

卫星反演风场进展概述

李艳兵^{1,2} 黄思训² 翟景秋³

(1 解放军 66199 部队气象中心,北京 100144) (2 解放军理工大学气象学院,南京 211101)

(3 解放军 61741 部队气象中心,北京 100081)

摘要 本文主要介绍利用卫星资料反演风场的三种方法——云迹风与水汽导风反演,海面风场反演及整体风场的构建方法,包括它们研究的历史、业务现状及算法原理等内容,对三种方法的精度、实用性进行了对比与评说,指出了反演中存在的问题,同时对未来发展作了展望。

关键词 海面风场反演 整体风场构建 综述

分类号 P405 **文献标识码** A

A review of satellite wind retrieval technologies

Li Yanbing^{1,2} Huang Sixun² Zhai Jingqiu³

(1 Meteorology Center of Troop 66199 PLA, Beijing 100144, China)

(2 Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

(3 Meteorology Center of Troop 61741 PLA, Beijing 100081, China)

Abstract Three kinds of satellite wind retrieval technologies: cloud and water vapor track wind, sea surface wind retrieval, whole wind field construction are summarized. Their research history, operational status, algorithm principle and etc. are introduced. Their precision and practicability are compared. After that, existing problems are pointed out and possible solutions to them are suggested for future development.

Key words Sea surface wind retrieval Whole wind field construction Reviews

引言

气象卫星资料为天气预报和气候变化监测提供了大量的有用信息,从而大大地提高了天气预报和自然灾害监测的能力。随着新的气象卫星投入使用和卫星观测仪器性能的不断提高,探索如何更好地利用其观测资料是一项十分有价值的工作。

反演风场是气象卫星应用的一个重要方面。尽管当前可采用无线电探空仪、风廓线仪、多普勒雷达资料反演等手段来获得风场^[1-4],但观测频次和探测范围仍有较大不足,特别在海洋上,风场的观测缺乏,于是利用卫星来观测和反演风场就显得尤为重要,这对于数值预报初始场的构造、台风、高空急流及水汽输送的研究等都具有非常重要的意义。

实际上,当“卫星风”概念的业务实现还没有多久的时候,它的意义就已经发生了变化,不再只是单一的示踪云表示的风。当前,卫星反演风场的技术有多种,本文主要介绍三种:云迹风和水汽导风、海面风场反演及整体风场的构建。

除了这三种还有其他的方法,例如:辐射仪红外通道观测的大气顶部的射出长波辐射(OLR),可反映众多的海洋和大气信息,其中包括了大气的垂直运动和散度风,由 OLR 出发,根据经验公式进行一定的计算,可推算出高低层的散度风及垂直速度,用于气候学研究^[5];欧空局(ESA)计划中的地球探测卫星 ADM - Aeolus 将采用主动多普勒风激光雷达(DWL)实现对风的直接观测,是对风场观测技术的新探索^[6]。

收稿日期:2007-07-09;修改稿日期:2007-10-23

基金项目:国家自然科学基金项目(40775023)

第一作者简介:李艳兵(1979-),男,山西汾阳,博士,主要从事遥感信息处理、大气参数反演的研究. leeyork_yanbing@163.com

1 云迹风和水汽导风

云迹风和水汽导风是利用连续观测的卫星云图中云和水汽特征来反演风场,所得风矢量目前统称为大气运动矢量 AMV (Atmospheric Motion Vector)。

1.1 业务现状

目前世界各大大国气象部门都在进行 AMV 产品的业务化生产。由 EUMETSAT 主办,每两年举行一次的国际风会议专门就 AMV 的工作进展进行交流和评论,最近的一次是 2006 年 4 月(第 8 届),这次会议的内容展示了当前各国 AMV 产品的业务状况^[7]。

我国利用 FY-2C 卫星数据生成业务化 AMV 产品开始于 2005 年 6 月,由国家卫星气象中心实施。星蚀期间每天生成 3 次,平时每天生成 4 次,每 6 h 1 次,利用间隔 30 min 的 3 幅图像得到,分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$; 高度指定利用红外和水汽通道联合进行,还利用了国家气象中心提供的 T213 数值预报产品中的温度廓线;空间连续性质量控制按照 3 个分层进行,即 399 hPa 以上、400 ~ 699 hPa、700 hPa 以下;产品每月要与无线电探空数据进行对比。2006 年底我国又发射了 FY-2D 静止气象卫星,与 FY-2C 联合观测可缩短图像时间间隔。

日本气象局的气象卫星中心 1978 年就开始从 GMS 的可见光和红外图像生成 AMV,1995 年开始利用水汽通道,GMS-5 失效后一段时间利用 GOES-9。2005 年 7 月开始利用 MTSAT-1R 图像生成 AMV,新的产品与 GMS 相比具有一些新特性:6 h 一次的产品由 15 min (GMS 是 0.5 h) 间隔图像来得到,AMV 数量得到增加;几乎每个小时可得到一次由 0.5 h 间隔图像生成的北半球 AMV 产品,正在进行把 AMV 资料同化到数值预报模式中去的实验。

欧洲 EUMETSAT 利用静止卫星 Meteosat 系列的资料生成 AMV 产品,第 1 代卫星 MFG 可得到 160 km 和 80 km 分辨率两种产品,第 2 代 MSG 可得到 80 km 和 32 km 分辨率两种产品。MFG 产品一般每 90 min 一次,利用 3 幅图像生成;MSG 产品 1 h 一次,利用 4 幅间隔 15 min 图像生成。

美国一直利用 GOES 业务双星来生成 AMV 产品,后来又增加了 TERRA 和 AQUA 卫星 MODIS 产品,与其他国家相比,其产品种类更多,内容更丰富:3.9 μm 短波红外云迹风产品的生成开始于 2004 年 7 月;MODIS 云和水汽导风产品开始于 2005 年 9

月,其特别之处是利用极轨卫星探测器生成,专门针对极地,这种做法为 AMV 的研究开辟了新的思路,该产品现在已经被世界各国数值预报中心采用。

1.2 AMV 研究概况

最早的云迹风反演试验是在美国国家环境卫星中心进行的,根据连续观测的 ATS-I 静止卫星图像的动画,人工判断高度,用手工标注出风矢量。后来,Leese^[8]用计算机实现了自动制作风矢量,仍利用 ATS-I 卫星图像,方法的核心是图像匹配的交叉相关法,这种方法一直沿用至今。由于交叉相关计算量很大,为了省时,Leese 还利用快速傅立叶变换来求协方差,使算法更能接近业务化使用,其他研究者则采用了不同策略,包括利用数值预报风场作为猜测值缩小搜索范围等^[9-10]。

虽然 AMV 的自动计算技术 1970s 就已经由 Leese 提出,但是他主要针对的是低层风,对于中高层风,还有很多问题需要研究。第一个全自动的云迹风软件直至 1992 年才在 NESDIS (美国国家环境卫星和资料信息局)投入业务使用,之前的 1970s—1980s, NESDIS 采用人工和计算机相结合的方法来计算云迹风^[9]。NESDIS 之后,其他国家的气象部门也相继实现了云迹风的业务化生成。

不论人工或是自动,云迹风生成的一般过程是:先选取合适的目标追踪云,再对相邻时刻图像进行匹配,确定云目标的位移,从而得到风矢量,然后估算目标云所在高度,即估计风矢量的高度,最后对风矢量进行质量控制^[11]。

云迹风是在可见光或红外通道图像中依靠追踪云来得到的,所以不适合晴空区,这是云迹风技术的局限。用水汽吸收通道图像反演风场(水汽导风)克服了这个困难。水汽导风的反演与云迹风反演的原理基本上一致。Eigenwillig^[12]较早探讨了利用水汽图像来进行湿气特征跟踪的可能性,之后 Stewart^[13]用 GOES 图像做试验,证实了这种可能。随后,Hayden^[14]和 Laurent^[15]等继续进行了深入的研究,使经自动化提取的水汽导风具备了较高的质量,可与云迹风相比。需要注意的是,水汽导风一般只能得到上层大气的运动状况。水汽导风的业务化生成是从 1993 年开始的,欧洲空间活动中心开发的算法,利用 Meteosat 的高质量水汽观测图像生成。

得益于静止气象卫星技术的成熟,AMV 的研究开展逐渐深入,美国、日本、欧洲的气象组织做了大量的工作^[11,16]。我国在这一领域的研究开始于 1980s 末期,在科技部“八五”公共课题的支持下,国

家气象局国家卫星气象中心、南京气象学院、北京大学等单位分别开展研究,直到现在,许健民院士等气象工作者在这方面做了十分有益的工作^[17-19]。

虽然 AMV 反演在实际中得到广泛的应用,由于风场反演靠两个图像块的相关匹配来实现,这使反演精度受到一定的限制,如何设计一种更精确更有效的算法仍然是研究的热点。

1.3 风矢量的高度指定问题

云迹风技术一提出,如何确定风矢量的高度就成为摆在我们面前的一个难点。目前国际上通常采用两种方法:

(1)利用当时的垂直温度廓线的物理方法。

先确定云顶的温度,再利用当时的垂直温度廓线计算云高。对于不透明云,云顶温度可以直接用红外窗区辐射转化得到的等效黑体温度来近似(注意这要基于一个假设:云充满视场。小块的积云可能不符合)。对于半透明云,云顶温度单独用一个红外通道是无法得到的,所以很多人尝试结合一个可见光通道来实现^[20],但这样实现只能在白天进行。Szejwach^[21]提出了用一个红外窗区 $11.5\ \mu\text{m}$ 通道和一个水汽 $6.5\ \mu\text{m}$ 通道共同指定半透明卷云云顶温度的水汽截距法。后来, Menzel^[22]等人利用二氧化碳吸收通道 ($13.3\ \mu\text{m}$, $14.0\ \mu\text{m}$, $14.2\ \mu\text{m}$) 来指定云的高度,利用晴空与有云时在吸收通道接收辐射的差异,以及不同高度云对 3 个通道辐射吸收能力的差异,把云分为高中低 3 层,该方法基本适用于所有云,但对观测仪器的要求比较高。国内,许健民院士等人研究发现,在红外和水汽两个通道图型的分布中,存在云所在高度的信息,可对双通道算法进行有效改进,对高云和中低云进行了区别处理,提高了云高指定的精度,由于在计算中利用了大气中大量存在的薄卷云,使得云迹风的分布更合理^[23]。

(2)立体观测法。

不考虑复杂的物理过程,而是纯粹从几何学的角度出发进行计算,被称为立体观测方法。这种方法的好处在于它只依赖于云块的基本几何关系,其他方法则要依赖于云的发射率、周围温度及递减率等,还要假定云满足局部热力学平衡^[24]。立体观测方法虽然难以业务化,但精度较高,可以作为一种真实性检验依据。目前,双星联合观测、单星多角度观测等的研究已取得了一些成果^[25]。

由于水汽导风的高度与云高无关,从而使计算受到很大的限制。欧洲空间中心提出的算法是:考

虑到追踪目标是高层云或纯水汽,它们的亮温要比背景低,首先计算目标区中所有辐射值较低的 20% 像素的辐射平均值,然后利用普朗克函数和辐射计过滤函数计算亮温,最后用欧洲中期数值预报中心的温度预报结果与之对比找到最佳气压层^[26],这亦是一种十分有效的算法。

2 海面风场反演

海面风场是海洋学和气象学的重要物理参数之一。利用卫星对海面风场进行观测对于解决海上常规资料匮乏的问题具有重大意义。

2.1 业务现状

1978 年发射的 Seasat-A 卫星装载的散射计 SASS 在 108 d 运行中所积累的海面风场数据量超过近百年海面风场常规观测数据量。经过 10 多年的研究和改进,以 1991 年 ERS-1 卫星装载的散射计为标志,卫星散射计进入业务化运行,卫星海面风场逐渐被广泛使用。当前,较成熟的能提供海面风场信息的卫星传感器主要有主动探测的散射计和高度计,被动探测的微波辐射计等^[27-28]。

散射计的测风原理早在 1973 年的 Skylab 实验就得到了证实,之后发展的散射计主要包括: Seasat-A 上的 SASS, ADEOS-1 上的 NSCAT, QuickSCAT 上的 Seawinds, ERS-1 和 ERS-2 上的 AM I wind, Metop 上的 ASCAT。除了 Seawinds 和 ASCAT,其他仪器已失效。散射计具有 25 ~ 50 km 的分辨率,时间重复周期一般为 2 ~ 3 d,能给出中分辨率的海面矢量风速,其风速率精度为 $\pm 1.5\ \text{m/s}$,风向为 $\pm 20^\circ$ 。

高度计是另一种主动探测仪器,能给出沿轨方向高分辨率的海面风速率值,其精度为 $\pm 1.8\ \text{m/s}$ 。目前,海洋卫星 Jason-1 和 Envisat 上均载有高度计。

微波辐射计主要包括: Seasat-A 上的 SMMR, DMSP 上的 SSM/I, TRMM 上的 TMI, AQUA 上的 AMSR-E, ADEOS-2 上的 AMSR, Coriolis 上的 Wind-sat。除了 SMMR 和 AMSR,其他仪器均在工作。微波辐射计的分辨率较低(约 50 km),但它的刈幅很宽,能达 1 000 km 以上,加之载有微波辐射计的卫星较多,通常有 2 颗(或以上)卫星同时运行,因此,微波辐射计资料通常具有较短(小于 2 d)的重复周期,成为遥感方法获取大面积海面风速率的主要途径,风速率精度为 $\pm 2\ \text{m/s}$ 。

合成孔径雷达(SAR)作为微波雷达也能获得高空间分辨率的海面风场信息,但 SAR 的覆盖范围小(约 150 km),资料成本高,其时空覆盖率远远不能

满足中大尺度海面风场动态监测的需要。

上面介绍的各种探测仪器多来自美国和欧洲,海面风场产品的业务生成也主要由他们完成。我国目前没有海面风场遥感卫星,但计划中的HY-2A海洋动力环境卫星将装载雷达高度计和散射计,FY-3A将装载微波成像仪,将为我们观测海面风场提供强有力的支持。

2.2 研究概况

微波传感器测量海面风速率均是基于海面的后向散射或亮度温度,它与海面的粗糙度有关,而海面的粗糙度与海面风速率有一定的经验关系,现有的风速率算法都是依这些关系建立的。散射计比较特别,可以获得风向的信息,因为它采用多极化、多天线的观测方式观测不同入射角的散射截面。文献[27-28]介绍了卫星遥感海面风场的进展。下面我们主要介绍两种探测仪器的风场反演方法。

散射计反演风场的方法很多^[29]。Wentz最早提出了SOS(Sum-of-Square)反演方法,用来处理SASS散射计数据,该方法要求后向散射截面以对数形式表示,因此不能处理后向散射能量为负值的情况,而此种情况在信噪比较低时经常发生。1984年Pierson提出将最大似然法(MLE)用于风场反演的基本思想^[30],MLE法不再受后向散射测量值正负的限制。后来又提出了其他方法(如LS法,L1法),但研究表明MLE法更具优势,它对风场反演有其更深刻的理论根据,并且具有诸多利于实施的优点,包括后向散射测量值采用自然单位、取值范围不受限制等,因而被认为是目前风场反演的最佳方法,且被用于处理新近的Sea Winds散射计数据。

微波辐射计风速率反演算法从原理上可以分为三类:统计、半统计和物理算法^[31]。统计算法是从亮温和现场浮标测量数据推导出的经验关系式,如Goodberlet的改进D矩阵算法;半统计算法是由Schluesel和Luthardt研究的,类似于统计算法,除了在回归时使用辐射传输方程计算来模拟亮温;物理反演算法是Wentz提出的^[32],原理是使SSM/I测量结果与模拟的亮温差值最小。

传统的微波辐射计,如SSM/I可以提供海面风速率数据,但是不能得到海面风向信息。随着微波辐射计灵敏度和定标精度的提高,人们对其测量结果进行分析时发现:在同样的风速率条件下,随着极化方向与相对风向之间夹角的变化,辐射亮温也有0.5~5K的变化,并且这种变化在很大的入射角的范围内都存在,这就是风向信号所在^[32]。后来,人

们开始研究机载的全极化微波辐射计,取得了一些成功,2003年第一台星载全极化微波辐射计Wind-sat上天,为海面风场反演带来了新的手段,国内同行也进行了这方面的研究^[33]。

2.3 多星融合海面风场

为了更好地利用各种观测仪器得到的反演结果,对它们进行融合是很有必要的,既填补了数据空白,又可纠正系统偏差,得到更好的海面风场。

Atlas^[34]利用变分方法融合SSM/I表面风场、常规观测和ECMWF分析值,生成了变分分析风场。Atlas^[35]继续这种工作,得到了将近10a的全球海面风场数据集。如今,多种卫星反演海面风场间的融合技术得到发展,业务化生成的典型例子是:美国气候数据中心把遥感系统有限公司(RSS)利用多个卫星探测器(SSM/I, TM I, Seawinds, AMSR-E)反演生成的风场资料进行融合处理,得到可覆盖全球海洋的海面风速率场^[36],分辨率为0.25经纬度格点,每6h一次;最近又依据NCEP再分析资料加入了风向信息,使产品更加实用。该产品的生成反映了全球卫星观测概念的成功,新的卫星应考虑这一概念来设计升交点等参数,以配合现有卫星进行更有效的全球覆盖观测。

3 整体风场构建

卫星手段无法直接得到整体风场,但利用卫星反演的温湿廓线等信息,结合物理过程或统计手段可以间接获得整体风场。

3.1 物理方法

1969年,Nimbus-2卫星用红外谱仪(SRS)的观测首次得到了大气廓线,以后,利用卫星观测资料反演大气温度廓线的技术发展起来,如今有很多探测器支持这种反演,统计的和物理的算法实现了业务化。大气运动是与温度场紧密相关的,所以,利用温度廓线得到风场成为一种途径,基本原理是:对于大尺度大气运动,在地转平衡的假设下,利用温度廓线,通过对静力方程求积分可以得到位势高度场,再由其梯度可以计算地转风场。这方面研究可分成3个阶段:

(1)最初的研究始于1970s初,A mold^[37]利用Nimbus-5获得的温度廓线资料,先沿卫星轨道方向计算层间平均温度的梯度,再根据等压面间的热成风关系,以某个参考层为基础,可逐一计算其他各等压层上垂直于轨道的横截面上的准地转风分量,为了减小逐次累加引起的误差,文中使用500 hPa作为

参考层向上下方向分别计算。

参考层 (tie-on wind) 的概念之前已经提出了,如果参考层上的风场是已知的,那么结合温度廓线就可以利用热成风关系来得到各层次的准地转风(参考层上的风包含非地转成分,所以这样得到的风是准地转风)。Smith^[38]采用参考层是 1 000 hPa, Togstad^[39]是 700 hPa, Duncan^[40]认为应在对流层中部比如 500 hPa。然而,不管参考层在哪里,以当时的探测条件都是难以得到该层上的实际风场的,研究人员寄希望于云迹风的研究。A mold^[37]根据其他研究者关于云迹风高层和低层结果可以较合理地表示真实风场的结论,提出如果能更精确指定云顶的温度,那么就有希望得到两个参考层的风,便于准地转风的计算。到现在为止,云迹风和水汽导风的风场依然很不完整,甚至没有一个层次是比较完整的,所以用云迹风得到较好的参考层的想法目前还在探索之中。

(2)后来, Moyer^[41]从 Nimbus-6 温度廓线估计了地转风, Carle^[42]将这种风场与无线电探空得到的风进行了详细的比较,发现在考察的时段内两者相差在 5 m/s 以内。这时的研究已经使用了格点上计算的方法,得到地转风场更完整。并且, Moyer 不只计算地转风,还根据经验公式计算了梯度风,原以为在离心力明显的地方梯度风近似会比地转风好,但其试验结果表明“梯度风并没有比地转风结果更好”,这是个很重要的发现,后来的研究者多不再进行梯度风的计算。

参考层仍是必须的,这时一般趋于选择地表,表面风场通常要由一个辅助的边界层模式来计算;还要求有对表面气压场的估计,卫星无法进行这种有效估计,对于无气压观测的海上,则求助于数值天气分析。

(3) Atlas^[34]利用变分方法融合 SSM/I 表面风场、常规观测和 ECMWF 分析值,生成的风场具有较高的精度,可以作为参考层风场使用,这是一个非常有意义的工作,大大地促进了风场整体构建的研究,从此,以海面作为参考层就成为了主流。

Slonaker^[43]从 VAM 风场出发,由 TOVS 探测的温度廓线利用热成风关系来生成经向风场,从而研究水汽输送。Slonaker 的研究结果是很鼓舞人心的,但是, Zou^[44]分析认为 Slonaker 的方法中只利用热成风关系就估计垂直风廓线是不合适的,因为这样的风场不是质量守恒的。Zou 的方法中于是引入了一个拉格朗日乘子来进行经向风的质量守恒约

束,求解新的变分最优问题可得到质量守恒的经向风场。Zou^[45]继续此方面的工作,利用卫星观测资料来计算中高纬度海上三维风场。首先计算风场初值,然后根据质量守恒约束来调整,提出了两套方案:第一套方案是用经向质量输送守恒作为约束,先推导经向风,再用垂直积分质量守恒方程推导纬向风;第二套方案是用垂直积分质量守恒方程作为约束同时估算纬向风和经向风。两套方案得到的两种风场与 ECMWF 和 NCEP-NCAR 再分析资料及南大洋无线电探空资料进行了对比,大体的环流结构是相似的,方案一结果偏差较小。

Zheng^[46]之后又研究了极地高原上的风场反演问题,由于陆地上摩擦力的影响,热成风近似不一定满足,新算法中加入了边界层参数化方案,这使得风场初值计算变得复杂,而质量守恒约束变分调整方法与 Zou 是一样的。用全球数据同化系统 GDAS 的数据对新算法进行了模拟检验,取得了较好的结果,但尚未用实际的卫星资料来验证。

国内这方面研究亦逐步展开,冯学民^[47]利用极轨气象卫星垂直探测器资料分别作了微波和红外通道的温度场反演,然后利用地转风关系计算了地转风场,再由地转风场计算大气边界层摩擦层上层实际风场,继而计算近地面层风场,得到了四川盆地的风场,和实际探空结果比较,误差在允许的范围内。

3.2 统计方法

该方法是考察各层风之间的统计相关性,从而由已知求得未知层次上的风。Kishtawal^[48]采用经验正交函数 EOF 方法,由卫星观测资料来构造风场垂直结构。首先,利用印度洋上大量的无线电探空资料进行 EOF 分析得到两个主成分,分别与 250 hPa 和 800 hPa 层上有最大相关,结合物理过程分析认为这两层上的某种物理过程控制了整个风场。其次,认为云迹风大致是两层: 850 hPa 和 200 hPa,经过某种转换可得到 250 hPa 和 800 hPa 上整层的风。最后,将它们作为主成分,可近似计算出整个风场。

3.3 风场调整

黄思训^[49]就三维风场调整问题进行了理论研究,首先分析了 Sasaki 的变分最佳分析处理三维风场的方法,认为当观测资料没有高频成分时,变分最佳分析方法能收到良好效果,但当观测资料有高频成分及随机扰动时,变分最佳分析方法往往无法抑制高频成分。所以,他利用正则化思想,结合变分最佳分析方法及滤波技术对三维风场采用了广义变分

最佳调整,并进行了数值试验。理论分析和数值试验说明调整的效果十分明显。

4 方法对比

4.1 精度

上述3种方法各自所得风场的精度如何,客观评价是很难的,因为针对的区域和垂直层次等诸多因素都不统一,下面给出的精度来自各方研究结论的综合。

AMV风场精度一般通过与探空资料的对比来衡量,不同卫星、不同的具体方案得到的AMV的误差有差别,风速率误差一般在 5 m/s 内,风向误差一般小于 20° ;文献[10]中情况较好,风速率误差小于 3 m/s ,风向误差小于 10° 。

海面风场一般与浮标观测风做对比,不同探测仪器、不同求解方案反演的海面风场误差有差别,总的说来,风速率误差小于 2 m/s ,风向误差小于 20° 。

整体风场构建中,具有代表性的Zou^[45]的工作,第一套方案的风场与单个探空比较的结果,年平均 u 的偏差约 1 m/s , v 偏差更小,说明此种方法适合于气候研究。

总的说来,3种方法得到的风场的精度能满足一定的应用需要。

4.2 实用性

卫星反演得到的风场最终要为天气预报应用服务,应用的效果如何就显得十分重要。

云迹风和水汽导风技术诞生后,很快就被应用于数值天气预报的初始风场计算,欧洲中期数值预报中心、英国气象局等组织多年来对AMV的应用表明,在资料稀少的地区,AMV的影响大,静止气象卫星的AMV风对数值预报的影响在热带和南半球是正反馈;由于在极地地区各种资料都十分匮乏,极轨卫星得到的MODIS风对数值天气预报有非常明显的正反馈^[11]。我国数值预报工作者也做了很多工作,把AMV用于大暴雨、台风等的预报,取得了较好的预报效果。

卫星反演海面风场数据在海洋、大气研究方面已显示出无比的优越性。尽管在过去的几十年里,台风预报技术不断的日臻完善^[50],但台风路径的预报误差的改善不大,其中一个重要原因在于缺乏台风内部结构资料和对台风活动物理机制的认识不足。利用卫星反演海面风场可以获得台风的精细结构并且从风速的分布可以看出台风的不对称性结构^[28],对台风的预报有积极作用。

整体风场的构建被成功地用来研究水汽输送^[44],更重要的应用则是台风涡旋的构造,Zhu^[51]利用AMSU反演温度廓线,并通过求解非线性平衡方程来构建三维风场,然后将该非对称涡旋结构用于台风模拟,取得了不错的效果。

4.3 存在的问题

(1)计算AMV时,高度指定仍是难点,几何方法如能走向业务化则可能带来重大改变;当前计算的AMV分布在不同高度上,难以有效利用,需要研究更好的后处理方法,使得某些层次的风更完整,则可用于整体风场构建;图像块精确匹配也需要有进一步改进。

(2)后两种方法多以极轨卫星的观测为基础,这会制约其业务化应用,因为极轨卫星的观测在时间上是很不连续的,在空间上范围也很有限。多星联合观测加上数据融合应是好的解决方案,海面风场融合已经有了较好的开端,以后还要促进温湿廓线数据的多星融合,从而使整体风场构建方法的时效性增强;发展静止卫星探测器是更理想的方案。

(3)海面风场的反演中,风向信息还比较缺乏,探测仪器和反演算法需要进一步改进。

(4)整体风场构建中,温湿廓线的反演受降水和云的影响仍是问题,由下层风场上推时,边界层的影响需要考虑,所得风场才能更准确。

(5)卫星探测器的分辨率有待提高,这样才能使反演的温湿廓线及构建的整体风场有可能用于较小尺度天气现象的研究,而不像当前仅限于大尺度。

(6)对卫星反演的风场,要进行广泛深入的误差分析工作,以便为之后的同化工作做充分的准备,使遥感工作者的成果能够更快捷有效地为预报工作者所用。

5 结束语

1970s开始起步的卫星反演风场研究,至今已有三十多年了,发展了许多种方法,本文介绍了主要的3种,AMV是相对高层的风,海面风场是低层的风,整体风场构建当前一般会用到海面风场,如果有更好的观测体制来克服极轨卫星时效性差的问题,并有效结合高层的AMV,则得到的整体风场可能更真实有效,再将这样的风场引入同化系统,则有望进一步提高台风等的数值预报的精度。

参 考 文 献

- [1] 彭霞云, 闵锦忠, 周振波, 等. 单多普勒雷达反演风场的质量控制. 南京气象学院学报, 2007, 30(1): 79-85.
- [2] 朱琳, 寿绍文, 彭加毅, 等. 集合卡尔曼滤波同化探空资料的数值试验. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 264-271.
- [3] 张少波, 陆汉城, 康建伟. 一次超级单体风暴多普勒天气雷达资料的低层风场反演研究. 气象科学, 2007, 27(2): 147-154.
- [4] 徐芬, 夏文梅, 胡志群, 等. 多普勒天气雷达风场产品在螺旋度计算中的应用. 气象科学, 2007, 27(5): 495-501.
- [5] 蒋尚城. OLR反演热带散度风及垂直环流. 气象, 1994, 20(3): 50-56.
- [6] ESA. ESA's wind mission ADM-Aeolus <http://www.esa.int/esa/L/Padmaeolus.html>, 2007.
- [7] EUMETSAT. Proceeding of eighth international winds workshop. 2006.
- [8] Leese J A, Novak C S. An automated technique for obtaining cloud motion from geosynchronous satellite data using cross correlation. J. Appl Meteor, 1971, 10: 118-132.
- [9] Nieman S J, Menzel W P, Hayden C M, et al. Fully automatic cloud-drift winds in NESDIS operations Bull Amer Meteor Soc, 1997, 78(6): 1121-1133.
- [10] Xu J, Holmlund K, Zhang Q, et al. Comparison of two schemes for derivation of atmospheric motion vectors J. Geophys Res, 2002, 107(D14).
- [11] 许健民, 张其松. 卫星风推导和应用综述. 应用气象学报, 2006, 17(5): 574-582.
- [12] Eigenwillig N, Fischer H. Determination of midtropospheric wind vectors by tracking pure water vapor structure in METEOSAT water vapor image sequences Bull Amer Meteor Soc, 1982, 63: 44-57.
- [13] Stewart T R, Hayden C M, Smith W L. A note on water-vapor wind tracking using VAS data on McIDAS Bull Amer Meteor Soc, 1985, 66: 1111-1115.
- [14] Hayden C M, Stewart T R. An update on cloud and water vapor tracers for providing wind estimates Extended Abstracts Sixth Symp. on Meteorological Observation and Instrumentation New Orleans, LA, Amer Meteor Soc, 1987: 70-75.
- [15] Laurent H. Wind extraction from Meteosat water vapor channel image data J. Appl Meteor, 1993, 32: 1124-1133.
- [16] Velden C, Daniels J, Stettner D, et al. Recent innovations in deriving tropospheric winds from meteorological satellites Bulletin of the American Meteorological Society, 2005: 205-223.
- [17] 许健民, 张其松, 方翔. 用红外和水汽两个通道的卫星测值指定卫星风的高度. 气象学报, 1997, 55(4): 408-417.
- [18] 王振会, 许建明, Kelly G. 基于傅立叶相位分析的卫星导风技术. 气象科学, 2004, 24(1): 9-15.
- [19] 曹文博, 沈桐立. 卫星云导风资料应用于伴随同化系统的数值试验研究. 南京气象学院学报, 2007, 30(4): 495-502.
- [20] Shenk W E, Curran R J. A multispectral method for estimation of cirrus cloud top heights Journal of Applied Meteorology, 1973, 12: 1213-1216.
- [21] Szejwach G. Determination of Semitransparent Cirrus Cloud Temperature from Infrared Radiances: Application to Meteosat Journal of Applied Meteorology, 1982, 21(3): 384-393.
- [22] Menzel W P, Smith W L, Stewart T R. Improved cloud motion wind vector and altitude assignment using VAS. J. Climate Appl Meteor, 1983, 22: 377-384.
- [23] Xu Jiamin, Zhang Qisong, Fang Xiang, et al. Cloud motion winds from FY-2 and GMS-5 meteorological satellites Proceedings of the 4th International Winds Workshop. Saanen, Switzerland, EUMETSAT Publication, 1998: 24, 41-48.
- [24] Hasler A F, Strang J, Woodward R H, et al. Automatic analysis of stereoscopic satellite image pairs for determination of cloud-top height and structure. J. Appl Meteor, 1991, 30: 257-281.
- [25] Diner J D, Auner P G, Davies R, et al. New directions in Earth observing: Scientific applications of multiangle remote sensing Bulletin American Meteorological Society, 1999, 80: 2209-2228.
- [26] 蒋尚城. 应用卫星气象学. 北京: 北京大学出版社, 2006.
- [27] 齐义泉, 施平, 王静. 卫星遥感海面风场的进展. 遥感技术与应用, 1998, 13(1): 56-61.
- [28] 冯倩. 多传感器卫星海面风场遥感研究: [博士学位论文]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [29] 解学通, 方裕, 陈晓翔, 等. 基于最大似然估计的海面风场反演算法研究. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 30-33.
- [30] Pierson J L. A Monte Carlo comparison of the recovery of winds near upwind and downwind from the SASS-I model function by means of the sum of squares algorithm and a maximum-likelihood estimator. NASA Contractor Reports, 1984: 3839.
- [31] 王振占. 用 19.35GHz星载微波辐射计(SSM/I)亮温反演海面风速. 海洋技术, 2003, 22(2): 1-6.
- [32] Wentz F J. Measurement of oceanic wind vector using satellite microwave radiometers IEEE Trans Geosci Remote Sensing, 1992, 30(5): 960-972.
- [33] 王振占. 海面风场全极化微波辐射测量: [博士学位论文]. 北京: 中国科学院研究生院, 2005.
- [34] Atlas R, Hoffman R N, Bjom S C. Surface wind velocity over the oceans. Gurney R J, Foster J L, Parkinson C L, Eds. Atlas of Satellite Observations Related to Global Change. Cambridge University Press, 1993: 129-139.
- [35] Atlas R, Hoffman R N, Bjom S C, et al. A multiyear global surface wind velocity dataset using SSM/I wind observations Bull Amer Meteor Soc, 1996, 77: 869-882.
- [36] Zhang HuaMin, John J B, Richard W R. Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed Geophysical Research Letters, 2006: 33.
- [37] Arnold J E, Scoggins J R, Fuelberg H E. A comparison between Nimbus-5 THIR and IIPR temperatures and derived winds with rawinsonde data obtained in the AVE II experiment. NASA Contractor Rep., 1976: CR-2757.
- [38] Smith W L, Woolf H M. An intercomparison of meteorological parameters derived from radiosonde and satellite vertical temperature cross sections. NOAA Tech Report, NESS 71, National Environmental Satellite Service National Oceanic and Atmospheric Admin-

- istration, U. S Department of Commerce, Washington, D. C., 1974.
- [39] Togstad W E, Hom L H. An Application of the satellite indirect sounding technique in describing the hyperbaroclinic zone of a jet streak. *J. Appl Meteor*, 1974, 13: 264-276.
- [40] Duncan L D, Kays M. Determining nuclear fallout winds from satellite-observed spectral radiances R. and D. Tech Rept, ECOM-5529, Atmospheric Sciences Lab, U. S Army Electronics Command, White Sands Missile Range, New Mexico, 1974.
- [41] Moyer V, Scoggins J R, Chou N M, et al. Atmospheric structure deduced from routine Nimbus 6 satellite data. *Mon Wea Rev*, 1978, 106: 1340-1352.
- [42] Carle W E, Scoggins J R. Determination of wind from Nimbus 6 satellite sounding data. NASA Reference Publication 1072, 1981: 82.
- [43] Slonaker R L, Van Woert M L. Atmospheric moisture transport across the Southern Ocean via satellite observations. *J. Geophys Res*, 1999, 104: 9229-9249.
- [44] Zou C Z, Van Woert M L. The role of conservation of mass in the satellite-derived poleward moisture transport over the Southern Oceans. *J. Climate*, 2001, 14: 997-1016.
- [45] Zou C Z, Van Woert M L. Atmospheric wind retrievals from satellite soundings over the middle- and high-latitude oceans. *Monthly Weather Review*, 2002, 130: 1771-1791.
- [46] Zheng W, Zou C Z. An improved algorithm for atmospheric wind retrievals from satellite soundings over the polar regions. *Geophys Res Lett*, 2006: 33.
- [47] 冯学民, 但尚铭, 顾清源. 用极轨气象卫星垂直探测器资料计算四川盆地的风场. *四川气象*, 1999, 69(3): 49-50.
- [48] Kishtawal C M, Basu S, Pandey P C. An algorithm for retrieving vertical wind profiles from satellite-observed winds over the Indian Ocean using complex EOF analysis. *J. Appl Meteor*, 1996, 35: 532-540.
- [49] 黄思训, 滕加俊, 兰伟仁, 等. 利用正则化方法对三维风场的变分调整. *力学学报*, 2005, 37(4): 399-407.
- [50] 陈玉石, 韩桂荣, 焦圣明, 等. 用 ECMWF 数值预报产品预报台风路径. *气象科学*, 2008, 28(2): 205-211.
- [51] Zhu T, Zhang D L, Weng F Z. Impact of the advanced microwave sounding unit measurement on hurricane prediction. *Mon Wea Rev*, 2002, 130: 2416-2432.