信息,利用 ATOVS 大气参数反演产品分析 0414 号台风“云娜”的热力结构特征。在准静力平衡假设的前提下,根据 ATOVS 对“云娜”台风监测相匹配的 4 个时次数据,分别计算出相应的中心海平面最低气压,同中央气象台利用可见光和红外技术得到的台风报告值相比,平均偏差为 11.8 hPa,它随时间的变化能显示台风强度演变的过程。

关键词:“云娜”台风;卫星微波垂直探测;暖核结构;中心海平面最低气压

引 言

在资料稀少的广阔洋面上,用于监测热带气旋的唯一可行方法就是利用星载仪器。Dvorak^[1]利用极轨卫星云图提出了一种分析预报热带气旋强度的系统性方法,该方法经过改进提高后至今仍在使用。该技术是通过由云模式收集得到的信息(包括曲率、螺旋云带、台风眼、中心密云覆盖)及其在可见光云图中的逐日变化来估测热带气旋的发展阶段。后来,Dvorak^[2]将其发展成为能合并静止气象卫星可见光和红外云图特征的模式识别技术,并实现了自动化和业务化。该技术在全球范围内得到了广泛的应用,但它也存在一定的局限性,例如它难以识别云层下面的热力结构,尤其是在对流云层上空有卷云存在的时候。除此之外,它还不能完全客观地反映事实,最显著的一点就是它会低估那些强度发生迅速变化的热带气旋^[3]。因此,除了业务化广泛使用的 Dvorak 技术以外,还需要设计出一种能用于估测热带气旋强度的客观技术。

与可见光和红外波段一样,利用卫星电磁波段中的微波波段对热带气旋的监测也取得了很大的进展。被动式微波探测器所利用的波段频率很低,对于绝大多数冰晶和水凝物而言,其波长较长,因此,在某一特定波长范围内的上行微波辐射受冰晶云影

响很小,预报人员可以得到热带气旋内部的热力结构而不必考虑是否存在卷云的影响。至今已经搭载上天的卫星扫描式微波有效载荷先后有 Nimbus-5 和 Nimbus-6 的微波扫描光谱仪(SCAMS)、NOAA-6 ~ NOAA-14 的微波垂直探测器(MSU)、NOAA-KLM 的先进微波垂直探测器(AMSU)、EOS/Aqua 的先进 EOS 微波扫描辐射计(AMSR-E)等。目前,AMSU 正在被广泛应用于对热带气旋的监测^[4-6]。Zhu 等^[7]将 AMSU 资料同化到 MM5 模式中去分析热带气旋的强度和云型结构,也取得了较好的效果。

1 利用的资料及其筛选

ATOVS 是指搭载于新一代极轨气象卫星 NOAA-KLM 上的 AMSU-A、AMSU-B 和 HIRS/3 (高分辨率红外探测器 3 型)的总称。地面站接收卫星发送的 HRPT(高分辨率图像传输)资料以后,经过数据的解码、定位、定标和资料预处理后形成 ATOVS-LID 数据集。利用美国威斯康星大学卫星气象合作研究所(CIMSS)开发的 ATOVS 反演软件包(IAPP)^[8],对该数据集进行云检测、反演初始场选择、正演辐射传输计算、通道选择和物理反演之后,最终可得到 ATOVS 大气参数反演产品,包括从 0.1 ~ 1050 hPa 的 42 个气压层的温度和露点温度数据,该反演产品在星下点处的分辨率约为 50 km,在晴

* 国家自然科学基金项目 49794030 和 40105001 共同资助。
2005-09-13 收到,2006-06-21 收到再改稿。

空条件下温度误差可小于 2 K,在有云条件下可小于 2.5 K,湿度误差约为 15%~20%。此外,中央气象台发布的台风报告提供了台风中心位置和强度信息,台风在卫星云图上表现为有组织的涡旋状云系,利用 Dvorak 技术根据云区的形状、云区中的纹线、云带或云线的弯曲曲率、云区中出现眼的特征及眼壁顶部温度可以判断其中心位置及强度大小^[9]。

由于 ATOVS 搭载于极轨气象卫星,它在一天内只能两次经过同一地区,因此,无法对台风活动频繁的中低纬度区域进行连续观测,从而导致台风的中心位置有可能会落到相邻扫描刈幅的间隙中,故必须对 A

TOVS 扫描的时次进行筛选。筛选的标准是台风的中心位于卫星星下点附近(如图 1a“T”所示),以确保台风中心的主体云系在扫描刈幅范围内,而且在卫星星下点附近扫描点分辨率较高,通过反演能得到精度较高的温湿廓线。若台风中心位于扫描刈幅的临边处(如图 1b“T”所示),其反演后产品的空间分辨率甚至会达到 100 km 以上,由于缺乏对台风主体云系的观测信息,只能将临边数据向外插值,这将导致很大的偏差,因此利用这些数据估测台风强度的意义不大。

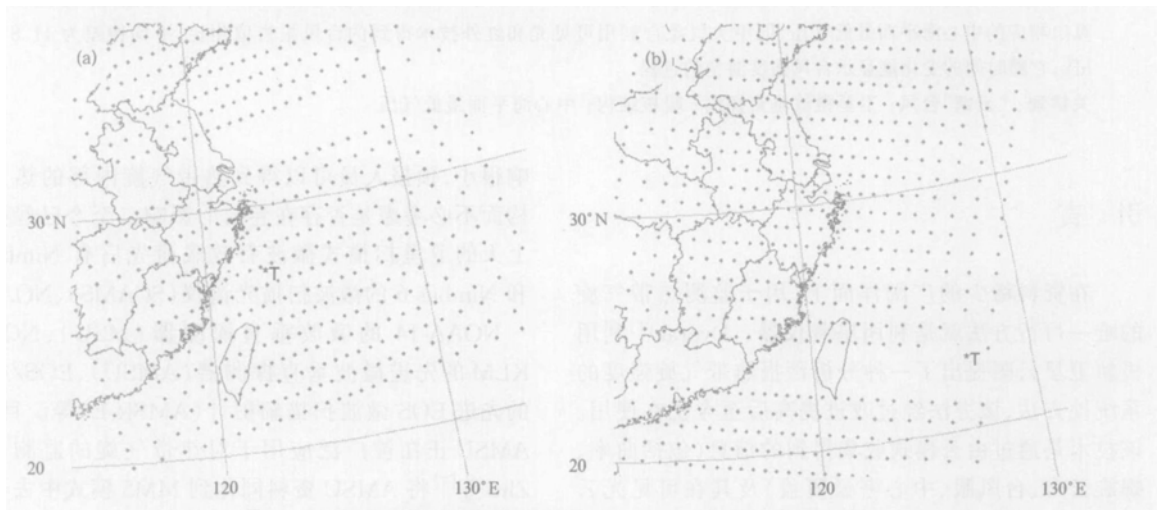


图1 ATOVS 反演产品空间分布图(T 为当时“云娜”台风中心位置)

(a) 数据起始于 2004 年 8 月 12 日 13:46(北京时,下同), (b) 数据起始于 2004 年 8 月 11 日 02:32

2 个例研究

“云娜”于 2004 年 8 月 9 日在关岛西北洋面上生成,在副热带高压南侧偏东气流的引导下,台风一直稳定地朝西北方向移动,强度不断加强,并于 12 日夜间在浙江省温岭登陆,登陆时中心海平面最低气压达到 950 hPa,近中心最大风速超过 45 m/s,登陆后台风强度不断减弱,13 日进入江西境内后消亡。

2.1 热力结构特征分析

该时次所使用的反演产品数据起始于 2004 年 8 月 12 日 13:46,由于在该时段“云娜”台风没有明显的强度变化,因此可以根据台风报告对“云娜”相邻的两次定位,插值出当时台风的中心位置及强度。此时台风中心位置靠近轨道刈幅中心(如图 1a 所示),相邻扫描点分辨率约为 60 km。相邻时次的 GOES-9 红外云图如彩图 2a 所示。从图中可以看出:成熟期

的“云娜”台风发展成为很圆的密蔽云区,台风眼结构清晰,表现为一个黑圆点;在眼区周围有明亮的白色圆环围绕,这是由高大的强对流云团组成的云墙;在密蔽云区周围可以看出有多条完整的螺旋云带,它们为台风的发展不断输入暖湿水汽;在云区的边缘有许多弯曲的卷云纹线,表明高空有很强的反气旋辐散气流,这种强烈的低层辐合流入和高层辐散流出,将有利于台风的进一步发展增强。彩图 2b 是同时次 AMSU-B 的 150 GHz 窗区通道亮温图,从中可以清楚的看出台风的螺旋雨带和中心眼区,而在相应的红外云图(彩图 2a)上则是一片密云覆盖区,这是因为特定波段的微波能穿透覆盖在台风眼区上空的卷云,继而得到台风内部的结构信息,而且眼壁附近的强降水区域对于该窗区通道而言是不透明的,使得云墙和台风眼之间有较大的亮温反差,这将有助于对台风眼区的精确定位。从该图中还可以看出有一股弱的干冷空气从东北部卷入台风环流的外

围,它伴随着东北信风的增强过程,促进了低层热带扰动的辐合作用,有助于增强台风的斜压不稳定性,预示着台风将进一步发展。

彩图 3a 为沿台风中心纬向方向得到的温度距平垂直剖面图,它由台风主体云系在各层格点的温度减去最外围格点的平均温度得到。从图中可以看出:台风暖核位于 200 ~ 250 hPa 之间,最大温度距平位于 200 hPa 附近,强度达到 7 K 以上,该暖核向下延伸到 600 hPa 附近,暖核结构较均匀对称;在 600 hPa 层以下出现了较为明显的负温度距平,其产生原因在于:螺旋雨带主要由对流云团组成,强劲的上升气流携带有大量暖湿空气,眼壁附近对流云发展十分旺盛,当它产生的降水强度达到 10 mm/h 时,大的降水粒子会将大气低层向上的微波辐射后向散射掉^[10],使 AMSU 接收到的辐射值偏小,并最终导致由物理反演方法得到的低层温度值出现异常偏低。因此,这种负温度距平能提供关于降水区域及强度的信息,负距平的大小间接反映出降水的强弱。该时次台风中心东南侧的降水较其西侧要大得多,这是因为当时台风是朝西北方向移动,强劲的气旋式涡旋将中心南侧的暖洋高湿水汽携带上升,因此相对于中心西侧而言,其东侧的对流更加旺盛,产生的降水也更强。这同彩图 2b 所示的结果一致。彩图 3b 是沿台风中心经向方向得到的温度距平垂直剖面图,同样也能解释中心区南侧降水量更大的原因。

彩图 4 是台风暖核在对流层中上层的温度截面图,可以看出:在 200 hPa 和 250 hPa 层上暖核清晰,其周围温度结构紧密,温度距平也更大,而在较低的 350 hPa 层上暖核中心不够突出,温度结构较为松散。

2.2 台风中心海平面最低气压

热带气旋是暖心性结构,其水平气压梯度必然随高度逐渐减小,当上升气流到达一定高度以后,维持其梯度平衡的惯性离心力和地转偏向力的合力就将大于该气压梯度力,空气向四周辐散流出。Spencer 等^[11]认为在平流层 50 hPa 以上气压层不受气旋环流的影响。在本文中,将 50 hPa 作为不受影响层,在气旋尺度范围内,该气压层的高度和气旋半径保持恒定。由于台风中心附近海平面气压低于 1000 hPa,本文主要利用 920 ~ 50 hPa 这 23 个气压层的温湿廓线产品,NCEP/NCAR 不超过 6 h 的全球预报模式再分析资料作为初始场来反演中心海平面最低气压。

台风在发展过程中,输入层挟卷大量暖湿空气上升,使得对流层中低层的水汽含量非常充沛,因此必须考虑水汽对湿空气状态方程和流体静力学方程计算的影响。根据 Tetens 经验公式可以由露点温度计算出水面的实际水汽压,继而得到各扫描点的比湿,再根据虚温的表达式就可以得到各扫描点的虚温值。本文对 500 hPa 以下气压层考虑水汽的影响,对其温度进行虚温处理。

首先将各气压层的温度数据内插到以台风中心为初始位置的径向格点上,于是各格点的温度值就可以表示为台风半径和气压的函数。因台风在星下点附近扫描分辨率达到 50 km,而越到边界其分辨率越粗糙,故需要对温度数据作平滑处理。由相近时次的红外云图估测出当时“云娜”台风的中心云区范围约为 $12^\circ \times 12^\circ$,因此选定平滑区域范围的最大半径(距离)为 600 km,网格点间隔为 25 km。利用高斯权重函数的扫描分析可以实现该平滑过程^[12]。若以台风中心为原点,则其径向方向上网格点 r_i 处的温度 T_i 可以表示为:

$$T_i = \frac{\sum W_k T'_k}{\sum W_k} \quad (1)$$

$$W_k = \exp[-(r_i - r_k)^2 / r_e^2] \quad (2)$$

式(1),(2)中, W_k 为各扫描点到台风中心的权重, r_i 为平滑后网格点的间隔, r_k 为相应气压层各扫描点到台风中心的距离, r_e 决定了内插区域的光滑程度,通常取为 30 km^[4], T'_k 是各扫描点的温度值。对该层数据进行平滑处理后,就可以得到以台风中心区为中心,间隔为 25 km,半径为 600 km 的各网格点的平滑温度值。

由 NCEP/NCAR 再分析资料得到台风在外围网格点上的洋面温度和气压,以此作为流体静力学方程的下边界条件向上积分得到各气压层在该格点上的位势高度,在积分过程中假设各气压层之间的温度随高度呈线性变化关系,其表达式为:

$$H_2 = H_1 + \frac{R_d \bar{T}}{g} \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3)$$

式(3)中, p_1 , p_2 和 H_1 , H_2 分别为相邻气压层的气压值和位势高度, \bar{T} 为气压层之间的平均温度。利用式(3)最终可得到外围格点在 50 hPa 气压层的位势高度。将 50 hPa 气压层的位势高度和中心格点在各气压层处的温度代入到流体静力学方程,向下积分得到 920 hPa 层位势高度,再根据该层温度及

由 NCEP/NCAR 再分析资料得到的洋面温度,就可以计算出台风中心海平面最低气压值。其表达式为:

$$\ln p_s = \ln p_{920} + \frac{g}{R_d T} H_{920} \quad (4)$$

式(4)中, p_s 为台风中心海平面最低气压, \bar{T} 为 920 hPa 气压层和洋面间的平均温度。该时次台风中心海平面最低气压值为 963.1 hPa。

由于地面站接收的资料范围有限,通过对数据的筛选后,仅能得到对“云娜”台风监测较为理想的 4 个时次数据,据此分别计算出了台风中心海平面最低气压和对流层中上层暖核的最大温度距平。由于近年来没有对西北太平洋的台风进行飞机探测,只能与中央气象台利用 Dvorak 业务化技术得到的强度报告值进行比较。由图 5 可以看出:反演出的台风中心海平面最低气压能近似反映出台风强度的变化情况,但 4 个时次气压值都略偏高,平均偏差为 11.8 hPa;相对应的对流层中高层最大温度距平的变化同台风中心海平面最低气压的变化趋势大体一致,这是因为热带气旋在对流层上层的暖核是造成其台风中心气压降低的主要原因,因此它们之间存在一定的相关性。

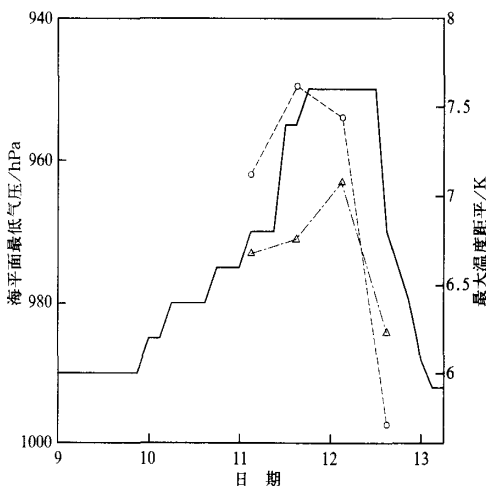


图5 2004年8月“云娜”台风中心海平面最低气压及暖核最大温度距平随时间变化的比较

(实线表示台风报告的最低海平面气压值,○表示最大温度距平,△表示 ATOVS 反演最低海平面气压值)

3 结论与讨论

1) ATOVS 能接收到穿透台风高层云系的微波辐射信息,从而更好地反映出台风的暖核性质,结合

成像频率更高的红外云图,有助于加深人们对台风云系特征和热力结构特征的理解。

2) 利用 AMSU-B 窗区通道亮温图可以判断台风强降雨区域的分布,有助于对台风眼区的精确定位。

3) 利用 ATOVS 数据估测台风强度主要基于辐射传输方程和流体静力学方程,相对于业务上广泛使用的 Dvorak 技术而言,该方法更加客观真实。通过对“云娜”台风的分析表明:利用这两种方法得到的强度值变化趋势一致,而且平均偏差较小。

利用 ATOVS 分析台风也存在着一些不足之处:ATOVS 搭载于极轨气象卫星上,无法对发生在中低纬度地区的台风进行连续监测;ATOVS 反演产品在星下点附近的分辨率同台风眼区尺度相当,随着扫描角度的增大,其分辨率更加粗糙;由于眼壁附近强降水会对上行的微波辐射产生较强的衰减,使得由物理方法反演出的低层温湿廓线出现一定偏差,这将影响最后的强度估测值,如何消除强降水的衰减影响有待于进一步深入研究。

参考文献

- [1] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery. *Mon Wea Rev*, 1975, 103: 420-430.
- [2] Dvorak V F. Tropical Cyclone Intensity Analysis Using Satellite Data. NOAA Tech Rep NESDIS. Washington: National Environmental Satellite Data Information Service, 1984.
- [3] De muth J L. Evaluation of Advanced Microwave Sounding Unit tropical cyclone intensity and size estimation algorithms. *J Appl Meteor*, 2004, 43: 282-296.
- [4] 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: 1241-1260.
- [5] Brueske K F, Velden C S. Satellite-based tropical cyclone intensity estimation using the NOAA KLM series Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU). *Mon Wea Rev*, 2003, 131: 687-697.
- [6] 王瑾, 江吉喜. AMSU 资料揭示的不同强度热带气旋热力结构特征. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 159-169.
- [7] Zhu Tong, Zhang Dalin, Weng Fuzhong. Impact of the Advanced Microwave Sounding Unit measurement on hurricane prediction. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 2416-2432.
- [8] Li Jun, Wolf Thomas H. Global sounding of the atmosphere from ATOVS measurements: the algorithm and validation. *J Appl Meteor*, 2000, 39: 1248-1268.
- [9] 董超华. 气象卫星业务产品释用手册. 北京: 气象出版社, 1999: 67-81.
- [10] 张培昌, 王振会. 大气微波遥感基础. 北京: 气象出版社,

1995: 304-345.

speeds. *Mon Wea Rev*, 2001, 129: 1518-1532.

[11] Spencer R W, Braswell W D. Atlantic tropical cyclone monitoring with AMSU-A: estimation of maximum sustained wind

[12] Barnes S. A technique for maximizing details in numerical weather map analysis. *J Appl Meteor*, 1964, 3: 396-409.

Analysis on Typhoon Rananim Using Products Retrieved from ATOVS

Liu Zhe¹⁾ Han Zhigang²⁾ Zhao Zengliang¹⁾ Zhang Fengying³⁾ Li Wanbiao¹⁾

¹⁾ (Department of Atmospheric Science, School of Physics, Peking University, Beijing 100871)

²⁾ (Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029)

³⁾ (National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

Nowadays, the most widely used tropical cyclone estimation and position analysis techniques employed by operational forecasters are to analyze the infrared and visible satellite imagery. While these products provide invaluable information about the overall structure and strength of tropical cyclones, they often can't penetrate clouds to ascertain low-level storm structures. Relatively, certain wavelengths of microwave energy are able to penetrate ice clouds (such as the cirrus above the storm). Therefore, it offers a unique perspective into tropical cyclone structures. Advanced TIROS Operational Vertical Sounding (ATOVS) is composed of the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) and the High-resolution Infrared Radiation Sounder (HIRS/3), which are aboard the NOAA-16-18 satellites. With the International ATOVS Processing Package (IAPP) by Cooperative Institute of Meteorological Satellite Studies (CIMSS) of the University of Wisconsin (UW), the ATOVS data can be finally translated into the retrieval products including the atmospheric temperature profile, moisture profile in both clear and cloudy atmospheres. The domain of typhoon center cloud field is determined according to the coincident infrared image, and then the temperature anomalies are calculated by subtracting the average temperature of outer radius from the temperature at each grid in the domain. By analyzing the cross-section of temperature anomalies, the warm-core of typhoon Rananim can be seen in the upper-troposphere clearly as well as the distribution of strong precipitation in the lower altitude due to its contamination to the upper microwave radiation. But the area range of ATOVS data received by National Satellite Meteorological Center (NSMC) is not wide enough, which can only receive the data of part of the Western North Pacific besides the mainland. By analyzing the area range of ATOVS retrieval data mapped with the tracks of Rananim from National Meteorological Center (NMC), four ideal sets of ATOVS retrieval data are received. Under hydrostatic assumption, using the nearest NCEP/NCAR reanalyzed data as initial parameter and four sets of ATOVS data mapped with Rananim, the minimum sea level pressure (MSLP) is calculated respectively and compared with the typhoon warning report of NMC estimated from the visible and infrared method, the mean discrepancy of MSLP is found to be 11.8 hPa, showing similar time-variant tendency of Rananim as described by NMC. Therefore, by using ATOVS retrieval products, the thermal structure under the Center Dense Overcast of typhoon Rananim is better displayed; what's more, the relatively accurate intensity of typhoon is obtained when compared with the result of the operational departments.

Key words: typhoon Rananim; satellite microwave sounding; warm-core structure; minimum sea level pressure

刘喆等：利用ATOVS反演产品分析“云娜”台风

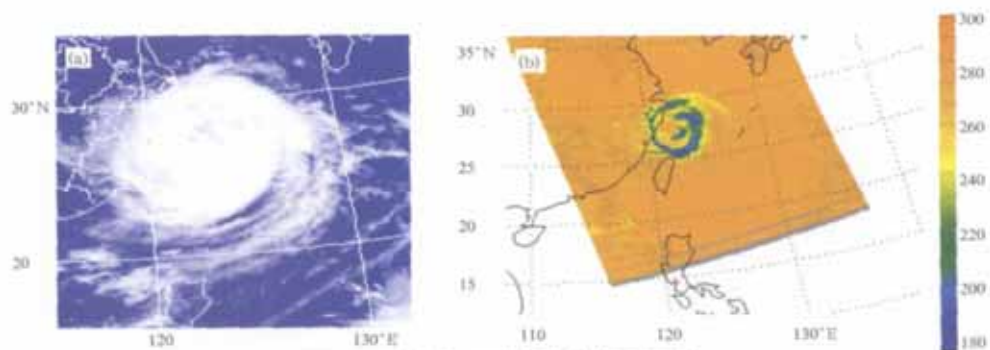


图2 2004年8月12日相邻时次的卫星云图

(a) 14:01 GOES 9红外云图, (b) 13:46 AMSU B 150 GHz亮温图(单位: K)

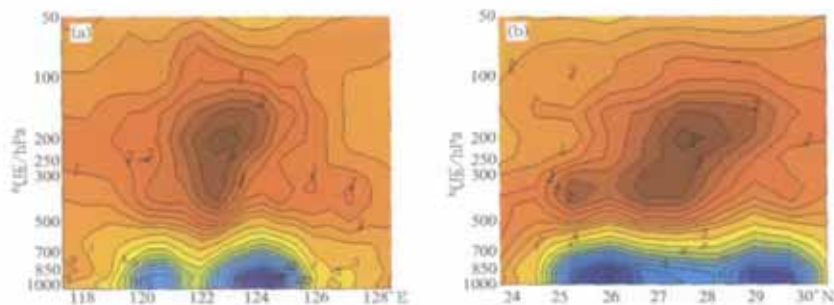


图3 2004年8月12日13:46沿台风中心得到的温度距平垂直剖面图(单位: K)

(a) 沿中心纬向方向, (b) 沿中心经向方向

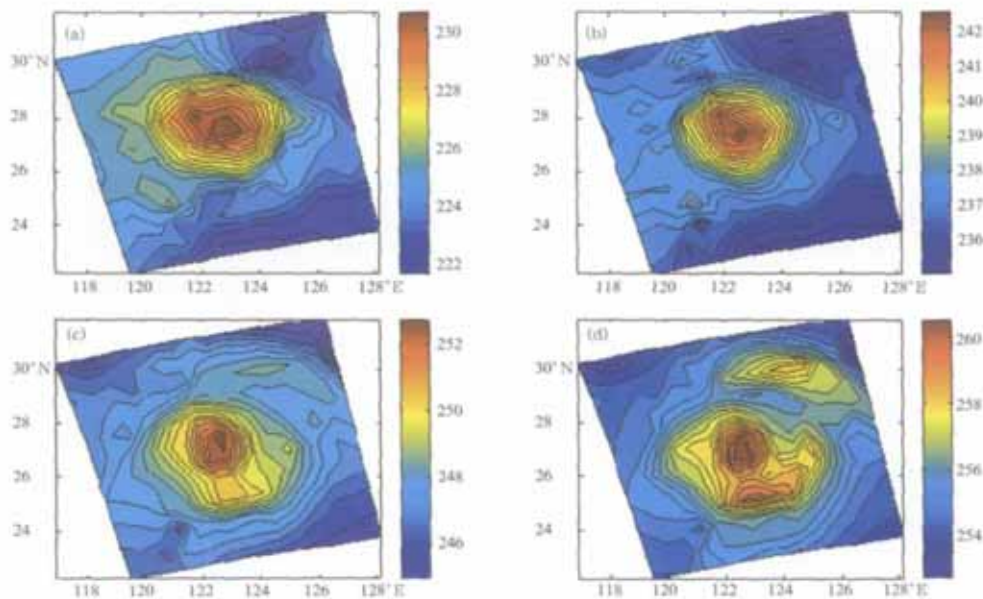


图4 2004年8月12日13:46台风暖核在对流层中上层的温度截面图(单位: K)

(a) 200 hPa, (b) 250 hPa, (c) 300 hPa, (d) 350 hPa