

# 应用 AMSU-B 微波资料分析 0509 号 Matsa 台风水汽场分布特征

王 新<sup>1</sup> 方 翔<sup>1,2</sup> 邱 红<sup>1</sup> 朱元竞<sup>2</sup>

(1. 国家卫星气象中心,北京 100081; 2. 北京大学物理学院大气科学系)

**提 要:** 热带气旋的形成、发展、移动以及消亡与大范围水汽输送和集中息息相关。此研究以 2006 年 7—8 月的 AMSU-B 的  $183.3 \pm 1$ 、 $183.3 \pm 3$ 、 $183.3 \pm 7$  GHz 三个水汽通道亮温为主要资料来源,利用三个通道所在的权重高度差异,分别建立了对流层高、中、低层水汽量与三个通道亮温的  $e$  指数统计回归关系。在此基础上,选取西北太平洋 2005 年 09 号麦莎台风,利用 AMSU-B 亮温通过回归关系式计算出的高、中、低层水汽量,就其水汽输送与强度变化关系进行了分析。结果表明,其一,微波水汽通道亮温能够很好地表征热带气旋环境场不同高度的水汽分布和水汽输送,尤其是对流层中层亮温的变化显示出的水汽量的变化与热带气旋强度密切相关;其二,热带气旋发展过程中,除了西南季风形成的西南水汽通道是水汽维持的重要输送带外,东南水汽通道也经常成为登陆热带气旋强度维持的主要水汽供给。

**关键词:** 热带气旋 AMSU-B 微波亮温 水汽输送

## Analysis of Environmental Water Vapor Transportation Around Typhoon Matsa (0509) From AMSU-B Radiances

Wang Xin<sup>1</sup> Fang Xiang<sup>1,2</sup> Qiu Hong<sup>1</sup> Zhu Yuanjing<sup>2</sup>

(1. National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081;

2. Department of Atmospheric Sciences, School of Physics, Peking University)

**Abstract:** Large-scale environmental vapor flux plays a very important role in the genesis, development and dissipation of tropical cyclones. A regression method is developed to get the relationship between radiances measured by the Advanced Microwave Sounding Unit (AMSU) and water vapor fluxes. The method uses the brightness temperatures at three channels 18, 19 and 20 of AMSU-B, which are centered around the 183.3GHz water vapor line, and

资助课题: 国家高科技研究发展计划资助项目(No. 500122)、国家重点基础研究发展规划项目(No. 500103006)

收稿日期: 2008 年 10 月 22 日; 修定稿日期: 2009 年 8 月 8 日

the water vapor flux is derived from the calculation of stream function. With the regression, it is found that the brightness temperatures at the corresponding channel  $183.3 \pm 7\text{GHz}$ ,  $183.3 \pm 3\text{GHz}$  and  $183.3 \pm 1\text{GHz}$  decrease exponentially with water vapor flux on the upper, middle and lower troposphere, respectively. Then, Typhoon Matsa (0509) is illustrated to analyze the distribution and evolution of the surrounding water vapor. By this exponential algorithm, there are great water vapor transportations as indicated by the water vapor channel brightness temperatures. And it shows the importance of the environmental water vapor in the development of tropical cyclones. Additionally, the incoming vapor collected around the cyclone is mainly from southwestern transportation, but the water vapor from other routes could not be ignored, especially the eastern and the southeastern.

**Key Words:** tropical cyclone AMSU-B brightness temperature vapor transportation

## 引 言

登陆热带气旋(TC)是我国的主要气象灾害之一,台风登陆前突然加强,以及登陆后的长时间维持,造成了更大的气象灾害,也给天气预报的准确性提出了更高的要求。

在热带气旋发展过程中,水汽输送起到非常重要的作用,从海气相互作用的角度来看,海洋通过水汽蒸发将热通量输送到大气中;从热带气旋强度变化方面来说,热带气旋系统中上升运动将低层水汽向上输送,凝结释放的潜热,提供热带气旋维持和发展的能量,水汽输送通过影响气旋暖心强度,间接影响着热带气旋的强弱;另外,从热带气旋的生命史和降水方面考虑,水汽输送带的持续维持也是热带气旋登陆后造成降水时间长短和降水量多少的主要影响因素。众多研究均表明,台风强度的发展变化与环境场水汽输送、中尺度系统活动等都有着非常密切的关系<sup>[1]</sup>。

在利用卫星遥感技术获得大气中水汽分布的众多研究中,通过红外分裂窗通道对水汽吸收的探测差异而反演大气可降水量方法,以及利用近红外附近水汽通道( $0.9\mu\text{m}$ )反演水汽总量的方法,水汽信号都容易受到地表及大气参数的影响。而微波辐射具有穿透云的独

特性,遥感大气水汽和云中液态水成为微波探测技术最主要的应用之一。大气垂直探测器 AMSU-A 的  $23.8$  和  $31.4\text{GHz}$  通道亮温对大气水汽和云水变化敏感,可以利用 VDIS-ORT 模式模拟这两个通道观测,建立亮温与大气水汽总量反演算法,其反演的水汽含量的范围在  $20\sim 75\text{mm}$ <sup>[2]</sup>,与 Grody 等利用云模式的模拟结果(可降水的范围为  $0\sim 70\text{mm}$ )相近<sup>[3]</sup>。搭载在 NOAA-KLM 系列极轨卫星上的微波探测器 AMSU-B,星下点空间分辨率  $16\text{km}$ ,其  $183.31 \pm 1$ ,  $183.31 \pm 3$ ,  $183.31 \pm 7\text{GHz}$  通道依次位于强水汽吸收线的中心到边缘位置,探测权重高度随频率逐渐靠近吸收线中心而逐渐升高,可以用于反演大气水汽的垂直分布<sup>[4]</sup>。

因此在本文中,利用 AMSU-B 的  $183.3 \pm 1$ ,  $183.3 \pm 3$ ,  $183.3 \pm 7\text{GHz}$  三个水汽通道对水汽可降水量的敏感性,以及三个通道所在的权重高度差异,分别建立了对流层高、中、低层水汽量与三个通道亮温的统计回归关系。在此基础上,选取西北太平洋 2005 年 09 号麦莎台风个例,分析台风发展过程中,高、中、低水汽输送与气旋强度变化之间的关系。该工作将 AMSU-B 探测性质与热带气旋水汽场紧密结合,具有在台风实际监测业务工作中得以应用的前景。

## 1 数据和方法

### 1.1 NOAA 卫星 AMSU-B 仪器特性

先进的微波探测器 (AMSU) 是搭载在新一代 NOAA 极轨气象卫星上的仪器, 第一台 AMSU 仪器于 1998 年 5 月 13 日随 NOAA-15 卫星发射升空。AMSU 包括两部分:

AMSU-A 主要用于探测大气温度分布; AMSU-B 有 5 个通道, 其各光谱特征见表 1, 其中 89 和 150GHz 通道位于大气窗区, AMSU-B 的 183.3GHz 附近的三个水汽通道, 通常用来反演大气湿度垂直廓线, 且根据其权重函数分布, 三个通道分别代表了 850hPa 附近、600hPa 附近和 400hPa 附近高度的大气湿度状况。

表 1 AMSU-B 各通道光谱特征

通道序号	中心频率/GHz	主要吸收成分	主要探测目的	权重函数峰值高度	等效噪声温度 <sup>+</sup> /K	极化特性 <sup>*</sup>
1	89.0	H <sub>2</sub> O	地表特征、可降水等	地表		V
2	150.0	H <sub>2</sub> O	地表特征、可降水等	地表	0.68	V
3	183.31±1.0	H <sub>2</sub> O	大气水汽	400hPa	0.57	
4	183.31±3.0	H <sub>2</sub> O	大气水汽	600hPa	0.35	
5	183.31±7.0	H <sub>2</sub> O	大气水汽	850hPa	0.30	V

+: 等效噪声温度是观测值; \*: 星下点垂直观测时的极化状态, V 代表垂直极化, H 代表水平极化, 参照水平状态; 对于扫描角  $\varphi$ , V 的极化角为  $90-\varphi$ , H 为  $\varphi$

### 1.2 研究区域

首先, 本文选取的环境场水汽输送与亮温的反演研究目标区域位于 ( $7^{\circ}\sim 18^{\circ}\text{N}$ ,  $109^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$ ) 地区 (图 1a), 对于该区域的选取, 主要考虑了以下几个方面的因素: 一方面该区域主要位于海面, 下垫面较均匀便于 AMSU 资料的使用, 另一方面该区域也是较主要的水汽西南通道的一部分, 水汽充足水汽量变化较大, 方便我们研究。本文的研究工作中使用的 AMSU-B 微波资料以及回归关

系建立都是针对这个目标区域进行的。

其次, 我们需要剔除强对流区。在前面的 AMSU-B 通道特性的介绍中我们已经提到, AMSU-B 主要是用于大气湿度以及降水信息的反演, 其中的两个窗区通道 (89GHz 与 150GHz) 对云中的雨滴粒子非常敏感, 通道的亮温值随雨滴的增多而降低。在降温幅度上 150GHz (通道 2) 要高于 89GHz (通道 1)。基于这个原理, 本文中的强降水区判据是根据魏应值等<sup>[5]</sup>对于台风螺旋雨带降水区的判据: AMSU-B 的 150GHz 亮温值  $\leq 220\text{K}$

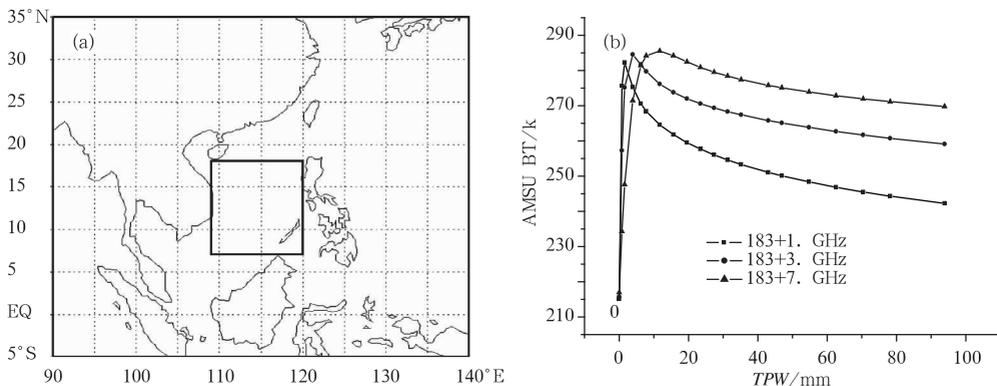


图 1 水汽输送研究选取范围(a)和 AMSU-B 183GHz 通道亮温 (BT) 随大气可降水 (TPW) 的变化 (b)<sup>[2]</sup>

时,台风螺旋雨带产生强降水的几率大于 85%,当达到 190K 时台风对流云区与地面强降水区相对应,190K 可以作为强降水预报指标。按照此判据选取了海面非强降水区域的点进行下面的回归计算。

### 3 建立微波通道亮温与水汽量统计回归关系

根据邱红<sup>[2]</sup>采用 VDISORT 辐射传输计算模式,模拟 AMSU-B 的 183.3GHz 水汽吸收线附近三个通道亮温对大气总的可降水量观测的微波辐射变化(如图 1b 所示)。结果发现随着水汽含量的增加,亮温逐渐降低,这是因为这三个通道的频率位于吸收线中心向边缘过渡,地表辐射不能到达大气顶,水汽增加导致探测权重高度升高,亮温降低。

进一步,为了确定微波通道亮温与各层水汽量的对应关系,我们从水汽密度随高度的增加呈指数衰减入手推导。

首先环境场水汽密度随着高度呈 e 指数递减:

$$\rho_{H_2O}(Z) = \rho_0 \exp\left\{-\frac{Z}{H}\right\} \quad (1)$$

通过式(1)我们可以得到由某一高度到大气层顶的总的积分水汽含量为式(2):

$$\begin{aligned} WV(Z^*) &= \int_{Z^*}^{\infty} \rho_{H_2O}(Z) dZ \\ &= \rho_0 H \exp\left\{-\frac{Z^*}{H}\right\} \end{aligned} \quad (2)$$

$Z^*$  是某指定高度。因此,水汽密度可以用式(3)表示:

$$\rho_{H_2O} = \frac{1}{FH} \exp\left\{\frac{1}{\beta H}(T_B - T_0)\right\} \quad (3)$$

其中  $\beta$  为温度垂直递减率常数,  $T(Z) = \beta Z + T_0$ ,  $F$  是权重函数关系式中的通道常数。

将式(3)代入式(2)得到式(4):

$$\begin{aligned} UTWV &= WV(T_B, \beta, T_0; Z^*) \\ &= \frac{1}{F} \exp\left\{-\left(\frac{Z^*}{H} + \frac{T_0}{\beta H}\right)\right\} \exp\left\{\frac{T_B}{\beta H}\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

如果我们设  $T_B$  为 500hPa 的亮度温度,那么式(4)即为对流层中上层的水汽总量<sup>[6]</sup>,因此建立通道亮温与水汽含量之间存在 e 指数对应关系,如下:

$$\begin{aligned} VP &= \exp[(T_B - a)/b] \\ \text{或} \quad T_B &= b \times \ln(VP) + a \end{aligned} \quad (5)$$

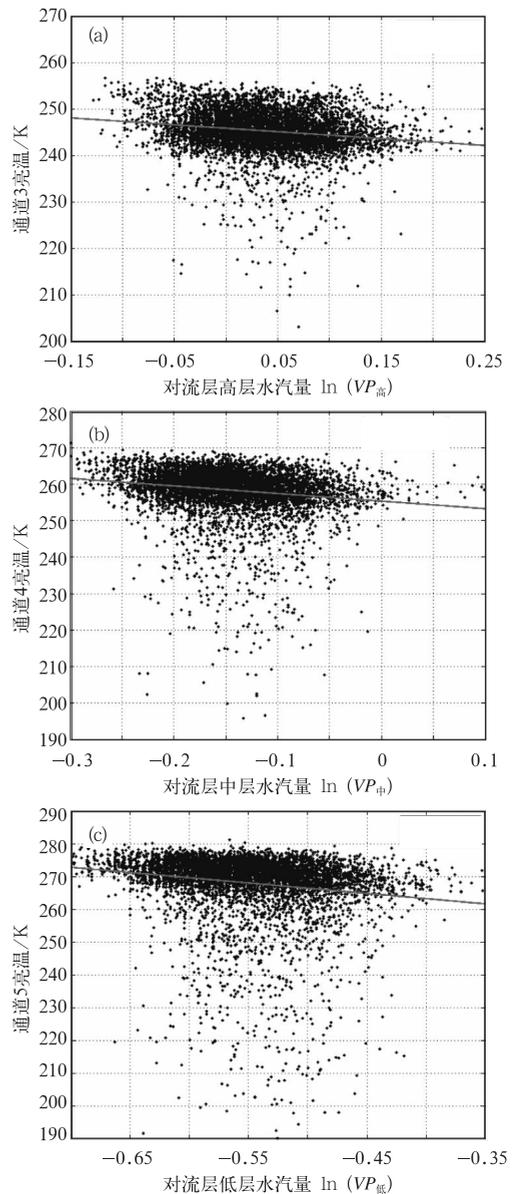


图 2 通道 3(a)、4(b)、5(c)亮温分别与对流层高、中、低层水汽量回归关系 (图中·代表各通道亮温与水汽量散点分布,一代表拟合回归线)

本文我们利用 2006 年 7—8 月两个月每日两次(上午轨和下午轨)的 NOAA-16/17 的 AMSU-B 的轨道拼接亮温数据,并根据水汽通量的物理意义,利用匹配响应时次(06 时和 18 时)的 NCEP 再分析风场资料计算水汽输送与水汽收支(世界时的 06 时和 18 时)。在上述 AMSU-B 微波水汽三通道对对流层大气不同高度层水汽的敏感性分析基础上,采用 Levenberg-Marquardt(麦夸特法)非线性最小二乘法<sup>[7]</sup>,分别计算 AMSU-B 的  $183.3 \pm 1$ 、 $183.3 \pm 3$ 、 $183.3 \pm 7$  亮温与对流层高、中、低层水汽量的  $e$  指数统计回归关系式系数,各通道亮温与水汽量的对应拟合关系如图 2 所示。

根据回归关系得出拟合的公式系数,得到其回归关系式为式(6)、(7)和(8),且各估计值的逼近标准误差和 95%置信区间的下限和高限(见表 2)。

表 2 通道 3、4、5 分别与对流层高、中、低层水汽量拟合参数估计值

	拟合参数	参数估计值	误差平方和	参数 95%置信区间	
				低限	高限
通道 3 与高层	$a$	245.9	1.297e	245.7	246
	$b$	-14.82	+005	-16.79	-12.84
通道 4 与中层	$a$	255.3	2.953e	254.8	255.8
	$b$	-21.8	+005	-23.82	-17.86
通道 5 与低层	$a$	250.4	7.596e	247.8	253.1
	$b$	-31.9	+005	-36.68	-27.12

$$VP_{\text{高层}} = \exp((245.9 - T_{B3})/14.82)$$

$$\text{或 } T_{B3} = -14.82 \times \ln(VP_{\text{高层}}) + 245.9 \quad (6)$$

$$VP_{\text{中层}} = \exp((255.3 - T_{B4})/20.84)$$

$$\text{或 } T_{B4} = -20.84 \times \ln(VP_{\text{中层}}) + 255.3 \quad (7)$$

$$VP_{\text{低层}} = \exp((250.4 - T_{B5})/31.9)$$

$$\text{或 } T_{B5} = -31.9 \times \ln(VP_{\text{低层}}) + 250.4 \quad (8)$$

### 3 0509 号超强台风麦莎环境场水汽分析

#### 3.1 天气过程简介

2005 年第 9 号台风麦莎,作为一个在我国华东地区登陆北上,并在陆地上经过长距

离行进,进而影响我国华东、华北甚至东北地区的一个超强台风系统而受到广泛关注。“麦莎”也是一个非常典型的变性(最终演变为温带气旋)的台风个例。

结合其移动路径图(图 3)，“麦莎”于 7 月 31 日 12 时(世界时)在太平洋上生成,之后朝西北方向移动,8 月 2 日加强为台风,8 月 5 日 19:40 在浙江玉环县登陆。登陆时中心气压 950hPa,近中心最大风速  $45 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。登陆后其强度迅速减弱,但并未像多数台风那样减弱消失,而是继续朝西北方向移动,7 日 8 时后向东北偏北方向移动,先后穿越浙江、安徽、江苏,到达山东半岛及渤海附近时,由于台风中心偏西侧出现系统性冷空气倾斜向下补充,斜压能量的释放使得“麦莎”强度有明显增强<sup>[8]</sup>,且仍然保持着热带气旋暖心的特点。可以看出,“麦莎”登陆时强度强,陆上路径长,影响范围广。

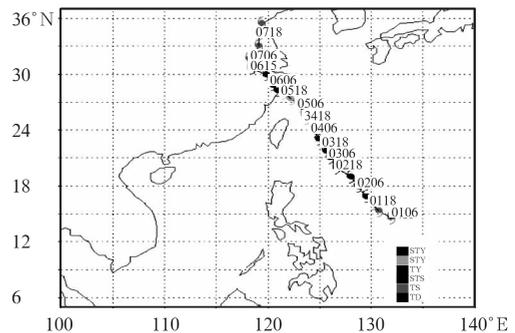


图 3 0509 号台风麦莎路径图

(2005 年 8 月 1 日 06 时至 8 月 7 日 18 时)

#### 3.2 AMSU-B 微波亮温水汽输送分析

利用我们建立各通道亮温与对流层高、中、低层水汽量的对应关系,并配合 NCEP 再分析资料水平风场,对台风麦莎发展移动过程中的大范围环境场水汽输送进行分析。另外,为了水汽收支辅助分析,选取台风移动中心为中心的约 1000km 的正方形区域,分析台风发展过程中东西南北四个边界水汽收支情况。

图 4(见彩页)所示为 2005 年 8 月 2—6

日的西北太平洋地区大范围水汽场的低、中、高层分布图,8月2日,强降水地区分布在台风中心南部,在对流层低层和高层都有很清晰的显示,同时也可以看到台风波动造成的距台风中心 1500km 以外的北部地区有水汽含量高值区并呈带状分布<sup>[9]</sup>,且其中有 3 个强对流中心,给我国南方沿海地区造成降水;8月2—3日(图 5a、b),台风麦莎周围的水汽总收入的主要来源是台风中心西南部和南部,东边界在对流层低层有少量流入,随着台风行进,3日,随着大量水汽涡旋卷入,台风眼附近强对流区范围扩大,在台风东侧和北侧温度梯度增大的温度场配置下,台风北侧的偏东风低空急流将东部海洋上暖湿空气输

向陆地<sup>[10]</sup>,东边界对流层中低层的水汽通量由流出转为流入并逐渐增大,区域内对流层中层总水汽通量迅速增加,台风强度增大。至8月5日(图 5c)台风登陆后,对流层中层总水汽通量明显减少,在 700hPa 以上台风范围内水汽总的收支甚至为负,非常明显的变化是西边界主要水汽通道的水汽通量逐渐减小,且西边界显示为水汽流出,但同时,东边界的水汽流入量逐渐增强,并成为主要的水汽输送供给。且从一开始的对流层低层增加,直到6日以后的 500hPa 以下的对流层中低层全部为东边界流入(图 5d),台风继续向西北方向移动,受地形影响,总的水汽收支继续减小,尤其是对流层中层水汽已经逐渐

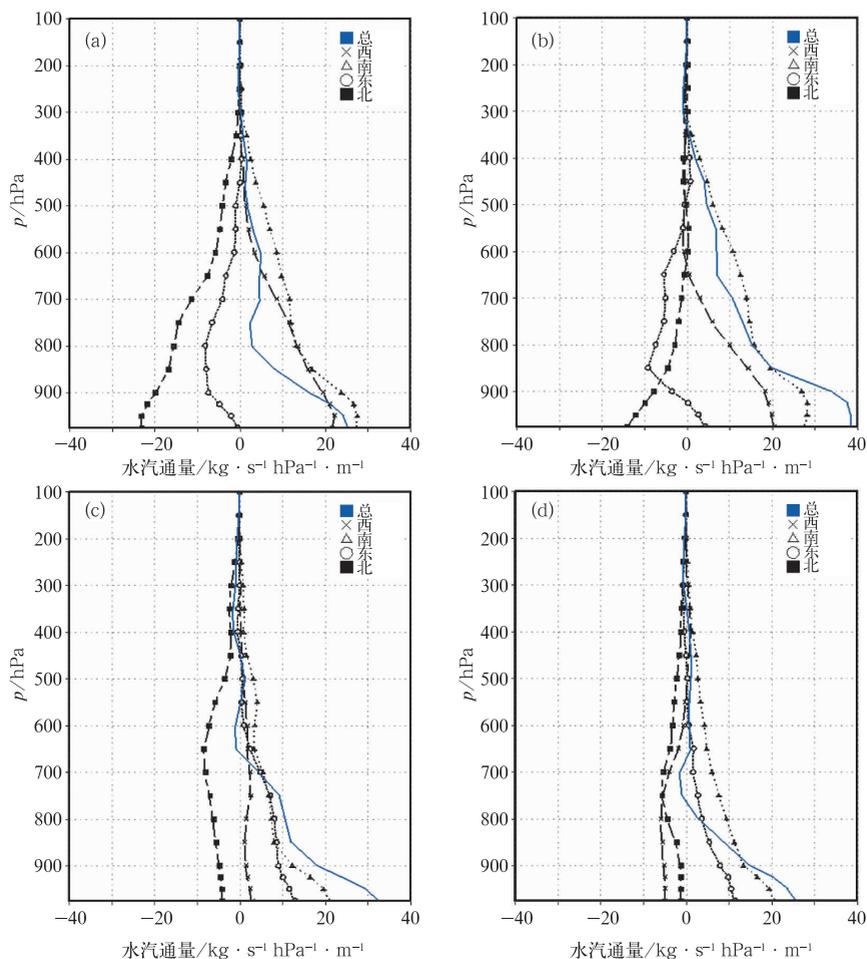


图 5 台风麦莎 2005 年 8 月 2 日(a)、3 日(b)、5 日(c)、6 日(d)东、南、西、北四边界水汽收支水汽通量(单位:  $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )

成为流出,此时台风中心最低气压由 969hPa 增大到 989hPa,台风强度继续减弱。与此同时,南边界的水汽通量在 300hPa 以下各层都为正值,南边界的水汽通量对于台风强度维持起到了重要的作用。同时麦莎台风带来的远距离暴雨的发生和维持,也与在台风右侧的东南气流向中纬度输送的水汽有关<sup>[11-12]</sup>。

#### 4 结 论

本文利用 AMSU-B 探测器分辨率高,能够穿透云的特性,在辐射模拟计算分析 AMSU-B 三个水汽通道亮温对大气中水汽的敏感性试验基础上,建立各通道亮温与对流层低、中、高层水汽通量的关系,并将这种关系应用于热带气旋发展过程中环境场水汽分布特征分析。

(1) 结果显示,AMSU-B 水汽通道的亮温与水汽量有着很好的对应关系,较低的通道亮温对应着较大的水汽量,对应关系符合 e 指数关系。且热带气旋个例分析表明,微波水汽通道亮温很好地表征了热带气旋环境场不同高度的水汽分布和水汽输送,尤其是对流层中层亮温的变化显示出水汽量的变化与热带气旋强度密切相关,对热带气旋的发展及强度变化有着很好的指示意义。

(2) 个例分析中可以看出,热带气旋的西南水汽通道是重要的水汽通道,而通过台风行进过程中,不同边界水汽收支情况变化来看,由副热带高压位置引起的东南水汽通道也是非常重要的,尤其在北上台风登陆后西南水汽通道输送减弱或被截断,东南的水汽给台风的

陆上维持提供了充分的水汽供应。

#### 参 考 文 献

- [1] 冀春晓,陈联寿,赵放. 登陆台风 Matsa 维持机理的数值研究[J]. 气象学报, 2007, 65(6): 888-895.
- [2] 邱红. 星载被动微波遥感热带气旋的研究[M]. 北京大学博士学位论文, 2005.
- [3] Grody N C, Weng F, and Ferraro A R. Application of AMSU for obtaining water vapor, cloud liquid water, precipitation, snow cover, and sea ice concentration [G], 10th Int. ATOVS Study Conf. 1999.
- [4] 方翔,邱红,曹志强,等. 应用 AMSU-B 微波资料识别强对流云区的研究[J]. 气象, 2008, 34(3): 22-29.
- [5] 魏应植,许健民,周学鸣. 台风杜鹃的 AMSU 卫星微波探测资料分析[J]. 热带气象学报, 2005, 21(4): 359-367.
- [6] Jimenez C, Eriksson P and John V O, et al. A practical demonstration on AMSU retrieval precision for upper tropospheric humidity by a non-linear multi-channel regression method[J]. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, 2004, 4, 7487-7511.
- [7] Manolis I A L. A brief description of the Levenberg-Marquardt algorithm[OL]. Institute of Computer Science Foundation for Research and Technology, <http://www.ics.forth.gr/~lourakis/>, 2005.
- [8] 狄利华,姚学祥,解以扬,等. 冷空气入侵对 0509 号台风麦莎变性的作用[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(1): 18-25.
- [9] 李英,王继志,陈联寿. 台风麦莎(Matsa)的波状降水特征研究[J]. 科学通报, 2007, 52(3): 344-353.
- [10] 何立富,尹洁,陈涛,等. 0509 号台风麦莎的结构与外围暴雨分布特征[J]. 气象, 2006, 32(3): 93-100.
- [11] 黄忠,张东,蔡安安,等. 台风远外围大范围强对流天气成因综合分析[J]. 气象, 2007, 33(1): 25-31.
- [12] 孙兴池,陈金敏,刁秀广,等. 一次远距离台风暴雨过程分析[J]. 气象, 2009, 35(5): 34-41.

# 王新等:应用AMSU-B微波资料分析0509号Matsa台风水汽场分布特征

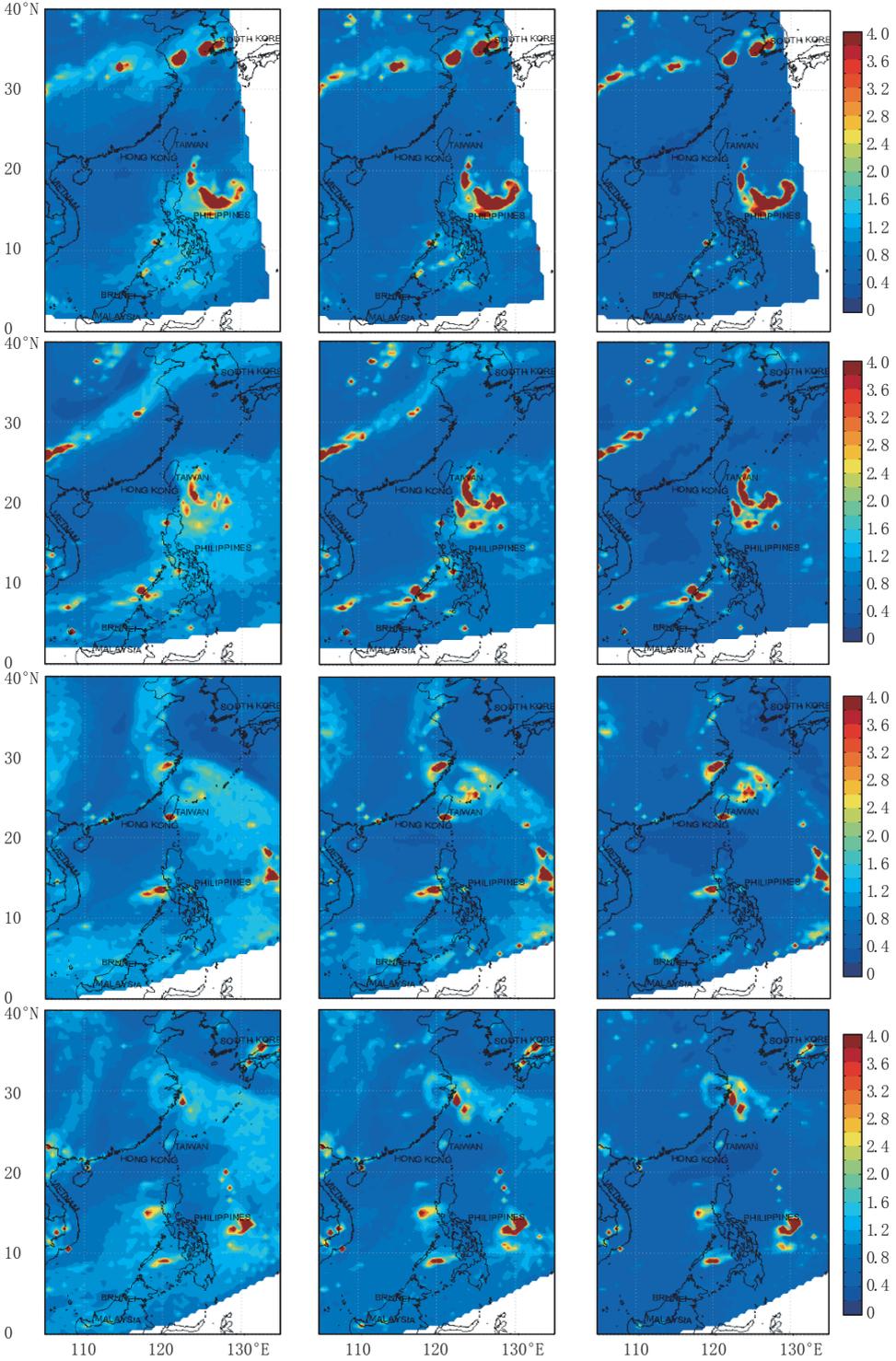


图 4 利用AMSU-B计算台风麦莎2005年8月2日、3日、5日、6日(从上到下)对流层低(左)、中(中)、高层(右)水汽量(单位:kg · hPa<sup>-1</sup> · m<sup>-2</sup>)