

燕亚菲,谈建国,崔林丽,等,2019.利用葵花8号(Himawari-8)高时空分辨率的红外亮温资料估计台风莫兰蒂的短时强降水及其演变[J].气象,45(3):318-329. Yan Y F, Tan J G, Cui L L, et al, 2019. Estimating the short-time severe precipitation of Typhoon Meranti and its evolution by using the infrared brightness temperature data from Himawari-8 satellite with high spatio-temporal resolution[J]. Meteor Mon, 45(3):318-329(in Chinese).

利用葵花8号(Himawari-8)高时空分辨率的红外亮温资料估计台风莫兰蒂的短时强降水及其演变^{*}

燕亚菲^{1,2,3} 谈建国⁴ 崔林丽¹ 岳彩军¹ 郭巍¹ 刘冬韡¹

1 上海市气象科学研究所,上海 200030

2 中国气象局上海台风研究所,上海 200030

3 中国科学院大气物理研究所 LASG 实验室,北京 100029

4 上海市气候中心,上海 200030

提 要:为探究高时空分辨率卫星资料在我国登陆台风降水预报中的作用,本文针对2016年14号超强台风莫兰蒂,采用Himawari-8亮温资料通过定量降水估计(quantitative precipitation estimation, QPE)方法估算降水强度,并利用国家气象信息中心全国综合气象信息共享系统(China Integrated Meteorological Information Sharing System, CIMISS)提供的台站降水资料进行质量评估。结果表明:(1)卫星估算与地面实测的降水落区有较好的对应关系,但是卫星高估了弱降水,而低估了强降水(尤其在海拔地区);(2)卫星估算与地面实测的降水强度并非同位相变化,而是实测降水滞后于卫星估算的降水,该滞后时间在台风登陆后的移动区较长(约2~2.5 h);(3)整体而言,卫星估算的某时刻降水强度与未来一段时间内(约2~2.5 h)该地区的实际总降水量有很强相关性,说明Himawari-8卫星估算的降水可在台风降水的预警预报中提供指示作用。

关键词:台风降水,莫兰蒂, Himawari-8, CIMISS, 定量降水估计(QPE)

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2019.03.003

Estimating the Short-Time Severe Precipitation of Typhoon Meranti and Its Evolution by Using the Infrared Brightness Temperature Data from Himawari-8 Satellite with High Spatio-Temporal Resolution

YAN Yafei^{1,2,3} TAN Jianguo⁴ CUI Linli¹ YUE Caijun¹ GUO Wei¹ LIU Dongwei¹

1 Shanghai Institute of Meteorological Science, Shanghai 200030

2 Shanghai Typhoon Institute, CMA, Shanghai 200030

3 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics (LASG),
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

4 Shanghai Climate Centre, Shanghai 200030

Abstract: In order to explore applications of satellite data with high resolution to the prediction of typhoon precipitation, a landfall typhoon case (Super Typhoon Meranti) was studied by using Himawari-8 (H8) satellite data. The precipitation intensity was estimated first by using an improved QPE (quantitative precipitation estimation) method and then evaluated by observation dataset from CIMISS (China Integrated

^{*} 上海市气象科技开发项目(QM201711)、上海市自然科学基金项目(18ZR1434100)、上海市定向征集项目(17DZ1205300)、华东区域气象科技协同创新基金合作项目(QYHZ201611)和国家自然科学基金项目(41405046)共同资助

2017年9月19日收稿; 2018年12月27日收修定稿

第一作者:燕亚菲,主要从事云、辐射与降水的研究. Email: feifeiyan_1988@126.com

Meteorological Information Sharing System). The results are as follows. (1) The precipitation estimated from H8 satellite has a good correspondence with the ground observations in terms of rainfall area, but the satellite overestimates weak precipitation and underestimates heavy rainfall, especially at high altitudes, which is due to lack of consideration of terrains' effect on promotion of precipitation in the QPE algorithm. (2) The time series of precipitation intensity from estimation and observation do not vary in same phase, and the observed precipitation lags behind the estimation. (3) Generally, the precipitation intensity estimated by the H8 satellite is positively correlated with the total precipitation later observed over a period (about 2–2.5 h). Besides, the correlation is also large between the total precipitation over a period (about 2–2.5 h) estimated by the satellite and the precipitation intensity measured on the ground later. This indicates that precipitation estimated by the H8 satellite could play an indicative role in the early warning of typhoon precipitation.

Key words: typhoon precipitation, Typhoon Meranti, Himawari-8 (H8), CIMISS (China Integrated Meteorological Information Sharing System), quantitative precipitation estimation (QPE)

引言

我国是世界上少数几个受台风灾害影响最严重的国家之一,平均每年约有7个台风在我国登陆(康斌,2016)。近年来,在全球变暖的背景下,登陆台风的平均强度明显增强、强台风数量明显增多(雷小途等,2009)。台风灾害以大风、暴雨和风暴潮为主,而与台风大风相比,台风暴雨致灾往往更强(陈联寿和丁一汇,1979)。例如2006年7月12日台风碧丽斯在福建登陆后,给湖南和江西南部 and 广东北部带来特大暴雨,引发了严重的山体滑坡和泥石流灾害,造成600多人死亡和200多人失踪,直接经济损失达459.1亿元,是1949年以来经济损失最大的一个台风(冯涛等,2013)。因此,对台风降水进行定量研究是防灾减灾的一项重要课题。

长期以来,业务预报人员一直十分关注台风降水定量估计。然而无论是地基台站,还是雷达探测,都具有空间覆盖率低的缺陷,不足以准确把握台风降水的空间分布和强度变化。随着遥感技术的发展,人们采用卫星资料对台风降水进行定量研究的工作越来越多(Rodgers and Pierce, 1995; 丁金才等,2004; 何会中等,2006; 王咏梅等,2006; 傅云飞等,2007; 丁德平和李英,2009; 潘旻等,2011; 崔林丽等,2012; 江漫和漆梁波,2016; 刘喆等,2013; Chen and Fu, 2015)。尤其是静止气象卫星具有时空分辨率高、覆盖范围广、时间连续性强等特点,弥补了常规观测资料的局限性,在气象业务中发挥了重要的作用。静止气象卫星提供的云顶亮温(TBB)资料可

以揭示云的存在和云所处演变阶段中的显著特征,在一定程度上能够反映台风的雨区分布。魏建苏(1996)、陈佩燕等(2006)、陈红和赵员春(2008)、覃丹宇和李博(2012)、梁军等(2015)已将TBB资料应用于台风研究中,并指出TBB与降水有很好的对应关系,TBB值越低降水越强,并且对流最旺盛的区域往往和陡变的TBB梯度区相对应。在Adler and Negri(1988)、Goldenberg et al(1990)及Li et al(1993)定量估计降水工作的基础之上,岳彩军等(2006)根据GMS-5卫星提供的TBB资料和逐小时观测雨量强度及水平分布特点,采用对流云-层云分类技术,建立了一种可用于登陆台风定量降水估计(quantitative precipitation estimation, QPE)的方法,能够分离出对流降水和层云降水,因此已在台风降水的相关研究中得到了广泛应用(Yu et al, 2009; 李宁等,2008; 吴启树等,2010; 姚丽娜等,2009; Shu et al, 2012; 曹钰等,2013)。

日本气象厅于2014年10月发射的Himawari-8(以下简称H8)卫星,是迄今为止拥有较高时空分辨率的静止气象卫星,可每隔10 min向地面传回一次空间分辨率为 $2\text{ km}\times 2\text{ km}$ 的数据。其搭载的可见光和红外扫描辐射计(AHI)是一个拥有16个通道的多光谱成像仪,可捕获亚洲-太平洋地区的可见光和红外图像。目前,H8卫星已在地表(刘超等,2017)和海表(Kurihara et al, 2016)温度反演、云和雾-霾探测(Shang et al, 2017)、气溶胶数据同化(Yumimoto et al, 2016)和森林火灾探测(Xu and Zhong, 2017)等领域得到应用,然而其在台风降水中的应用尚未开展。采用高时空分辨率的H8卫星

资料对台风降水进行定量估计研究,不仅有助于弥补传统低分辨率卫星资料在台风降水应用中的缺陷,还可以为我国发射的风云四号卫星在未来台风降水中的应用提供基础。

2016 年超强台风莫兰蒂(图 1),亦即当年全球海域的最强风暴,于 2016 年 9 月 10 日 14 时在西北太平洋生成后,11 日 14 时加强为强热带风暴,12 日 02 时加强为台风,08 时加强为强台风,11 时继续加强为超强台风,13 日晚间加强到最大强度($75 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),15 日以强台风级在我国福建厦门登陆,登陆时中心最大风力为 $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,当日 17 时减弱为热带低压,并于 17 日凌晨在我国黄海海域消散,其运动路径如图 1 所示。台风莫兰蒂有降雨总量大、范围广、强度大,以及防范难度大等特点,我国多个地区甚至经历了百年一遇的强降水。据统计,该次台风过程共造成 30 人死亡,49 人受伤,18 人失踪,经济损失高达 26.3 亿美元。因此,选取超强台风莫兰蒂作为典型个例进行研究具有重要的科学价值和现实意义。

综上所述,本文拟针对 2016 年超强台风莫兰蒂,基于较高时空分辨率的静止气象卫星 H8 提供的 TBB 数据,首先采用 QPE 方法对其降水强度进行定量估算,然后将卫星估算的结果与气象台站的实测降水进行对比,探究两者可能存在的对应关系,以期探索 H8 卫星资料在台风降水预报中的作用。文中所涉及的时间均为北京时。

1 资料与方法

1.1 资料

本研究采用 2016 年 9 月 13—17 日(涵盖台风过境期间)H8 卫星提供的 TBB 数据进行定量降水估计。鉴于岳彩军等(2006)采用的红外亮温通道波长为 $11 \mu\text{m}$,因此本文采用 H8 卫星提供的第 14 通道(波长约 $11.2 \mu\text{m}$)的 TBB 数据进行研究。

为了检验卫星估算的台风降水的精度,本文还采用国家气象信息中心全国综合气象信息共享平台(CIMISS)提供的同时段我国华东区域 13810 个自动站每 10 min 的观测资料对其进行质量评估。首先利用 13810 个台站每 10 min 的累积降水量计算出每 10 min 的降水强度(单位: $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$),然后对所得的台站降水强度通过阈值判断进行质量控制,

即若台站降水强度在 $0 \sim 500 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,则认为其是有效值,否则赋予缺省值。

1.2 方法

1.2.1 定量降水估算方法

岳彩军等(2006)采用 GMS-5 卫星资料开发的 QPE 方法可用于定量估算台风降水强度,本文基于该方法,通过参数修改和调整,得到可适用于 H8 卫星资料的登陆台风降水的估计方法,其计算流程如图 2 所示。

具体计算步骤描述如下:

(1) 确定对流核,对于 TBB 不高于 253 K 的格点,判断该点的 TBB 是否小于或等于其周围相邻格点,若是,则计算该点 T_{\min} 的对流倾斜参数 $S_{i,j}$ [式(1)]和对流倾斜参数临界值 $Slope$ (式 2)。

$$S_{i,j} = \frac{\bar{\Delta}}{4} \left[\frac{T_{i-1,j} + T_{i+1,j} - 2T_{i,j}}{\Delta EW} + \frac{T_{i,j-1} + T_{i,j+1} - 2T_{i,j}}{\Delta NS} \right] \quad (1)$$

$$Slope = \exp[0.0826(T_{\min} - 217)] \quad (2)$$

式中, T 即 TBB, $\Delta EW = \Delta NS = 2 \text{ km}$ (即 H8 卫星的水平分辨率); $\bar{\Delta} = 5.6 \text{ km}$, 其为 GOES 卫星的水平分辨率;若 $S_{i,j} \geq Slope$, 则判定 T_{\min} 所在的格点即为对流核。

(2) 建立 T_{\min} 校正公式,鉴于卫星可视场分辨率不同于一维云模式的水平分辨率, T_{\min} 不可直接用于计算对流降水覆盖面积及平均对流降水率,因此,需通过 H8 卫星与 GOES 卫星水平分辨率的差异计算 T_{\min} 的矫正值 T_c [式(3)]。

$$T_{\min} - T_c = \begin{cases} 0.056 T_{\min} - 11.23 & T_{\min} > 200 \text{ K} \\ 0 & T_{\min} \leq 200 \text{ K} \end{cases} \quad (3)$$

(3) 计算对流降水覆盖面积 A_r [式(4)]和平均对流降水率 R_{mean} [式(5)],本研究中对流降水覆盖面积的计算与岳彩军等(2006)保持一致,而与其相似地,参照登陆台风影响期间地面自动站逐时雨量资料,对对流降水率的计算公式进行了调整,得到可用于 H8 卫星估算登陆台风降水强度的公式,对于对流降水覆盖面积下的每个格点,均采用步骤(2)对其云顶温度进行校正,然后根据校正温度计算得到该点对应的对流降水率。

$$A_r = \exp(15.27 - 0.0465 T_c) \quad (4)$$

$$R_{\text{mean}} = \exp(-0.0257 T_c + 7.968) \quad (5)$$



图 1 2016 年超强台风莫兰蒂移动路径
(<http://www.wztf121.com/history.html>)
Fig. 1 Movement path of Super Typhoon Meranti in 2016
(<http://www.wztf121.com/history.html>)

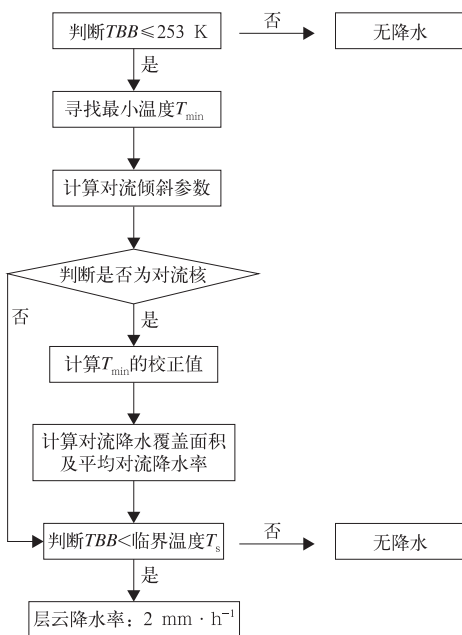


图 2 本研究 QPE 方法计算流程
Fig. 2 Main calculation process of QPE method used in this study

(4) 当某些格点的云顶温度小于临界温度 T_s [临界温度的计算详见岳彩军等(2006)], 且未被赋予对流降水率时, 这些格点则被判定为层云降水, 降水率赋值为 $2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

1.2.2 统计检验方法

本文采用皮尔逊相关系数及 t 检验方法对卫星

估算和台站实测降水的相关性进行了计算和检验, 统计方法的详细描述见魏凤英(2007)。

需要说明的是: 在对卫星估算的格点降水与台站观测的站点降水进行对比和相关性计算时, 取距离台站最近的格点与台站进行空间匹配。由于 H8 卫星的空间分辨率为 2 km , 因此卫星估算与实测降水的台站之间的空间距离在 1 km 之内, 认为是合理的。

2 结 果

2.1 卫星估算和台站实测降水强度的对比分析

2.1.1 空间分布及相关性

从图 3 可以看出, 台风登陆后云系依然呈螺旋状分布, 较低的云顶亮温区往往对应着降水的发生。从卫星估算和台站观测的降水落区来看, 两者有很好的对应关系; 但是从降水强度的分布来看, 卫星对于弱降水(台站降水强度 $< 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$) 有一定高估, 而对于强降水(台站降水强度 $> 20 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 则明显低估。另外, 注意到台站中的强降水主要位于我国东南部海陆交界至武夷山脉一带, 并且其分布与地形走向较吻合, Wesley and Pielke(1990)、陈潜和赵鸣(2006)、黄奕武等(2009)、周福等(2016)、段晶晶等(2017)、梁红丽和程正泉(2017)曾指出地形对于降水具有促发机制, 而 QPE 方法仅通过 TBB 估算降水, 并未考虑地形的影响, 因此认为这是造成 H8 卫星估算的强降水比实测低的原因。

9 月 13—17 日, 同时刻卫星估算与台站实测降水强度之间存在着较强相关性, 尤其在台风登陆区 ($24^{\circ} \sim 26^{\circ} \text{N}$ 、 $117^{\circ} \sim 119^{\circ} \text{E}$)、登陆后的移动区 ($28^{\circ} \sim 30^{\circ} \text{N}$ 、 $117^{\circ} \sim 121^{\circ} \text{E}$), 以及台风消亡入海区 ($33^{\circ} \sim 34^{\circ} \text{N}$ 、 $119^{\circ} \sim 121^{\circ} \text{E}$), 两者的相关系数超过了 0.6 (图 4a), 说明 H8 卫星对台风莫兰蒂的降水过程具有较好的估计能力。然而两者的均方根误差 (图 4b) 在海陆交界处最大 (可达 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$), 随着向内陆延伸, 误差逐渐减小。说明从定量角度而言, 同时刻估算的台风降水与实测值仍有较大差异, 尤其在海陆交界处, 再一次说明了未考虑地形影响的 QPE 方法对登陆台风降水估算的局限性。

2.1.2 最大相关区域时间序列演变

为了更好地考察 H8 卫星估算台风降水的效果, 绘制整个台风莫兰蒂登陆期间卫星估算与台站

实测降水强度相关性最高的三个子区域的时间序列图(图 5)。在台风登陆区(图 5a),当实测有降水时,卫星也能估算出有降水发生,并且两者的降水强度

较吻合;而此区域在台风登陆之前,当实测并没有降水时,卫星却估算出有降水发生(尤其是 9 月 14 日 00—12 时),进一步采用 TRMM 卫星的 3 h 降水数

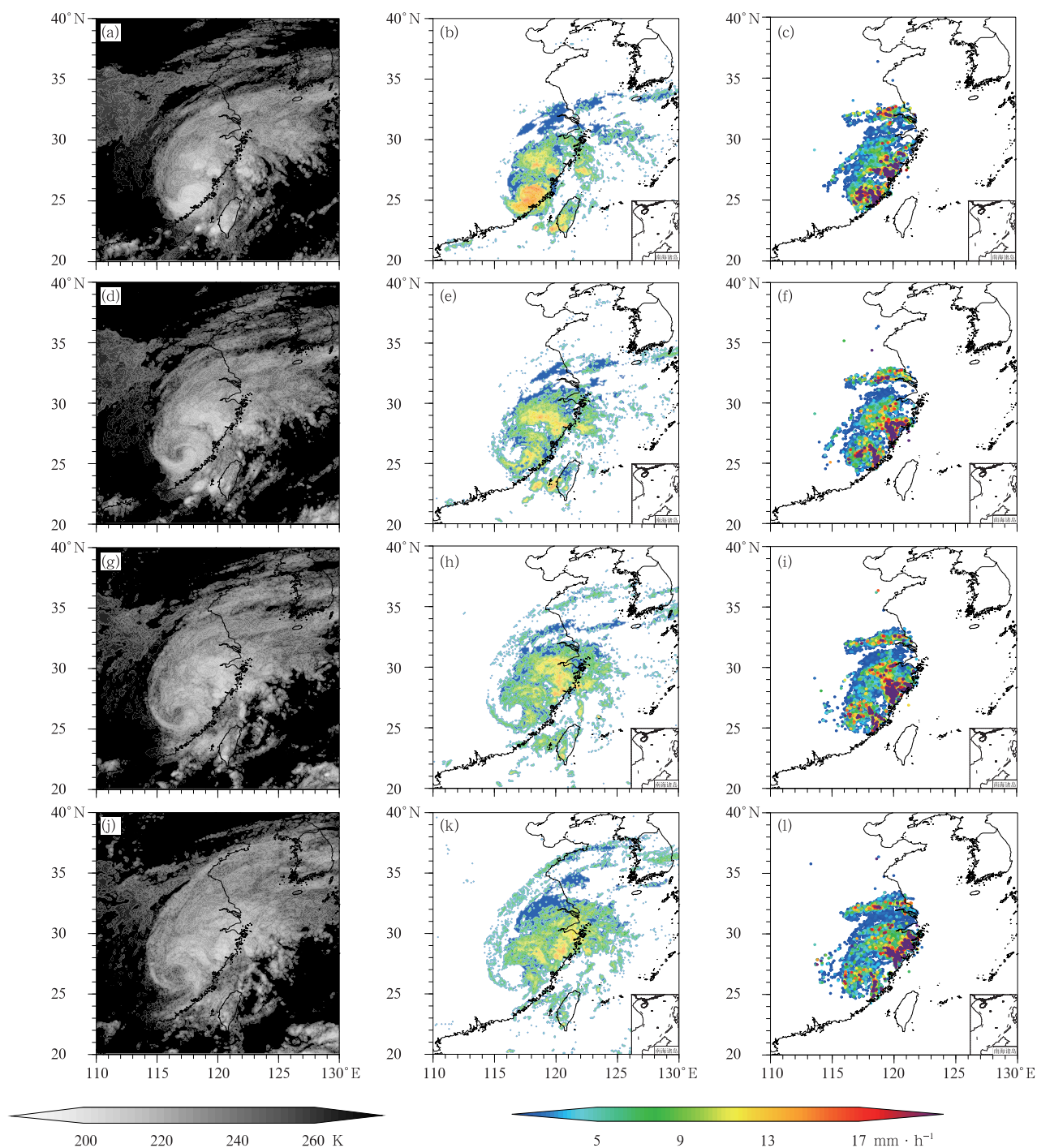


图 3 2016 年 9 月 15 日 08 时(a,b,c)、10 时(d,e,f)、12 时(g,h,i)、
14 时(j,k,l)H8 卫星观测的 TBB(a,d,g,j)、估算的降水强度(b,e,h,k)
和 CIMISS 台站观测的降水强度(c,f,i,l)

Fig. 3 Spatial distribution of TBB (a, d, g, j) observed by H8 satellite, precipitation intensity (b, e, h, k) estimated by H8 satellite and precipitation intensity (c, f, i, l) observed by CIMISS at 08:00 BT (a, b, c), 10:00 BT (d, e, f), 12:00 BT (g, h, i) and 14:00 BT (j, k, l) 15 September 2016

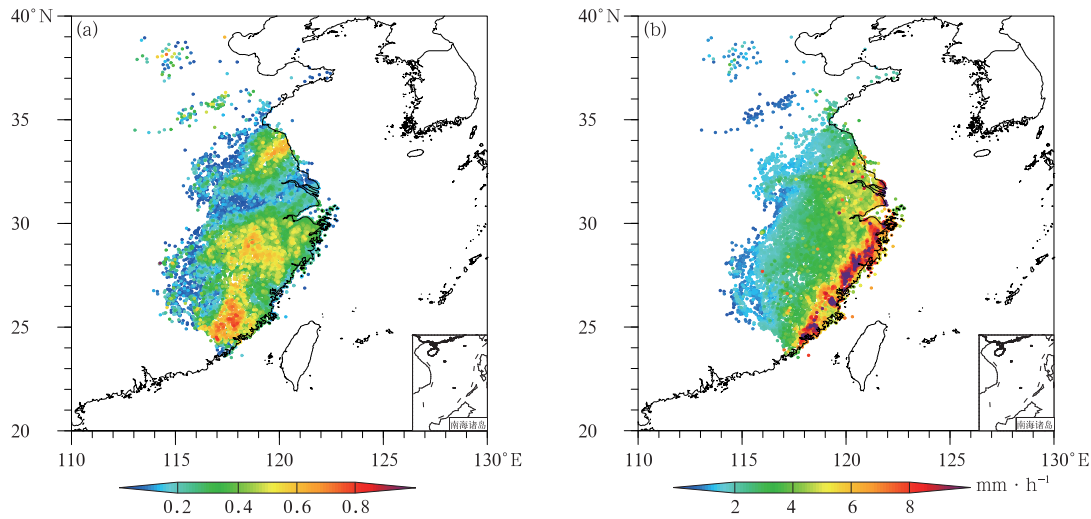


图 4 2016 年 9 月 13—17 日 H8 卫星估算的降水强度和同时刻 CIMISS 台站观测的降水强度之间的相关系数(a)和均方根误差(b)
(彩色点:通过 0.10 显著性水平检验)

Fig. 4 Correlation coefficients (a) and root mean square error (b) between the precipitation intensities estimated by H8 satellite and observed by CIMISS at same time from 13 to 17 September 2016
(color dots: having passed the 0.10 significance level test)

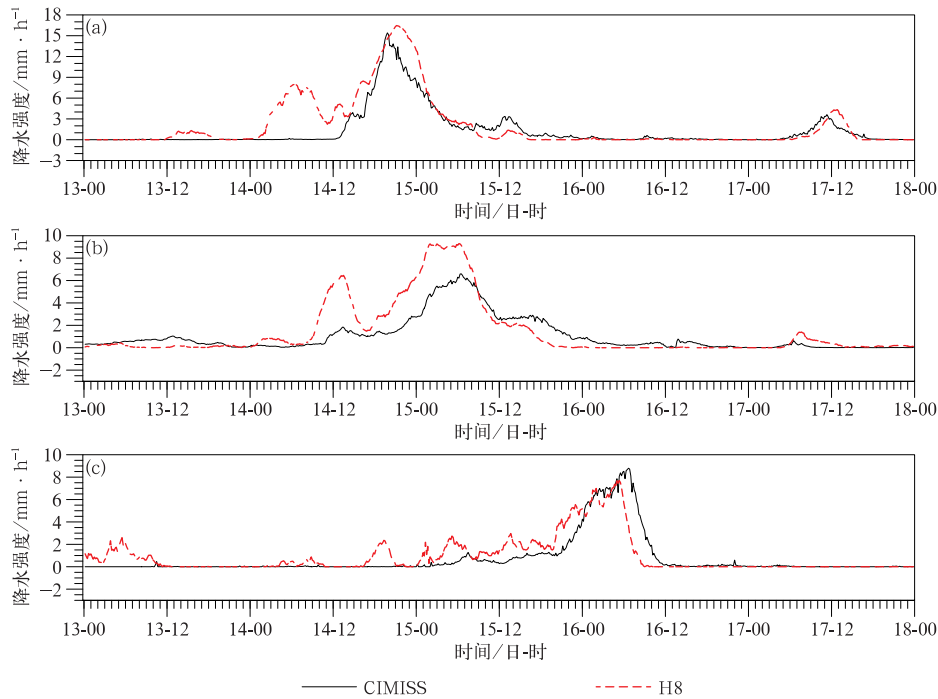


图 5 2016 年 9 月 13—17 日,三个子区域中 H8 卫星估算和 CIMISS 台站观测的降水强度的时间序列
(a)台风登陆区(24°~26°N、117°~119°E), (b)登陆后的移动区(28°~30°N、117°~121°E),
(c)台风消亡入海区(33°~34°N、119°~121°E)

Fig. 5 Time series of precipitation intensities estimated by H8 satellite and observed by CIMISS in three sub-regions from 13 to 17 September 2016
(a) typhoon landing area (24°—26°N, 117°—119°E),
(b) typhoon moving area after landing (28°—30°N, 117°—121°E),
(c) typhoon extinguishing area (33°—34°N, 119°—121°E)

据做时间序列图(图略),发现该降水峰值依然存在,由此推断卫星资料在登陆台风的降水反演中存在“空报”的情况。在台风登陆后的移动区(图 5b),尽管就大范围平均而言,卫星估算的降水强于台站观测,但是一个更重要的信号是:前者的位相变化领先于后者(约 2~3 h)。在台风消亡入海区(图 5c),当台站有降水时,卫星也能估计出一定强度的降水,并且两者的量值十分接近,然而卫星估算的降水位相变化依然领先于台站观测。因此,我们认为仅通过云顶温度对降水强度进行估计的方法具有一定预报时效的作用,这是因为云和降水的形成与发展演变包含着非常复杂的云微物理过程(肖辉等,2004;陶玥,2007;王思懋和银燕,2011;杨文霞,2013),而从云顶温度降低到降水粒子落下并在地面观测到降水则需要一定时间。

2.2 卫星估算与台站实测降水之间可能存在的关系探究

由图 5 可见,台风登陆后对各地的风雨影响既非 9 月 13—17 日全时段,也非同时。与降水集中发生时段相比,非降水时段对卫星估算与台站实测降水之间的相关系数具有重要影响。因此,在评估卫星估算的台风降水时,有必要对统计样本做进一步筛选。

2.2.1 各站点实际受台风影响时段确定

这里采用的方法是以 CIMISS 每 10 min 的台站降水强度做判断,若从某一时刻开始出现降水,并在其之后的连续 6 个时次内(即 1 h 内)至少一次有降水,则定义该时刻为该站受台风影响的开始时间(图 6a);相似地,从某一降水时刻开始,若在其之后

的连续 6 个时次内均无降水发生,则定义该时刻为受台风影响的结束时间(图 6b);两者之差即为台风在该站的过境时长(图 6c)。可以看到台风自 9 月 14 日 06 时前后在福建一带开始造成风雨影响,而后逐步向北对江西、江苏、浙江、安徽等地造成影响,并于 9 月 16 日 13 时影响山东半岛。降水结束时间(图 6b)与开始时间(图 6a)的推进相似,而受该次台风风雨影响时间最久(约 28 h)的是台风登陆地附近,这是由于台风登陆后,受地形阻挡,其移动速度变缓以致原地打转。另外,浙江东部和安徽东部等地受台风风雨影响的时间也较长,结合地势的分布,认为在同样的水汽条件下,这是由较高地形对降水的促进影响所致。

2.2.2 可能存在的关系探究

利用图 6 提取的各站点实际受台风莫兰蒂影响的降水样本序列,重新对卫星估算和台站实测降水之间的相关系数进行三组计算。分别是:某时刻估算的降水强度和不同滞后时刻实测降水强度之间的相关系数(图 7a~7f),记为 A 组;某时刻估算的降水强度和未来一段时间内实际总降水量之间的相关系数(图 7g~7l),记为 B 组;某时刻的实测降水强度和该时刻之前一段时间内估算的总降水量之间的相关系数(图 7m~7r),记为 C 组。从图 7 中看到,三组计算中卫星估算和实测降水之间的相关性都随着时间增长而减弱;尽管某时刻估算的降水强度与 1 h 后的实测降水强度之间存在较强相关,但是这种相关性仍弱于其与未来一段时间内实际总降水量之间的相关性;从 B 组计算结果中,看到在台风登陆区和登陆后的移动区,某时刻估算的降水强度与该时刻未来 2~3 h 内的实际总降水量之间的相关

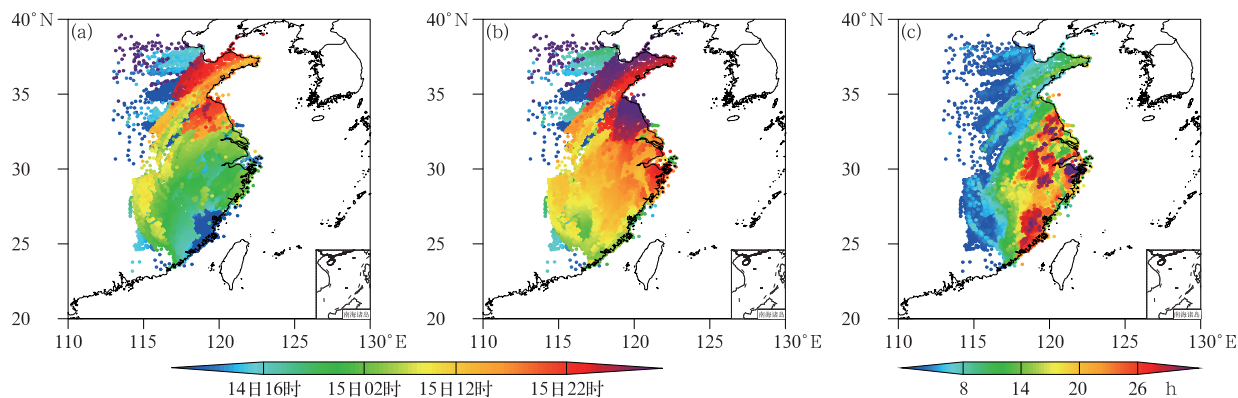


图 6 各站点受台风莫兰蒂影响的起始时间(a)、结束时间(b)和过境时长(c)

Fig. 6 The start time (a), end time (b) and transit duration (c) of Typhoon Meranti at each station

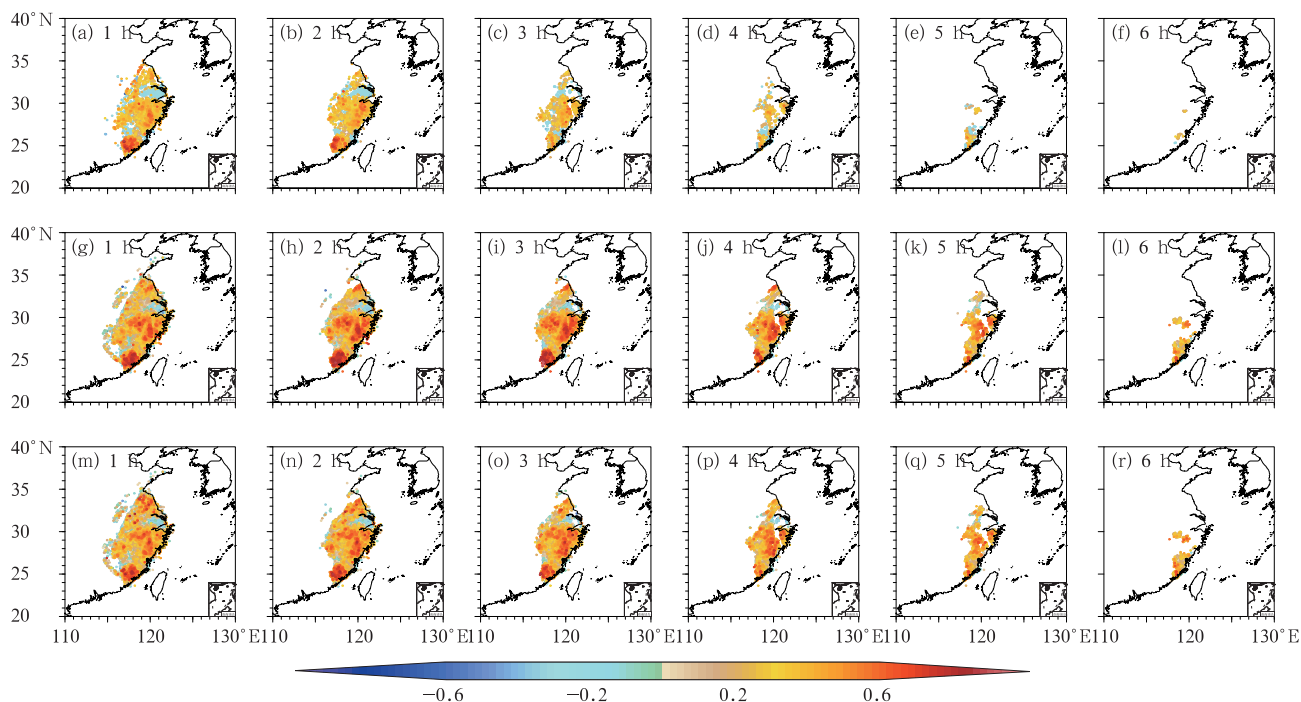


图7 H8卫星估算的降水和 CIMISS 台站观测的降水在不同滞后时间长度的相关系数分布

(a~f)某时刻 H8 卫星估算的降水强度与未来时刻 CIMISS 台站观测的降水强度,
(g~l)某时刻 H8 卫星估算的降水强度与未来一段时间内 CIMISS 台站观测的总降水量,
(m~r)某时刻 CIMISS 台站观测的降水强度与之前一段时间内 H8 卫星估算的总降水量
(彩色点:通过 0.10 显著性水平检验)

Fig. 7 Spatial distribution of correlation coefficients between estimated precipitation and observed precipitation at different lag time

(a, b, c, d, e, f) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and precipitation intensity observed by CIMISS at another coming time; (g, h, i, j, k, l) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and total precipitation observed by CIMISS for a future period;
(m, n, o, p, q, r) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and total precipitation observed by CIMISS for a previous period
(color dots; having passed the 0.10 significance level test)

度最高,且相关系数大于 0.6,甚至可达 0.8(图 7h 和 7i),说明 H8 卫星估算的登陆台风降水强度对于未来一段时间的总降水量有很好的预报意义。其次,某一时刻之前一段时间内(2~3 h 内)卫星估算的总降水量对该时刻的实际降水强度(图 7n 和 7o)也具有一定指示意义。

进一步分析 H8 卫星估算与实际降水之间的最大相关系数及其对应的时间滞后度(图 8)。图 8a 和 8d 显示几乎所有站点卫星估算与台站实测降水强度之间的最强相关都非同时的,而是台站实测降水滞后于卫星估算的降水,该滞后度在 0.5~4 h。图 8a~8c 显示卫星估算与台站实测降水相关性最高的站点都主要位于台风登陆区和登陆后的移动

区,而在这些区域中,相比于 A 组和 C 组,B 组的相关系数是最大的,最大相关系数对应的时间滞后度在台风登陆区较短(一般为 1~2.5 h),在台风登陆后的移动区较长(一般为 2~4.5 h)(图 8e)。体现了卫星估算的降水强度对未来一段时间内总降水量的预报意义。

进一步给出所有站点卫星估算和台站实测降水之间最大相关系数的四分位图(图 9a~9c)和不同时间滞后度对应的关系系数(图 9d~9f)。图 9a 和图 9d 更直观地反映出某时刻估算的降水与未来时刻实际降水强度之间的关系在 2 h 后有明显的随时间滞后度增长而减弱的趋势;与其相比,图 9b 和 9c 的中位数及图 9e 和 9f 的曲线都有明显的随时间滞

后度增长,对应的相关系数先增大后减小的特征,并且当时间滞后度为 $2 \sim 2.5$ h 时达到最大。然而与 B 组相比, C 组的相关性较弱,但是仍强于 A 组。换言之,对于登陆台风降水,卫星估算的某时刻降水强度与未来一段时间内 ($2 \sim 2.5$ h) 台站的总降水量之间相关性最强,并且强于某时刻实测降水强度与该时刻之前一段时间内 ($2 \sim 2.5$ h) 卫星估算的总降水

量之间的相关性,而与之相比,卫星估算的某时刻降水强度与未来某时刻台站实测降水强度之间的相关性最弱。由此得出结论: H8 卫星估算的降水强度对于未来一段时间的总降水量有较好的预测意义;其次,卫星估算的一段时间内的降水总量对于未来时刻的降水强度也有一定的预测意义。

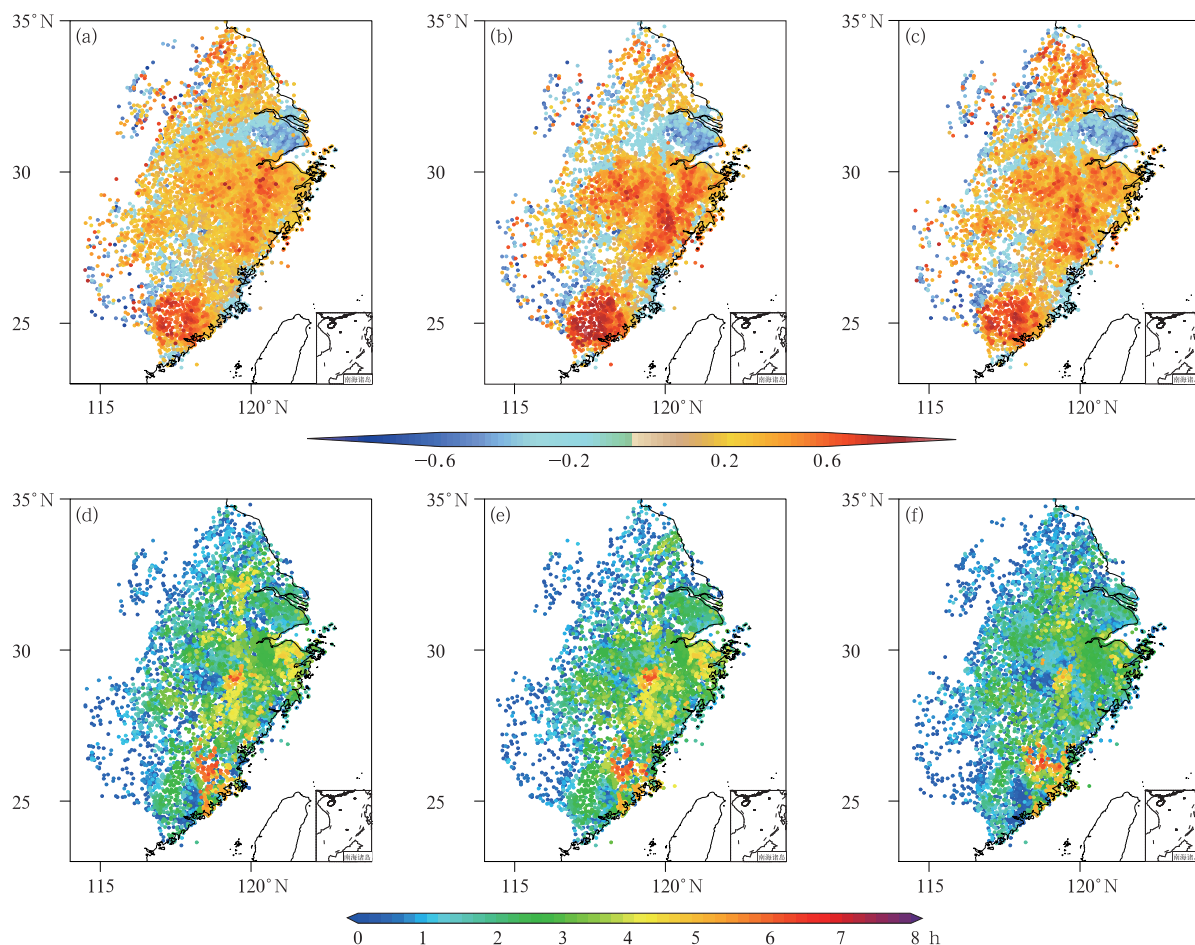


图 8 H8 卫星估算的降水和 CIMISS 台站观测的降水的最大相关系数(a,b,c)及其对应的滞后时间(d,e,f)分布

(a,d)某时刻 H8 卫星估算的降水强度与未来某时刻 CIMISS 台站观测的降水强度,
(b,e)某时刻 H8 卫星估算的降水强度与未来一段时间内 CIMISS 台站观测的总降水量,
(c,f)某时刻 CIMISS 台站观测的降水强度与之前一段时间内 H8 卫星估算的总降水量
(彩色点:通过 0.10 显著性水平检验)

Fig. 8 Spatial distributions of the maximum correlation coefficient (a, b, c) and its corresponding lag time (d, e, f) between estimated precipitation and observed precipitation
(a, d) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and precipitation intensity observed by CIMISS at another coming time; (b, e) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and total precipitation observed by CIMISS for a future period; (c, f) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and total precipitation observed by CIMISS for a previous period
(color dots: having passed the 0.10 significance level test)

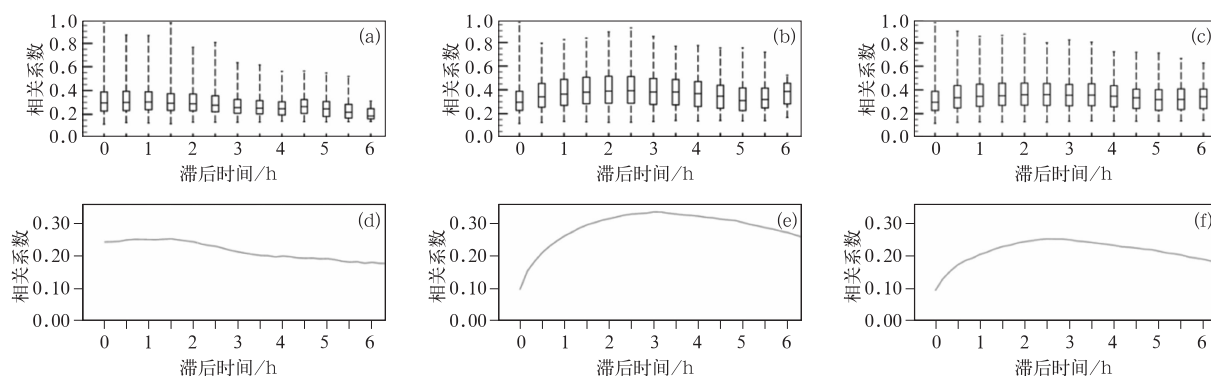


图9 所有站点卫星估算和实测降水之间在不同时间滞后度相关系数的四分位图(a,b,c)

和不同时间滞后度对应的所有站点平均相关系数(d,e,f)

(a,d)某时刻 H8 卫星估算的降水强度与未来某时刻 CIMISS 台站观测的降水强度,
(b,e)某时刻 H8 卫星估算的降水强度与未来一段时间内 CIMISS 台站观测的总降水量,
(c,f)某时刻 CIMISS 台站观测的降水强度与之前一段时间内 H8 卫星估算的总降水量
(所有站点通过 0.10 显著性水平检验)

Fig. 9 Quartile plots of the correlation coefficients (a, b, c) and the averaged lag time corresponding to the correlation coefficients (d, e, f)

(all stations having passed the 0.10 significance level test)

(a, d) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and precipitation intensity observed by CIMISS at another coming time; (b, e) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and total precipitation observed by CIMISS for a future period;
(c, f) precipitation intensity estimated by H8 satellite at a time and total precipitation observed by CIMISS for a previous period

3 结论与讨论

利用静止卫星 H8 提供的高时空分辨率亮温资料,采用 QPE 方法估算了台风莫兰蒂登陆期间我国华东地区的降水强度,并将估算的降水与 CIMISS 提供的 13810 个自动站观测的降水进行对比,研究了两者之间的相关关系,所得结论如下:

(1) 卫星估算与台站实测降水落区能够较好对应,但是对于弱降水,卫星估算的降水偏强,而对于强降水,卫星估算的降水偏弱。对强降水的低估与 QPE 方法仅以 TBB 作为降水强度的判据,而未考虑地形对降水的促进作用有关,这也造成估算的降水强度在沿海一带误差最大(可达 $10 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$)。

(2) 卫星估算的降水强度和台站实测的降水强度之间的最强相关区域主要位于台风登陆区、登陆后移动区和消亡入海区。然而两者并非同位相变化,而是与卫星估算的结果相比,实测降水存在一定的滞后时间。

(3) 整体而言,卫星估算的登陆台风降水强度

对于未来一段时间内(2~2.5 h)的总降水量有很好的预报意义;其次,利用卫星资料估算的某时刻之前一段时间内(2~2.5 h)的总降水量对于该时刻的降水强度也有一定的预报意义。

通过高时空分辨率的 H8 卫星反演的降水产品能够为我国登陆台风降水的预警预报提供一定的指示作用,从而为防灾减灾提供可靠的参考价值。但是需要说明的是,本文所用的台站降水强度是用 10 min 的累积降水量计算所得,而非严格意义上某一时刻的真实雨强值,这与通过某一时刻的云顶温度估算出的降水强度存在一些差别。

参考文献

- 曹钰,岳彩军,寿绍文,2013. 热带气旋(TC)环流内对流核数、TBB 特征与 TC 强度关系的统计合成分析[J]. 热带气象学报,29(3): 381-392. Cao Y, Yue C J, Shou S W, 2013. Statistical synthesis on relationship between the number of convective core and the character of TBB within the tropical cyclone circulation and its intensity[J]. J Trop Meteor, 29(3): 381-392(in Chinese).
- 陈红,赵员春,2008. FY-2C 卫星资料在热带风暴“范斯高”预报分析中的应用[J]. 气象研究与应用,29(2): 38-41. Chen H, Zhao Y

- C, 2008. Application of the FY-2C satellite data on forecasting tropical cyclone "Francisco"[J]. *J Meteor Res Appl*, 29(2): 38-41(in Chinese).
- 陈联寿, 丁一汇, 1979. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社: 491. Chen L S, Ding Y H, 1979. Introduction to the western Pacific typhoon[M]. Beijing: Science Press: 491(in Chinese).
- 陈佩燕, 端义宏, 余晖, 等, 2006. 红外云顶亮温在西北太平洋热带气旋强度预报中的应用[J]. *气象学报*, 64(4): 474-484. Chen P Y, Duan Y H, Yu H, et al, 2006. Application of equivalent black body temperature to forecast of TC intensity in northwest Pacific[J]. *Acta Meteor Sin*, 64(4): 474-484(in Chinese).
- 陈潜, 赵鸣, 2006. 地形对降水影响的数值试验[J]. *气象科学*, 26(5): 484-493. Chen Q, Zhao M, 2006. A numerical experiment on the effect of terrain on the precipitation[J]. *Sci Meteor Sin*, 26(5): 484-493(in Chinese).
- 崔林丽, 杨引明, 游然, 等, 2012. FY-3A/MWHS 数据在定量降水估计中的应用研究[J]. *高原气象*, 31(5): 1439-1445. Cui L L, Yang Y M, You R, et al, 2012. Application study of FY-3A/MWHS in quantitative precipitation estimation[J]. *Plateau Meteor*, 31(5): 1439-1445(in Chinese).
- 丁德平, 李英, 2009. 北京地区的台风降水特征研究[J]. *气象学报*, 67(5): 864-874. Ding D P, Li Y, 2009. A study on rainfall features of Beijing associated with typhoon[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(5): 864-874(in Chinese).
- 丁金才, 黄炎, 叶其欣, 等, 2004. 2002 年台风 Ramasun 影响华东沿海期间可降水量的 GPS 观测和分析[J]. *大气科学*, 28(4): 613-624. Ding J C, Huang Y, Ye Q X, et al, 2004. GPS observation and analysis of precipitable water vapor during Typhoon Ramasun in 2002 influencing east China coast[J]. *Chin J Atmos Sci*, 28(4): 613-624(in Chinese).
- 段晶晶, 钱燕珍, 周福, 等, 2017. 台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究[J]. *气象*, 43(6): 686-695. Duan J J, Qian Y Z, Zhou F, et al, 2017. Numerical simulation of topographic effect on heavy rainfall in northeastern Zhejiang caused by Typhoon Chan-Hom[J]. *Meteor Mon*, 43(6): 686-695(in Chinese).
- 冯涛, 黄荣辉, 陈光华, 等, 2013. 近年来关于西北太平洋热带气旋和台风活动的气候学研究进展[J]. *大气科学*, 37(2): 364-382. Feng T, Huang R H, Chen G H, et al, 2013. Progress in recent climatological research on tropical cyclone activity over the western north Pacific[J]. *Chin J Atmos Sci*, 37(2): 364-382(in Chinese).
- 傅云飞, 刘栋, 王雨, 等, 2007. 热带测雨卫星综合探测结果之“云娜”台风降水云与非降水云特征[J]. *气象学报*, 65(3): 316-328. Fu Y F, Liu D, Wang Y, et al, 2007. Characteristics of precipitating and non-precipitation clouds in Typhoon Ranan as viewed by TRMM combined measurements[J]. *Acta Meteor Sin*, 65(3): 316-328(in Chinese).
- 何会中, 程明虎, 周凤仙, 2006. 0302 号(鲸鱼)台风降水和水粒子空间分布的三维结构特征[J]. *大气科学*, 30(3): 491-503. He H Z, Cheng M H, Zhou F X, 2006. 3D Structure of rain and cloud hydrometeors for Typhoon Kujira (0302)[J]. *Chin J Atmos Sci*, 30(3): 491-503(in Chinese).
- 黄奕武, 端义宏, 余晖, 2009. 地形对超强台风罗莎降水影响的初步分析[J]. *气象*, 35(9): 3-10. Huang Y W, Duan Y H, Yu H, 2009. A study of the impact of terrain on the precipitation of "Krosa"[J]. *Meteor Mon*, 35(9): 3-10(in Chinese).
- 江漫, 漆梁波, 2016. 1959—2012 年我国极端降水台风的气候特征分析[J]. *气象*, 42(10): 1230-1236. Jiang M, Qi L B, 2016. Analysis on climatic characteristics of extreme precipitating typhoon in China during 1959—2012[J]. *Meteor Mon*, 42(10): 1230-1236(in Chinese).
- 康斌, 2016. 我国台风灾害统计分析[J]. *中国防汛抗旱*, 26(2): 36-40. Kang B, 2016. Statistical analysis of typhoon disasters in China[J]. *China Flood Drought Manage*, 26(2): 36-40(in Chinese).
- 雷小途, 徐明, 任福民, 2009. 全球变暖对台风活动影响的研究进展[J]. *气象学报*, 67(5): 679-688. Lei X T, Xu M, Ren F M, 2009. A review on the impact of global warming on tropical cyclone activities[J]. *Acta Meteor Sin*, 67(5): 679-688(in Chinese).
- 李宁, 沈桐立, 闵锦忠, 2008. 一次台风登陆过程的变分同化模拟试验[J]. *气象科学*, 28(3): 244-250. Li N, Shen T L, Min J Z, 2008. Variational assimilation experiment on landfall of typhoon[J]. *Sci Meteor Sin*, 28(3): 244-250(in Chinese).
- 梁红丽, 程正泉, 2017. 2014 年两次相似路径影响云南台风降水差异成因分析[J]. *气象*, 43(11): 1339-1353. Liang H L, Cheng Z Q, 2017. Cause analysis of precipitation difference between two typhoons influencing Yunnan along similar tracks in 2014[J]. *Meteor Mon*, 43(11): 1339-1353(in Chinese).
- 梁军, 张胜军, 黄艇, 等, 2015. 辽东半岛“达维”(1210)台风暴雨的诊断分析[J]. *气象*, 41(3): 364-371. Liang J, Zhang S J, Huang T, et al, 2015. Diagnostic analyses of typhoon torrential rain over Liaodong Peninsula[J]. *Meteor Mon*, 41(3): 364-371(in Chinese).
- 刘超, 历华, 杜永明, 等, 2017. 针对 Himawari-8 AHI 数据地表温度反演的实用劈窗算法[J]. *遥感学报*, 21(5): 702-714. Liu C, Li H, Du Y M, et al, 2017. Practical split-window algorithm for retrieving land surface temperature from Himawari-8 AHI data[J]. *J Remote Sens*, 21(5): 702-714(in Chinese).
- 刘喆, 白洁, 张文军, 等, 2013. 利用 TRMM 卫星分析西北太平洋各等级热带气旋降水分布特征[J]. *热带气象学报*, 29(3): 432-440. Liu Z, Bai J, Zhang W J, et al, 2013. Analysis of tropical cyclone precipitation for different class of intensity in northwest Pacific with TRMM Data[J]. *J Trop Meteor*, 29(3): 432-440(in Chinese).
- 潘畅, 宇婧婧, 廖捷, 等, 2011. 地面和卫星降水产品对台风莫拉克降水监测能力的对比分析[J]. *气象*, 37(5): 564-570. Pan Y, Yu J J, Liao J, et al, 2011. Assessment on the rainfall monitoring of typhoon Morakot by ground-gauged and satellite precipitation products[J]. *Meteor Mon*, 37(5): 564-570(in Chinese).
- 覃丹宇, 李博, 2012. FY-2 双星亮温归一化及其在台风个例中的应用[J]. *气象*, 38(12): 1449-1455. Qin D Y, Li B, 2012. Matching

- FY-2 dual-satellite infrared cloud top temperatures in typhoon monitoring application[J]. Meteor Mon, 38(12):1449-1455 (in Chinese).
- 陶珣, 2007. 中尺度对流系统微物理过程对云和降水过程影响的数值研究[D]. 北京: 中国科学院大气物理研究所. Tao Y, 2007. Numerical study on the influence of microphysical processes of mesoscale convective system on cloud and precipitation processes [D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences (in Chinese).
- 王思慈, 银燕, 2011. 一次热带海洋对流云微物理过程的数值模拟[J]. 热带气象学报, 27(4):519-528. Wang S M, Yin Y, 2011. A numerical simulation of cloud microphysical processes of a tropical convective cloud[J]. J Trop Meteor, 27(4):519-528 (in Chinese).
- 王咏梅, 任福民, 王小玲, 等, 2006. 中国台风降水分离客观方法的改进研究[J]. 气象, 32(3):6-10. Wang Y M, Ren F M, Wang X L, et al, 2006. The study on the objective technique for partitioning tropical cyclone precipitation in China[J]. Meteor Mon, 32(3):6-10 (in Chinese).
- 魏风英, 2007. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社: 296. Wei F Y, 2007. Modern climate statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press: 296 (in Chinese).
- 魏建苏, 1996. 云顶亮温值与华东热带气旋暴雨[J]. 气象科学, 16(1):93-97. Wei J S, 1996. The brightness temperature of cloud top and the torrential rain of tropical cycle in the East China[J]. Sci Meteor Sin, 16(1):93-97 (in Chinese).
- 吴启树, 郑颖青, 沈新勇, 等, 2010. 福建一次秋季大范围暴雨成因分析[J]. 气象科学, 30(1):126-131. Wu Q S, Zheng Y Q, Shen X Y, et al, 2010. Analysis of a wide range autumn rainstorm in Fujian Province[J]. Sci Meteor Sin, 30(1):126-131 (in Chinese).
- 肖辉, 王孝波, 周非非, 等, 2004. 强降水云物理过程的三维数值模拟研究[J]. 大气科学, 28(3):385-404. Xiao H, Wang X B, Zhou F F, et al, 2004. A three-dimensional numerical simulation on microphysical processes of torrential rainstorms[J]. Chin J Atmos Sci, 28(3):385-404 (in Chinese).
- 杨文霞, 2013. 台风螺旋雨带云结构和降水形成机制研究[J]. 气象, 39(2):194-202. Yang W X, 2013. Study on the cloud structure and precipitation forming mechanisms for the spiral rain bands of typhoon[J]. Meteor Mon, 39(2):194-202 (in Chinese).
- 姚丽娜, 任健, 罗哲贤, 2009. 华东地区登陆台风降水变化的初步研究[J]. 南京气象学院学报, 32(1):87-93. Yao L N, Ren J, Luo Z X, 2009. Preliminary study on variations of landfalling tropical cyclone rainfall over East China[J]. J Nanjing Inst Meteor, 32(1):87-93 (in Chinese).
- 岳彩军, 陈佩燕, 雷小途, 等, 2006. 一种可用于登陆台风定量降水估计(QPE)方法的初步建立[J]. 气象科学, 26(1):17-23. Yue C J, Chen P Y, Lei X T, et al, 2006. A preliminary study on method of quantitative precipitation estimation (QPE) for landfall typhoon[J]. Sci Meteor Sin, 26(1):17-23 (in Chinese).
- 周福, 钱燕珍, 方艳莹, 等, 2016. “灿鸿”台风造成浙江东北部大暴雨成因分析[J]. 气象, 42(3):305-313. Zhou F, Qian Y Z, Fang Y Y, et al, 2016. Analysis on causes for the severe rainfall in northeastern Zhejiang induced by Typhoon Chan-Hom (1509) [J]. Meteor Mon, 42(3):305-313 (in Chinese).
- Adler R F, Negri A J, 1988. A satellite infrared technique to estimate tropical convective and stratiform rainfall[J]. J Appl Meteor, 27(1):30-51.
- Chen F J, Fu Y F, 2015. Contribution of tropical cyclone rainfall at categories to total precipitation over the Western North Pacific from 1998 to 2007[J]. Sci China Earth Sci, 58(11):2015-2025.
- Goldenberg S B, Houze R A, Churchill D D, 1990. Convective and stratiform components of a winter monsoon cloud cluster determined from geosynchronous infrared satellite data[J]. J Meteor Soc Jpn, 68(1):37-63.
- Kurihara Y, Murakami H, Kachi M, 2016. Sea Surface temperature from the new Japanese geostationary meteorological Himawari-8 satellite[J]. Geophys Res Lett, 43(3):1234-1240.
- Li J, Wang L Y, Zhou F X, 1993. Convective and stratiform cloud rainfall estimation from geostationary satellite data[J]. Adv Atmos Sci, 10(4):475-480.
- Rodgers E B, Pierce H F, 1995. A satellite observational study of precipitation characteristics in Western North Pacific tropical cyclones[J]. J Appl Meteor, 34(12):2587-2599.
- Shang H Z, Chen L F, Letu H, et al, 2017. Development of a daytime cloud and haze detection algorithm for Himawari-8 satellite measurements over central and eastern China[J]. J Geophys Res, 122(6):3528-3543.
- Shu S J, Xu Y, Song J J, et al, 2012. An observational study on distribution of precipitation associated with landfalling tropical cyclones affecting China[J]. J Trop Meteor, 18(3):275-283.
- Wesley D A, Pielke R A, 1990. Observations of blocking-induced convergence zones and effects on precipitation in complex terrain [J]. Atmos Res, 25(1-3):235-276.
- Xu G, Zhong X, 2017. Real-time wildfire detection and tracking in Australia using geostationary satellite: Himawari-8[J]. Remote Sens Lett, 8(11):1052-1061.
- Yu Z F, Yu H, Chen P Y, et al, 2009. Verification of tropical cyclone-related satellite precipitation estimates in mainland China[J]. J Appl Meteor Climate, 48(11):2227-2241.
- Yumimoto K, Nagao T M, Kikuchi M, et al, 2016. Aerosol data assimilation using data from Himawari-8, a next-generation geostationary meteorological satellite [J]. Geophys Res Lett, 43(11):5886-5894.