

卫星遥感海面风技术现状及应用进展

窦芳丽 商建 郭杨 尹红刚 谷松岩

(国家卫星气象中心, 北京 100081)

摘要: 在常规观测资料稀少的洋面上, 利用卫星遥感海面风对数值预报模式初始场的构建、海上天气预报精度的提高等具有重要意义。对目前国内外在轨的卫星遥感海面风的各种微波传感器及产品特性做了较全面的评述, 并对比了主被动方式遥感海面风产品的异同。结合近年来卫星海面风反演技术的提高, 总结了卫星遥感海面风产品在数值天气预报同化、台风强度及路径预报改善和气候研究等方面的贡献, 同时展望了卫星遥感海面风技术及其资料在实际应用中的限制和有待进一步研究的内容。

关键词: 海面风, 微波遥感, 散射计, 辐射计

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.04.001

Satellite Remote Sensing of Sea Surface Winds: Technique Status and Application Progress

Dou Fangli, Shang Jian, Guo Yang, Yin Honggang, Gu Songyan

(National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081)

Abstract: Satellite measurement of sea surface winds (SSW) is important in creating the first field of numerical weather prediction (NWP) and improving the marine forecasting accuracy. This paper reviews the international and domestic satellite SSW measurement missions, and tells the main differences of measured SSW products between the intensive and passive ways. It also describes the contributions of satellite derived SSW products to the NWP data assimilation, forecasting the intensity and path of tropical cyclone, and to climate research. In addition, the restriction in SSW products applications and the direction of further study are discussed here.

Keywords: sea surface wind, microwave remote sensing, scatterometer, radiometer

0 引言

海面风通过驱动海洋环流, 影响全球及局地气候, 是重要的海洋学和气象学参数; 海上极端天气系统的风场更是严重威胁海上交通、军事活动以及渔业安全的重要预报要素。过去对于海面风的观测主要依赖于岛屿台站、船舶和浮标, 无法保证观测的时空连续性, 不能满足海洋灾害监测预警业务、海洋动力过程、气候研究和数值模式对于海面风资料的需求, 因此, 利用卫星来对海面风进行观测尤为重要。极轨卫星遥感设备, 尤其是微波遥感设备, 以其全球覆盖、全天候观测能力, 能够有效实现对全球海面风的连续准确观测。

卫星主动或被动微波仪器观测到的海面风是海面 10 m 高度处的等效中性稳定层结风 (equivalent neutral wind)^[1], 微波传感器测量海面风是基于海面的后向

散射或辐射亮温, 而影响海面散射和发射的海面毛细重力波同时由海面风切变和大气浮力决定, 卫星接收到的相同信号可能对应着不同的海面参考高度真实风速, 因此, 卫星观测到的是一种消除了大气层结状态影响的参考风, 而不是真实的海面风场。

极轨卫星遥感海面风的微波仪器^[2]按观测方式分为主动和被动仪器两类。主动仪器指雷达系统, 通过发射连续或脉冲形式的电磁波, 接收经过海面调制的回波信号, 对后向散射系数进行反演同时获取海面风速和风向; 被动仪器即微波辐射计, 其频点设计在不同的大气窗区, 接收到的海面亮温与风成海面粗糙度、海温、盐度以及大气状况相关, 通过多通道亮温组合反演可以消除其他环境参数的影响, 获得海面风速信息^[3-4], 全极化辐射计也能够对风向进行观测^[5]。近三十年来, 在众多卫星海面风观测任务的连续观测下, 已经获取了长时间序列的全球覆盖的海面风资料, 不同观测方式的微波传感器获得的海面风资料各有其特点和应用限制, 多卫星平台观测的融合海面风产品, 在气候分析等领域也有广泛的应用^[6]。

收稿日期: 2017年2月3日; 修回日期: 2017年6月14日
第一作者: 窦芳丽 (1986—), Email: doufl@cma.gov.cn
资助信息: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201506022)

本文对国内外卫星遥感海面风的各类微波仪器和产品特性进行了较详细的介绍,从产品角度分析了主被动方式观测海面风产品的异同,进而说明主被动联合反演或融合对于海面风应用的意义。结合目前资料在应用中存在的问题,对卫星遥感海面风产品的应用及发展进行了展望。

1 卫星微波仪器遥感海面风现状

极轨卫星微波传感器观测海面风的特点在于卫星能够进行大面积的连续观测,以满足气候及数值预报对于动态观测和长期观测的需求,微波对云和弱降雨的穿透性比较好,受大气的影响较小。星载微波散射计、辐射计、全极化辐射计、高度计和合成孔径雷达均可以对海面风进行观测。

1.1 主动微波仪器观测

当前比较成熟的能够对海面风进行业务观测的主动星载传感器包括微波散射计和高度计系统。微波散射计是能够同时测量海面风速和风向的星载雷达系统,通过精确测量海表的归一化后向散射截面(NRCS),间接测量海面附近的风速,同时在不同方向角测量风元(WVC)的后向散射确定风向。业务化运行的散射计提供的全球、全天候、高时空分辨率、高精度的海面风数据,在海洋学和气象学研究中做出了极大贡献^[7]。微波高度计垂直观测星下点海面的后向散射,能提供沿轨方向高分辨率的风速产品^[8]。其他海面风观测的主动仪器还包括星载合成孔径雷达等。

表1列出了过去和目前国际上的散射计观测计划,并给出了工作频率、分辨率、扫描方式以及服役时间。散射计测量海面风场的可行性于1973年被美国的S-193散射计试验首次证实,之后美国的散射计观测计划包括美国航空航天局(NASA)Seasat-A卫星上的

表1 国际上在轨运行过的散射计观测计划

Table 1 Summary of the international scatterometer missions in orbit

散射计	卫星	频率	扫描方式	服役时间
SASS	SeaSAT	Ku	扇形波束横扫方式	1978年6—10月
AMI	ERS-1	C	扇形波束横扫方式	1991年7月—2000年3月
AMI	ERS-2	C	扇形波束横扫方式	1995年4月—2011年7月
NSCAT	ADEOS-1	Ku	扇形波束横扫方式	1996年8月—1997年6月
Seawinds	QuikSCAT	Ku	笔形波束圆锥扫描	1999年7月—2009年11月
Seawinds	ADEOS-2	Ku	笔形波束圆锥扫描	2002年12月—2003年8月
ASCAT	MetOp-A	C	扇形波束横扫方式	2006年10月—
ASCAT	MetOp-B	C	扇形波束横扫方式	2012年9月—
RapidScat	ISS	Ku	笔形波束圆锥扫描	2014年10月—2016年8月
HY-2	HY-2	Ku	笔形波束圆锥扫描	2011年8月—
OSCAT	OceanSAT	Ku	笔形波束圆锥扫描	2009年9月—2014年2月

SASS, ADEOS-1卫星上的NSCAT, QuikSCAT卫星上的Seawinds以及国际空间站的RapidSCAT, 欧洲的散射计计划包括欧空局(ESA)在ERS-1和ERS-2卫星上装载的AMI, MetOp-A和MetOp-B卫星的ASCAT。其他还包括我国国家海洋局的HY-2散射计, 以及印度的OSCAT散射计等。

散射计反演风场的方法是最大似然估计(MLE)方法^[9], 在整个风矢量二维空间内搜索, 寻找使表征误差联合概率密度的目标函数达到局部最大值的风速和风向, 认为是真实解。由于逆风和顺风方向的探测获得的返回信号的差别不明显, 有可能出现多个模糊风向, 需要利用中数滤波或二维变分等技术对模糊解进行去除, 产品处理整体流程参见图1。

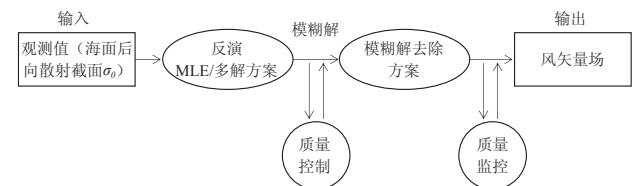


图1 微波散射计风矢量产品处理流程

Fig. 1 Flow chart of scatterometer wind vector product processing

目前业务中能够使用的海面风产品来自在轨运行的HY-2、ASCAT以及RapidSCAT, 它们分别于当地时间06:30/18:30、09:00/21:00、01:00/13:00附近经过中国区域。不同散射计观测频点、观测方式不同, 给出的海面风产品也有所区别。例如HY-2和RapidSCAT散射计采用Ku频段(13.5 GHz), 分辨率高, 对小风的反应更敏感, 但受云和降水的影响比较大, 有降水的风元一般经标识后去除或做重处理, 并且需要在预处理中进行大气校正。其笔形波束圆锥旋转扫描方式能实现更宽的刈幅宽度, HY-2的刈幅宽度内波束为1300 km, 外波束为1700 km。而ASCAT等欧洲研发的散射计采用C频段(5.3 GHz), 对较大风速的敏感性优于Ku频段, 并且对云和降水的穿透性更好, 但较低的频段也导致了较差的分辨率。横扫方式相比于锥扫, 刈幅宽度较窄, ASCAT单侧刈幅仅为550 km, 难以对大面积区域实现覆盖。HY-2的风速反演精度约为1.6 m/s, 风向反演精度约为20°, 风速反演误差的特征表现为在中等风速的情况下优于低风速和高风速, 风向反演误差随交轨方向位置变化, 在低风速情况下误差较大^[10]。ASCAT给出的u、v分量的反演精度约为1.6 m/s^[11]。

除了散射计, 高度计和合成孔径雷达也能对海面风实现业务观测。目前已经发射的星载高度计包括分别装载在ERS-1/2、TOPEX/POSEIDON、Jason-1/2、ENVISAT和我国HY-2卫星上的Altimeter传感器, 能提

供沿轨方向的风速产品，无法提供风向信息，刈幅宽度很窄，优势在于千米级的分辨率优于散射计，Ku波段与C波段同步测量，能够显著减小降雨对风速的影响^[12]。合成孔径雷达主要包括欧空局ERS-1/2上的SAR和ENVISAT上的ASAR，以及加拿大RADARSAT卫星上的SAR传感器，均为C频段。合成孔径雷达的空间分辨率能够达到几十米，但覆盖范围小，刈幅宽度在百千米级，很难满足大尺度海面风监测的需要^[13]。

1.2 被动微波仪器观测

用于海面风观测的微波辐射计包括多通道扫描成像辐射计和全极化辐射计两种。平静海面的微波辐射亮温仅与海温、盐度及电磁参数有关，而真实海面由于海面风的存在表现为不同尺度波构成的粗糙表面，辐射亮温与依赖于表面风的粗糙度及白沫效益相关联，基于这个原理，通过统计海面风与辐射计接收到的亮温之间的关系可以对风速进行反演^[14]。全极化辐射计不但测量微波辐射的正交极化分量，同时测量两个正交极化分量的复相关量，通过后两个Stokes参数来反演风向和去除模糊风向。

第一台多通道微波辐射计是1978年NASA发射的Seasat-A卫星上装载的SMMR，之后的星载微波辐射计包括DMSP系列卫星的SSM/I，TRMM上的TMI，Aqua上的AMSR-E，ADEOS-2上的AMSR，GCOM卫星上的AMSR-2以及我国FY-3B/C星上的MWRI，以及Coriolis上的全极化辐射计WindSat。表2给出了国际上已有微波辐射计的平台、频点设置，以及服役时间的信息。

表2 国际上在轨运行过的微波辐射计观测计划
Table 2 Summary of the international microwave radiometer missions in orbit

卫星	设备	观测频点	服役时间
DMSP-F08/10/11/13/15/16/17/18/19	SSM/I	19.35, 22.235, 37.000, 91.655	1978年—
TRMM	TMI	10.7, 19.4, 21.3, 37.0, 85.5	1997年11月—
Aqua	AMSR-E	6.9, 10.7, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0	2002年5月—
ADEOS-2	AMSR	6.90, 10.65, 18.70, 23.80, 36.50, 89.00, 50.30, 52.80	2002年12月— 2003年10月
GCOM-W1	AMSR-2	6.925, 7.300, 10.650, 18.700, 23.800, 36.500, 89.000	2012年8月—
FY-3B	MWRI	10.650, 18.700, 23.800, 36.500, 89.000	2010年11月—
FY-3C	MWRI	10.650, 18.700, 23.800, 36.500, 89.000	2013年9月—
Coriolis	WindSat	6.8, 10.7, 18.7, 23.8, 37.0	2003年1月—

微波辐射计反演风速的算法一般分为两大类，第一类是经验模型反演，第二类是结合辐射传输模式模拟亮温库的半经验模型反演，同时还有神经网络算法等，FY-3 WMRI海面风速产品的反演方法采用半经验

模型反演，图2给出产品处理流程。全极化微波辐射计的反演方法是首先建立海面辐射的Stokes分量与海面风矢量之间的关系函数，再利用物理统计、牛顿法和最大似然估计方法对风速和风向进行反演^[5]。

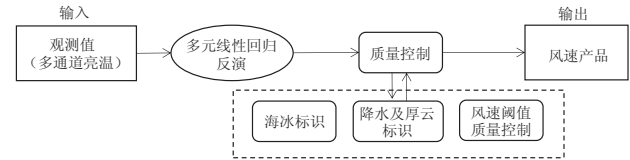


图2 FY-3微波成像仪风速产品处理流程
Fig. 2 Flow chart of FY-3 MWRI wind speed product processing

表2中列出的卫星除了DMSP系列早期已经退役的卫星和日本发射一年后即失效的ADEOS卫星之外，其他均在业务运行。不同微波辐射计的频点设置略有差异，频点差异在产品上反应为，SSM/I、TMI和MWRI等辐射计反演风速需要先做降雨判识，去除掉雨区的无效数据，如果辐射计包含低频6.9和10.7 GHz，结合新的算法能够获取全天候风速产品，减小降雨和云对产品的影响，比如，AMSR-E 6.9和10.7水平极化的两个通道能够用于估计雨区甚至台风外围风暴区的海面风速^[15-16]。微波辐射计风速产品的另一个优势在于刈幅较宽，例如FY-3 MWRI的扫描刈幅为1800 km，因此更适合应用于大、中尺度系统和较长时间平均的海面风场观测。

1.3 主被动观测的比较

根据1.1和1.2节的分析，主动和被动微波仪器观测海面风的机理不同，仪器频点和扫描方式有差别，这些都是导致主被动观测的产品各有其特点的原因。过去的研究表明，散射计相对于被动辐射计风速反演精度更高^[17]，SSM/I、TMI最初反演的风速与NSCAT、QuikSCAT相比存在比较大的系统偏差，一致性在海表发射率模型升级后得到了改善；ADEOS-2卫星上同时装载了散射计Seawinds和辐射计AMSR，对二者同步观测的风速交叉比对结果表明，二者反演的风速一致性较好，但在小于5 m/s的低风速区间，AMSR反演的风速明显偏小^[18]。在高风速下，微波散射计测量的海面后向散射系数会出现饱和现象，即随着风速的增加，高风速下波浪破碎和白沫效应掩盖了布拉格散射信号，后向散射会趋于稳定，不再有明显增长，因此散射计对较大的风速敏感性较差，而Shibata等的研究证明微波辐射计的6.9和10.7 GHz通道对高风速（33~72 m/s）有较好的响应^[16]，再加上低频对云和降雨更好的穿透能力，能够在台风区域进行应用。

利用散射计和同步观测的辐射计进行联合反演,能够结合主被动观测的优势。被动辐射计可以用来为散射计做大气校正, Hilburn等的研究表明可以利用AMSR的数据研究降雨对Seawinds雷达回波的影响,并进行降雨影响去除^[19]; Wentz、Alsweiss等的研究表明, SeaWinds-AMSR联合算法反演的风矢量精度更高,能够用于风暴区域的反演^[20-21],同时AMSR能为海面风产品提供准确的降雨和海冰标识。除了主被动联合反演算法的研发,将多源卫星的主被动风产品进行融合也是应用的主要方向,NASA的物理海洋学分布式档案中心以ECMWF的再分析资料为背景场,采用变分方法同化QuikSCAT、ADEOS、AMSR-E、TMI和SSM/I等多种卫星探测洋面风资料和传统的船舶、浮标资料,合成了一种新的交叉定标多平台海面风场资料(CCMP),在海洋和气象学中得到了广泛应用,该产品能够提供6 h一次的全球格点风场,能够填补一天内的数据空白,又能够校正不同传感器的系统偏差和定标误差^[22]。

2 卫星海面风产品应用进展

卫星海面风资料的主要应用是通过提供近海面的流场信息,使预报员了解大气运动过程,预测海上天气,尤其是用于改进台风的定位、强度及路径的预报。近年来,卫星海面风资料在数值天气预报中发挥了越来越重要的作用,包括欧洲、日本和美国的几大天气预报中心都已将卫星海面风数据同化到业务数值预报模式中^[23]。海面风对于气候研究的重要性也已经被广泛认识,用于季风、厄尔尼诺、大气的辐合性等方面的研究。

2.1 数值天气预报中的应用

Cane等首次证实在数值天气预报模式中同化散射计风产品能够显著提高预报精度^[24]。随后的研究表明散射计海面风产品对全球模式预报的改进效果在南半球和热带更显著^[25-26],对北半球预报改进效果不大,在区域试验例如热带气旋个例试验中能发挥较大的作用:Atlas等的研究表明NSCAT数据的同化能够改善南半球预报^[27],Chang等将NSCAT数据用于改善热带中尺度降水系统的预报^[28],国内的一些学者也针对QuikSCAT资料的同化做了一些研究^[29-30],结果表明散射计风场资料对台风的大风圈、中心位置的分析 and 预报有正效应,王亮等构造非对称台风风场模型,与QuikSCAT资料相结合共同改善模式初始场,台风整层风场的强度和路径模拟都有了很大改进^[31]。Kazumori利用日本气象厅的四维变分同化系统,研究了AMSR-E的亮温和全天候风速产品对热带气旋个例

预报的作用,结果表明对其路径预报没有明显改善,但改进了强度和最大风速的预报^[32]。

限制海面风资料在数值模式中同化效果的原因是反演精度有限,数值预报模式中边界层方案不成熟,同时表面层信息很难向上层传输。

2.2 热带气旋预报中的应用

尽管台风预报技术不断完善,但台风的路径和强度的预报精度却没有质的提高,卫星海面风场资料能够刻画台风的内部近海面流场,分析台风的不对称结构,分析台风外围环流对于分析其走向和强度变化也有一定的作用。

除了2.1节中提到的卫星海面风产品在数值天气预报模式同化中对台风强度、路径预报的应用之外,海面风产品在热带气旋领域的其他应用还包括:Hsu和Liu利用ERS-1散射计数据,计算了台风Oliver的海平面气压场,对台风的强度和路径预报产生正贡献,他们的研究还表明,基于海面风场计算的相对涡度能够用于评估台风的气候态尺度^[33]。Katsaro等利用1999年飓风季的QuikSCAT数据对热带气旋进行监测,发现QuikSCAT提前几天就能够识别热带低压强度的闭合环流,这对于热带气旋生成的监测是非常重要的^[34]。Liu也利用QuikSCAT来追踪海表的涡旋,这些涡旋尺度太小,很难被数值模式预测,散射计被认为是研究和追踪这些小涡旋的最佳工具^[35]。我国的一些学者也就QuickSCAT资料对台风定位、路径分析及暴雨预报的作用做了一些有益的研究^[36-38],表明海面风资料对台风尤其是眼区不明显的弱台风的定位定强,以及强度发展和移动趋势预报能够发挥独特的作用。

2.3 气候应用

海表风应力能够驱动海气之间的热通量、水汽通量、气体通量和海洋环流,从而影响区域和全球气候。气候学研究对于海面风产品的需求对于卫星海面风观测计划的发展是决定性的。Liu等利用6年的ERS散射计和Topex/Poseidon高度计数据,计算了南海的风应力旋度的季节环流和海平面变化,证明了二者之间的负相关与季风后的Ekman抽吸有一致的季节变化^[39];Liu等在厄尔尼诺研究中利用ERS风场和高度计风速产品计算了西太平洋的西风异常和海平面变化,利用NSCAT产品揭示了1997年ENSO现象中西太平洋的西风异常与赤道太平洋暖湿气流之间的联系^[40]。国内的谢强等利用ERS卫星数据和其他资料,比较分析了中国南海海域几种风应力资料的特点,发现卫星遥感产品具有分辨率高、量值合理的特点^[41];蒋兴伟等收集NSCAT、QuikSCAT和SeaWinds的全球海面风矢

量数据,通过对所收集数据的质量控制、滤波处理,构建了气候态的月平均风场、风应力场和风应力旋度场,用于海气相互作用、海洋中小尺度过程等方面的研究^[42]。

3 结论与展望

目前卫星遥感海面风的技术已经日趋成熟,海面风资料的独特性也已经在应用中得以体现。然而,也存在着一些限制应用的条件和技术上需要改进的问题。海面风资料不管应用于数值天气预报,还是用于天气分析和气候研究,其精度是影响应用效果的主要因素。不管是微波散射计、高度计、SAR,还是微波辐射计,在大风和强降雨区域的反演精度仍不能令人满意,这限制了卫星海面风产品对极端天气预报和分析的能力。主被动联合反演算法的研发是改善这个问题的一个主要方向,被动微波辐射计的低频通道观测亮温对大风有更强的响应,并且能够提供辅助的降雨数据,对主动雷达的回波做降雨订正,对极端天气条件下海面风产品的精度提高将会有非常大的帮助。

无论是风应力的计算,热带气旋中心位置的确定还是外围环流的分析,风向的反演精度都极为重要。全极化辐射计和散射计获得的海面信号在逆风和顺风方向的差别不明显,加之大气的影响、仪器的噪声,会造成微波传感器反演的风向存在顺/逆风模糊解问题,目前的解决方案是通过背景场信息来对模糊解进行选择,这在海面风产品应用在同化系统时会造成信息重复的问题。这就需要在仪器扫描方式设计时,在扫描周期内合理分配观测方位角和定标单元,减小模糊解出现的可能^[43]。

单一的卫星传感器提供的海面风资料在时间和空间上的覆盖率有限,日数据的刈幅之间存在数据空白,多星融合产品能够融合众多传感器观测到的海面风场,减小定标偏差和系统偏差,提供时间上连续、空间上实现全球覆盖的海面风资料,也是卫星遥感海面风产品发展的一个重要方向。

参考文献

- [1] Liu W T, Tang W Q. Equivalent Neutral Wind. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory Publ, 1996.
- [2] 李艳兵, 黄思训, 翟景秋. 卫星反演风场进展概述. 气象科学, 2009, 29(2): 277-284.
- [3] Chang A T C, Wilheit T T. Remote sensing of atmospheric water vapor, liquid water, and wind speed at the ocean surface by passive microwave techniques from the Nimbus 5 satellite. Radio Science, 1979, 14(5): 793-802.
- [4] Hollinger J P. Passive microwave measurements of sea surface roughness. Geoscience Electronics IEEE Transactions on, 1971, 9(3): 165-169.
- [5] 王振占, 姜景山, 刘璟怡, 等. 全极化微波辐射计遥感海面风场的关键技术和科学问题. 中国工程科学, 2008, 10(6): 76-86.
- [6] 郑崇伟. 基于CCMP风场的近22年中国海海表风场特征分析. 气象与减灾研究, 2011, 34(3): 41-46.
- [7] 张毅, 蒋兴伟, 林明森, 等. 星载微波散射计的研究现状及发展趋势. 遥感信息, 2010, (6): 87-94.
- [8] 姜祝辉, 黄思训, 刘刚, 等. 星载雷达高度计反演海面风速进展. 海洋通报, 2011, 30(5): 588-594.
- [9] 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.
- [10] 穆博, 林明森, 彭海龙, 等. HY-2卫星微波散射计反演风矢量产品真实性检验方法研究. 中国工程科学, 2014, (6): 39-45.
- [11] Verhoef A, Stoffelen A. Validation of ASCAT 12.5 km winds. Ocean and Sea Ice SAF, 2009.
- [12] 陈戈, 方朝阳, 徐萍. 利用双波段补偿法提高卫星高度计海面风速反演精度. 中国图像图形学报, 1999, (11): 970-975.
- [13] 张毅, 陈永强, 朱敏慧. SAR海面风场反演研究. 电子测量技术, 2007, 30(2):36-38.
- [14] 窦芳丽, 安大伟, 李嘉睿. 基于FY-3B微波成像仪的海面风速反演. 遥感技术与应用, 2014, (6): 984-992.
- [15] Saitoh S, Shibata A. AMSR-E All weather sea surface wind speed. Tenki, 2010, 57: 5-17.
- [16] Shibata A. A wind speed retrieval algorithm by combining 6 and 10 GHz data from Advanced Microwave Scanning Radiometer: wind speed inside hurricanes. J Oceanogra, 2006, 62(3): 351-359.
- [17] Mears C A, Smith D K, Wentz F J. Comparison of Special Sensor Microwave Imager and buoy-measured wind speeds from 1987 - 1997. J Geophys Res Atmos, 2001, 106(C6): 11719-11729.
- [18] Ebuchi N. Evaluation of marine surface winds observed by seawinds and AMSR on ADEOS-II. J Oceanogra, 2006, 62(3): 293-301.
- [19] Hilburn K A, Wentz F J, Smith D K, et al. Correcting active scatterometer data for the effects of rain using passive radiometer data. J Appl Meteor Climat, 2006, 45(3): 382-398.
- [20] Wentz F J, Smith D K, Mears C A, et al. Advanced algorithms for QuikScat and SeaWinds/AMSR. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001, 3:1079-1081.
- [21] Alsweiss S O, Laupattarakasem P, Jones W L. A novel ku-band radiometer/scatterometer approach for improved oceanic wind vector measurements. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2011, 49(9): 3189-3197.
- [22] Atlas R M, Hoffman R N, Ardizzone J V, et al. The cross-calibrated, multi-platform (CCMP) ocean surface wind product: current status and plans. American Geophysical Union, Fall Meeting 2009, 2009.
- [23] Atlas R, Hoffman R N. Chapter 4 The use of satellite surface wind data to improve weather analysis and forecasting at the NASA Data Assimilation Office// Elsevier Oceanography Series. Elsevier B V, 2000.
- [24] Cane M A, Cardone V J, Halem M, et al. On the sensitivity of numerical weather prediction to remotely sensed marine surface wind data: a simulation study. J Geophys Res Ocea, 1981, 86(C9): 8093-8106.
- [25] Anderson D, Hollingsworth A, Uppala S, et al. A study of the use of scatterometer data in the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts operational analysis-forecast model. 2. Data impact. J Geophys Res Atmos, 1991, 96(C2):2635-2647.
- [26] Yu T W, McPherson R D. Global data assimilation experiments with scatterometer winds from SEASAT-A. Mon Wea Rev, 1984, 112(2): 368-376.
- [27] Atlas R, Bloom S C, Hoffman R N, et al. Geophysical validation of NSCAT winds using atmospheric data and analyses. J Geophys Res Atmos, 1999, 104(C5): 11405-11424.
- [28] Chang C P, Lin S C, Liou C S, et al. An experiment using NSCAT winds in the numerical prediction of tropical mesoscale rainfall systems under the influence of terrain. Geophys Res Lett, 1999, 26(3):311-314.
- [29] 刘春霞, 王静, 齐义泉, 等. 基于WRF模式同化QuikSCAT风场资料的初步试验. 热带海洋学报, 2004, 23(6): 69-74.
- [30] 刘宇迪, 李国义, 任景鹏. 散射计和下投式探空仪资料对台风模拟的影响. 气象科学, 2012, 32(1): 18-28.
- [31] 王亮, 陆汉城, 潘晓滨, 等. 台风模拟中QuikSCAT风场的非对称加强订正及同化应用. 热带气象学报, 2008, 24(6): 658-664.

- [32] Kazumori M. Impact studies of AMSR-E ocean surface wind speed data in NWP at JMA. Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2010, 2: II-801-II-804.
- [33] Hsu C S, Liu W T. Wind and pressure fields near tropical cyclone Oliver derived from scatterometer observations. J Geophys Res Atmos, 1996, 101(D12): 17021-17027.
- [34] Katsaros K B, Forde E B, Chang P, et al. QuikSCAT's sea winds facilitates early identification of tropical depressions in 1999 hurricane season. Geophys Res Lett, 2001, 28(6): 1043-1046.
- [35] Liu W T, Hu H, Song Y T, et al. Improvement of scatterometer wind vectors-impact on hurricane and coastal studies. WCRP/SCOR Workshop on Intercomparison and Validation of Ocean-Atmosphere Flux Fields, Bolger Center, May 21-24, 2001.
- [36] 吴晓京, 陈云浩, 郑新江, 等. 洋面风场的QuikSCAT/SeaWinds遥感探测. 自然灾害学报, 2007, 16(2): 7-15.
- [37] 方翔, 咸迪, 李小龙, 等. QuikSCAT洋面风资料及其在热带气旋分析中的应用. 气象, 2007, 33(3): 33-39.
- [38] 邹巨洪, 林明森, 潘德炉, 等. QuikSCAT在台风监测中的应用. 遥感学报, 2009, 13(5): 840-853.
- [39] Liu W T, Xie X. Spacebased observations of the seasonal changes of south Asian monsoons and oceanic responses. Geophys Res Lett, 1999, 26(10): 1473-1476.
- [40] Liu W T, Tang W, Fu L L. Recent warming event in the Pacific may be an El Niño. Eos Trans, 1995, 76(43): 429-437.
- [41] 谢强, 王东晓, 王卫强, 等. 南海几种海面风应力资料的比较分析. 热带海洋学报, 2001(1): 91-100.
- [42] 蒋兴伟, 宋清涛. 基于微波散射计观测的气候态海面风场和风应力场. 海洋学报, 2010, 32(6): 83-90.
- [43] 王振占, 刘璟怡, 殷晓斌, 等. 一种消除全极化微波辐射计顺/逆风向遥感模糊性的新方案——星上定标和扫描机制设计的有关考虑. 遥感学报, 2009, 13(2): 190-196.

留存此照：世界上第一次各国气象局长会

■ 贾朋群

最近, 国际大地测量学与地球物理学联合会2016年年报发表, 其中联合会历史工作组在报告中报道了被重新发现的, 125年前召开的世界上第一次各国气象局长会的照片(图1)。

有组织的国际气象活动, 可以追溯到160多年前的1853年, 第一次国际海洋气象会议在比利时的布鲁塞尔召开, 会议的参加者虽然只有来自比利时、丹麦、法国、英国、荷兰、挪威、葡萄牙、瑞典和美国等9个国家的主要是海军军官的12名代表, 但正是在这次会议上, 讨论并就航行于全球海洋上的船只进行气象和海洋观测达成了一致意见, 意义巨大的统一的海洋气象观测网在这次会议之后逐渐形成, 为全球的海洋运输业的大发展创造了条件。对气象学家来说更为重要的是, 这次会议直接导致了20年以

后的1873年第一次国际气象大会在巴黎召开, 世界气象组织(WMO)的前身国际气象组织(IMO)的成立, 为最广泛意义的国际气象合作奠定了基础。

在1879年召开了第二次国际气象大会后, 国际气象活动进入发展阶段。同时, 在英国1854年和美国1871年相继成立了国家气象机构前后, 欧洲更多的国家建立了国家气象局。IMO从民间向“官方”过度的势头开始出现。例如, 法国提出IMO的活动要有气象局长参与其中, 但德国表示反对, 认为气象局长即使参与也是以个人名义。

经过各方努力, 1891年8月26日—9月2日, 第一次各国气象局长会议终于在德国的慕尼黑召开。参会的34位代表的会议合影, 实际上记录了一次极大提升国际气象合作的重要事件。正是这次会议, 建立了第一个常设技术委员会, 并为之后设立辐射委员会、气象电报委员会等打下伏笔。

参加这次会议的34人中, 来自东道主德国的有11人, 人数最多。其余除美国5人、法国2人外, 荷兰、澳大利亚、英国、芬兰、罗马尼亚、瑞典、挪威、奥地利、波兰、爱沙尼亚、丹麦、俄国、保加利亚、瑞士和西班牙各有1人参加。其中, 俄国参会代表为时任IMO主席, 而法国代表之一为1896—1907年IMO主席。

这次非政府的国际气象会议, 实际上成为各国政府的气象部门走到一起开始合作的新纪元, 之后, 自1896年开始, 到1951年WMO宣告成立, 又召开了第二届到第九届气象局长会。图中34位早期气象学者, 为随后国际气象事业的大发展贡献了最初的智慧。

(作者单位: 中国气象局气象干部培训学院)

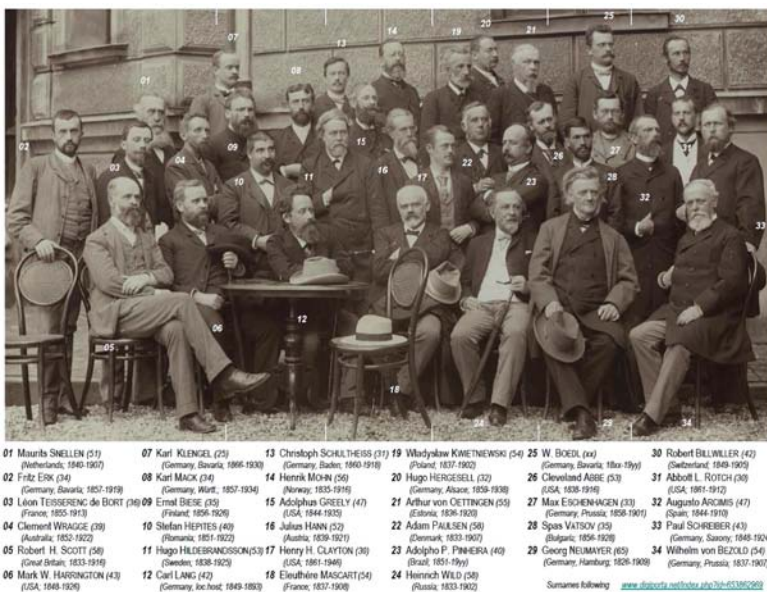


图1 1891年在德国召开的世界上第一次气象局长会34位会议代表合影