

基于HY-2卫星数据的热带气旋风速和气压反演

张有广, 贾永君, 林明森, 马小峰

1. 国家卫星海洋应用中心, 北京 100081;
2. 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室, 北京 100081

摘要: 基于HY-2卫星数据提出了主被动微波遥感联合观测热带气旋海面高风速和海面气压的方法。在海面风速观测方法中, 利用与雷达高度计同步观测的校正辐射计获取的亮度温度信息来修正雷达高度计观测中受到的降雨影响, 以此提升高风速观测能力。校正辐射计观测的降雨和海面粗糙度信息能够真实的反映在亮度温度中, 结合雷达高度计观测的海面粗糙度信息, 把校正辐射计观测亮温中的海面粗糙度信息剥离, 将剩余的降雨信息等效为风速补偿到雷达高度计的原有海面风速观测中, 进而得到海面高风速。在上述研究基础上, 依据热带气旋期间气压差与风速差的比例关系, 计算出中心气压。通过与预报和机载观测数据比对的结果表明: 该方法能够实现热带气旋期间高风速的观测, HY-2卫星与预报数据和机载观测数据的均方根误差分别为1.3 m/s和1.0 m/s; 海面气压均方根误差分别为5.5 hPa和4.6 hPa。同时, 文中方法对于中低风速和中低风速条件下的海面气压也具备观测能力。

关键词: 遥感, HY-2卫星, 热带气旋, 海面风速, 海面气压, 反演方法

中图分类号: P2

引用格式: 张有广, 贾永君, 林明森, 马小峰. 2024. 基于HY-2卫星数据的热带气旋风速和气压反演. 遥感学报, 28(6): 1588-1601

Zhang Y G, Jia Y J, Lin M S and Ma X F. 2024. A retrieval method of tropical cyclone wind speed and sea level pressure based on HY-2 satellite data. National Remote Sensing Bulletin, 28(6): 1588-1601 [DOI: 10.11834/jrs.20242306]

1 引言

中国的海洋动力环境卫星(HY-2B、HY-2C和HY-2D卫星)是搭载多个主被动微波遥感载荷的多功能卫星观测平台(蒋兴伟, 2014)。其中, 卫星上的雷达高度计是一种星下指向的主动式雷达传感器, 可提供同步的风速、浪高数据, 为风浪研究和监测提供准确的观测数据(蒋兴伟, 2014; 林明森和张有广, 2018)。卫星上还搭载有为雷达高度计做大气湿对流层路径延迟修正的被动微波遥感载荷—校正辐射计, 雷达高度计和校正辐射计的组合是海洋动力环境卫星观测的标准载荷配置。

利用雷达高度计获取海面的风速信息是雷达高度计的主要功能之一。迄今为止研究学者已提出大约20种左右的雷达高度计风速反演算法, 其

中比较著名的包括文献中提出的仅依赖于Ku波段后向散射系数单参数经验算法(Brown等, 1981; Chelton和McCabe, 1985; Chelton和Wentz, 1986; Goldhirsh和Dobson, 1985; Witter和Chelton, 1991)。其中, Witter和Chelton(1991)提出的经验算法已经发展成为ERS-1, ERS-2和T/P高度计的业务化风速反演算法。此外, Lefevre等(1994)提出了双参数(风速的反演除了依赖Ku波段雷达后向散射截面外, 还依赖于高度计测量的有效波高)经验算法, 这种双参数算法在风速反演精度上较单参数算法有一定程度的改善。Gourrion等(2002)通过对TOPEX/Poseidon高度计测量的有效波高和标准化雷达后向散射截面资料与NSCAT风速数据进行时空匹配处理, 得到同步数据集, 利用人工神经网络方法试验得到反演海面风速的两参数算法(即将后向散射截面和有效波高都作

收稿日期: 2022-07-06; 预印本: 2023-02-02

基金项目: 国家重点研发计划(编号:2021YFC3101502)

第一作者简介: 张有广, 研究方向为海洋微波遥感。E-mail: zhangyouguang@mail.nsoas.org.cn

为输入的参数)。后续的Jason系列卫星也基本沿用上述方法。但是, 受限于后向散射系数的测量范围为7—30 dB, 决定了观测风速只能在0—30 m/s之间, 无法获取大于等于30 m/s风速的准确信息。Syarawi等(2021)提出利用Jason-3卫星雷达高度计和同步观测的校正辐射计(JMR)联合观测获取高风速信息的方法, 通过建立的包括两个频段后向散射系数、波高、3个通道亮温、水汽含量和液水含量在内的多参数风速反演方法, 可以实现35 m/s风速的观测, 精度为1 m/s。但是, 该方法需要同时输入上面所述的至少9个参数, 各个参数的精度和质量都会对算法的精度造成影响, 并且对于35 m/s及更高的风速没有精度评估结果。

海面气压是另一个重要的气象参数, 在数值天气预报, 热带气旋监测分析以及气候学研究等大气科学领域均有非常重要的应用。张子瑾和董晓龙(2020)提出一种中低海况海面气压反演算法, 利用美国联合极轨卫星系统SNPP卫星搭载的先进技术微波探测仪(ATMS)和中国风云3号C星搭载的新型微波温湿探测仪(MWHTS)的实测亮温数据实现了中低纬度(40°S—40°N)海面气压反演, 将反演结果与分析数据, 现场观测数据进行了对比, 结果表明算法对晴空、云天、雨天海面气压的估计精度分别为2.0 hPa, 3.0 hPa和3.5 hPa, 算法虽然对中低风速情形下海面气压的估计精度较高, 且具备较强的热带气旋识别能力, 但是由于强热带气旋中心附近温度和湿度垂直分布的异常, 导致极高风速情形下估计精度不够理想。

本文在综合考虑了雷达高度计观测风速和校正辐射计(CMR) 18.7 GHz观测对风速敏感性的基础上, 提出了基于HY-2卫星主被动微波遥感器联合观测热带气旋风速和气压的一种新方法, 即利用校正辐射计T18通道的亮温和雷达高度计的后向散射信息, 来对台风期间雷达高度计观测受降雨的影响进行补偿, 进而提升高风速的观测能力; 在有效观测台风高风速的基础上, 基于台风中心气压差和风速差的关系, 提出了海面气压的反演方法。

2 卫星观测及相关数据来源

HY-2系列卫星中的HY-2B、HY-2C和HY-2D卫星分别于2018年、2020年和2021年发射, 由于3颗卫星上的雷达高度计和校正辐射计具有同

样的技术指标, 因此本文将三星的数据一起纳入数据处理、比对和评估中, 以弥补热带气旋观测数据的不足。

2.1 雷达高度计及观测数据

HY-2卫星雷达高度计是海洋动力环境卫星上的主动微波遥感载荷。它向海面垂直发射脉冲, 通过接收返回脉冲的信号进行信息的获取。在返回的脉冲信号波形中, 波形的幅度与海面后向散射特性具有相关性, 利用这种相关关系可以建立海面风速与后向散射系数的算法模型, 进而实现风速信息的获取(蒋兴伟, 2014)。在雷达高度计的二级标准数据产品中包含了海面风速、有效波高和海面高度等海洋动力环境信息。数据沿轨道的空间分辨率为7 km, 1 s一个观测数据点, 每个观测数据的空间足印为1.9 km。

2.2 校正辐射计及观测数据

校正辐射计是HY-2卫星上专门为雷达高度计配备的用于大气湿对流层路径延迟校正的被动微波遥感载荷。它有18.7 GHz、23.8 GHz和37 GHz等3个亮温观测通道, 这3个通道分别对海面风速、大气水汽和液水含量信息敏感, 进而可以建立相应的反演算法(王振占等, 2013)。文中只利用了校正辐射计18.7 GHz通道的亮温数据, 数据采样间隔是1 s, 地面足印是24 km。

2.3 美国NOAA机载观测数据

美国国家海洋与大气管理局飞行业务中心(NOAA's Aircraft Operations Center)在每次飓风期间执行观测任务。美国空军P-3海上侦察机的民用型WP-3D飞机, 用于获取飓风期间的大气和海洋信息。飞机最大飞行高度7600 m, 航程为4100—6100 km。飞机上搭载的步进频率微波辐射计(SFMR)用于获取飓风期间的海面风速信息。SFMR观测数据经过处理后的采样间隔是1 s(AOML, 2014), 数据可在NOAA大西洋海洋气象试验室网站获取。SFMR是目前热带气旋风速观测最准确的观测手段之一, 多用于高风速算法的训练和验证。

2.4 美国NDBC观测数据

美国国家浮标数据中心(NDBC)持续提供高质量的海洋环境观测, 以支持对天气、气候、海

洋和海岸变化的理解和预测。NDBC全球浮标观测体系中有1000多个各类浮标,用来获取海洋和大气的多种现场观测数据。其中,浮标获取的风速信息有海面风速、气压和波高等。本文研究中选取了距离HY-2卫星下点观测距离最近的51101浮标的观测数据进行定量评估,数据时段是2019年1月—2022年5月。

2.5 JAXA降雨观测数据

日本宇航局(JAXA)全球降雨观测网数据是基于全球降雨观测任务(GPM)中双频降雨雷达(DPR)为核心的降雨观测数据。数据中提供每小时的降雨率,数据范围为:60°N—60°S,空间分辨率0.1°。

3 研究方法

3.1 现有的海面风速反演方法

现有的HY-2卫星雷达高度计风速反演算法采用Gourrion等提出的双参数模型(Gourrion等,2002),即

$$U_{10} = \frac{Y - a_{U_{10}}}{b_{U_{10}}} \quad (1)$$

$$Y = \left(1 + \exp^{-(\overline{W}_x \overline{X} + \overline{B}_x)}\right)^{-1} \quad (2)$$

$$\overline{X} = \left(1 + \exp^{-(\overline{W}_x \overline{P}^T + \overline{B}_x^T)}\right)^{-1} \quad (3)$$

式中, U_{10} 为距离海面10 m处的风速, P 为SWH与 σ° 归一化后的矩阵,维度为 1×2 , $a_{U_{10}}$, $b_{U_{10}}$ 为风速系数, \overline{W}_x , \overline{W}_y , \overline{B}_x , \overline{B}_y 为待定的模型参数矩阵,维度分别为 2×2 , 2×1 , 1×2 , 1×1 。利用神经网络模型确定的上述模型中的待定参数如表1和表2所示。

表1 Gourrion模型参数1

参数	a	b
σ°	-0.34336	0.06909
SWH	0.08725	0.06374
U_{10}	0.1	0.02844

根据上述方法, HY-2B、HY-2C和HY-2D卫星雷达高度计可以实现全球海面风速的观测,在非降雨条件下,20 m/s以内风速的观测精度优于2 m/s,但是超过30 m/s的风速无法有效观测。例

如,2021年7月24日HY-2B/C/D这3颗卫星观测的全球海面风速,如图1所示,风速观测范围基本在20 m/s以内,无法观测到台风“烟花”(IN-FA)过程中的高风速(图1红色圈内),此时实际风速已达40 m/s左右。因此,需要对原有算法进行改进,提升高风速观测能力。

表2 Gourrion模型参数2

参数	矩阵元素	
\overline{W}_x	-33.95062	-11.03394
	-3.93428	-0.05834
\overline{W}_y	0.54012	10.40481
\overline{B}_x	18.06378	-0.37228
\overline{B}_y	-2.28387	...
\overline{P}	$a_{\sigma^\circ} + b_{\sigma^\circ} \sigma^\circ$	$a_{SWH} + b_{SWH} SWH$

3.2 改进的风速反演方法

HY-2卫星校正辐射计18.7 GHz通道亮度温度(T_{18})的观测范围为150—250 K,雷达高度计Ku频段后向散射系数(σ°)的观测范围为7—30 dB,为了便于分析,这里将 T_{18} 缩小10倍,达到与 σ° 同等数量级。以HY-2B卫星2019年10月9日8 h 14 min—21 min观测的台风“海贝斯”和HY-2C卫星2021年9月12日8 h 03 min—07 min观测的“灿都”为例,给出了 $T_{18}/10$ 与 σ° 随纬度的变化曲线,如图2和图3所示。JAXA提供的两次台风观测时段降雨分布,如图4—5所示, HY-2B和HY-2C卫星分别经过台风区域的地面轨迹,见图4、5中黑色线,箭头指向卫星运行方向。可以看出,卫星轨迹在接近台风中心处 $T_{18}/10$ 明显增大, σ° 则明显降低,两者呈很好的负相关关系。这也表明了降雨对卫星观测的影响,即降雨强度大的区域,卫星观测亮温 T_{18} 变大;降雨造成海面粗糙度加大,进而观测的 σ° 降低,这与两个遥感载荷的观测机理相符合。在 T_{18} 中既包含大气中的降雨信息,也包含了海况的信息,而原海面风速反演算法中只考虑了风速与海况的信息,没有考虑降雨的影响,造成了热带气旋过程中风速估计偏低的情况。

基于图中 $T_{18}/10$ 与 σ° 展示出的相关性信息,本文提出如下计算海面风速的公式:

$$W = \left(\frac{T_{18}}{a} - \sigma^\circ\right) \times b + W_0, \quad \left(\frac{T_{18}}{10} > \sigma^\circ\right) \quad (4)$$

式中, W 为海面风速(单位:m/s); σ° 为雷达高度

计后向散射系数（单位：dB）； T_{18} 为校正辐射计18.7 GHz通道亮温（单位：K）； W_0 为现有算法观测的风速； a 和 b 为系数（文中 a 取值为10 dB/K； b 取值为 $2 \text{ ms}^{-1}/\text{dB}$ ）。需要指出的是，由于HY-2卫星雷达高度计观测刈副窄，恰好经过台风中心位置的轨道不多，相应的能够用于统计分析确定系数 b 的足够多的预报模式数据或实测数据少，因此，这里采用经验方法确定系数 b 。由图2和图3看出， $\frac{T_{18}}{10} - \sigma^\circ$ 的取值范围在2—22，考虑到雷达高度计能够保证观测精度的最大风速为25 m/s，如

果 b 取值为 $2 \text{ ms}^{-1}/\text{dB}$ ，根据式（4）则可实现最大风速为69 m/s的观测。已知的超强台风风速超过70 m/s十分罕见，系数 b 取值为 $2 \text{ ms}^{-1}/\text{dB}$ 就可涵盖绝大多数热带气旋风速的情况。另外，受到强降雨影响，原观测风速算法超过30 m/s风速观测范围时，在HY-2卫星雷达高度计后向散射系数和风速数据中会出现“空值”，基于雷达高度计C频段观测受降雨影响小的特点，这里采用C频段的后向散射系数替换Ku频段的数据，并采用3.1节中风速反演方法重新计算风速，再采用式（4）计算热带气旋期间的海面风速。

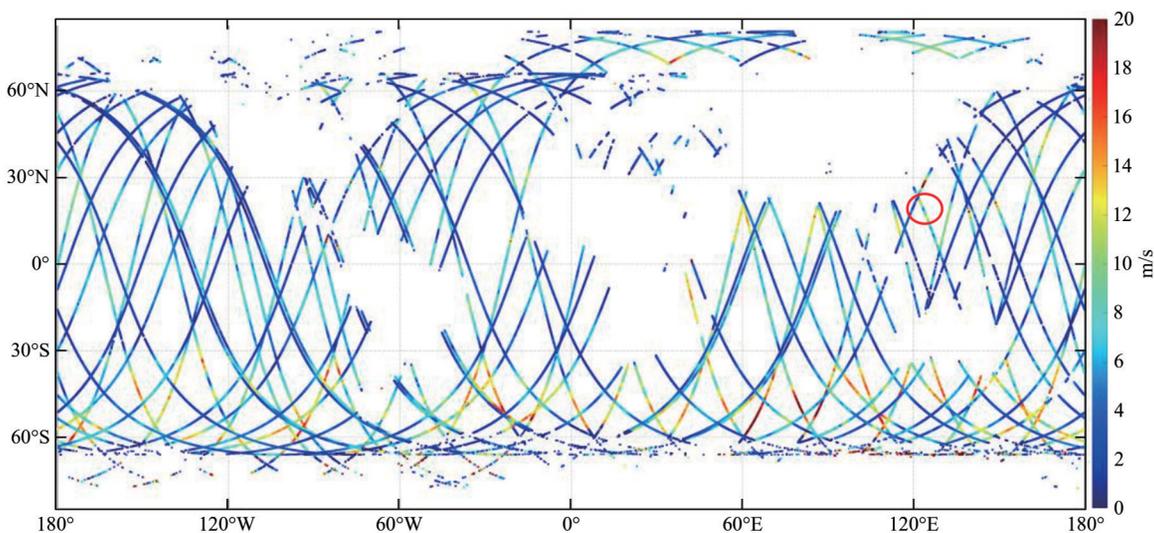


图1 HY-2B/C/D卫星雷达高度计联合观测海面风速

Fig.1 Joint observation of sea surface wind speed with HY-2 satellite

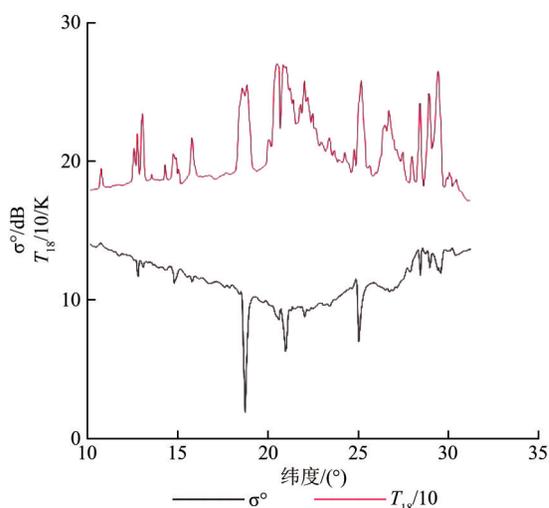


图2 HY-2B卫星观测台风“海贝思” σ° 与 $T_{18}/10$ 沿纬度变化曲线(2019年10月9日)
Fig.2 Correlation between backscatter coefficient and $T_{18}/10$ in Super Typhoon HAGIBIS(October 9, 2019)

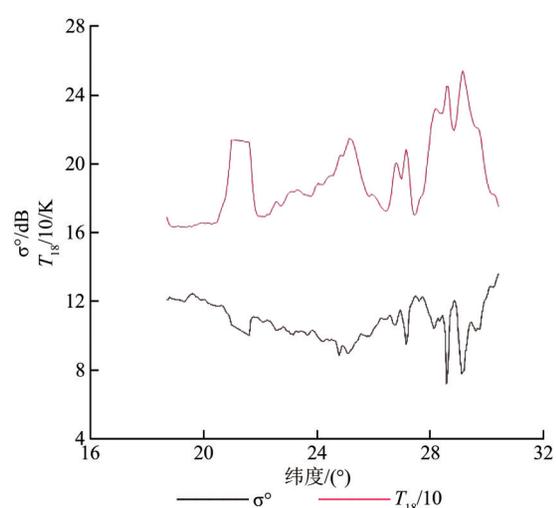


图3 HY-2C卫星观测台风“灿都” σ° 与 $T_{18}/10$ 沿纬度变化曲线(2021年9月12日)
Fig.3 Correlation between backscatter coefficient and $T_{18}/10$ in Typhoon CHANTHU(September 12, 2021)

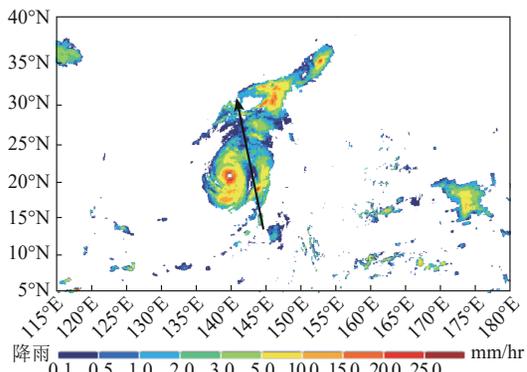


图4 HY-2B卫星经过台风降雨区域的地面轨迹

Fig.4 Rainfall distribution and HY-2B satellite ground track of typhoon HAGIBIS on October 9, 2019

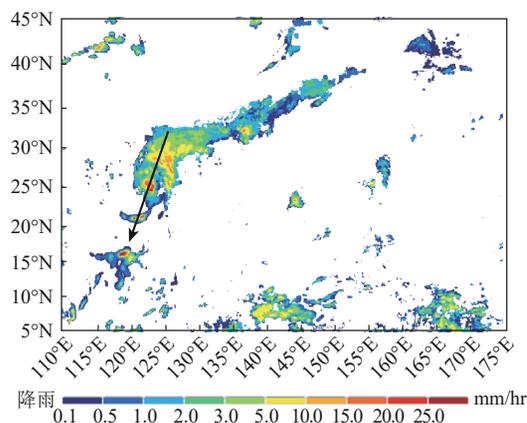


图5 HY-2C卫星经过台风降雨区域的地面轨迹

Fig.5 Rainfall distribution and HY-2C satellite ground track of typhoon CHANTHU on September 12, 2021

图6、图7是以2次超强台风为例，对原风速算法和改进方风速进行比较，可以看出改进算法观测的风速得到明显提升，2次超强台风“海贝思”和“灿都”的最大风速都在60 m/s左右，风速提升了~35 m/s。

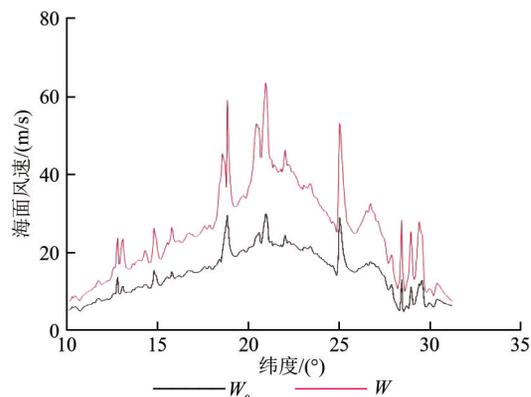


图6 HY-2B观测台风“海贝思”风速修正前后比较

Fig.6 Comparison of typhoon HAGIBIS wind speed before and after correction

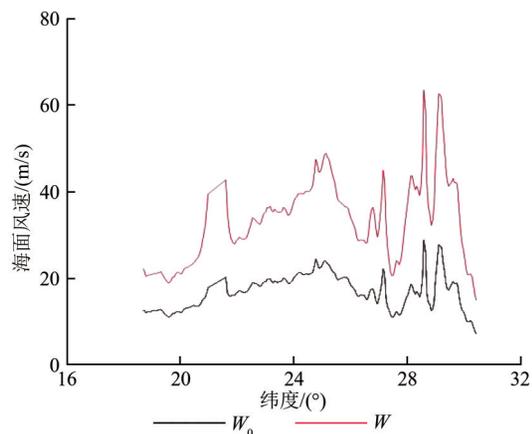


图7 HY-2C观测台风“灿都”风速修正前后比较

Fig.7 Comparison of typhoon CHANTHU wind speed before and after correction

3.3 海面气压计算方法

考虑到台风中心气压越低，台风强度越大，利用式(4)得到的热带气旋风速 W ，可以建立气压差与风速差的比例关系：

$$\Delta P \propto \Delta W \tag{5}$$

式中， ΔP 为台风12级风圈和7级风圈的气压差， ΔW 为台风12级风圈风速与7级风圈平均风速 \bar{W} 的差。根据式(5)进一步建立如下关系：

$$\Delta P = A \times \Delta W = A \times (W - \bar{W}) \tag{6}$$

式中， A 为待定系数，单位为 $\text{hPa} \cdot \text{s}/\text{m}$ ； \bar{W} 取值为 15 m/s 。

根据式(6)，利用HY-2卫星数据观测台风中心气压的计算公式如下：

$$P = P_0 - \Delta P = P_0 - A \times (W - 15) \tag{7}$$

式中， P 为台风中心气压， P_0 为海面平均气压（文中取值为 1010 hPa ）。

关于式(7)中系数 A 的取值，文中采用了简便的统计平均方法。任意选取2019年台风“海贝思”和飓风“多利安”(Dorian)为例，根据中央气象台台风网(CMA)、联合台风预警中心(JTWC)和美国国家飓风中心(NHC)3个机构提供的热带气旋最大风速、中心气压和中心位置信息，利用式(7)确定不同时刻和位置对应的系数 A ，具体见表3—5。由于不同机构对热带气旋的预测存在差异，根据表3—5中的热带气旋预报信息，采用分段平均的方法给出了系数 A 在不同风速范围的取值，见表6—8所示。

表3 台风“海贝思”中基于CMA预报信息的系数A
Table 3 Coefficient A based CMA forecast information in typhoon Hagibis

日期	时间	纬度/°N	经度/°E	风速/(m/s)	中心气压/hPa	A
10-06	14:00	14.5	154.3	25	985	2.5
10-06	20:00	14.5	152.8	25	985	2.5
10-07	02:00	14.9	151.2	30	980	2.0
10-07	05:00	15.1	150.1	35	970	2.0
10-07	08:00	15.2	149.6	42	955	2.0
10-07	14:00	15.5	148.2	55	930	2.0
10-07	17:00	15.9	147.4	65	910	2.0
10-08	14:00	17.7	142.7	60	920	2.0
10-08	20:00	18.4	141.8	58	925	2.0
10-09	02:00	19.3	140.8	58	925	2.0
10-09	05:00	19.5	140.5	58	925	2.0
10-09	08:00	19.8	140.4	60	920	2.0
10-09	14:00	20.6	139.9	60	920	2.0
10-09	17:00	21.0	139.8	58	925	2.0
10-10	14:00	24.4	139.4	58	925	2.0
10-10	20:00	25.3	138.9	58	925	2.0
10-11	02:00	26.3	138.5	55	930	2.0
10-11	05:00	26.9	138.3	55	930	2.0
10-11	08:00	27.4	137.9	52	935	2.0
10-11	14:00	28.8	137.4	50	940	2.0
10-11	20:00	29.8	137.1	50	935	2.1
10-12	02:00	30.8	137.0	48	940	2.1
10-12	08:00	31.9	137.4	48	940	2.1
10-12	17:00	34.7	138.7	42	950	2.2
10-12	20:00	35.5	139.5	40	960	2.0
10-13	02:00	38.1	141.7	33	970	2.2

表4 台风“海贝思”中基于JTWC预报信息的系数A
Table 4 Coefficient A based JTWC forecast information in typhoon Hagibis

日期	时间	纬度/°N	经度/°E	风速/(m/s)	中心气压/hPa	A
10-06	06:00	14.4	154.2	25	995	1.5
10-06	12:00	14.5	152.2	30	988	1.5
10-06	18:00	14.9	151.1	35	982	1.4
10-07	00:00	15.2	149.2	55	953	1.4
10-07	06:00	15.5	148.2	70	921	1.6
10-07	12:00	16.1	146.6	80	890	1.9
10-07	18:00	16.5	144.9	75	909	1.7
10-08	00:00	16.9	143.8	65	926	1.7
10-08	06:00	17.7	142.7	60	936	1.6
10-08	12:00	18.4	141.8	65	928	1.6
10-08	18:00	19.3	140.8	70	909	1.8
10-09	00:00	19.8	140.4	75	902	1.8
10-09	06:00	20.6	139.9	75	904	1.8
10-09	12:00	21.2	139.6	70	910	1.8
10-09	18:00	22.0	139.8	70	911	1.8

						续表
日期	时间	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ E	风速/(m/s)	中心气压/hPa	A
10-10	00:00	23.2	139.9	65	916	1.9
10-10	12:00	25.3	139.0	65	920	1.8
10-10	18:00	26.3	138.5	60	923	1.9
10-11	00:00	27.5	138.0	60	933	1.7
10-11	06:00	28.4	137.5	55	933	1.9
10-11	12:00	29.9	137.1	55	935	1.9
10-11	18:00	30.8	137.0	50	942	1.9
10-12	00:00	32.1	137.4	50	948	1.8
10-12	06:00	33.7	138.2	45	951	2.0
10-12	12:00	35.6	139.4	40	960	2.0
10-12	18:00	38.2	141.8	35	970	2.0
10-13	00:00	40.0	145.1	30	976	2.3

表5 飓风“多利安”中基于NHC预报信息的系数A

Table 5 Coefficient A based NHC forecast information in hurricane Dorian

日期	时间	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ E	风速/(m/s)	中心气压/hPa	A
08-24	18:00	10.6	48.7	20	1008	0.4
08-25	00:00	10.8	49.9	20	1008	0.4
08-25	06:00	11.0	51.0	20	1008	0.4
08-25	12:00	11.2	52.3	20	1007	0.6
08-25	18:00	11.4	53.5	25	1007	0.3
08-26	00:00	11.6	54.7	25	1007	0.3
08-26	06:00	11.9	56.0	26	1006	0.4
08-26	12:00	12.2	57.2	25	1006	0.4
08-27	12:00	14.2	61.2	25	1005	0.5
08-28	00:00	15.7	62.8	25	1003	0.7
08-28	06:00	16.4	63.5	30	1001	0.6
08-28	15:00	17.7	64.5	35	995	0.8
08-29	00:00	19.2	65.7	40	989	0.8
08-30	00:00	22.8	68.0	40	978	1.3
08-30	12:00	24.3	69.5	50	972	1.1
08-30	18:00	24.8	70.3	50	968	1.2
08-31	00:00	25.3	71.1	60	949	1.4
08-31	06:00	25.6	72.1	60	947	1.4
08-31	12:00	25.9	73.0	65	944	1.3
08-31	18:00	26.1	74.0	65	942	1.4
09-01	00:00	26.3	74.7	70	939	1.3
09-01	06:00	26.4	75.6	75	934	1.3
09-01	12:00	26.5	76.5	80	927	1.3
09-01	18:00	26.5	77.1	80	910	1.6
09-02	00:00	26.6	77.7	80	914	1.5
09-02	06:00	26.6	78.0	75	916	1.6
09-02	12:00	26.7	78.3	70	927	1.5
09-02	18:00	26.8	78.4	65	938	1.4
09-03	00:00	26.9	78.5	60	944	1.5

表6 基于NMC台风预报信息的系数A取值

Table 6 Value of coefficient A based on CMA typhoon forecast information

风速范围/(m/s)	A
≤25	2.5
>25	2.0

表7 基于JTWC台风预报信息的系数A取值

Table 7 Value of coefficient A based on JTWC typhoon forecast information

风速范围/(m/s)	A
≤25	1.5
>25	1.8

表8 基于NHC台风预报信息的系数A取值

Table 8 Value of coefficient A based on NHC hurricane forecast information

风速范围/(m/s)	A
<35	0.5
35—60	1.0
>60	1.4

4 数据比对和评估

4.1 HY-2卫星观测与预报风速和气压比对评估

为了验证利用式(7)计算的卫星观测热带气旋中心气压,本文选取预报风速数据进行比对和评估。预报风速数据来自中国气象局热带气旋资料中心(文中简称:CMA)提供的热带气旋路径数据集,数据集中包括台风的中心位置、中心风速和中心气压等信息(Ying等,2014;Lu等,

2021)。在比对数据的匹配中,选取的时空窗口为:时间3h和空间150km。由于HY-2B/C/D3颗卫星发射时间的不同,这里选取了2019年1月到2022年4月的卫星热带气旋观测数据,进行数据匹配和比对。另外,因为HY-2卫星雷达高度计观测刈幅窄,恰好经过热带气旋中心或附近区域的观测数据少,并考虑到HY-2B/C/D三星雷达高度计和校正辐射计的技术指标完全一致,为了增加数据比对点数,文中将三星的观测数据纳入到一起进行数据的比对评估。通过数据的匹配,共计匹配到25次台风期间的观测数据,其中,HY-2B卫星18次观测和HY-2C卫星7次观测,HY-2D没有匹配到观测数据。表9中列出了这25次热带气旋观测的比对信息,包括数据比对点对应的台风日期和时间,经纬度、风速、气压、气压等。

根据表9和图8可以看出,25次热带气旋观测中卫星观测风速的绝对误差均≤2.0m/s,23次气压绝对误差<10hPa。图8—9中给出了25个热带气旋观测数据的散点图,卫星观测与预报风速及气压具有很好的一致性, R^2 分别为0.99和0.97, RMSE分别为1.3m/s和5.5hPa。观测的最大风速为59.8m/s,相应的绝对误差为1.8m/s。在表9中最后一列给出了观测点对应的降雨率,由此可以看出,在风速大于30m/s情况下,(表9中蓝色的统计信息)均伴随有5mm/h以上的降雨率,也就是中雨以上的降雨,可见要准确观测热带气旋期间的风速,必须要考虑降雨的影响。通过比较可以证明,文中方法具备高精度热带气旋风速和中心气压观测能力,对于热带风暴、强热带风暴、台风、强台风和超强台风均可高精度观测。

表9 HY-2卫星热带气旋观测风速与预报风速比较

Table 9 Comparison results of wind speed and sea level pressure observed by HY-2 satellite and CMA

序号	数据源	日期/时间	纬度/°N	经度/°E	海面风速/(m/s)	海面风速绝对误差/(m/s)	海面气压/hPa	气压绝对误差/hPa	距离/km	降雨率/(mm/h)
1	HY-2B	2019-02-27/04:47:02	15.78	141.10	34.9	1.9	970	5	137	6.8
	CMA	2019-02-27/06:00:00	16.21	139.90	33.0		975			
2	HY-2B	2019-08-01/06:53:08	21.24	110.79	25.0	2.0	985	3	60	4.7
	CMA	2019-08-01/06:00:00	20.70	110.80	23.0		982			
3	HY-2B	2019-08-01/18:24:30	20.88	110.72	22.8	0.2	991	3	129	1.9
	CMA	2019-08-01/18:00:00	21.10	109.50	23.0		982			
4	HY-2B	2019-10-23/04:46:31	22.27	142.76	46.0	2.0	948	3	91	7.5
	CMA	2019-10-23/06:00:00	22.70	142.00	48.0		945			
5	HY-2B	2019-12-01/05:26:46	12.89	131.04	35.2	0.2	970	0	118	12.3
	CMA	2019-12-01/06:00:00	13.20	130.00	35.0		970			

续表

序号	数据源	日期/时间	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ E	海面风速/ (m/s)	海面风速 绝对误差/(m/s)	海面气压/ hPa	气压绝对 误差/hPa	距离/ km	降雨率/ (mm/h)
6	HY-2B	2019-12-02/05:49:01	13.36	125.56	48.3	0.3	943	2	40	11.3
	CMA	2019-12-02/06:00:00	13.00	125.60	48.0		945			
7	HY-2B	2020-06-13/18:18:34	20.75	112.62	20.2	0.2	998	3	61	4.6
	CMA	2020-06-13/18:00:00	20.70	113.20	20.0		995			
8	HY-2B	2020-09-06/17:00:43	33.62	129.49	41.1	0.9	956	6	84	5.3
	CMA	2020-09-06/18:00:00	32.90	129.20	42.0		950			
9	HY-2C	2020-10-19/19:28:53	14.71	126.99	15.8	0.8	1010	8	121	4.3
	CMA	2020-10-19/18:00:00	15.00	125.90	15.0		1002			
10	HY-2C	2020-10-20/06:35:43	16.46	124.47	19.9	1.9	998	0	140	0.4
	CMA	2020-10-20/06:00:00	15.90	123.30	18.0		998			
11	HY-2C	2020-10-20/19:47:03	16.96	120.01	18.6	1.4	1001	6	107	1.9
	CMA	2020-10-20/18:00:00	16.00	120.10	20.0		995			
12	HY-2B	2020-10-21/18:02:54	16.02	117.55	26.0	2.0	988	6	87	4.6
	CMA	2020-10-21/18:00:00	16.50	116.90	28.0		982			
13	HY-2B	2020-10-27/18:32:12	14.09	110.58	45.2	0.2	950	5	27	5.6
	CMA	2020-10-27/18:00:00	14.20	110.80	45.0		955			
14	HY-2B	2021-04-13/16:46:26	7.26	138.34	16.6	1.4	1006	8	150	4.9
	CMA	2021-04-13/18:00:00	8.00	137.20	18.0		998			
15	HY-2C	2021-04-15/13:02:23	8.56	135.41	29.4	1.4	981	4	35	4.1
	CMA	2021-04-15/12:00:00	8.70	135.70	28.0		985			
16	HY-2B	2021-04-19/05:50:46	14.97	125.97	59.8	1.8	920	10	63	12.5
	CMA	2021-04-19/06:00:00	14.50	126.30	58.0		930			
17	HY-2B	2021-09-15/17:16:13	30.52	126.70	29.8	0.2	980	0	127	4.0
	CMA	2021-09-15/18:00:00	30.30	125.40	30.0		980			
18	HY-2B	2021-09-16/06:01:54	29.81	126.21	29.5	0.5	981	1	111	1.4
	CMA	2021-09-16/06:00:00	30.30	125.20	30.0		980			
19	HY-2C	2021-09-26/22:32:28	19.64	136.28	51.8	0.2	936	1	44	7.6
	CMA	2021-09-27/00:00:00	19.60	136.70	52.0		935			
20	HY-2B	2021-09-28/05:19:35	21.66	135.14	50.9	0.9	938	2	61	5.8
	CMA	2021-09-28/06:00:00	21.50	135.70	50.0		940			
21	HY-2B	2021-09-28/16:51:35	22.64	134.50	51.3	1.3	937	3	113	17.6
	CMA	2021-09-28/18:00:00	22.70	135.60	50.0		940			
22	HY-2B	2021-09-29/21:38:38	26.23	135.93	50.0	2.0	940	5	62	5.1
	CMA	2021-09-30/00:00:00	26.60	136.40	48.0		945			
23	HY-2C	2021-12-15/17:20:48	9.01	130.04	54.0	2.0	932	3	122	36.5
	CMA	2021-12-15/18:00:00	9.40	129.00	52.0		935			
24	HY-2C	2021-12-18/05:05:55	11.65	115.84	52.0	0	936	9	124	21.7
	CMA	2021-12-18/06:00:00	11.20	114.80	52.0		945			
25	HY-2B	2022-04-15/16:16:46	29.02	142.06	29.2	0.8	982	10	72	0.9
	CMA	2022-04-15/17:00:00	29.00	142.80	30.0		972			

注: 序号1、4、5、6、8、13、16、19、20、21、22、23、24表示风速大于30 m/s情况。

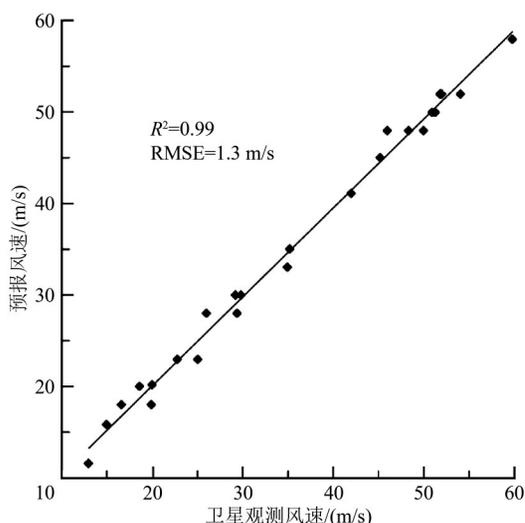


图8 HY-2卫星观测和预报风速比较散点图

Fig.8 Scatter diagram of comparison between HY-2 satellite and forecast wind speed data

4.2 HY-2卫星与SFMR观测风速和气压比对和评估

在HY-2卫星与SFMR机载观测的数据定量化评估中，使用了美国飓风中心2019年—2021年的多架次机载数据进行比对。采用的数据比对匹配标准：空间窗口150 km以内，时间窗口3 h以内。通过数据筛选，2020年—2021年351个飞行架次中，只匹配到9次飓风中的观测数据点，相应的数据比对结果见表10，根据表中的统计，9次观测的风速绝对误差均 ≤ 1.8 m/s，气压绝对误差均 < 10 hPa，风速和气压的RMSE分别为1.0 m/s和4.6 hPa，气

压；风速超过30 m/s的气压观测有3次，风速超过50 m/s的气压观测有1次，风速最大绝对误差均未为超过1 m/s，气压绝对误差优于7 hPa。同时，风速小于15 m/s的3次观测中，绝对误差也在10 hPa以内。在表中统计了观测点相应的降雨情况，在风速超过50 m/s的观测点，有9.6 mm/h的降雨率，风速越大伴随更强的降雨。在卫星观测与SFMR的数据比对中，能够匹配上的飓风期间气压观测数据少，但从这9个观测点的数据结果来看，可以初步证明文中方法具备高精度观测飓风风速和中心气压的能力。

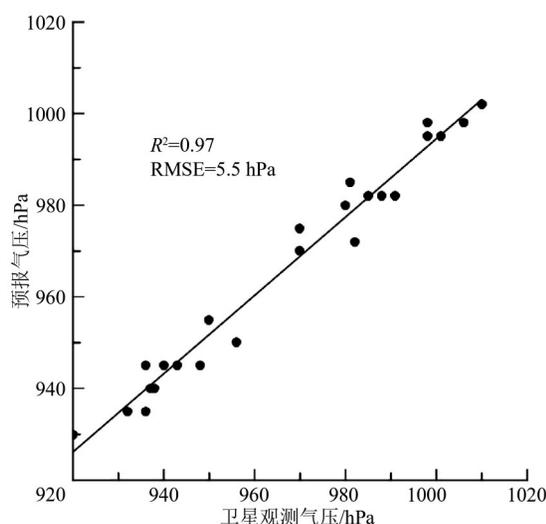


图9 HY-2卫星观测和预报气压比较散点图

Fig.9 Scatter diagram of comparison between HY-2 satellite and forecast sea level pressure data

表10 HY-2卫星与SFMR观测风速和气压比较

Table 10 Comparison results of wind speed and sea level pressure observed by HY-2 satellite and SFMR

序号	数据源	日期/时间	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ W	海面风速/ (m/s)	海面风速 绝对误差/(m/s)	海面气压/ hPa	气压绝对 误差/hPa	距离/km	降雨率/ (mm/h)
1	HY-2B	2019-07-12/12:16:15	30.09	88.22	16.8		1009			
	SFMR	2019-07-12/10:35:59	30.28	88.97	18.0	1.2	1008	1	75	0.1
2	HY-2B	2019-09-03/22:45:37	28.52	76.04	30.9		1002			
	SFMR	2019-09-03/21:23:56	28.49	77.12	31.5	0.6	1002	0	106	3.5
3	HY-2B	2019-09-04/11:32:18	28.41	77.52	31.8		1002			
	SFMR	2019-09-04/14:55:18	28.41	78.14	31.5	0.3	1006	4	61	1.3
4	HY-2B	2019-09-13/11:25:38	25.90	76.36	13.3		1011			
	SFMR	2019-09-13/13:09:00	25.75	76.33	11.5	1.8	1013	2	17	0.1
5	HY-2B	2019-09-14/23:23:12	29.24	85.57	8.6		1013			
	SFMR	2019-09-14/22:19:46	30.12	85.41	8.5	0.1	1013	0	109	0
6	HY-2B	2020-06-07/12:11:06	27.96	86.97	28.1		999			
	SFMR	2020-06-07/13:17:50	27.73	87.92	26.5	1.6	1004	5	97	3.3

序号	数据源	日期/时间	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ W	海面风速/	海面风速	海面气压/	气压绝对	距离/km	续表
					(m/s)	绝对误差/(m/s)	hPa	误差/hPa		降雨率/ (mm/h)
7	HY-2B	2020-08-26/12:26:53	26.26	91.18	52.7	0.7	972	4	47	9.6
	SFMR	2020-08-26/13:13:13	26.68	91.26	52.0		976			
8	HY-2B	2020-11-16/11:45:57	14.40	83.01	31.4	0.4	1002	7	57	6.4
	SFMR	2020-11-16/11:54:36	14.55	82.50	31.0		1009			
9	HY-2B	2021-08-20/23:55:06	25.65	92.01	11.6	0.6	1012	9	33	0
	SFMR	2021-08-20/22:13:41	25.86	92.24	11.0		1003			

4.3 HY-2卫星和NDBC观测气压比对和评估

由表9和表10中可以看出,本文方法不仅对于30 m/s以上风速情况下热带气旋中心气压可以高精度的观测,对于中低风速情况下HY-2卫星气压观测与预报信息和SFMR观测数据也十分接近。为此,本文进一步检验文中方法在15 m/s以内风速条件下卫星观测气压的观测能力,这里采用浮标现场观测的气压进行比对和评估。浮标选取位于太平洋开阔海域的51101号浮标,数据观测时段2019年—2022年。在HY-2卫星观测气压和NDBC观测气压比对中,选取的时空窗口为:空间

100 km,时间30 min。通过数据筛选, HY-2卫星在2019年1月—2022年5月有28个观测点满足匹配条件。28个观测点中, HY-2B卫星20个, HY-2C卫星5个, HY-2D卫星3个,具体比对结果见表11。在表11中只有两次观测超过10 hPa,其他观测点气压绝对误差均小于等于10 hPa,均方根误差为6.0 hPa。数据比对结果显示,本文中的方法对于15 m/s以内风速条件下气压的观测也具备较好观测能力。对于中低风速的观测, HY-2卫星在轨测试已经经过评估,满足2 m/s的观测精度,这里不再进行比较和评估。

表11 HY-2卫星和浮标51101观测气压比较

Table 11 Comparison results of sea level pressure observed by HY-2 satellite and buoy 51101

序号	数据源	观测时间	纬度 $^{\circ}$ N/经度 $^{\circ}$ E	海面风速/(m/s)	气压/hPa	气压绝对误差/hPa	距离/km
1	HY-2B	2019-04-14/04:34	24.140/162.475	8.8	1013	10	47
	51101	2019-04-14/04:40	24.359/162.081	9.0	1023		
2	HY-2B	2019-06-23/04:34	24.371/162.539	8.6	1013	1	46
	51101	2019-06-23/06:50	24.359/162.081	7.4	1014		
3	HY-2B	2019-06-27/17:08	24.376/162.570	8.8	1013	5	50
	51101	2019-06-27/16:40	24.359/162.081	9.8	1008		
4	HY-2B	2019-07-21/04:34	24.374/162.542	6.9	1016	1	47
	51101	2019-07-21/04:30	24.359/162.081	7.9	1017		
5	HY-2B	2019-07-25/17:08	24.345/162.578	6.3	1014	5	50
	51101	2019-07-25/17:00	24.359/162.081	6.5	1019		
6	HY-2B	2019-08-04/04:34	24.345/162.536	7.9	1014	2	46
	51101	2019-08-04/04:30	24.359/162.081	7.0	1016		
7	HY-2B	2019-09-19/17:09	24.437/162.566	9.9	1013	1	50
	51101	2019-09-19/17:10	24.359/162.081	9.3	1014		
8	HY-2B	2019-12-12/17:09	24.480/162.563	13.7	1011	11	51
	51101	2019-12-12/17:10	24.359/162.081	12.9	1022		
9	HY-2B	2019-12-26/17:09	24.413/162.583	6.8	1014	5	51
	51101	2019-12-26/17:00	24.359/162.081	5.1	1011		
10	HY-2B	2020-01-09/17:09	24.453/162.574	10.0	1013	8	51
	51101	2020-01-09/17:00	24.359/162.081	10.3	1021		
11	HY-2B	2020-02-06/17:10	24.439/162.576	12.3	1011	8	51

续表

序号	数据源	观测时间	纬度°N/经度°E	海面风速/(m/s)	气压/hPa	气压绝对误差/hPa	距离/km
	51101	2020-02-06/17:00	24.359/162.081	11.5	1019		
12	HY-2B	2020-02-20/17:10	24.380/162.588	10.5	1012	14	51
	51101	2020-02-20/17:00	24.439/162.576	10.3	1026		
13	HY-2B	2020-03-05/17:10	24.359/162.586	9.4	1013	8	51
	51101	2020-03-05/17:00	24.439/162.576	9.7	1121		
14	HY-2B	2020-03-29/04:35	24.500/162.305	8.6	1013	8	28
	51101	2020-03-29/04:30	24.439/162.576	9.6	1018		
15	HY-2B	2020-04-26/04:36	24.000/162.490	8.7	1013	7	45
	51101	2020-04-26/04:30	24.439/162.576	8.8	1020		
16	HY-2B	2020-11-22/04:37	24.229/162.503	11.8	1017	4	45
	51101	2020-11-22/04:30	24.439/162.576	11.3	1021		
17	HY-2B	2021-01-17/04:37	24.256/162.507	4.6	1015	1	45
	51101	2021-01-17/04:30	24.439/162.576	5.8	1014		
18	HY-2B	2021-07-04/04:38	24.212/162.498	9.8	1013	6	45
	51101	2021-07-04/04:30	24.439/162.576	9.2	1019		
19	HY-2B	2021-08-01/04:38	24.250/162.510	9.2	1013	5	45
	51101	2021-08-01/04:30	24.439/162.576	9.1	1018		
20	HY-2B	2021-12-19/04:38	24.251/162.507	8.1	1013	5	45
	51101	2021-12-19/04:30	24.439/162.576	8.5	1018		
21	HY-2C	2021-01-23/19:15	24.087/162.623	9.4	1013	6	63
	51101	2021-01-23/19:20	24.439/162.576	10.9	1019		
22	HY-2C	2021-02-02/16:58	24.068/162.616	6.9	1014	2	63
	51101	2021-02-02/17:00	24.439/162.576	8.3	1012		
23	HY-2C	2021-04-03/03:12	24.085/162.616	6.5	1018	2	62
	51101	2021-04-03/03:10	24.439/162.576	7.8	1016		
24	HY-2C	2021-06-11/11:08	24.063/162.602	5.8	1015	9	62
	51101	2021-06-11/11:10	24.439/162.576	7.7	1024		
25	HY-2C	2021-12-26/13:14	24.060/162.616	10.5	1012	1	64
	51101	2021-12-26/13:10	24.439/162.576	10.1	1011		
26	HY-2D	2022-03-25/12:03	24.063/162.039	9.2	1013	9	
	51101	2022-03-25/12:00	24.439/162.576	8.5	1022		
27	HY-2D	2022-04-24/05:10	24.055/162.042	7.8	1014	7	34
	51101	2022-04-24/05:10	24.439/162.576	7.1	1021		
28	HY-2D	2022-05-05/02:53	24.049/162.052	8.5	1013	8	35
	51101	2022-05-04/02:50	24.439/162.576	8.0	1021		

4.4 国外卫星观测结果和分析

为了检验本文方法在国外同类卫星中的适用性，这里纳入与HY-2卫星雷达高度计和校正辐射计相同技术指标的Jason-1、Jason-2和Jason-3卫星观测数据进行比对评价。通过数据匹配，获取到Jason-1/2/3卫星3次飓风观测数据点，分别见表12—14所示。Jason-1和Jason-2卫星的2次观测，均观测到60 m/s以上的风速，风速绝对误差

≤3 m/s，气压绝对误差分别为2 hPa和0 hPa，说明本文方法对于60 m/s以上风速，并伴有10 mm/hr以上降雨率的情况下仍具备高精度风速和中心气压观测能力。在表14中，恰好有一次卫星和SFMR观测的比对数据，数据的比对时间超过时间窗口13 min，但两个观测点的距离是最接近的，风速绝对误差为0.4 m/s，海面气压的绝对误差为0，这个比对结果也具有参考意义。

表 12 Jason-1 卫星观测飓风 Isabel 风速和气压与 NHC 比对结果

Table 12 Comparison results of wind speed and pressure observed by Jason-3 and NHC data

数据	日期/时间	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ W	海面风速/(m/s)	海面气压/hPa	距离/km	降雨率/(mm/h)
Jason-1	2023-09-13/23:55	22.30	63.10	67	937	70	26.9
NHC	2023-09-14/00:00	22.90	63.30	70	935		

表 13 Jason-2 卫星观测飓风 Jose 风速和气压与 NHC 比对结果

Table 13 Comparison results of wind speed and pressure observed by Jason-3 and NHC data

数据	日期/时间	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ W	海面风速/(m/s)	海面气压/hPa	距离/km	降雨率/(mm/h)
Jason-2	2017-09-08/12:30	16.39	56.57	65.0	940	37	11.4
NHC	2017-09-08/12:00	16.10	56.40	65.0	940		

表 14 Jason-3 卫星观测飓风 Dorian 风速和气压与 SFMR 比对结果

Table 14 Comparison results of wind speed and pressure observed by Jason-3 and NHC data

数据	日期/时间/(mmdd/hhmm)	纬度/ $^{\circ}$ N	经度/ $^{\circ}$ W	海面风速/(m/s)	海面气压/hPa	距离/km	降雨率/(mm/h)
Jason-3	2019-09-04/23:27	30.82	80.21	41.4	984	5	12.7
SFMR	2019-09-04/20:14	30.84	80.26	41.0	984		

5 结论

(1) 本文基于 HY-2 卫星数据提出了主被动微波遥感联合观测热带气旋海面风速和气压的方法, 该方法适用于国内外具有天底指向的卫星雷达高度计和微波辐射计数据。

(2) 文中方法能够实现 50 m/s 以上风速的高精度观测, 与 CMA 预报数据和 SFMR 机载观测数据的绝对误差均在 2 m/s 以内, RMSE 分别为 1.3 m/s 和 1.0 m/s。

(3) 提出的海面气压观测方法, 与 SFMR 机载观测数据和 CMA、JTWC 以及 NHC 等比对的绝对误差均在 10 hPa 以内, 与 CMA 和 SFMR 的 RMSE 分别为 5.5 hPa 和 4.6 hPa, 证明了方法的可靠性。同时, 文中方法对于中低风速条件下的气压也具备观测能力。

(4) 基于文中方法有效弥补了降雨条件下主被动微波遥感观测能力的短板, 具备同时获取热带气旋风速和海面气压信息的能力。不足之处在于, 研究中因 HY-2 卫星观测数据时间和空间等方面的限制, 符合真实性验证要求的比对数据少, 后续将积累更长时段的卫星观测数据和全球范围内热带气旋数据进行更全面的数据分析和评估。

志 谢 感谢中国气象局热带气旋资料中心提供的台风信息。感谢美国国家海洋与大气管理局 (NOAA) 飞行业务中心提供的飓风期间机载飞行数据。感谢联合台风预警中心 (JTWC) 提供

的热带气旋信息。感谢 NOAA 飓风中心 NHC 提供的飓风信息。感谢 NDBC 浮标中心提供的风速和气压数据。

参考文献 (References)

- AOML. 2014. Hurricane Radar Data. Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory (AOML)
- Brown G S, Stanley H R and Roy N A. 1981. The wind-speed measurement capability of spaceborne radar altimeters. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 6(2): 59-63 [DOI: 10.1109/JOE.1981.1145484]
- Chelton D B and McCabe P J. 1985. A review of satellite altimeter measurement of sea surface wind speed: with a proposed new algorithm. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 90(C3): 4707-4720 [DOI: 10.1029/JC090iC03p04707]
- Chelton D B and Wentz F J. 1986. Further development of an improved altimeter wind speed algorithm. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 91(C12): 14250-14260 [DOI: 10.1029/JC091iC12p14250]
- Goldhirsh R E and Dobson E B. 1985. A Recommended Algorithm for the Determination of Ocean Surface Wind Speed Using A Satellite Borne Radar Altimeter. JHU/APLS1R85U-005. Applied Physics Laboratory, Johns Hopkins University
- Gourrion J, Vandemark D, Bailey S, Chapron B, Gommenginger G P, Challenor P G and Srokosz M A. 2002. A two-parameter wind speed algorithm for Ku-band altimeters. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(12): 2030-2048 [DOI: 10.1175/1520-0426(2002)019<2030:ATPWSA>2.0.CO;2]
- Jiang X W. 2014. Basic Theory and Engineering Application of Ocean Dynamic Environment Satellite. Beijing: China Ocean Press (蒋兴伟. 2014. 海洋动力环境卫星基础理论与工程应用. 北京: 海洋出版社)
- Lefevre J M, Barckicke J and Ménard Y. 1994. A significant wave height dependent function for TOPEX/POSEIDON wind speed re-

- trieval. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C12): 25035-25049 [DOI: 10.1029/94JC01958]
- Lin M S and Zhang Y G. 2018. Application status and development prospect of ocean dynamic environmental satellite in China. *Satellite Application*, (5): 19-23 (林明森, 张有广. 2018. 我国海洋动力环境卫星应用现状及发展展望. *卫星应用*, (5): 19-23) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-9030.2018.05.006]
- Lu X Q, Yu H, Ying M, Zhao B K, Zhang S, Lin L M, Bai L N and Wan R J. 2021. Western North Pacific tropical cyclone database created by the China meteorological administration. *Advances in Atmospheric Sciences*, 38(4): 690-699 [DOI: 10.1007/s00376-020-0211-7]
- Sharoni S M H, Reba M N M and Hossain M S. 2021. Tropical cyclone wind speed estimation from satellite altimeter-derived ocean parameters. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 126(4): e2020JC016988 [DOI: 10.1029/2020JC016988]
- Wang Z Z, Zhang D H, Zhao J and Li Y. 2013. In-orbit calibration and validation of atmospheric correction microwave radiometer on HY-2A satellite. *Strategic Study of CAE*, 15(7): 44-52, 61 (王振占, 张德海, 赵谨, 李芸. 2013. HY-2A 卫星大气校正微波辐射计在轨数据定标和检验研究. *中国工程科学*, 15(7): 44-52, 61) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-1742.2013.07.007]
- Witter D L and Chelton D B. 1991. A Geosat altimeter wind speed algorithm and a method for altimeter wind speed algorithm development. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 96(C5): 8853-8860 [DOI: 10.1029/91JC00414]
- Ying M, Zhang W, Yu H, Lu X Q, Feng J X, Fan Y X, Zhu Y T and Chen D Q. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 31(2): 287-301 [DOI: 10.1175/JTECH-D-12-00119.1]
- Zhang Z J and Dong X L. 2020. Sea level pressure retrieval in mid-to-low latitude regions using FY-3C/MWHTS data. *Chinese Journal of Space Science*, 40(3): 364-375 (张子瑾, 董晓龙. 2020. 基于FY-3C/MWHTS 观测资料反演中低纬度海面气压. *空间科学学报*, 40(3): 364-375) [DOI: 10.11728/cjss2020.03.364]

A retrieval method of tropical cyclone wind speed and sea level pressure based on HY-2 satellite data

ZHANG Youguang, JIA Yongjun, LIN Mingsen, MA Xiaofeng

1. National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081, China;

2. Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081, China

Abstract: Tropical cyclones are accompanied by different degrees of rainfall, which attenuates the remote sensing parameters obtained by the active microwave remote sensor to varying degrees, resulting in the underestimate of wind speed, and the wind speed above 30 m/s cannot be observed effectively.

Based on the comprehensive consideration of the sensitivity of HY-2 satellite radar altimeter and calibration microwave radiometer to wind speed observation, this paper proposes a new method for the joint observation of tropical cyclone wind speed and sea level pressure based on HY-2 satellite active and passive microwave remote sensor, that is, the influence of rainfall on radar altimeter observation during typhoon is compensated by using the brightness temperature of calibration radiometer T_{18} channel, to improve the observation ability of high wind speed; Based on the effective observation of typhoon high wind speed and the relationship between typhoon central pressure difference and wind speed difference, an inversion method of sea surface pressure is proposed.

The method can realize high-precision observation of wind speed above 50 m/s. The absolute error between the method and SFMR airborne observation data is within 2 m/s, and the RMSE is 1.0 m/s. The absolute errors of the proposed sea level pressure observation method compared with SFMR airborne observation data and CMA, JTWC and NHC are all within 10 hPa, and RMSE is 4.6 hPa, which proves the reliability of the method. At the same time, the method in this paper also has the ability to observe the sea level pressure under the condition of medium and low wind speed.

Based on HY-2 satellite data, a method for active and passive microwave remote sensing to jointly observe tropical cyclone sea surface wind speed and pressure is presented. This method is suitable for satellite radar altimeter and correction microwave radiometer data, which can make up for the shortage of active microwave remote sensing payload observation ability under the condition of tropical cyclone rainfall, and has the ability to simultaneously obtain the information of tropical cyclone wind speed and sea level pressure. The deficiency lies in that, due to the time and space limitations of HY-2 satellite observation data in the study, there are few comparison data that meet the requirements of verification. Subsequently, HY-2 satellite observation data for a longer period of time and global tropical cyclone data will be accumulated for more comprehensive data analysis and evaluation. In terms of data evaluation, it is proposed to apply the method in this paper to the Jason series of satellite observation to obtain the satellite observation data of tropical cyclone in a long time series, and realize more observation of typhoon or hurricane wind speed, so as to give more objective statistical analysis results. At the same time, it can also further test the applicability of the method in this paper on similar satellites. In terms of sea level pressure observation, the method in this paper is proposed to be further improved and evaluated with NDBC buoy data in order to realize sea level pressure observation under non-cyclone conditions and expand radar altimeter.

Key words: remote sensing, HY-2 satellite, tropical cyclone, wind speed, sea level pressure, inversion method

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFC3101502)