

向纯怡,钱传海.海基观测资料在改进南海台风强度分析中的应用[J].海洋气象学报,2018,38(2):20-27.
Xiang Chunyi, Qian Chuanhai. Application of ocean-based observation data on improving tropical cyclone intensity analysis over the South China Sea[J].Journal of Marine Meteorology,2018,38(2):20-27. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.003. (in Chinese)

海基观测资料在改进南海台风强度分析中的应用

向纯怡,钱传海

(国家气象中心,北京 100081)

摘要: 探讨了一种利用海岛自动站、石油平台站、海洋气象浮标观测站、船载自动气象站等在内的海基观测资料来改进南海热带气旋强度分析的客观估计方案,并利用该方案对近几年(2013—2016年)出现在南海海域的18个热带气旋强度进行了分析。结果表明:该方案的估计误差与基于卫星遥感资料分析得到的结果水平相当,其估计效果与热带气旋的自身强度和有效样本数量有关,同时是否有观测样本位于热带气旋最大风速半径内也会影响估计的准确性。在传统基于卫星遥感资料对热带气旋强度主客观分析出现不一致时,利用海基观测来估计台风的强度可以作为一种补充方案来提高强度分析的可靠性。

关键词: 海基观测;南海台风;强度分析

中图分类号: P732; P714.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2018)02-0020-08

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2018.02.003

Application of ocean-based observation data on improving tropical cyclone intensity analysis over the South China Sea

XIANG Chunyi, QIAN Chuanhai

(National Meteorological Center, Beijing 100081, China)

Abstract Based on meteorological data from island automatic weather stations (AWS), oil platforms, buoy observation stations and shipboard AWS, an objective estimation method of improving TC (tropical cyclone) intensity analysis over the South China Sea is discussed. The tropical intensity of 18 tropical cyclones from 2013 to 2016 has been analyzed using that objective method. The results show that the averaged estimation errors using that method are at the same level with those based on atmospheric satellites. Meanwhile, the estimation is related to the TC intensity itself and the number of valid observation samples. Whether there are observation samples located inside the maximum wind radius can also influence the estimated outcomes. In the case of inconsistent intensity analysis, the use of ocean-based observation can serve as a supplemental method in TC intensity analysis.

Key words ocean-based observation; TCs over the South China Sea; intensity analysis

引言

台风是影响南海及其周边区域的重要气象灾害之一^[1],其生成和发展都与大尺度海气相互作用

和热带季节内振荡有关^[2-4]。我国南海海盆面积较小,海陆地形分布特殊,位于南亚季风、东亚季风和澳洲季风的交汇区,一方面赤道辐合带(ITCZ)在此来回摆动,另一方面中纬度的冷空气也能够到达南

收稿日期:2018-01-19; 修订日期:2018-04-03

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2013CB430103,2015CB452803);国家气象中心预报员专项(Y201707)

作者简介:向纯怡,女,高级工程师,主要从事台风预报及研究,xiangcy@ema.gov.cn。

海,使得这里往往会出现十分强烈的季风对流^[5]。在西北太平洋副热带高压、西南季风、越赤道气流、热带东风波及西风带短波槽等的相互作用下,使得南海的台风云系呈现出明显的不对称分布特征,因此增加了对其实况强度和结构准确分析及预报的难度^[6-8]。

在南海腹地生成的热带气旋,由于距离陆地较近,有可能很快就登陆或影响南海周边国家或地区,这种生成于南海海域内并且强度迅速发展的热带气旋被称作南海土台风^[9]。对于这类土台风的预警防御时间较短,对沿海台风监测及预报预警提出了巨大的挑战。另有不少生成于西北太平洋的台风在进入南海后,在南海有利的热力和动力条件下出现近海的快速加强^[10-11],其中不乏像 1330 号超强台风“海燕”和 1409 号超强台风“威马逊”这类进入南海的台风^[12],给我国华南沿海带来巨大的灾害损失。

当南海台风位于海面上时,由于缺乏足够的观测资料,对其强度的分析主要还是依靠卫星遥感资料。目前,国际上认可和通行的热带气旋强度分析方法是根据静止气象卫星云图上的云型结构特征、云顶温度特征和强度发展规律建立的一套主观强度分析方法^[13-14],简称德沃夏克(Dvorak)分析方法。我国在实际业务中也采用该方法对西北太平洋和南海海域的台风进行实时强度分析,并将其结果作为最终确定台风中心最大风速和最低气压的重要参考^[15]。在实际分析中发现,尽管采用了国际通用的分析方法,但中国、日本和美国三家官方机构对于同一台风的最终强度认定上仍然会出现不一致的情况^[16],这一方面是由于不同预报中心在使用德沃夏克技术本身存在一定主观差异,另一方面也与各家预报中心采用了不同的风压关系有关^[17-19],而不同的风压关系可能导致即使是相同的德沃夏克最终强度指数(CI)也可能得到不同的风速和气压值^[20]。在这种情况下,需要充分利用有限的观测资料或技术手段对卫星资料的强度分析结果进行进一步补充分析,使得最终确定的台风强度结果更接近真实值。

因此,利用目前南海海域中已建成的各类海岛自动站、浮标观测站以及石油平台站等非常规观测资料作为台风强度分析的辅助资料变得非常必要。在沿海受台风影响的地区(包括海岛)建设重点观测区,将有助于提高对极端台风事件的监测能力^[21]。近年来我国已在南海及周边区域大力发展

了综合观测体系的建设,已经初步建成了包括南沙观测区、西沙观测区、海南岛观测区、北部湾观测区、粤西观测区、珠江口观测区和粤东观测区在内的七大观测区。目前,结合这些海基气象观测资料进行热带气旋强度分析的相关研究工作还比较缺乏。因此,充分应用这些观测资料不仅能帮助我们获得一手的热带气旋观测事实,而且可被应用于改进现有南海台风监测及分析手段的相关研究中。

1 资料与方法

1.1 资料

文中所涉及的海基观测资料来源于中国气象局地面自动站观测,包括逐小时全站点资料、逐 10 min 自动站观测资料,其中逐小时站点观测资料中的风速值为整点时刻 2 min 的平均。

选取了 2013—2016 年南海区域内出现的共 18 个编号热带气旋,并且根据研究需要只截取了热带气旋在 120°E 以西到登陆我国华南或越南陆地前(登陆海南岛的除外)的时段进行分析。

在改进方案中计算观测站点与热带气旋中心距离时,采用了中央气象台业务定位和定强资料,该资料对南海区域内的热带气旋有逐小时的定位和强度分析结果(图 1)。在对比改进后方法的强度分析结果和基于卫星遥感观测分析结果时,采用了美国威斯康星大学麦迪逊分校热带气旋分析 CIMSS(The Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies)开发的基于红外卫星资料和德沃夏克技术开发的客观自动分析系统 ADT(Advanced Dvorak Technique)^[22]在整点时刻的对应分析结果,该分析结果中也包含了热带气旋逐小时的估计最大风速和最低气压值。在分析改进方案的估计效果时,应用了中国气象局热带气旋最佳路径数据集^[23],该资料集包括了热带气旋逐 6 h 的最大风速和最低气压。

考虑到观测站点只在一定的半径范围内才有可能观测到热带气旋的强度和结构特征,因此选取距离台风中心 300 km 范围内的站点资料。为避免由于观测站点所在海拔高度差异和空间不连续造成的明显观测偏差,首先对不同高度上观测风速进行了订正,其次在资料预处理中首先剔除了分析时段内存在空间不连续站点和位置变迁观测站,具体的订正方法将在 1.3 节中进行介绍。

根据上述条件共选取南海海域内的有效观测站点 181 个,其站点分布和有效观测样本数占总样

本数的占比分布如图2所示。可以看到,有效观测站点自北往南分布于福建南部沿海、广东沿海、雷州半岛、广西沿海、海南岛沿海、西沙和南沙诸岛。对于所选取的近五年的热带气旋个例而言,有效观测样本占比较大(占比大于50%)的观测站点主要位于南海北部的海岛站、浮标站和石油平台站点,其中使用占比最高的观测站是海南省三沙市北礁岛的海岛观测站(达到93%)。这说明了海基观测站点,特别是位于远海的海岛观测站点对于监测和分析影响我国华南沿海的热带气旋具有十分重要的价值。

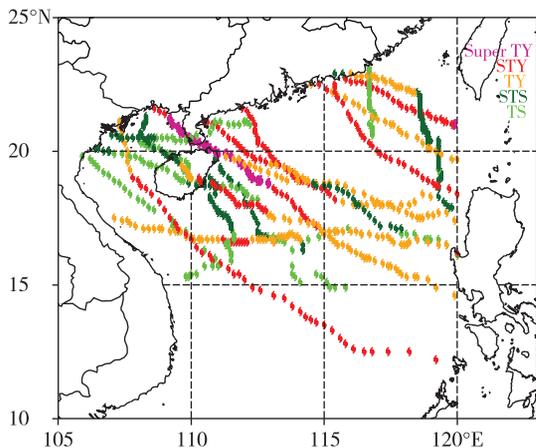


图1 南海区域内18个编号热带气旋的业务定位及强度(2013—2016年)

Fig.1 Operational tracks and intensity of all TCs over the South China Sea from 2013 to 2016

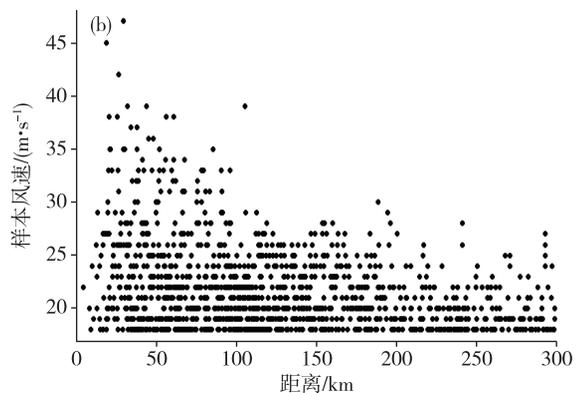
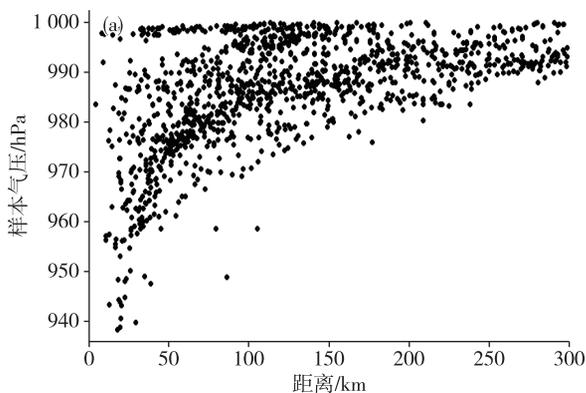


图3 逐小时观测样本气压(a)和风速(b)相对气旋中心不同半径的分布

Fig.3 Distribution of observed hourly pressure (a) and wind speed (b) versus distance to TCs centers

为分析不同观测要素的具体误差分布情况,图4给出了距气旋中心100 km半径范围内观测气压(图4a)和风速(图4b)与中央气象台实时强度资料中的最低气压(MSLP)和最大风速(VMAX)的差值

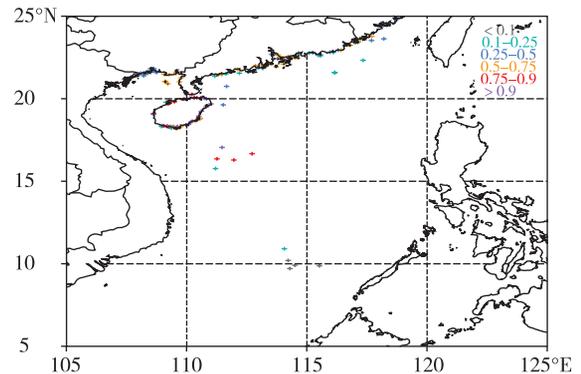


图2 南海热带气旋的海基观测站点样本占比(不同颜色标识)及站点分布(2013—2016年)

Fig.2 Percentages of ocean-based observation samples (in different colors) in the South China Sea and distribution of observation stations from 2013 to 2016

1.2 资料评估

为评估自动站观测资料在估计热带气旋强度分析中的适用性,需要对观测获得的风速和气压资料的观测结果进行简单的评估。采用了同时包含风速和气压观测的逐小时自动站观测数据进行计算。图3a和图3b分别给出了观测气压和风速距离热带气旋中心不同半径的空间分布特征。可以发现相对于风速观测而言,气压观测更能体现热带气旋径向上的结构特征,即径向上观测气压越靠近热带气旋中心下降幅度越大,符合热带气旋的理想结构特征;而风速观测的分布存在较多的低值干扰,如在热带气旋最大风速半径范围内仍有较多的低观测值,且并没有明显的结构分布特征。

在距气旋中心不同半径下的分布。可以发现,观测气压与最低气压(MSLP)的差值分布从气旋的外部向气旋中心逐渐收敛,说明距离气旋中心越近观测气压越能反映热带气旋的强度;相反,风速观测值

和最大风速(VMAX)之间的差值没有这个现象,观测风速值较VMAX普遍较弱,这可能与逐小时观测资料中风速值为该整点时刻2 min的平均风速,无法充分录得气旋中心低层最大风速的脉动特征有关。通过资料评估可以发现,观测样本中的气压观

测值相对于风速观测更能反映热带气旋从外向内的结构特征,因而利用其不同半径上的气压下降趋势来估计气旋中心的最低气压值是更为合理的方案。

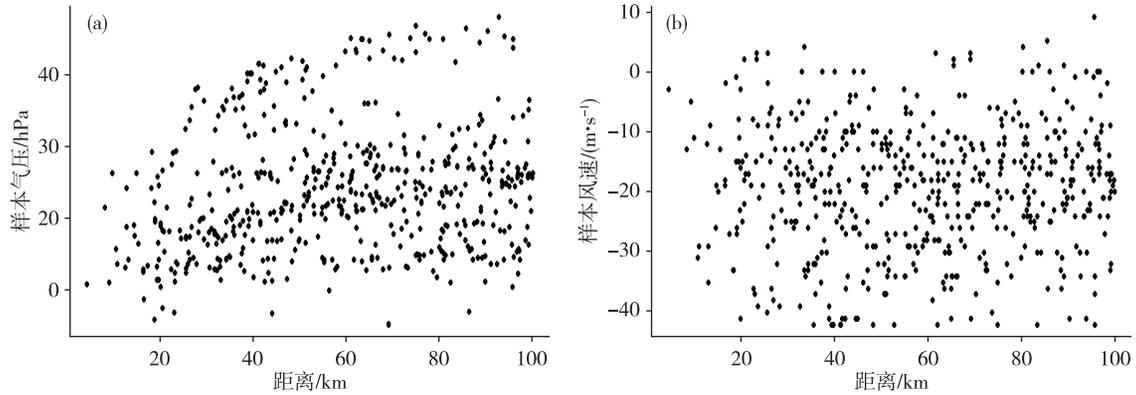


图4 逐小时观测样本气压(a;单位:hPa)和风速(b;单位: $m \cdot s^{-1}$)与中心最低气压和最大风速差值相对气旋中心不同半径的分布

Fig.4 Distribution of errors between observed hourly pressure (a; units: hPa) and MSLP & errors between observed hourly wind (b; units: $m \cdot s^{-1}$) and VMAX versus distance to TCs centers

1.3 方法

1.3.1 高度订正方案

由于不同海基测站的海拔高度不同,如各海岛自动站的海拔高度分布在几米到一百多米,差别较大,而浮标观测资料的风速气压观测仪一般都装置在10 m的高度上,这样不仅会造成风速和气压观测的系统性偏差,而且也会对强度估计结果产生影响^[24]。因此在考虑利用观测数据来进行台风强度估计时应首先进行高度订正,即将测站原始观测统一订正到海拔10 m高度。根据已有研究^[25-26]认为,热带气旋的低层风速随高度呈幂指数分布,即 $U_{adj} = U_{obs} \times (10/Z)^\alpha$,其中 U_{obs} 为海拔高度 Z 处的观测风速, U_{adj} 为订正到海拔高度10 m的风速, α 为风廓线幂指数。根据观测试验结果^[27],分布按站点位于台风的的不同结构区域时使用不同的风廓线幂指数:

1) 当测站位于台风眼内(距离 ≤ 60 km),

$$U_{adj} = U_{obs} \times (10/Z)^{0.25};$$

2) 当测站位于台风眼墙区($60 \text{ km} < \text{距离} \leq 120 \text{ km}$),

$$U_{adj} = U_{obs} \times (10/Z)^{0.2};$$

3) 当位于台风外围大风区(距离 $> 120 \text{ km}$),

$$U_{adj} = U_{obs} \times (10/Z)^{0.1}。$$

1.3.2 空间修正方案

分析发现,由于自动站观测站点位置和仪器本

身存在差异性,即使是相邻的两个观测站点在同一时刻的观测结果也会存在明显差异,这对于有效估计热带气旋强度会带来较大的分析误差。因此在资料预处理阶段应该合理剔除空间上的不连续观测。在实际分析中,通过数学方法逐一判断相邻站点资料的合理性,具体方法如下:

1) 计算观测站点距离台风中心的距离分别为 D_1, D_2, D_3, \dots ,而其观测的气压值分别为 p_1, p_2, p_3, \dots ;

2) 按距台风中心距离从近到远依次排列观测样本,分别计算某一观测样本与相邻观测样本之间的等距离气压降比(单位:hPa/m):

$$\Delta p_n = (p_{n+1} - p_n) / (D_{n+1} - D_n);$$

3) 若该样本的等距离气压下降比 $\Delta p_n \geq 0$,则认为该观测合理,反之,若 $\Delta p_n < 0$ 则认为该观测不合理,剔除。

这样通过去除观测样本中的空间不连续样本,减小由于观测站点位置异常造成的空间上的不连续性,保证后面进行拟合时的连续性。

1.3.3 强度估计方案

估计方案需要一定的假设条件:1) 台风具有轴对称结构,也就是在不同方位上距离台风中心相同距离的风速和气压值相同;2) 气压在随距离台风中心和时间变化上是连续的,这样可排除气压分布上的奇异值和不连续值;3) 不考虑不同观测仪器造成的误差。具体而言,每个观测站点的位置是固定

的,但是由于台风本身是移动的,在以台风中心为原点的相对坐标系中(图5),每个观测站点本可看作相对台风移动的观测样本,相对于台风中心的距离是在随时间变化。因此根据同一时刻多个观测样本数据就可以拟合出气压或者风速随距离(到台风中心的距离,单位:km)变化的一元二次函数 $f(D) = e + aD + bD^2$,其中 $f(D)$ 为观测样本值, D 为观测样本距离台风中心的距离, a 和 b 为拟合参数, e 为估计值。

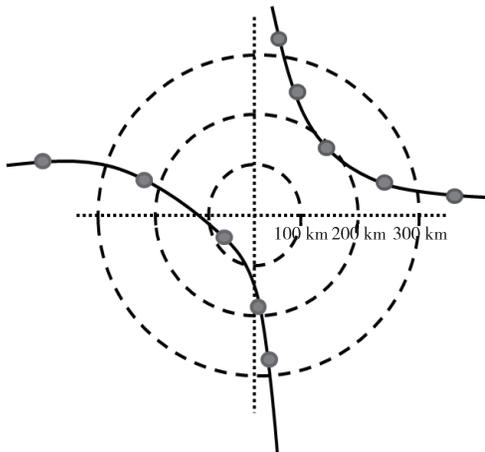


图5 观测样本在以气旋中心为原点的相对坐标系中的示意图

Fig.5 Observation samples in the relative coordinate system where TC center is the origin

之前的研究^[27]表明,生成于不同海域的热带气旋具有不同结构特征。因此在利用观测资料估计其中心强度时,应该首先区分其生成源地,并由其生成源地给出不同的限定条件参数(最大风速半径 RMX 和有效半径 RII),在本研究中生成于西北太平洋的热带气旋的 RMX 设定为 60 km,而生成于南海的热带气旋 RMX 设定为 90 km,而两者的有效半径都为 300 km。根据 RII 可以计算参与估计的资料的数量,而根据 RMX 区分不同观测样本在拟合函数中的权重,其中在 RMX 半径内的观测样本被赋予了双倍权重。

其次,由于只有存在足够数量的有效观测样本时,才能进行强度估计。故而需要对引入的观测资料数量进行判断,设定的限定条件是:限定在一个小时内的累积有效观测样本数不少于 5 个,且在最大风速半径内至少有一个有效观测样本。

最后,根据资料类型给出不同的线性估计方案,对于岸基(包括沿海自动站和石油平台等)、海岛自动站,采用先估计最低气压值 MSLP,再通过风

压关系来估计最大风速 VMAX,而对于浮标资料,由于缺少气压观测数据,故而直接用风速值参与估计最大风速 VMAX。

另外,在得到气旋中心最低气压的估计结果后,需要通过一定的风速气压转换关系得到最终的台风最大风速值。目前,还没有适合 2 min 平均风速的热带气旋风压关系式,本研究中应用的是燕方杰和范永祥^[28]根据不同纬度的环境气压差对 Atkinson 和 Holliday 的公式进行了订正后的经验公式。

2 强度分析结果

利用该方法对 2013—2016 年南海海域内的 18 个热带气旋进行强度估计,并将最终的估计结果与中国气象局热带气旋最佳路径数据集中的强度进行对比,计算得到逐 6 h(与最佳路径数据集对应时刻)的平均估计误差为 7.2 hPa。这样的估计误差水平与利用卫星遥感资料进行的 ADT 同样本计算得到的强度分析误差水平总体相当^[29]。

不同强度下估计样本的最低气压误差分布情况如图 6 所示,可以发现热带气旋中心气压值越低(强度越强),利用该方法估计的误差越大。说明热带气旋自身的强度越强,可能出现的估计误差也越大。另外,有效观测样本的数量对估计误差的大小也有影响,图 7 所示为参与估计的有效样本数量与估计误差的分布。说明有效观测样本数越多其估计结果的可信度越高,同时研究中也发现估计结果还与进入到热带气旋最大风速半径内观测样本的数量有关,因此在估计方法中提高了这部分观测值的权重。

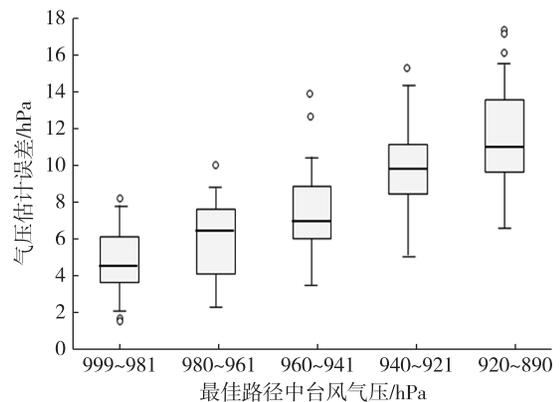


图6 估计误差随强度(最低气压 MSLP,单位:hPa)的分布

Fig.6 Distribution of estimated MSLP errors with different intensity (X-axis: typhoon pressure in the best path; Y-axis: estimated errors of pressure; units:hPa)

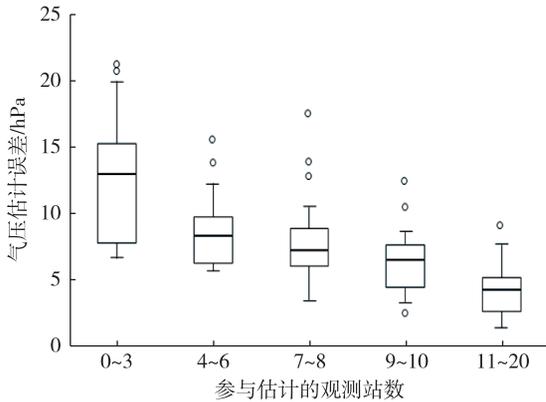


图 7 估计误差(单位:hPa)随有效观测数量的分布
Fig.7 Distribution of estimated MSLP errors with different number of effective observations (X-axis: the number of observation stations; Y-axis: estimated errors of pressure; units: hPa)

应用该方法对个例逐一进行了强度估计分析,以 1409 号超强台风“威马逊”为例。当“威马逊”台风以西北行路径靠近海南岛东北部时,其路径左右两侧均有有效观测站点(左侧为文昌龙楼浮标站,距台风中心最近距离约 20 km;右侧为北仕岛,最近距离约 30 km)。通过逐小时的估计结果对比(表 1)发现估计误差逐渐接近于实时业务定强。这主要由于“威马逊”的台风眼小而圆,当有观测站点进入到眼墙内(通过雷达回波判断 30~50 km)时估计误差显著减小。说明了如果有观测站点接近台风眼墙或者位于眼墙内时,通过直接观测手段来估计气旋中心强度更为准确。

表 1 威马逊强度估计结果与业务定强对比(2014 年 7 月 18 日 04—07 时,世界时)

时间(UTC)	估计强度	业务定强
20140718T04	960.8	920
20140718T05	948.5	920
20140718T06	944.8	920
20140718T07	915.5	915

进一步以 1508 号台风“鲸鱼”为例,说明海基观测资料在强度分析中的改进作用。在“鲸鱼”移动路径上有西沙诸岛的海岛自动观测站录得了“鲸鱼”的强度变化特征,其中北礁岛(站号 771911)测得观测最大风速为 $29 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,最低气压为 983.6 hPa,进行高度订正后的风速为 $23.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,气压为

989.5 hPa。而利用强度客观估计方法对“鲸鱼”台风 22 日 00 时的强度进行估计(图 8),最终估计气压值为 982.8 hPa,对应的最大风速值为 $28.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

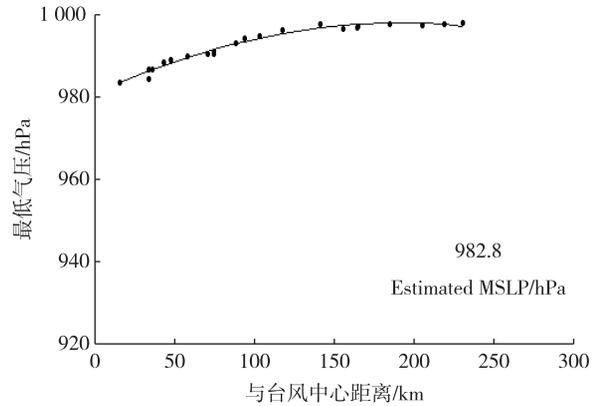


图 8 基于海基观测资料对“鲸鱼”台风 22 日 00 时最低气压值的客观估计

Fig.8 Objectively estimated MSLP of Typhoon Kujira at 00:00 UTC on 22 June 2015 based on ocean-based observations

而同时刻中央台(CMA)主观分析认为其强度为 $25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,日本气象厅(CMA)主观定强为 40 kts(约 $20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),美国关岛台风联合预警中心(JTWC)定强为 45 kts(约 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),存在较大差异。通过对比基于卫星资料的德沃夏克分析最终强度指数(图 9),可以发现利用卫星资料分析得到的“鲸鱼”的强度也存在一定差别,在 22 日 00 时 CMA 分析的 CI 指数为 3.5,而 JMA 分析为 2.5,ADT 的最终强度指数 CI 最大值为 3.3,根据 ADT 的最终强度指数计算对应的风速和气压值估算的“鲸鱼”中心最低气压约为 990 hPa,最大风速约为 45 kts(约 $23 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$),比利用海基观测资料估计的强度结果偏低。这说明在传统基于卫星遥感资料对热带气旋强度主客观分析出现不一致时,利用海基观测来估计台风的强度不失为一种合理的补充方案。

3 结论与讨论

本文探讨了一种利用海岛自动站、石油平台站、海洋气象浮标观测站、船载自动气象站等在内的海基观测资料对热带气旋强度进行分析的客观估计方案。对观测资料的适用性分析发现,相对于风速观测而言,气压观测更能体现热带气旋径向上的结构特征,即径向上观测气压越靠近热带气旋中心下降幅度越大,符合热带气旋的理想结构特征;

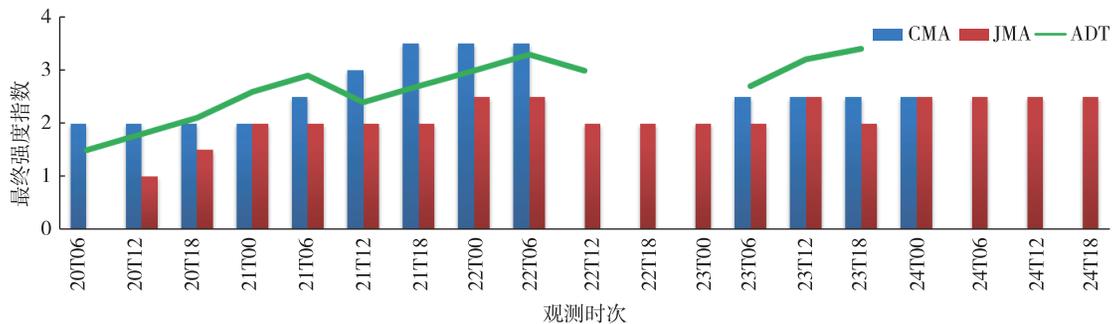


图9 主客观卫星资料德沃夏克分析的最终强度指数对比(CMA:蓝色,JMA:红色,ADT:绿色)

Fig.9 Subjective and objective Dvorak current index (CMA: in blue, JMA: in red, ADT: in green)

而风速观测的分布存在较多的低值干扰。应用强度估计方案对近几年出现在南海海域的热带气旋强度的分析结果表明,估计误差与基于卫星遥感资料分析得到的结果水平相当。且估计效果与热带气旋的自身强度和有效样本数量有关,热带气旋自身的强度越强,可能出现的估计误差也越大,有效观测样本数越多,其估计结果的可信度越高。同时研究也发现,估计结果还与进入到热带气旋最大风速半径内观测样本的数量有关。在传统基于卫星遥感资料对热带气旋强度主客观分析出现不一致时,可以利用海基观测来估计台风的强度,并作为一种补充方案来提高强度分析的可靠性。

在具体个例分析中发现,基于观测资料的估计效果与有效观测样本数量和是否有观测样本进入到台风眼墙内有着密切关系。因此,在实际应用中需要考虑引入更多的有效观测样本,这除了依赖于建设更多的海基观测站点,也可以通过增加观测时间频次来解决。另外,南海台风普遍具有明显的非对称结构特征,因此如何准确判断其最大风速半径成为一个复杂的问题。通过个例分析也发现,只有当有足够的有效观测资料站点位于热带气旋的最大风速半径内时,客观估计的结果才更为可靠,而位于不同方位上的观测样本可能对应了不同的结构特征参数。因此,在实际应用中应当考虑具体观测站点相对气旋中心的位置和方位,并结合气旋的云型结构特征来具体分析。当有接近气旋中心或者位于其最大风速半径内的观测样本出现时,应当充分考虑基于海基观测资料的客观估计结果,并考虑将其作为对传统主客观业务定强结果的补充和参考。

参考文献:

[1] 聂桂珍. 影响南海的热带气旋活动初步分析[J]. 海洋

通报,1990,9(2):27-32.

- [2] 李崇银. 厄尼诺与南海的台风活动[J]. 热带气象学报,1986,2(2):117-124.
- [3] 金小霞,何金海,占瑞芬,等. 大气季节内振荡对热带气旋活动影响的研究[J]. 热带气象学报,2011,27(1):133-138.
- [4] 祝丽娟,王亚非,尹志聪. 热带季节内振荡与南海热带气旋活动的关系[J]. 热带气象学报,2013,29(5):737-748.
- [5] 黄菲,李元妮. 南海夏季风爆发与西北太平洋热带气旋活动[J]. 中国海洋大学学报,2010,40(8):1-10.
- [6] 关芬呈,谢清华. 南海台风的统计特征[J]. 海洋通报,1984,3(4):19-27.
- [7] 丁治英,沈桐立,丁一汇. 副热带高压和对流潜热加热与南海台风的耗散及维持[J]. 热带气象学报,1998,14(4):306-313.
- [8] 陈联寿,孟智勇,丛春华. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报,2017,37(4):1-7.
- [9] 吴迪生,赵雪,冯伟忠,等. 南海灾害性土台风统计分析[J]. 热带气象学报,2005,21(3):309-314.
- [10] 林良勋,梁巧倩,黄忠. 华南近海急剧加强热带气旋及其环流综合分析[J]. 气象,2006,32(2):14-18.
- [11] 蒋迪,黄菲,郝光华,等. 南海土台风生成及发展过程海气热通量交换特征[J]. 热带气象学报,2012,28(6):888-896.
- [12] 陈子通,张诚忠,黄燕燕,等. 南海台风模式对“海燕”移动路径的预报[J]. 气象学报,2014,72(4):678-698.
- [13] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis and forecasting from satellite imagery [J]. Mon Wea Rev, 1975, 103(5):420-430.
- [14] Dvorak V F. Tropical cyclone intensity analysis using satellite data [G]. NOAA Technical Report NESDIS11, 1984:11-47.
- [15] 刘喆,朱元竞,李万彪,等. 气象卫星资料在估测热带气旋强度方向的应用进展[J]. 热带气象学报,2008,24(5):550-556.

- [16] 许映龙,张玲,向纯怡. 台风定强技术及业务应用——以 Dvorak 技术为例[J]. 气象科技进展,2015,5(4):22-34.
- [17] Atkinson G D, Holliday C R. Tropical cyclone minimum sea level pressure/maximum sustained wind relationship for the western North Pacific [J]. Mon Wea Rev, 1977, 105(4):421-427.
- [18] Koba H, Hagiwara T, Asano S, et al. Relationship between the CI number and central pressure and maximum wind speed in typhoons [J]. Geophys Mag, 1991, 44:15-24.
- [19] Knaff J A, Zehr R M. Reexamination of tropical cyclone wind-pressure relationship [J]. Wea Forecasting, 2007, 22(1):71-88.
- [20] Courtney J, Knaff J A. Adapting the Knaff and Zehr wind-pressure relationship for operational use in tropical cyclone warning centers [J]. Australian Meteor Oceanogr J, 2009, 58(3):167-179.
- [21] 许映龙,黄奕武. 2015 年西北太平洋和南海台风活动特征及主要预报技术难点 [J]. 2017, 海洋气象学报, 37(1):31-41.
- [22] Olander T L, Velden C S. The advanced Dvorak technique: Continued development of an objective scheme to estimate tropical cyclone intensity using geostationary infrared satellite imagery [J]. Wea Forecasting, 2007, 22(2):287-298.
- [23] Ying M, Zhang W, Yu H, et al. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database [J]. J Atmos Oceanic Technol, 2014, 31(2):287-301.
- [24] 武强,石磊,宗锋,等. 龙口至旅顺海上航线大风实况资料处理方法研究 [J]. 海洋气象学报, 2017, 37(3):102-108.
- [25] 赵小平,朱晶晶,樊晶,等. 强台风海鸥登陆期间近地层风特性分析 [J]. 气象, 2016, 42(4):415-423.
- [26] 宋丽莉,毛慧琴,汤海燕,等. 广东沿海近地层大风特性的观测分析 [J]. 热带气象学报, 2004, 20(6):731-736.
- [27] 向纯怡,吴立广,田伟,等. 多平台热带气旋表面风场资料在台风结构分析中的应用 [J]. 气象, 2016, 42(11):1315-1324.
- [28] 燕方杰,范永祥. 西北太平洋台风近中心最大风速与中心最低海平面气压的统计相关 [J]. 气象科技, 1994, 22(1):56-59.
- [29] Velden C, Harper B, Wells F, et al. The Dvorak tropical cyclone intensity estimation technique: A satellite-based method that has endured for over 30 years [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2006, 87(9):1195-1210.