

卫星微波大气遥感温湿廓线及应用进展

胡皓 翁富忠

(中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081)

摘要: 简要回顾了星载微波探测仪对大气温湿廓线遥感应用技术进展, 对统计回归反演方法、一维变分反演方法以及最新的场景自适应反演方法的发展进行了介绍。最后通过介绍新型微波探测仪搭载平台, 对可能的新的反演产品和技术进行展望。

关键词: 卫星, 遥感, 微波探测仪, 场景自适应

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.006

Progress in Satellite Microwave Remote Sensing of Atmospheric Temperature and Moisture Profiles and Their Applications

Hu Hao, Weng Fuzhong

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

Abstract: In this paper, we reviewed the techniques of using satellite-borne microwave sounders for remote sensing of atmospheric temperature and humidity profiles. And introduced three primary algorithms including statistical regression, one-dimensional variation method and the latest scene-dependent methods. In the end, the newly developed microwave sounder platform, as well as the prospect of possible new retrieval technologies and products, were discussed.

Keywords: satellite, remote sensing, microwave sounder, scene-dependent

0 引言

近年来, 随着星载探测仪器的进步以及地面算法能力的提升, 卫星资料在大气探测和数值天气预报中的作用越来越显著。对于海上以及常规观测资料稀少的部分陆地区域, 卫星资料作为弥补地基观测不足的重要手段尤为重要。有效利用卫星观测资料, 对提高我国气象预报以及防灾减灾能力有重要意义。

与可见光和红外波段的探测仪器相比, 星载微波波段探测仪器具备一定的穿云透雨能力, 且其探测波段对包括大气温度、湿度、云水、云冰、雨水、表面风等要素更敏感^[1], 是监测大气三维垂直结构的重要手段, 尤其对已经成云致雨的灾害天气系统内部热力结构监测具有重要意义。随着仪器制造技术的提升, 目前的微波探测仪已经覆盖了包括50~60 GHz、118 GHz附近的氧气吸收带, 以及183 GHz附近的水汽

吸收带, 并包含了部分微波窗区探测通道^[2-3]。如何有效利用这些探测信息, 在不同下垫面不同天气条件下反演出合理可靠的大气三维热力结构, 是亟待解决的科研和技术问题。

尽管微波探测仪具备一定的穿云透雨能力, 但是在强降水条件下的反演结果依然存在较大误差。因此如何在反演算法中考虑与强降水相关的散射过程影响一直是热门研究问题。热带气旋(Tropical Cyclone, TC)是影响我国的主要灾害性天气之一, 由于海上缺乏常规观测资料, 因此微波探测仪是海上TC三维热力结构的重要观测手段, 也是微波遥感大气温湿廓线的重要应用领域之一。目前研究中主要使用两种方法从卫星微波观测中反演TC热力结构, 一种是基于回归方程的统计算法, 另一种是一维变化算法(1-Dimensional VARIation, 1DVAR)。

本文将从统计回归和一维变分两种算法出发介绍大气温湿廓线反演算法的研究进展, 讨论未来搭载于新平台上的微波探测仪反演和应用思路。在此基础上对未来的研究方向和策略提出展望。

1 基于统计回归的反演算法及其在热带气旋监测中的应用

回归统计算法主要基于微波辐射和大气温度基本

收稿日期: 2021年1月22日; 修回日期: 2021年6月28日
第一作者: 胡皓(1990—), Email: huhao@cma.gov.cn
通信作者: 翁富忠(1959—), Email: wengfz@cma.gov.cn
资助信息: 科技部基础资源调查专项(2019QZKK0105);
风云卫星应用先行计划项目; 中国气象科学研究院基本科研业务费项目(2020Y013)

呈线性关系的物理条件，并且要求微波仪器各通道的权重函数要相对稳定。则等压面 p 上的温度 $T(p)$ 可以表示为微波探测仪各通道观测亮温的线性组合，即：

$$T(p) = C_0(p) + \sum_{i_{1,p}}^{i_{2,p}} C_i(p) T_b^{\text{obs}}(i), \quad (1)$$

其中： p 代表大气层等压面；求和函数代表与等压面 p 上温度 $T(p)$ 相关的微波探测仪通道观测亮温的加权平均（即通道 $i_{1,p}$ 到 $i_{2,p}$ 观测亮温的加权平均）； $C_i(p)$ 代表拟合系数，一般基于参照气温数据根据最小二乘法拟合得到。Kidder等^[1]针对AMSU-A（Advanced Microwave Sounding Unit-A）仪器使用无线电探空仪观测的温度估计回归系数。为了使无线电探空仪与AMSU-A的空间匹配样本足够大，他们首先将所有AMSU-A观测值调整至星下点。Kidder等认为，这样做可以减小由于不同扫描角上拟合样本量不同造成的反演数据里与扫描角度有关的偏差（scan-angle-dependent biases）。在他们的模型中，AMSU-A通道1~7不用于100 hPa以上的温度反演，以确保没有高海拔地形污染以及强降水云系污染；通道1~5不用于700~115 hPa的反演，以减少强降水造成的污染（图1a）。Zhu等^[4]在此基础上直接在公式（1）中考虑了扫描角度，改进后的反演方程如下：

$$T(p) = C_0(p) + \sum_{i=3}^{11} C_i(p) T_b^{\text{obs}}(i) + C_\theta(p) \frac{1}{\cos \theta}, \quad (2)$$

其中： θ 代表扫描角， $C_\theta(p)$ 代表与扫描角相关的各个等压面上的拟合系数。Knaff等^[5]使用类似的统计回归方法反演AMSU-A，得到TC暖心结构以及平衡流场的切向风^[6]。他们的研究中自920~50 hPa选取了23个等

压面，并对186个个例进行了反演试验，发现暖心高度大致位于12 km左右。

目前基于AMSU仪器的TC结构反演业务化系统主要有两种，他们均是使用多元线性回归来实现的。一种是美国威斯康辛麦迪逊大学的CIMSS（Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies）提出的回归算法^[7]，另一种是美国科罗拉多大学CIRA（Cooperative Institute for Research in the Atmosphere）提出的回归算法^[8-9]。

然而，使用AMSU得到的反演结果受到^[10]的质疑，因为他们认为AMSU的水平分辨率不足以分辨与散射效应相关的低层温度负异常。Zhu等^[11]基于Zhu等^[4]为AMSU-A开发的反演算法，使用具有更高水平分辨率和更多通道的ATMS（Advanced Technology Microwave Sounder）仪器对10个TC个例的暖心结构进行反演，发现ATMS反演的暖心与TC强度密切相关，但低层由于强散射造成的温度负异常依然存在。Tian等^[12]发现，式（2）并不能完全避免与扫描角度有关的反演偏差，因此他们对该算法进行了进一步改进。改进公式如下：

$$T(p) = C_0(p, \theta) + \sum_{i_{1,p}}^{i_{2,p}} C_i(p, \theta) T_b^{\text{obs}}(i), \quad (3)$$

其中在拟合系数时仅考虑与等压面 p 上的气温具有高相关性的通道，且他们并没有使用无线电探空仪资料进行拟合，而是使用数值预报模式中反演时间前两周的数值预报结果作为参考值进行拟合。因此，他们的反演算法中系数是动态的且每次都需要进行数值模拟并重新训练。虽然能够在一定程度上减小与扫描角度

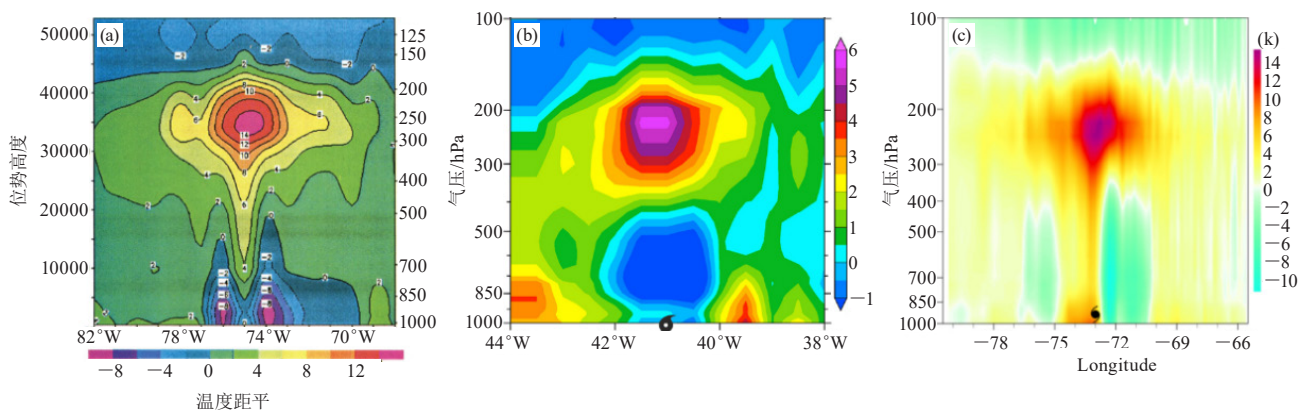


图1 (a) Kidder等^[1]反演AMSU-A（NOAA-15卫星）观测得到的飓风Bonnie（1998年8月25日）暖心结构；(b) Tian等^[12]反演AMSU-A（NOAA-18卫星）观测得到的飓风Michael（2012年9月7日）暖心结构；(c) Lin等^[13]反演ATMS（NPP卫星）观测得到的飓风Maria（2017年9月25日）暖心结构

Fig. 1 Retrieved warm core structure of: (a) Hurricane Bonnie (25 August 1998) observed by AMSU-A (NOAA-15) by Kidder et al.^[1], (b) Hurricane Michael (7 September 2012) observed by AMSU-A (NOAA-18) was retrieved by Tian and Zou^[12], (c) Hurricane Maria (25 September 2017) observed by ATMS (NPP) by Lin and Weng^[13]

相关的偏差，但计算成本却大幅上涨（图1b）。Lin等^[13]对其进一步进行了改进，他们使用历史一段特定时间内的GFS分析场资料与ATMS观测进行时空匹配并训练系数，并且他们在训练系数时对晴空和有云区域分别进行，从而实现基于云分类的动态拟合系数以反演TC温度场结构。结果表明他们可以有效反演出TC的暖心结构，且暖心强度与TC强度具有很好的线性关系。并且由于不需要调用数值预报模式训练系数，其计算量远小于Tian等^[12]（图1c）。

以上研究结果表明，在反演算法中有效处理散射条件是提高灾害天气热力结构反演精度的关键。但是，这类基于回归方程的反演方案仅适用于对温度廓线的反演，湿度廓线结构以及与降水直接相关的水成物廓线结构无法通过此类方案反演。而且微波探测仪中的高频水汽吸收带通道（例如ATMS的183 GHz附近通道）在此类研究中均被剔除，造成大量低层观测信息没有被有效利用。

2 基于一维变分的反演算法及其在热带气旋监测中的应用

早在2005年，Liu等^[14]便基于AMSU提出了1DVAR反演方案，与数值天气预报中的变分资料同化类似。主要思路是以快速辐射传输模式作为观测算子，给定大气背景场、背景场协方差矩阵、观测算子误差矩阵、观测信息等，最小化下列代价函数（Cost Function）以得到大气状态量反演产品。1DVAR的代价函数 $J(X)$ 如下：

$$J(X) = \left[\frac{1}{2}(X - X_0)^T \right] \times B^{-1} \times (X - X_0) + \left[\frac{1}{2}(Y_m - Y(X))^T \right] \times E^{-1} \times (Y_m - Y(X)) \quad (4)$$

其中： X_0 和 B 分别代表背景大气状态量（初猜值）以及大气状态量的协方差矩阵。 Y_m 代表观测资料。 $Y(X)$ 代表基于大气状态量 X 通过观测算子（快速辐射传输模式） Y 计算得到的模拟观测资料。 E 代表观测资料及/或观测算子的误差矩阵。最小化代价函数 $J(X)$ 即等同于求解如下等式：

$$\frac{\partial J(X)}{\partial (X)} = 0, \quad (5)$$

为了求解这个方程，我们需要假设观测算子是局地线性的。即 $Y(X) = Y(X_0) + K(X - X_0) = Y(X_0) + K\Delta X$ 。则式（5）可以化为如下形式：

$$\Delta X_{n+1} = [BK_n^T(K_nBK_n^T + E)^{-1}][Y_m - Y(X_n) + K_n\Delta X_n], \quad (6)$$

其中： n 代表迭代次数。 K 代表观测算子 Y 相对于大气状态量 X 的雅克比行列式。

由于观测算子 Y 通常使用大气辐射传输模式，其

输入量包括大气温度、湿度、水成物廓线以及部分地表参数（如地表温度、地表气压、地表类型等），因此通过1DVAR反演得到的大气状态量 X 也可以包含上述变量。这与仅能反演出大气温度廓线的统计回归算法相比有巨大优势。也因此成为目前欧洲^[15]和美国^[16]反演星载微波探测仪的主要方法，并被应用于欧洲中期天气预报中心（ECMWF）的全天空资料同化系统中^[17]。目前，美国业务化微波反演系统MiRS（Microwave Integrated Retrieval System）反演产品包括直接反演产品（温度廓线、湿度廓线、云液水廓线、云冰廓线、雨水廓线、地表发射率、地表温度），垂直积分产品（整层可降水量、雨水路径、云冰路径、云水路径），后处理产品（海冰、雪水当量、积雪类型、陆表湿度、降水率、降雪率、风速风向、云顶高度、云厚度、云类型）三大类共数十种^[16]。

与统计回归算法的验证方式类似，许多1DVAR算法的研究也针对TC条件下的反演精度进行质量评估。Han等^[18]提出了一个基于1DVAR的微波反演平台（Microwave Retrieval Testbed, MRT），他们在反演中以美国标准大气廓线作为背景场和初猜值（First Guess），以快速辐射传输模式CRTM（Community Radiative Transfer Model）作为观测算子，并使用ATMS观测反演出合理的飓风暖心结构。他们的研究中测试了不同通道对1DVAR反演结果的影响，发现当仅使用ATMS通道4~15的观测时，反演出的暖心结构最为合理，这可以归因于强散射条件下，高频的水汽通道（ATMS通道16~22）在观测算子（CRTM）中误差较大，排除这些通道的影响可以得到更合理的暖心结构。然而，排除高频通道的同时也会降低反演出的水汽廓线的精度，并且由于高频通道多分布在对流层低层，排除后低层通道过少会导致在TC强度较强时仍然存在低层的冷异常中心^[18]，这与基于多元线性回归算法的反演结果类似（图2b）。美国业务化微波反演系统MiRS^[16]也存在类似的问题（图2a）。为了改进MiRS系统在TC条件下的反演效果，其开发团队最近基于原版MiRS系统研制出了新一代的MiRS-TC系统，目前仍处于实验阶段^[19]。MiRS-TC系统针对TC条件设计了与TC中心位置相关的动态大气背景场，以及与降水状态相关的动态通道选择方案。初步评估结果表明，这种方案可以反演出合理的TC结构，低层的冷异常中心也可以被有效减弱（图2c）。但是这种算法由于依赖TC中心位置信息，因此仅能适用于已知TC位置的情况下，无法实时运行。并且该方案缺乏普适性，对于非TC条件并不适用。

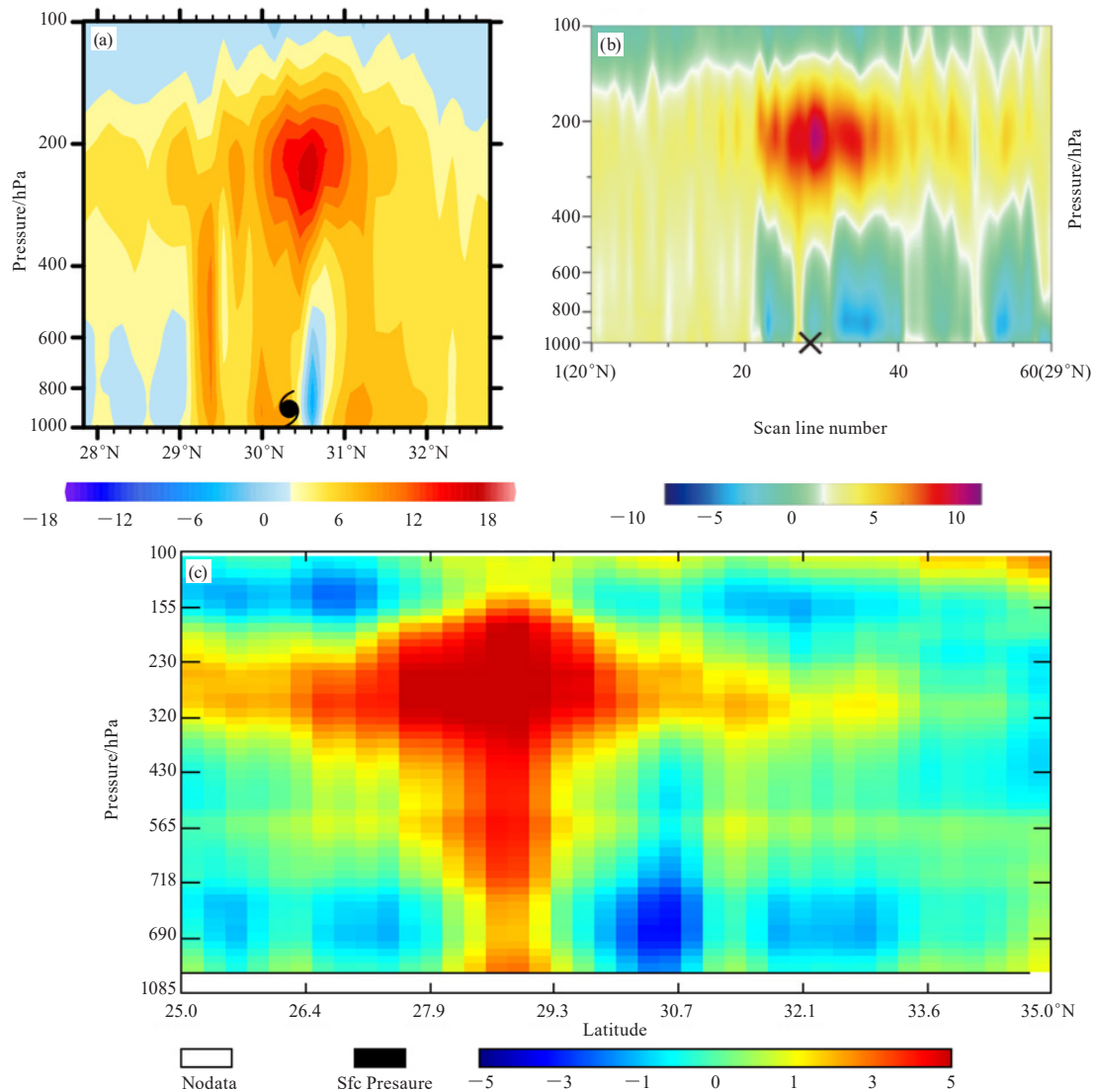


图2 (a) MiRS系统业务反演ATMS (NPP卫星) 观测得到的飓风Florence (2018年9月12日) 暖心结构^[24]; (b) Han等^[18]反演ATMS (NPP卫星) 观测得到的飓风Harvey (2017年8月24日) 暖心结构; (c) MiRS-TC系统反演ATMS (NPP卫星) 观测得到的飓风Florence (2018年9月12日) 暖心结构^[19]

Fig. 2 Retrieved warm core structure of: (a) Hurricane Florence (12 September 2018) observed by ATMS(NPP)^[24], (b) Hurricane Harvey (24 August 2017) observed by ATMS(NPP) was retrieved by Han and Weng^[18], (c) Hurricane Florence (12 September 2018) observed by ATMS (NPP)^[19]

3 场景自适应的一维变分反演算法及其在热带气旋监测中的应用

目前大多数的反演算法在TC条件下均存在比较明显的误差,这可以主要归因于反演算法对不同场景的适应能力不足^[20]。对于海上TC的反演,最重要的场景适应能力是对不同天气条件(也可以理解为不同大气散射条件)的适应能力。大气中降水过程可以粗略分为层云降水和对流云降水两类,这两类降水对应的大气状态(如温度湿度)及雷达回波结构和微物理结构有很大区别^[21]。Wang等^[22]发现,与层云降水相比对流云降水的温度廓线表现为在对流层低层更冷而在对

流层中层更温暖。由于微波探测仪中的高频通道对降水十分敏感,因此采用根据降水类型的场景自适应反演算法十分有必要。在统计回归和1DVAR反演算法的研究中,均有学者尝试针对不同天气条件采用不同反演方案,结果均表明适应天气条件的反演方案可以有效提高TC条件下的反演精度^[13,19]。但是,Lin等^[13]的反演算法是基于统计回归模型,并不能反演出大气湿度等其他状态量。Grassotti等^[19]的反演算法虽然基于1DVAR,但他们的天气条件适应方案针对TC条件设计,并不能拓展到全球范围。因此,亟需一种可以适用于全球范围的基于1DVAR的场景自适应反演算法。

Hu等^[20]针对散射效应的影 响改进了1DVAR方案，他们分别使用了不同的大气背景场反演晴空、层云和对流云条件下的观测像元，基于ATMS仪器成功在热带气旋条件下反演出合理的三维热力结构。在散射较强的热带气旋内核区低层，Hu等^[20]改进后的反演结果与美国MiRS业务反演的ATMS结果相比，温度和湿度反演误差均有明显降低。这说明在1DVAR算法中合理处理散射像元对提高灾害天气热力结构的反演精度有重要作用。并且，Hu等^[20]发现当针对散射效应改进1DVAR方案后，同时使用所有通道的反演误差要明显低于仅使用低频水汽吸收带通道的反演误差，说明有效利用微波温度计和微波湿度计的全部探测信息可以改进对灾害天气系统的监测结果。

Hu等^[23]将这一场景自适应的反演算法拓展到风云三号D星（FY-3D）搭载的微波探测仪。由于FY-3D同时搭载微波温度计（MWTS）和微波湿度计

（MWHS）两部仪器，为了同时利用两部仪器的探测信息，Hu等^[23]采用了Han等^[24]的微波探测仪融合技术生成MWTS和MWHS融合产品。他们的结果表明，与美国的飞机下投式探空仪观测资料相比，在TC内核区和外围区反演FY-3D微波探测仪的温湿度误差明显优于美国MiRS同类业务化反演产品（图3），且不论TC的强度大小，内核区对流层底层的异常冷池均有明显减弱（图4），反演得到的TC结构更加合理精确。基于反演结果，Hu等^[25]使用大气湿静力平衡方程对温湿度廓线进行垂直积分，以获取海平面气压场结构，并通过海平面气压对TC进行定位定强试验。他们的结果表明，场景自适应反演FY-3D微波探测仪对TC的定位误差和定强误差可以分别比美国同类业务化产品降低约52.79%和36.91%，进一步验证了场景自适应1DVAR算法在TC内核区结构反演的重要性。

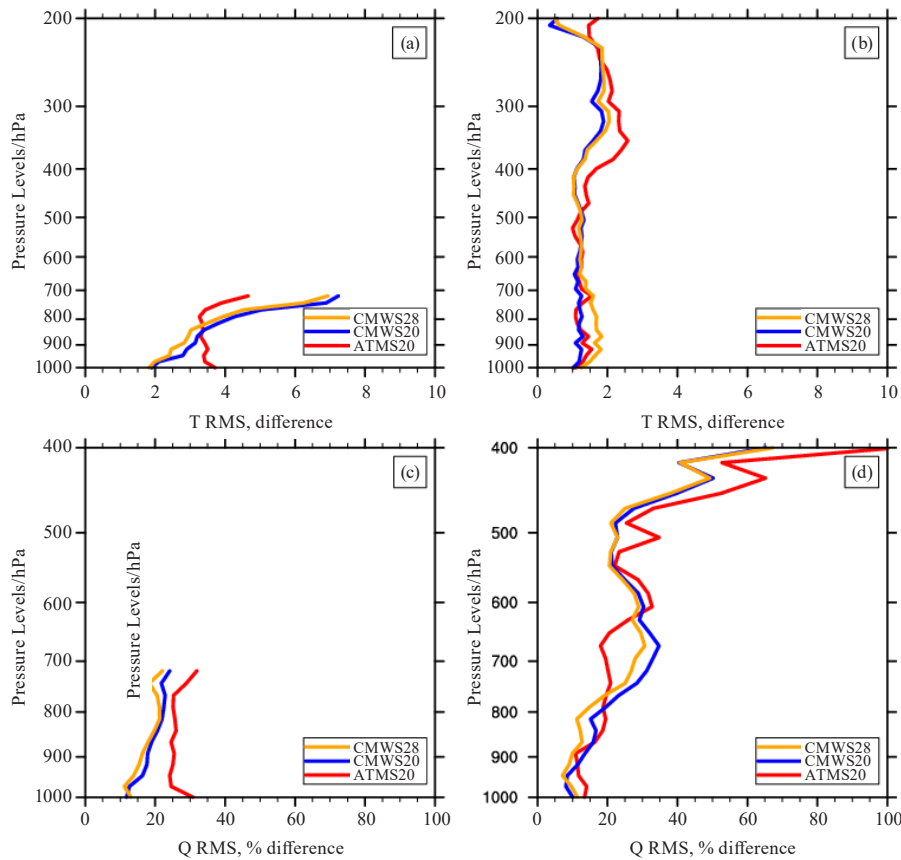


图3 基于场景自适应1DVAR反演FY-3D卫星微波探测仪（蓝色和黄色曲线）以及NPP卫星ATMS微波探测仪（红色曲线）的温度和湿度廓线误差^[23]

(a, c) 飓风内核区, (b, d) 飓风外围 (蓝色和黄色曲线分别代表未使用和使用FY-3D卫星微波探测仪中的118 GHz探测通道)
Fig. 3 Temperature and humidity profile errors of FY-3D satellite microwave detector (blue and yellow curves) and NPP satellite ATMS microwave detector (red curve) retrieved based on scene adaptive 1DVAR^[23]

(a,c) in the inner region of the hurricane, (b, d) the outer region of the hurricane (The blue and yellow curves represent the 118 GHz detection channels in the unused and used FY-3D satellite microwave detectors, respectively)

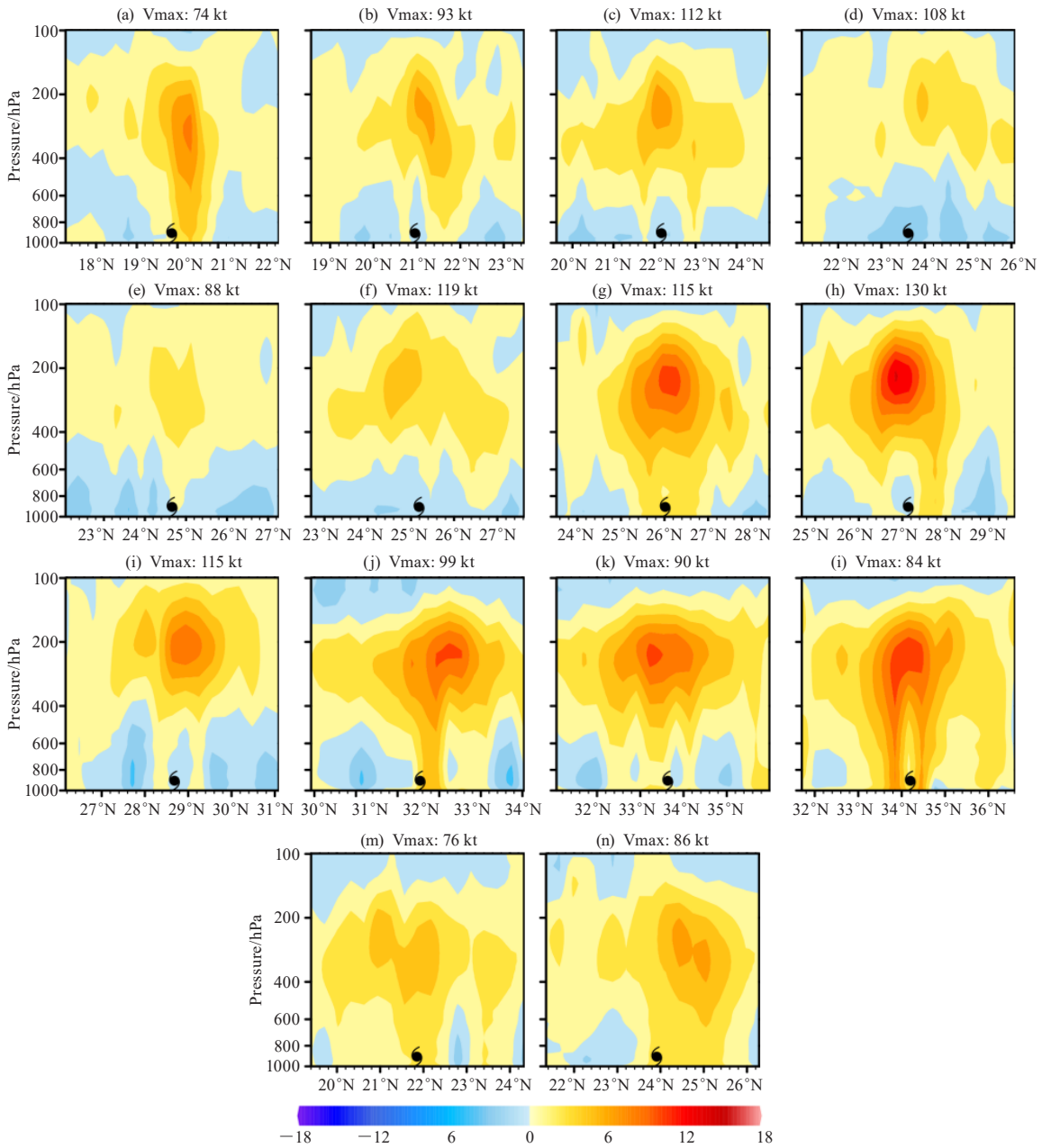


图4 基于场景自适应1DVAR算法反演FY-3D微波探测仪观测得到的飓风Florence和Michael各时次暖心结构^[23]

Fig. 4 Retrieved warm core structure of Hurricane Florence and Michael observed by FY-3D microwave detector based on scene adaptive 1DVAR algorithm^[23]

4 未来星载微波探测仪平台展望

由于目前星载微波探测仪主要搭载于极轨卫星平台上，对同一观测点的重访问周期过长是其主要缺陷之一。把目前所有的美国NOAA、欧洲METOP和中国FY-3业务极轨卫星提供的微波温度探测资料加在一起，在时间分辨率上还远远不能捕捉到快速发展的灾害性天气系统。此外，卫星计划中经常性的发射延迟和在轨卫星微波探测的过早失效，譬如FY-3C的微波温度探测，往往导致严重的观测缺口，进一步减小极

轨卫星对强风暴的监测和预报能力。因此亟需探索新的微波探测仪搭载平台，以充分发挥微波探测仪在灾害天气监测和预报中的作用。

4.1 静止卫星微波载荷平台及其应用前景展望

与极轨卫星相比，静止卫星可以对某一区域进行连续观测。现有静止气象卫星上仅能搭载可见光/红外探测仪，虽然这些仪器可以很好地追踪风暴发展的轨迹，但是由于云和降水的遮挡，这些仪器无法获取风暴内部的热力学结构。如果将半米天线尺寸的星载

微波探测仪放置在静止卫星平台上，则50~60 GHz通道的空间分辨率只有100~200 km，这个分辨率将无法满足不同分辨率需求的需求。若要得到50 km或更高的空间分辨率，那么在50 GHz的探测频率下的真实孔径尺寸大约为4 m或更大。在目前的技术条件下，不仅建造这样的微波探测仪非常昂贵，而且将其发射到静止轨道上也有着非常大的挑战性。这就是迄今为止尚无静止卫星平台微波载荷的主要原因。

21世纪初期开始被关注的合成孔径成像设想，使得静止轨道微波载荷成为可能^[26]。这种设想不仅可以在满足空间分辨率需求的前提下大大降低天线体积，同时这种系统孔径的尺寸易于扩展以满足未来的需求。美国、欧洲和中国正在研制的静止微波卫星GeoSTAR^[26]、GAS^[27]和FY-4M^[28]，都是基于这种合成孔径成像技术实现的。基于静止轨道微波载荷，我们不仅可以对特定区域的灾害天气系统三维热力结构（包括温度湿度和水成物分布）进行连续监测，甚至还可以通过导风算法或光流法追踪得到三维大气风场。Lambrigtsen等^[29]基于仿真的GeoSTAR观测数据对TC条件下的风场进行导风计算，结果发现在15 min时间间隔和25 km水平分辨率的条件下大气导风产品的风速大小和方向均方根误差分别可以达到2 m/s以内和15°以内。这种卫星三维风场产品将极大弥补卫星资料监测风场的空白。

4.2 小卫星星座微波载荷平台及其应用前景展望

另一种快速可行的新型平台是小卫星星座微波载荷平台，每颗卫星携带一个微波载荷的小卫星星座就能够在全球范围内监测和预报快速发展的天气系统。与静止微波载荷相比，小卫星微波载荷平台研发成本和造价更低，且能按需求覆盖全球大部分区域，可以实现对全球天气系统的高时间分辨率观测，并有可能实现全球大气三维风场产品。与传统极轨微波载荷相

比，小卫星造价和发射成本更低，可以轻松形成星座组网观测，一次发射的失利对整个任务带来极低的影响。

如表1所示，小卫星微波载荷按照用途一般分为两类^[30]，一类用于全球观测，如MicroMAS计划^[31]和MiRaTA计划^[32]；一类用于特定区域（如热带和中纬度地区）观测，如TROPICS^[33]计划和TEMPSET计划^[34]。近年来也出现了特定功能的小卫星星座计划，例如CYGNSS小卫星星座计划通过接受海表面对GPS信号的散射特征来估计海表面10 m/s风速^[35]。该星座可以用来监测包括TC内核区域在内所有天气条件下的海表面10 m/s风速，并且在8颗卫星的协同配合下，CYGNSS可以实现对热带地区的空间全覆盖，且同一区域的观测时间间隔中位数可以达到4 h，与星载雷达散射计多达数天的重复观测时间间隔相比有巨大提升^[36]。但与微波仪器相比，其观测覆盖范围很随机，虽然能避免降水散射的影响，但有可能错过TC发展演变的关键过程，对TC的监测还有一定缺陷。

5 总结与展望

星载微波探测仪对灾害天气三维热力结构的监测和预报都有重要意义。已有研究针对灾害天气（以TC为主）内部温湿度廓线反演精度进行了大量尝试，并且已经可以在TC内核区反演出合理的温湿度廓线结构。未来如何将这种反演算法扩展到全球不同区域、不同下垫面、不同天气条件，是需要进一步关注的问题。另外，基于对灾害天气反演算法中的研究思路，是否能在资料同化中提高微波探测仪观测资料的利用率，也是需要尝试的领域。

随着新型探测技术的进步，星载微波探测仪的观测平台有望得到提升。不论是静止卫星微波载荷平台还是小卫星星座微波载荷平台，都将大大提升微波探测仪的观测时间分辨率。高时间分辨率除了可以提供

表1 现有微波载荷小卫星星座计划简介

Table 1 Introduction to the existing microwave loaded satellite constellation plan

类型	小卫星计划名称	简介	现状
全球观测	MicroMAS	观测靠近118.75 GHz氧气吸收线附近的9个通道，从近赤道轨道观测对流雷暴、热带气旋等 ^[31]	MicroMAS-1已经于2014年7月13日发射，发射后2015年8月接收器出现故障，MicroMAS-2目前加入了TROPICS计划
	MiRaTA	携带三波段微波探测仪和GPS无线电掩星传感器。微波探测仪探测通道包括V波段：60 GHz氧气吸收线附近；G波段：183 GHz附近的水汽吸收线和207 GHz附近的冰云探测通道 ^[32]	MiRaTA已经于2017年11月18日与JPSS-1卫星搭载同一火箭发射
热带和中纬度地区	TROPICS	由12颗携带微波辐射计的立方体卫星组成的星座，共12个通道：118.75 GHz附近有7个通道测量温度；183 GHz附近3个通道测量水汽；90 GHz附近1个通道测量降水；206 GHz附近1个通道测量冰云 ^[33]	目前仍处于计划中
	TEMPEST	由5个轨道间隔5~10 min的立方体卫星组成，提供5 mm波，90~183 GHz的观测，可以直接观测云的时间演变 ^[34]	TEMPEST-D已经于2018年5月21日发射，2021年6月22日其完成三年任务，成功脱离轨道
海洋风速测量	CYGNSS	由8颗小卫星组成的星座，用于测量海表面风速，可以接收直接和间接的GPS信号。直接信号用来确认CYGNSS观测位置；间接信号可反应海洋粗糙度 ^[35]	CYGNSS已经于2016年12月15日发射升空，目前仍在正常工作中

更加精细和连续的灾害天气三维热力结构监测外,还为三维风场的反演提供了可能。这将极大弥补卫星观测产品的空白。

参考文献

- [1] Kidder S Q, et al. Satellite analysis of tropical cyclones using the advanced microwave sounding unit (AMSU). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): 1241-1260.
- [2] Zhang S, et al. Design of the second generation microwave humidity sounder (MWSH-II) for Chinese meteorological satellite FY-3. 2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2012: 4672-4675.
- [3] Weng F, et al. Calibration of Suomi national polar-orbiting partnership advanced technology microwave sounder. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(19): 11.
- [4] Zhu T, Zhang D L, Weng F. Impact of the advanced microwave sounding unit measurements on hurricane prediction. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(10): 2416-2432.
- [5] Knaff J A, Seseske S A, DeMaria M, et al. On the influences of vertical wind shear on symmetric tropical cyclone structure derived from AMSU. *Monthly Weather Review*, 2004, 132(10): 2503-2510.
- [6] Knaff J A, Zehr R M, Goldberg M D, et al. An example of temperature structure differences in two cyclone systems derived from the advanced microwave sounder unit. *Weather and Forecasting*, 2000, 15(4): 476-483.
- [7] Brueske K F, Velden C S. Satellite-Based tropical cyclone intensity estimation using the noaa-klm series advanced microwave sounding unit (AMSU). *Monthly Weather Review*, 2003, 131(4): 687-697.
- [8] Demuth J L, DeMaria M, Knaff J A. Improvement of advanced microwave sounding unit tropical cyclone intensity and size estimation algorithms. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2006, 45(11): 1573-1581.
- [9] Demuth J L, DeMaria M, Knaff J A, et al. Evaluation of advanced microwave sounding unit tropical-cyclone intensity and size estimation algorithms. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 43(2): 282-296.
- [10] Stern D P, Nolan D S. On the height of the warm core in tropical cyclones. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2012, 69(5): 1657-1680.
- [11] Zhu T, Weng F. Hurricane Sandy warm-core structure observed from advanced Technology Microwave Sounder. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(12): 3325-3330.
- [12] Tian X, Zou X. ATMS- and AMSU-A-derived hurricane warm core structures using a modified retrieval algorithm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2016, 121(21): 12630-12646.
- [13] Lin L, Weng F. Estimation of hurricane maximum wind speed using temperature anomaly derived from advanced technology microwave sounder. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2018, 15(5): 639-643.
- [14] Liu Q, Weng F. One-dimensional variational retrieval algorithm of temperature, water vapor, and cloud water profiles from advanced microwave sounding unit AMSU. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(5): 1087-1095.
- [15] Weston P P, Bell W, Eyre J R. Accounting for correlated error in the assimilation of high-resolution sounder data. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2014, 140(685): 2420-2429.
- [16] Boukabara S A, et al. MiRS: An all-weather 1DVAR satellite data assimilation and retrieval system. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2011, 49(9): 3249-3272.
- [17] Geer A J, Bauer P, Lopez P. Lessons learnt from the operational 1D + 4D-Var assimilation of rain- and cloud-affected SSM/I observations at ECMWF. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2008, 134(635): 1513-1525.
- [18] Han Y, Weng F. Remote sensing of tropical cyclone thermal structure from satellite microwave sounding instruments): impacts of optimal channel selection on retrievals. *Journal of Meteorological Research*, 2018, 325: 804-818.
- [19] Grassotti C, Liu S, Lee Y K, et al. Preliminary development and assessment of the NOAA Microwave Integrated Retrieval System for Tropical Cyclones (MiRS-TC): a passive satellite microwave retrieval algorithm optimized for the tropical cyclone environment. *AGU Fall Meeting*, 2019.
- [20] Hu H, Weng F, Han Y, et al. Remote sensing of tropical cyclone thermal structure from satellite microwave sounding instruments): impacts of background profiles on retrievals. *Journal of Meteorological Research*, 2019, 33(1): 89-103.
- [21] Houze R A Jr. *Cloud dynamics*. New York: Academic Press, 2014.
- [22] Wang R, Fu Y. Structural characteristics of atmospheric temperature and humidity inside clouds of convective and stratiform precipitation in the rainy season over East Asia. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(5): 890-905.
- [23] Hu H, Han Y. Comparing the thermal structures of tropical cyclones derived from Suomi NPP ATMS and FY-3D Microwave Sounders. 2020 IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020.
- [24] Han Y, Yang J, Hu H, et al. Retrieval of oceanic total precipitable water vapor and cloud liquid water from Fengyun-3D microwave sounding instruments. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(2): 371-383.
- [25] Hu H, Weng F. Estimation of location and intensity of tropical cyclones based on microwave sounding instruments. 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2020.
- [26] Lambriqtsen B, Wilson W, Tanner A, et al. GeoSTAR—a microwave sounder for geostationary satellites. 2004 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2004.
- [27] Christensen J, et al. GAS: the Geostationary Atmospheric Sounder. 2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007.
- [28] Zhang C, et al. Imaging Analysis and First Results of the Geostationary Interferometric Microwave Sounder Demonstrator. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2015, 53(1): 207-218.
- [29] Lambriqtsen B, Dang H V, Turk F J, et al. All-weather tropospheric 3-D wind from microwave sounders. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(6): 1949-1956.
- [30] Ma Y, Zou X, Weng F. Potential applications of small satellite microwave observations for monitoring and predicting global fast-evolving weathers. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2017, 10(6): 2441-2451.
- [31] Blackwell W, et al. Nanosatellites for earth environmental monitoring: the MicroMAS project. 12th Specialist Meeting on Microwave Radiometry and Remote Sensing of the Environment (MicroRad), 2012: 1-4.
- [32] Cahoy K, et al. Development of the Microwave Radiometer Technology Acceleration (MiRaTA) CubeSat for all-weather atmospheric sounding. 2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015: 5304-5307.
- [33] Blackwell W J. An overview of the NASA tropics earth venture mission. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017: 5934-5937.
- [34] Reising S C, et al. Overview of Temporal Experiment for Storms and Tropical Systems (TEMPEST) CubeSat constellation mission. 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2015: 1-4.
- [35] Ruf C, et al. CYGNSS: enabling the future of hurricane prediction [remote sensing satellites]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 2013, 1(2): 52-67.
- [36] Ruf C S, et al. New ocean winds satellite mission to probe hurricanes and tropical convection. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2016, 97(3): 385-395.