

涡旋强度调整半径对 2016 年第 18 号 热带气旋路径预报的影响^{*}

麻素红

MA Suhong

国家气象中心, 北京, 100081

National Meteorological Center, Beijing 100081, China

2018-08-14 收稿, 2018-12-13 改回.

麻素红. 2019. 涡旋强度调整半径对 2016 年第 18 号热带气旋路径预报的影响. 气象学报, 77(4):662-673

Ma Suhong. 2019. Impact of radius of TC intensity correction on No. 1618 TC track prediction. *Acta Meteorologica Sinica*, 77(4):662-673

Abstract The mean track error of the 18th tropical cyclone (TC) in 2016 (noted as TC1618) predicted by the regional typhoon model GRAPES_TYM is much larger compared to that of all other TC forecasts in that year. The impact of vortex initialization scheme including vortex relocation and intensity correction is tested in this paper. The results show that vortex intensity correction is the main factor that causes the large mean track error. The sensitivity study of the impacts of different radii ($r_0 = 12^\circ, 9^\circ, 6^\circ, 3^\circ$) of vortex intensity correction on the forecast track is further carried out. The results show that the larger the radius of intensity correction is, the bigger the mean track error would be. A larger intensity correction radius will produce a faster moving speed and larger moving direction error. Examinations of the subtropical high and the size of TC vortex in the mean sea level pressure field reveal that a larger intensity correction radius produces a larger TC vortex and a weaker subtropical high adjacent to the TC circulation in the initial time; the larger TC vortex moves northward faster, sustains the larger size of vortex and the weaker subtropical high to the north of the TC during integration. Eventually the larger vortex moves into the westerly trough earlier.

Key words Vortex initialization, Intensity correction, Vortex size, Track error

摘 要 2016 年中国国家气象中心区域台风模式 (GRAPES_TYM) 对第 18 号热带气旋 (记为 TC1618) 的路径预报出现了较大的误差; 其平均路径误差显著大于全年的平均误差。分析了涡旋初始化方案 (包括涡旋重定位以及涡旋强度调整) 对其路径预报的影响。结果显示, 涡旋强度调整是造成 TC1618 预报路径平均误差偏大的主要原因。不同的强度调整半径 ($r_0 = 12^\circ, 9^\circ, 6^\circ, 3^\circ$) 对 TC1618 路径影响的敏感性试验结果显示, 强度调整半径越大, 其平均路径预报误差越大。500 hPa 副热带高压以及平均海平面涡旋尺度分析发现: 较大的强度调整半径 ($r_0 = 12^\circ, 9^\circ$) 其初始时刻的涡旋尺度较大, 涡旋北侧邻近区域副热带高压等值线相对偏北, 副热带高压相对偏弱。尺度大的涡旋其北移速度较大, 并且在积分过程中其环流邻近区域副热带高压进一步减弱, 导致涡旋环流会更早与其西北侧东移的西风槽结合, 移速偏快。

关键词 涡旋初始化, 强度调整, 涡旋尺度, 路径误差

中图法分类号 P457.8

^{*} 资助课题: 公益性行业 (气象) 科研专项 (GYHY201406006)、国家重点研发计划 (2007YFC1501904)。

作者简介: 麻素红, 主要从事台风数值预报研究。E-mail: mash@cma.gov.cn

1 引言

热带气旋生成及发展于广阔的洋面上,常规观测资料少。由于强降水的影响,台风环流区域的卫星观测资料精度低,在资料同化质量控制过程中被剔除,基于资料同化技术来改善模式初始场对涡旋内核描述仍面临很多挑战。Aksoy 等(2012)、Zou 等(2015)均针对卫星资料在区域热带气旋模式中的应用进行了研究。研究结果表明,由于可用观测资料稀少,对于以热带气旋强度预报为目标的区域模式,将资料同化和涡旋初始化合理地结合则会改进区域模式初始场对热带气旋的描述精度,进而提高模式对热带气旋路径及强度的预报能力。合理的涡旋初始化可以为热带气旋环流区提供结构合理、强度更接近观测分析的背景场,从而提高有限观测资料(如载人飞机观测资料)的有效同化(Zhang, et al, 2012; Tallapragada, et al, 2014b)。为此,在关注热带气旋强度预报的区域热带气旋数值预报系统中,涡旋初始化技术一直是模式预报性能改进的关键因素之一,如美国环境预报中心针对热带气旋路径及强度预报所发展的区域热带气旋数值预报系统(Hurricane Weather Research and Forecast, HWRF)(Tallapragada, et al, 2012, 2014a, 2014b, 2015, 2016)。

目前在区域模式业务系统以及针对热带气旋异常路径、强度快速加强(40 hPa/(24 h)或 30 knots/(24 h))的研究中,基于与模式动力及物理协调的概念(Hendricks, et al, 2011, 2013)发展的涡旋初始化方案主要有:(1)基于模式约束的变分同化技术(梁旭东等, 2010; Zhang, et al, 2012);(2)利用模式积分生成具有对称结构的涡旋来改进模式对初始场中涡旋的描述能力(Kurihara, et al, 1993, 1995);(3)利用模式短期(6—12 h)循环积分获得同观测分析强度相近的涡旋(Cha, et al, 2013);(4)基于模式生成的涡旋,通过对涡旋尺度和强度调整获得同观测分析接近的初始涡旋(瞿安祥等, 2009a, 2009b; Biswas, et al, 2017; 麻素红等, 2018)。由于涡旋初始化对于区域模式热带气旋路径及强度预报的重要性,世界上主要数值预报业务中心如美国环境预报中心以及中国国家气象中心在其例行的业务系统升级中均会针对涡旋初始化进行持续的改进。

2010 年中国国家气象中心基于自主研发的中尺度数值预报模式 GRAPES-MESO(陈德辉等, 2006)开始发展区域中尺度台风数值预报系统(GRAPES_TYM),并于 2012 年 7 月业务化运行。2014 及 2015 年的关键技术升级明显改进了 GRAPES_TYM 对热带气旋路径及强度的预报能力,有效减小了 GRAPES_TYM 在热带气旋路径以及强度预报中存在的系统偏差(张进等, 2017; 麻素红等, 2018)。

2016 年第 18 号热带气旋(记为 TC1618)于 2016 年 9 月 27 日 18 时(世界时,下同)生成于西北太平洋中部,生成后沿副热带高压短暂西行后转为北上,并于 10 月 5 日 09 时消亡。TC1618 属于西北太平洋西转向热带气旋,并不属于异常路径,但其平均路径误差明显超过 2016 年全年台风的平均路径误差(图 1)。2016 年全年热带气旋平均路径误差为 349 km/(96 h)、472 km/(120 h),而 TC1618 的平均路径预报误差为 566 km/(96 h)、1052 km/(120 h)。2016 年 9 月 27 日 18 时—29 日 18 时,9 次 120 h 路径预报(4 次/d)有 5 次超过 1000 km,其余 4 次也均超过 600 km,而单次最大路径误差达到了 1615 km。GRAPES_TYM 对 TC1618 的路径预报(图 2)显示,TC1618 的前几次路径预报存在明显东及东北向偏差,这是导致 TC1618 预报的平均误差明显超过全年平均误差的主要原因。

影响区域模式热带气旋路径预报误差的因素很多,如模式初始场对热带气旋强度、结构描述的精度、模式物理过程等(Gopalakrishnan, et al, 2012; Tien, et al, 2013)。当热带气旋路径靠近区域模式

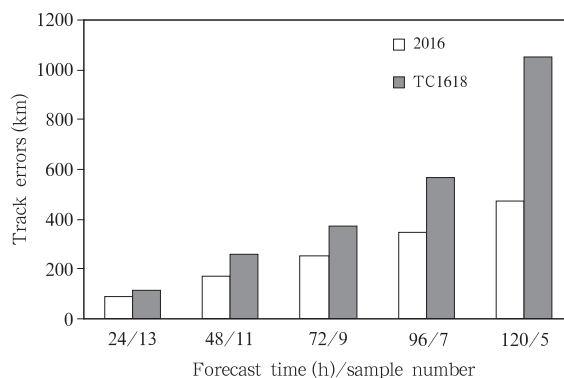


图 1 2016 年全年样本和 TC1618 平均路径误差

Fig. 1 Mean TC track forecast errors of all TCs in 2016 and TC1618

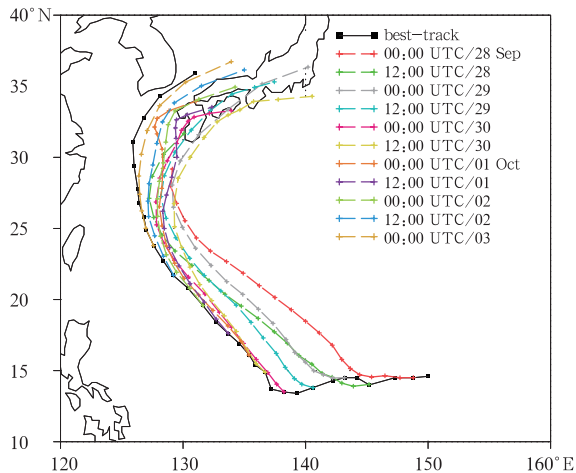


图2 TC1618 的预报路径
(不同颜色的路径代表不同的初始时刻)
Fig. 2 Forecast tracks of TC1618
(Different colors indicate forecast tracks
initialized at different time)

积分区域边界时,模式积分区域的设置也是影响区域模式热带气旋路径预报的因素之一。将从模式初始场的角度分析涡旋初始化对 TC1618 较大路径误差的作用,为进一步提高 GRAPES_TYM 热带气旋的预报能力提供改进线索。

2 GRAPES_TYM 模式概况及涡旋初始化

2.1 模式概况

GRAPES_TYM 是中国国家气象中心区域台风模式,其预报区域覆盖西北太平洋和中国南海(EQ—51°N, 90°—171°E)。模式水平分辨率为 0.12°,垂直方向上采用 50 层地形追随高度坐标。模式所采用的物理过程包括 WSM6 微物理过程、Meso-SAS 对流参数化、YSU 边界层过程、SLAB 陆面过程、莫宁-奥布霍夫相似理论表面层参数化以及 Goddard 短波辐射和 RRTM 长波辐射参数化。在存在台风的情况下,该系统每天运行 4 次(00、06、12、18 时),预报时效为 120 h。

2.2 涡旋初始化方案

GRAPES_TYM 采用的涡旋初始化方案包括涡旋重定位技术和涡旋强度调整技术。涡旋重定位技术采用的是 Kurihara 等(1995)的方案,即将全球模式分析场的热带气旋涡旋分离出来,并重新放置在中国气象局台风海洋预报中心综合分析(简称综合分析)的位置。

由于全球模式的分析场中所分析的热带气旋环流其强度通常比综合分析的强度弱,因此,需要对全球模式分析场中的热带气旋强度进行调整,使其接近综合分析的强度。强度调整方案采用的是 Wang (1995)的方案

$$\begin{cases} V_T(r, \sigma) = V_m \left(\frac{r}{r_m} \right) \left[\exp \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \right] \right\} - \left| \frac{r - r_m}{r_0 - r_m} \right| \exp \left\{ \frac{1}{b} \left[1 - \left(\frac{r}{r_m} \right)^b \right] \right\} \sin \left(\frac{\pi}{2} \sigma \right) \right] & r \leq r_0 \\ V_T(r, \sigma) = 0 & r > r_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, V_m 为近地面最大风速, r_m 为最大风速半径, r 为距热带气旋中心的半径, r_0 为涡旋所影响最大半径, b 为控制涡旋风场水平廓线形态的参数, σ 为模式的垂直 Sigma 坐标。切向风水平廓线采用 e 指数形式,将人造涡旋对初始场的调整主要集中在热带气旋内核部分,尽量减小对热带气旋外围的影响。人造涡旋的温、压扰动结构通过非线性平衡方程求得,具体推导过程见 Wang (1995)。

3 试验方案

为了分析涡旋初始化对 TC1618 路径预报的影响,分别针对涡旋重定位以及涡旋强度调整进行了敏感性试验。

3.1 涡旋初始化对 TC1618 路径预报的影响

为了分析业务系统涡旋初始化方案对 TC1618 路径预报的影响,针对有无涡旋重定位以及涡旋强度调整进行了敏感性试验(表 1)。其中,CTL:不做涡旋初始化(无涡旋重定位和涡旋强度调整),Rel:做涡旋重定位,不做涡旋强度调整;Correc:做涡旋重定位和涡旋强度调整。

表 1 涡旋初始化方案敏感性试验

Table 1 Configuration of sensitive experiments of vortex initialization

试验方案	涡旋重定位	涡旋强度调整
CTL	No	No
Rel	Yes	No
Correc	Yes	Yes

3.2 涡旋强度调整半径对 TC1618 路径预报的影响

在涡旋强度调整时,参数 r_0 为强度调整半径,即强度调整的范围。在业务预报系统中强度调整半

径 $r_0 = 12^\circ$ 。为了分析强度调整半径对 TC1618 路径预报的影响, 针对不同的调整半径进行了试验(表 2)。在所有试验方案中, 均做涡旋重定位, 而强度调整半径分别为 12° 、 9° 、 6° 和 3° , 分别记为 R12、R09、R06 和 R03。

表 2 涡旋强度调整半径试验
Table 2 Configuration of experiments
of intensity correction radius

试验方案	涡旋重定位	涡旋强度调整
Rel	Yes	No
R12	Yes	$r_0 = 12^\circ$
R09	Yes	$r_0 = 9^\circ$
R06	Yes	$r_0 = 6^\circ$
R03	Yes	$r_0 = 3^\circ$

4 试验结果

4.1 涡旋初始化对 TC1618 路径预报的影响

基于表 1 的试验方案对 TC1618 进行了路径预报试验。从平均路径预报结果(图 3)可以看出, 涡旋重定位技术的应用可以减小初始时刻的平均误

差, 但 6 h 以后, 采用涡旋重定位技术的预报路径其平均误差开始大于对照预报, 24—120 h, 平均路径误差分别增大了 13.3%、19.6%、27.3%、15.3% 和 20.3%。加入涡旋强度调整后, 平均路径误差迅速增大, 120 h 的平均路径误差由只有涡旋重定位的 532.2 km 增至 986.7 km, 增加了 85.4%, 而相对于无涡旋初始化试验的平均路径则增大了 123.1%。从移速偏差来看, 涡旋强度调整会明显加大模式涡旋的移速正偏差, 涡旋重定位对于移速的改变较小, 而涡旋强度调整对移速的改变颇大: 就 120 h 移速偏差而言, 涡旋强度调整可以使移速偏差由涡旋重定位的 -192.5 km 增至 525.8 km。从移向偏差来看, 涡旋重定位和涡旋强度调整均会增大模式涡旋的移向偏差, 而涡旋强度调整是移向偏差增大的主要因素。对于 120 h 预报路径而言, 仅有涡旋重定位技术, 移向偏差会由无涡旋初始化的 81.7 km 增至 262.3 km; 在涡旋重定位之后应用涡旋强度调整, 移向偏差则会增至 804.3 km。可见 TC1618 平均误差过大的主要原因是涡旋初始化中的强度调整。

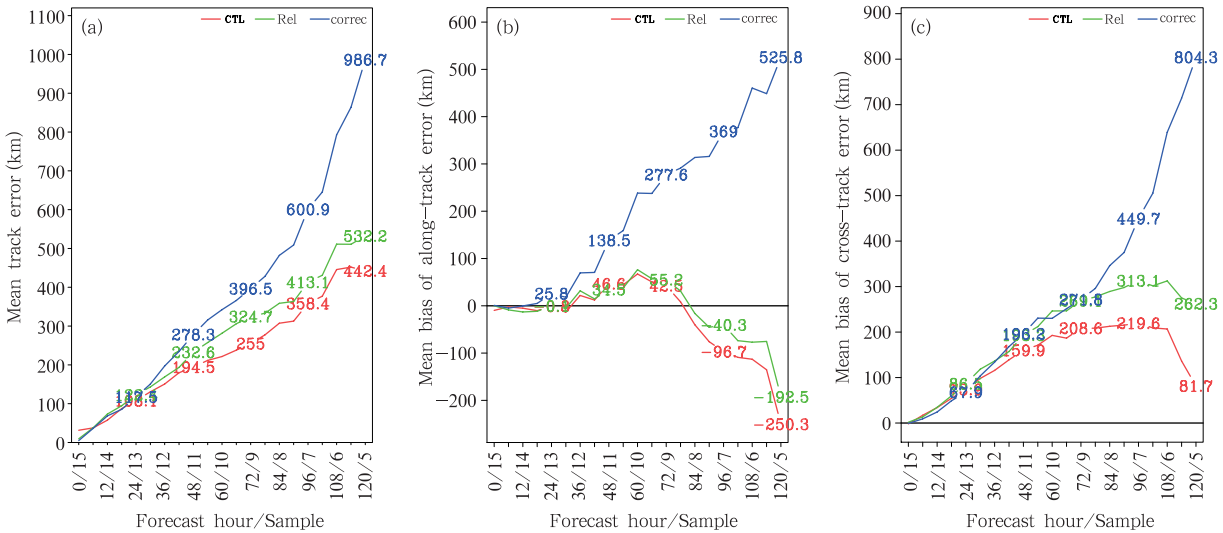


图 3 平均路径误差(a)、移速偏差(b)及移向偏差(c)

Fig. 3 Mean track errors (a), mean biases of along-track errors (b) and mean biases of cross-track errors (c)

4.2 强度调整半径对 TC1618 预报路径的影响

GRAPES_TYM 的初始场来源于美国环境预报中心全球模式预报系统(Global Prediction System of National Center for Environment Prediction; NCEP-GFS)的分析场, 其热带气旋的最低海

平面气压和近地面(10 m 高度)最大风速同综合分析的值并不相同; 当分析场中的最低海平面气压高于综合分析的最低海平面气压时, GRAPES_TYM 需要启动涡旋强度调整技术, 通过对模式热带气旋风场进行修正, 并利用风场与高度场的平衡关系来

获得平均海平面气压。当调整后的平均海平面气压达到综合分析时,强度调整过程结束。强度调整方案中的 r_0 主要控制涡旋强度调整半径。

2016年9月29日00时,TC1618的中心气压为990 hPa,近地面最大风速23 m/s。此时NCEP-GFS分析场中心气压为1004.5 hPa,近地面最大风速为11.93 m/s。根据GRAPES_TYM的强度调整方案,对于不同强度调整半径,在1000 hPa等压面以及600 hPa等压面产生的经向风增量和温度增量的纬向廓线如图4a、b。可见不同的强度调整半

径所产生增量极值基本相近,而增量的范围则差别明显:1000 hPa经向风增量的分布特征主要在7级风(风速为15 m/s)处发生变化,调整半径越大,增量曲线越平缓。600 hPa的温度增量在7级风半径内分布基本一致,7级风半径以外的地方稍有差别。

经过强度调整后,不同的强度调整半径均可以调整到接近观测的中心气压和近地面最大风速(图4c、d)。而调整半径越小,调整半径内要素场的水平梯度会越大。

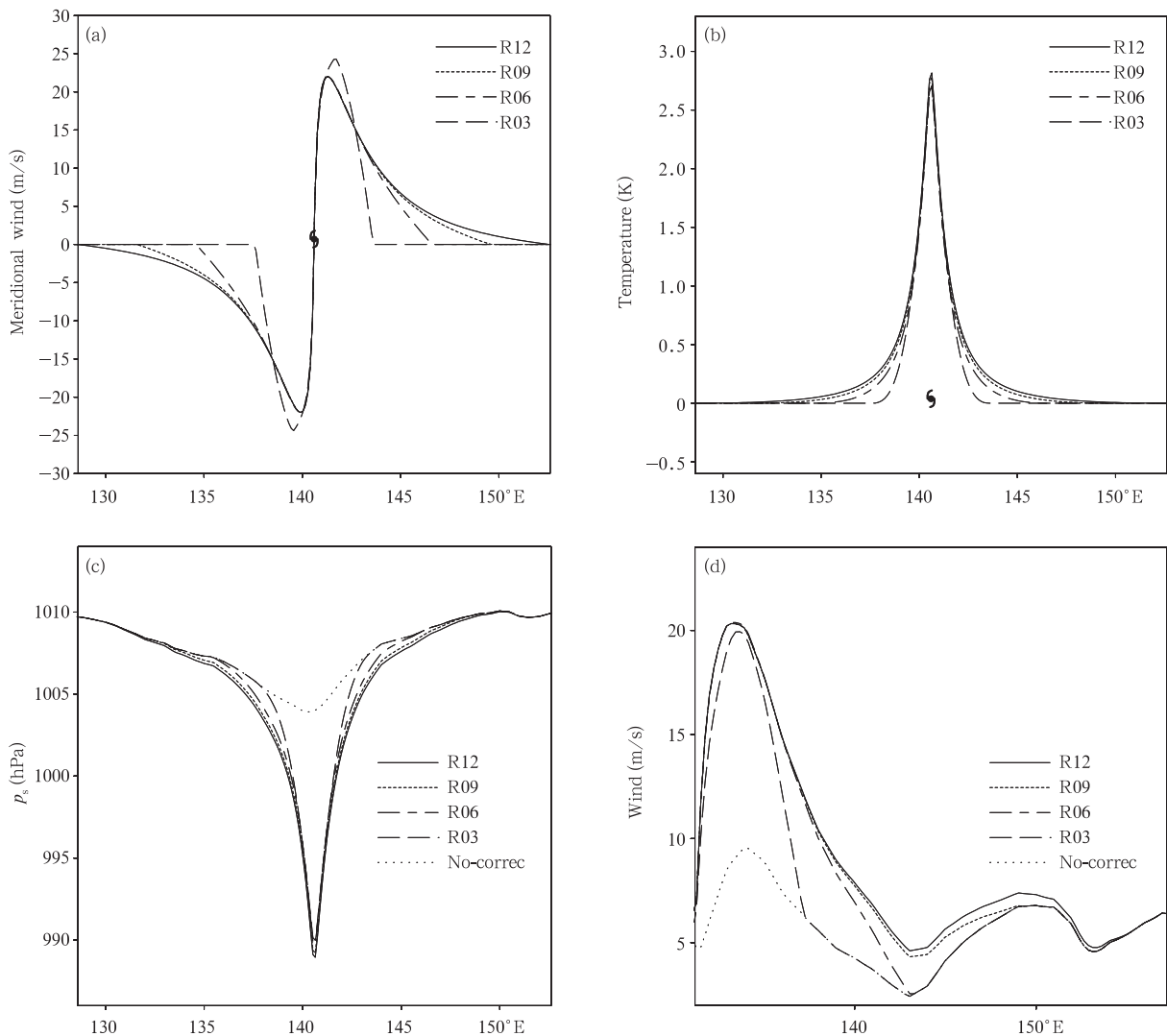


图4 1000 hPa 经向风增量纬向廓线(a)和600 hPa 温度增量(b)的经向廓线,
不同调整半径调整前后中心气压(c)及近地面最大风速(d)的经向廓线

Fig. 4 Zonal profiles of increments of 1000 hPa meridional wind (a) and 600 hPa temperature (b),
and meridional profiles of mean sea level pressure (c) and
10 m wind (d) for different radii of correction

从以 2016 年 9 月 29 日 00 时为初始时刻的 120 h 预报路径(图 5)可以看出,无强度调整的预报路径同观测路径更加一致,而采用强度调整的预报路径相对偏东;转向进入西风带后,其移速明显偏快(图 5a)。从路径误差分布来看,无强度调整的预报路径误差最小,而强度调整半径越大,路径误差越大。调整半径为 12°和调整半径为 9°的误差比较接近,而 3°调整半径的误差最小,6°调整半径的误差位

于 3°和 9°之间(图 5b)。从移速偏差(图 5c)和移向偏差(图 5d)来看,无涡旋强度调整涡旋移速明显偏慢、移向偏差小。增加涡旋强度调整后,移速成为正偏差,强度调整半径越大,移向及移速正偏差越大。

2016 年 9 月 28 日 00 时—10 月 5 日 00 时,间隔 12 h,共有 15 次预报。15 次预报平均路径、移速偏差以及移向偏差的表现同 29 日 00 时的分布相似(图略)。

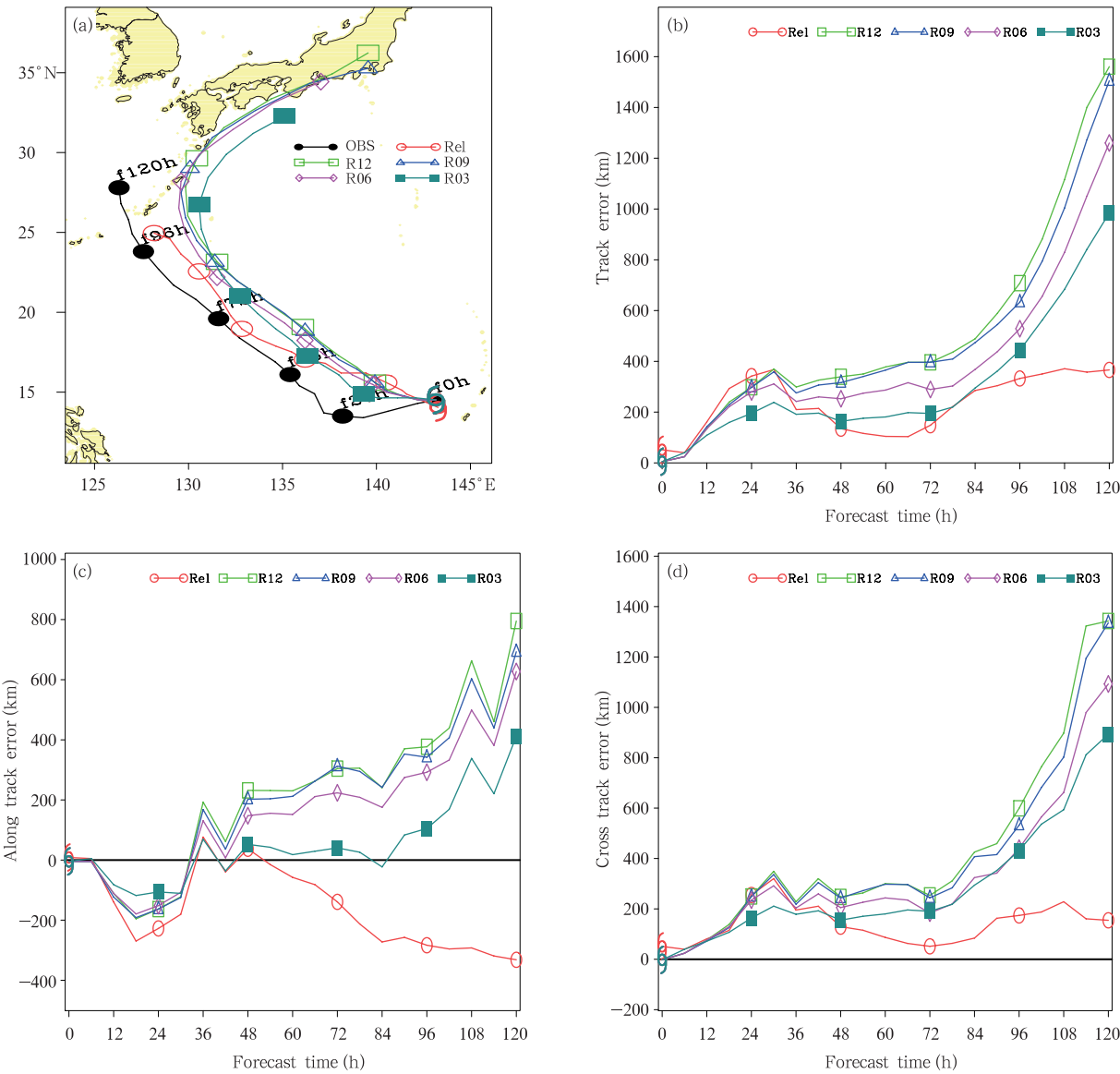


图 5 采用不同强度调整半径的预报路径(a)、路径误差(b)、移速偏差(c)以及移向偏差(d)
(黑色:最佳路径;其他标注如表 2 所示)

Fig. 5 TC tracks (a), track errors (b), along track biases (c) and cross track biases (d)
with different intensity correction radii
(OBS: best track; other annotations are the same as in Table 2)

上述路径误差的分布特征同不同强度调整半径所预报的环境场以及涡旋尺度密切相关。如果以平均海平面气压场中 1005 hPa 闭合等值线来表示热带气旋的尺度,不同强度调整半径所对应的 00、48 以及 96 h 预报的热带气旋尺度如图 6 所示。可以看出,无涡旋强度调整试验其涡旋初始尺度明显小于有强度调整的试验,且初始强度相对观测强度明显偏弱(1005 hPa)。对于较大的强度调整半径,初始时刻的涡旋尺度较大,但最低平均海平面气压接近观测(990 hPa)。48 h 后强度调整半径较大的试验会发展出强度较强、尺度较大的涡旋,涡旋中心位置以逐次偏北为主。无强度调整的试验其 48 h 预报涡旋没有发展,涡旋尺度非常小,中心气压为 1003 hPa。在有涡旋强度调整试验中,中心气压以

R03 最高(964 hPa),涡旋尺度最小;R06 的涡旋尺度位于 R03 和 R09 之间,中心强度相对 R09 弱 3 hPa,而 R09 和 R12 的涡旋强度及尺度均比较接近;96 h 预报的涡旋强度和尺度特征同 48 h 比较接近;R03 对应的强度最弱(961 hPa)、尺度最小,涡旋位置位于最南侧;R06 的涡旋尺度位于 R03 和 R09 之间,强度与 R09 和 R12 相同(940 hPa);无强度调整的试验其 96 h 预报涡旋仍没有发展,中心气压为 1004 hPa,而此时涡旋中心气压已经加深到 935 hPa。

不同半径的涡旋强度调整对副热带高压的影响如图 7 所示,其中,以 5880 gpm 代表副热带高压的位置,而 5840 gpm 代表涡旋尺度及西风槽位置(鉴于 R09 和 R12 的表现比较接近,为了使所示图形更

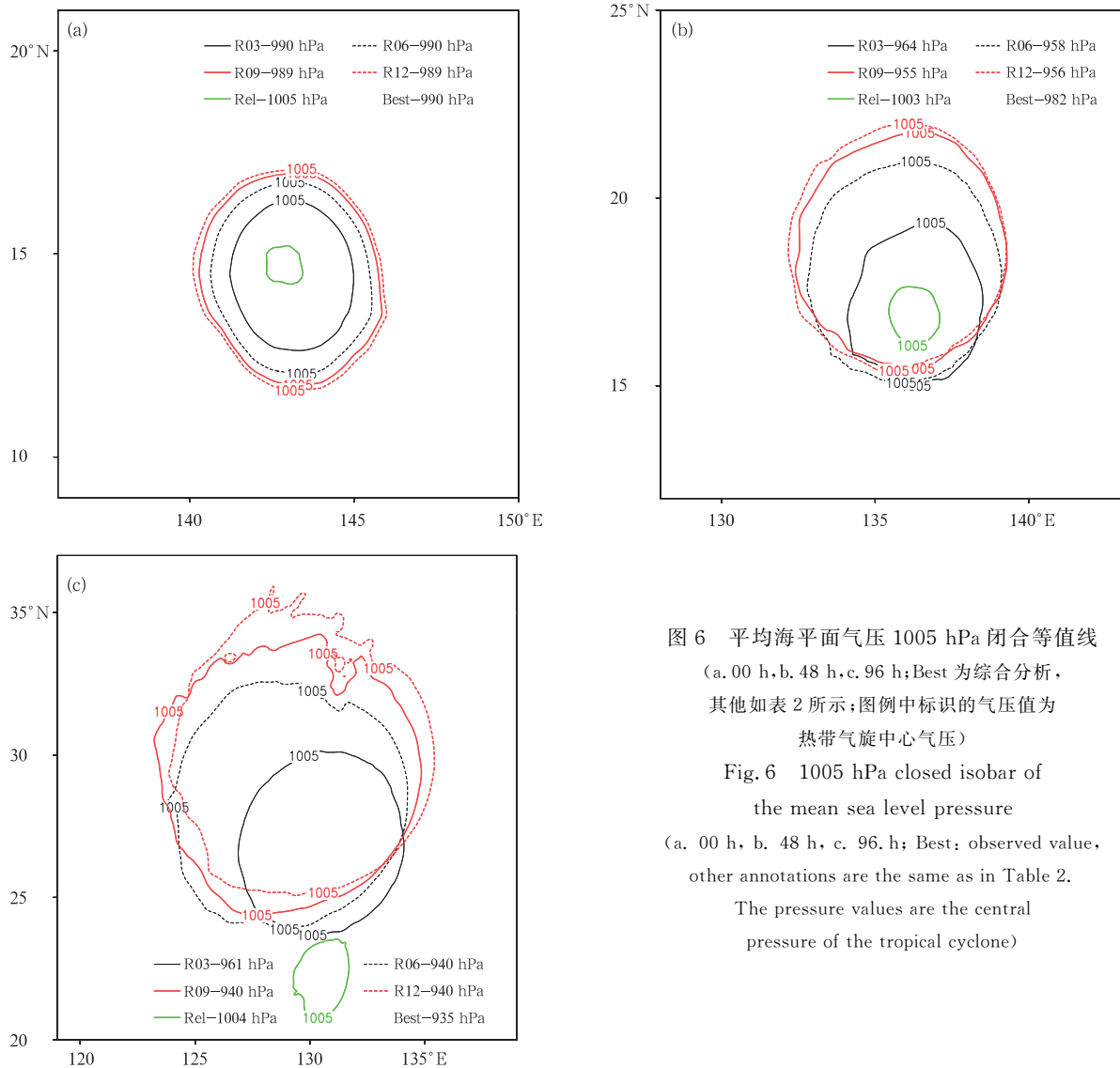


图 6 平均海平面气压 1005 hPa 闭合等值线
(a. 00 h, b. 48 h, c. 96 h; Best 为综合分析,
其他如表 2 所示;图例中标识的气压值为
热带气旋中心气压)

Fig. 6 1005 hPa closed isobar of
the mean sea level pressure
(a. 00 h, b. 48 h, c. 96 h; Best: observed value,
other annotations are the same as in Table 2.
The pressure values are the central
pressure of the tropical cyclone)

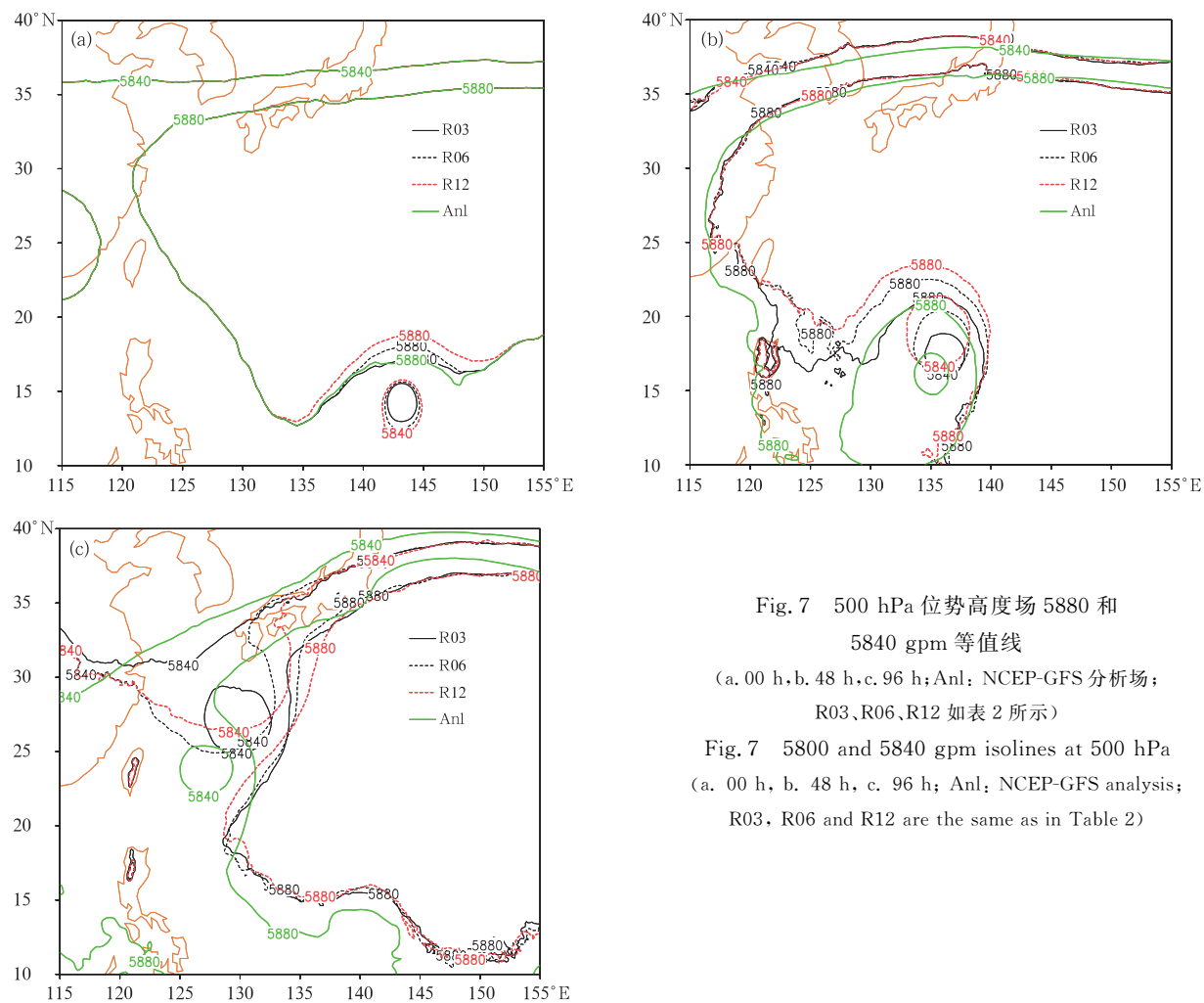


Fig. 7 500 hPa 位势高度场 5880 和 5840 gpm 等值线
(a. 00 h, b. 48 h, c. 96 h; Anl: NCEP-GFS 分析场;
R03, R06, R12 如表 2 所示)
Fig. 7 5800 and 5840 gpm isolines at 500 hPa
(a. 00 h, b. 48 h, c. 96 h; Anl: NCEP-GFS analysis;
R03, R06 and R12 are the same as in Table 2)

加清晰,在分析不同强度调整半径对副热带高压的影响时所示图形中不再包括 R09。热带气旋通常生成在副热带高压南侧,较大的涡旋强度调整半径会削弱热带气旋北侧高压的强度,使得 5880 gpm 等值线北退(图 7a)。强度调整半径越大,5880 gpm 等值线越偏北,其中 R03 试验在初始时刻的 5880 gpm 等值线位置同 NCEP-GFS 的分析更接近。在 48 h 预报时刻(图 7b),调整半径为 3°的 R03 试验,其 5880 gpm 的位置相对于其他强度调整半径明显偏南,接近分析场。如果用闭合的 5840 gpm 来表示 TC1618 在 500 hPa 的尺度,则强度调整半径小的对应于较小的涡旋。至 96 h(图 7c),R06、R12 强度调整半径较大的涡旋已经并入西风槽区,只有调整半径较小的 R03 的 5840 gpm 线还未同槽区的 5840 gpm 合并,同此时分析场的表现一致。

从上述分析可以看出,涡旋强度调整半径越大,预报的涡旋环流越大,相应的北侧副热带高压越偏北,涡旋北上时就会更早地融入西风带,导致预报后期误差明显偏大。

从 NCEP-GFS 的分析场中最低海平面气压和观测最低海平面气压(图 8)可以看出,在 TC1618 最初的 5 个时次,分析场中的最低海平面气压有 4 个时次在 1004 hPa 附近,一个时次为 999 hPa,涡旋环流强度偏弱。为了分析涡旋强度调整对 TC1618 处于不同强度阶段的影响,将 9 月 28 日 00 时—10 月 5 日 00 时 15 次预报按照分析场中热带气旋最低海平面气压的强度分成 2 组。将分析场中最低海平面气压高于 995 hPa 的标记为弱,而将分析场中最低海平面气压低于 995 hPa 的标记为强。

图 9 为两组强度的预报路径平均误差。从图中可以看出,当 TC1618 处于较弱阶段时,无强度调整

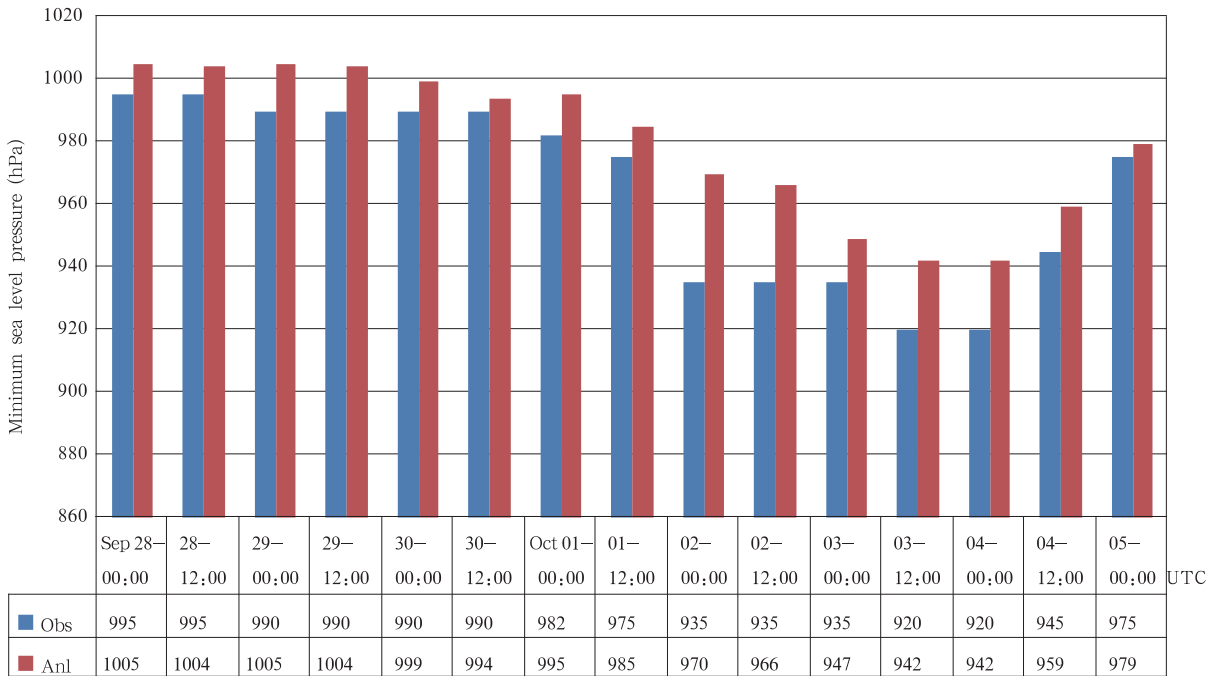


图 8 NCEP-GFS 分析场(Anl)及最佳路径(Obs)的最低海平面气压(hPa)

Fig. 8 Minimum sea level pressure (hPa) from the NCEP-GFS analysis (Anl) and best track data (Obs)

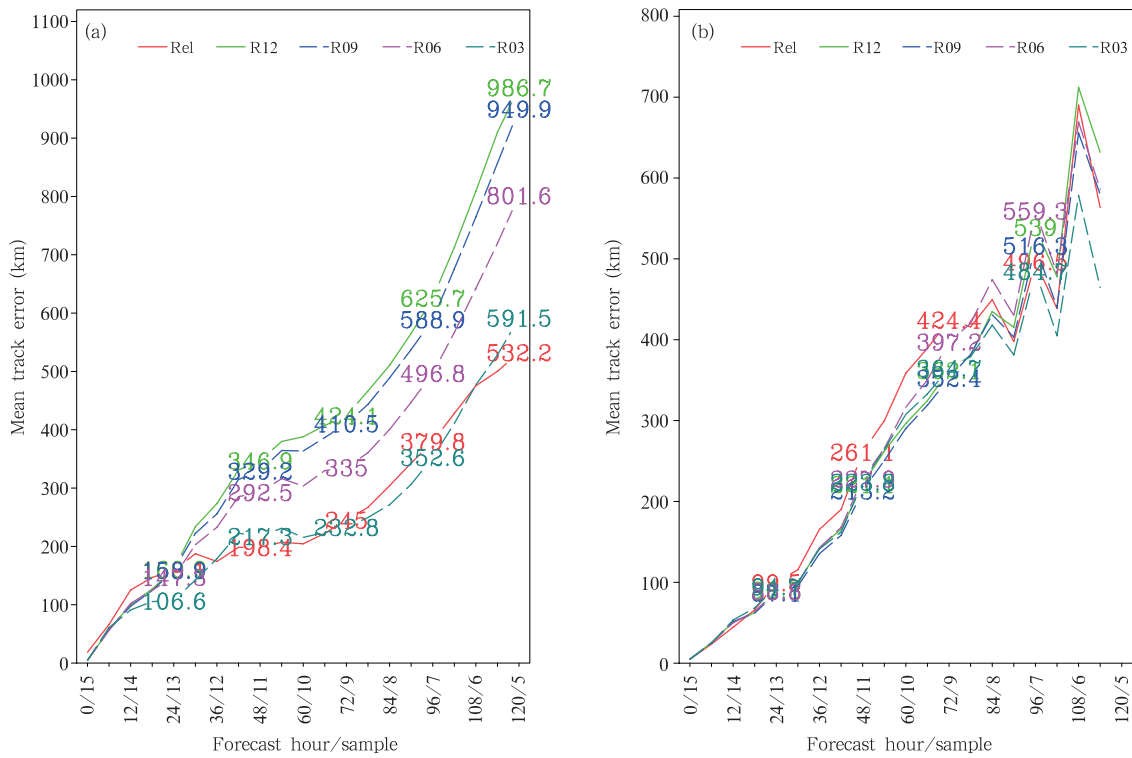


图 9 平均路径误差

(a. 弱, b. 强)

Fig. 9 Mean track errors

(a. weak, b. strong)

的试验平均路径误差同调整半径为 3° 的预报路径误差相当;而不同的涡旋强度调整半径对路径影响非常明显:调整半径为 12° 和 9° 时,路径预报误差相近,明显大于调整半径为 6° 和 3° 的预报路径误差。当 TC1618 处于较强阶段时,强度调整半径对其平均路径误差影响较小,除了 R03 120 h 的平均路径误差明显小于其他强度调整半径的试验外,其他预报时效不同强度调整半径的平均路径比较接近。而无强度调整的试验其平均误差在 84 h 前较大。由此可见,当热带气旋处于较弱阶段(如热带风暴时),其路径预报对涡旋强度调整半径更为敏感。在强、弱两组试验中,R03 在不同强度调整半径中均有优势,尤其是 TC1618 处于较弱阶段时。

4.3 批量结果

TC1618 的路径预报误差分析表明,过大的强度调整半径会导致预报涡旋环流偏强,进而容易造成热带气旋路径发生北偏,产生较大的路径预报误差。为此,针对强度调整半径 12° 和 3° ,利用 2016 年生命期超过 3 d 的 13 个热带气旋(1601、1604、1609、1610、1612、1614、1616、1617、1618、1619、1620、1621 和 1622)进行了批量试验,试验包括不加强度调整、强度调整半径为 12° (R12)以及强度调整半径为 3° (R03)。24—120 h 的总样本数分别为 134(24 h)、106(48 h)、77(72 h)、56(96 h)、38(120 h)。从平均误差来看,当强度调整半径为 3° 时,其 24、72、96 h 的平均路径误差略小于无强度调整试验的平均路径误差,而强度调整半径为 12° 时其平均路径误差明显偏大(图 10)。

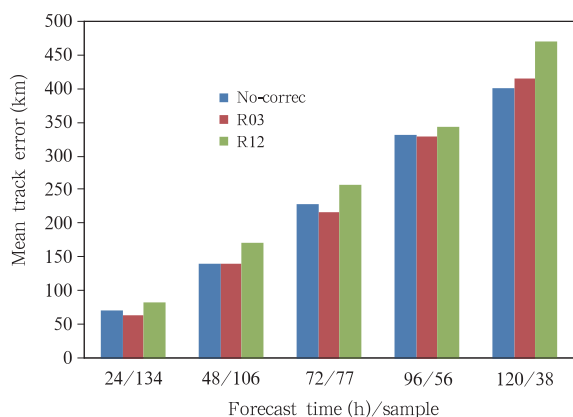


图 10 2016 年 13 个热带气旋平均路径误差

Fig. 10 Mean track forecast errors
for 13 TCs in 2016

5 小结和讨论

5.1 小结

TC1618 的平均路径误差明显大于 2016 年全年的平均路径误差。针对 GRAPES_TYM 的涡旋初始化方案(包括涡旋重定位和涡旋强度调整)对其路径预报的影响进行了敏感性试验。试验结果显示,GRAPES_TYM 涡旋初始化中的涡旋强度调整是造成 TC1618 预报路径平均误差过大的主要原因。针对强度调整方案中不同的调整半径(12° 、 9° 、 6° 、 3°)进行了进一步敏感性试验。

不同涡旋强度调整半径试验结果显示,TC1618 的预报路径对强度调整方案的调整半径比较敏感,尤其是当其强度较弱时,如热带风暴。当 TC1618 处于较弱阶段时,较大的强度调整半径(12° 、 9°)会导致路径误差显著偏大;调整半径为 3° 时其路径预报误差最小;调整半径为 6° 时,其路径预报误差位于 12° (9°)与 3° 之间。进一步分析不同的强度调整半径对 TC1618 的环境场以及涡旋环流尺度的影响可以发现:较大的涡旋强度调整半径,对应于初始场中较大的涡旋环流,同时会使得副热带高压南侧邻近 TC1618 环流区域等高线北移,并且,在 120 h 积分过程中保持相近的特征:涡旋环流尺度越大,其邻近区域的副热带高压越弱,涡旋北移速度越快,涡旋环流同其西北部的西风槽结合得越早,后期路径偏差越大。

为了进一步分析涡旋强度调整对 GRAPES_TYM 路径预报的影响,选取 12° 和 3° 作为强度调整半径,利用 2016 年主要热带气旋进行了批量试验。批量试验结果统计分析显示:较小的涡旋强度调整半径会明显减小模式平均路径误差。

5.2 讨论

TC1618 的个例试验结果分析以及 2016 年主要热带气旋预报试验结果统计分析均表明:涡旋强度调整对区域模式台风路径预报改进没有明显正效果(图 9a、10),涡旋强度调整半径为 3° 的试验同无强度调整试验的平均路径误差相当。热带气旋强度预报是热带气旋区域模式发展重要目标之一,而对于强度预报而言,涡旋强度调整至关重要。2016 年 9 月 29 日 00 时的个例试验分析表明,无涡旋强度调整时模式对热带气旋的发展无预报能力。9 月 29 日 00 时模式初始场的平均海平面中心气压为

1005 hPa,而综合分析的中心气压为 990 hPa,两者相差 15 hPa;48 和 96 h 模式预报的中心气压分别为 1003 和 1004 hPa,而此时综合分析的中心气压为 982 和 935 hPa,相差 21 和 69 hPa。无涡旋强度调整时,模式预报不出 TC1618 的发展。基于第 4.3 节批量试验的结果计算了近地面最大风速误差,结果显示,涡旋强度调整可以明显提高区域模式对热带气旋强度的预报能力(图 11)。同无涡旋强度调整相比,强度调整半径为 3° 的 R03 试验其 24—120 h 平均近地面最大风速误差分别减小 16.5% (24 h)、15.4% (48 h)、21.3% (72 h)、25% (96 h) 和 28.8% (120 h)。

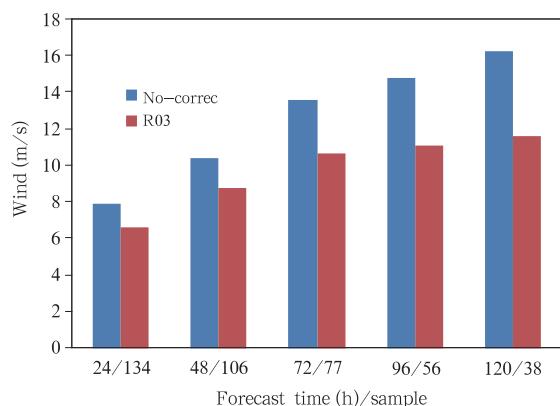


图 11 2016 年 13 个热带气旋 10 m 最大风速平均误差

Fig. 11 Mean error of maximum wind speed at 10 m for 13 TCs in 2016

目前在 GRAPES_TYM 中所用的涡旋强度调整方案基于理想涡旋设计,未考虑近地面摩擦所引起近地面风速的减小。这样调整后的热带气旋同模式的动力及物理均存在一定的不协调。为了获取结构合理的初始涡旋,提高区域模式对热带气旋路径及强度的预报能力,需要在以下方面做进一步的研究:

(1) 精细化涡旋强度调整技术:基于区域模式本身所预报的历史涡旋来构造包含合理结构的强度调整模型,并考虑热带气旋的实际尺度(最大风速半径、7 级风半径)对模式初始涡旋进行尺度调整及强度调整,使获得的涡旋从结构和强度上更加合理,从而改善由于强度调整对模式路径预报所带来的负面影响。

(2) 加强区域模式资料同化技术开发:针对热

带气旋的特征,发展先进的资料同化技术,加强已有的卫星观测资料的同化应用。

(3) 开展针对热带气旋环流区的观测研究,包括有人机穿越观测和无人机/船观测,获得包括下投探空在内的热带气旋内核区域资料,通过资料同化技术改善热带气旋环流区域的分析精度,从而改善模式初始场对热带气旋环流结构、强度的描述。

参考文献

- 陈德辉, 沈学顺. 2006. 新一代数值预报系统 GRAPES 研究进展. 应用气象学报, 17(6): 773-777. Chen D H, Shen X S. 2006. Recent progress on GRAPES research and application. J Appl Meteor Sci, 17(6): 773-777 (in Chinese)
- 梁旭东, 王斌. 2010. 基于模式约束三维变分技术的连续循环同化试验研究. 气象学报, 68(2): 153-161. Liang X D, Wang B. 2010. Data assimilation cycle experiments in typhoon numerical prediction using the model-constrained 3DVar. Acta Meteor Sinica, 68(2): 153-161 (in Chinese)
- 麻素红, 张进, 沈学顺等. 2018. 2016 年 GRAPES_TYM 改进及对台风预报影响. 应用气象学报, 29(3): 257-269. Ma S H, Zhang J, Shen X S, et al. 2018. The upgrade of GRAPE_TYM in 2016 and its impacts on tropical cyclone prediction. J Appl Meteor Sci, 29(3): 257-269 (in Chinese)
- 瞿安祥, 麻素红, Liu Q F 等. 2009a. 全球数值模式中的台风初始化 I: 方案设计. 气象学报, 67(5): 716-726. Qu A X, Ma S H, Liu Q F, et al. 2009a. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model Part I: Scheme design. Acta Meteor Sinica, 67(5): 716-726 (in Chinese)
- 瞿安祥, 麻素红, 李娟等. 2009b. 全球数值模式中的台风初始化 II: 业务应用. 气象学报, 67(5): 727-735. Qu A X, Ma S H, Li J, et al. 2009b. The initialization of tropical cyclones in the NMC global model. Part II: Implementation. Acta Meteor Sinica, 67(5): 727-735 (in Chinese)
- 张进, 麻素红, 陈德辉等. 2017. GRAPES_TYM 改进及其在 2013 年西北太平洋和南海台风预报的表现. 热带气象学报, 33(1): 64-73. Zhang J, Ma S H, Chen D H, et al. 2017. The improvements of GRAPES_TYM and its performance in North-west Pacific Ocean and South China Sea in 2013. J Trop Meteor, 33(1): 64-73 (in Chinese)
- Aksoy A, Lorsolo S, Vukicevic T, et al. 2012. The HWRF Hurricane ensemble data assimilation system (HEDAS) for high-resolution data: The impact of airborne Doppler radar observations in an OSSE. Mon Wea Rev, 140(6): 1843-1862
- Biswas M, Bernardet L, Abarca S, et al. 2017. Hurricane Weather Research and Forecasting (HWRF) Model: 2017 Scientific Documentation
- Cha D H, Wang Y Q. 2013. A dynamical initialization scheme for real-time forecasts of tropical cyclones using the WRF model.

- Mon Wea Rev, 141(3): 964-986
- Gopalakrishnan S G, Goldenberg S, Quirino T, et al. 2012. Toward improving high-resolution numerical hurricane forecasting: Influence of model horizontal grid resolution, initialization, and physics. *Wea Forecast*, 27(3): 647-666
- Hendricks E A, Peng M S, Ge X Y, et al. 2011. Performance of a dynamic initialization scheme in the coupled Ocean-Atmosphere Mesoscale Prediction System for Tropical Cyclones (COAMPS-TC). *Wea Forecast*, 26(5): 650-663
- Hendricks E A, Peng M S, Li T. 2013. Evaluation of multiple dynamic initialization schemes for Tropical Cyclone prediction. *Mon Wea Rev*, 141(11): 4028-4048
- Kurihara Y, Bender M A, Ross R J. 1993. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon Wea Rev*, 121(7): 2030-2045
- Kurihara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al. 1995. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon Wea Rev*, 123(9): 2791-2801
- Pu Z, Zhang S, Tong M, et al. 2016. Influence of the self-consistent regional ensemble background error covariance on hurricane inner-core data assimilation with the GSI-based hybrid system for HWRF. *J Atmos Sci*, 73: 4911-4925
- Tallapragada V, Kwon Y C, Liu Q, et al. 2012. Operational implementation of high-resolution triple-nested HWRF at NCEP/EMC-A major step towards addressing intensity forecast problem // *Proceedings of the 30th Conference on Hurricane and Tropical Meteorology*. Ponte Verde, FL: American Meteorological Society
- Tallapragada V, Kieu C, Kwon Y, et al. 2014a. Evaluation of storm structure from the operational HWRF during 2012 implementation. *Mon Wea Rev*, 142(11): 4308-4325
- Tallapragada V, Zhang Z, Kieu C Q, et al. 2014b. Significant advances to the NCEP operational HWRF modeling system for improved hurricane forecasts // *Proceedings of 31st Conference on Hurricane and Tropical Meteorology*. San Diego, CA: Amer Meteor Soc
- Tallapragada V, Kieu C, Trahan S, et al. 2015. Forecasting tropical cyclones in the Western North Pacific basin using the NCEP operational HWRF: Real-time implementation in 2012. *Wea Forecast*, 30(5): 1355-1373
- Tallapragada V, Kieu C, Trahan S, et al. 2016. Forecasting tropical cyclones in the Western North Pacific Basin using the NCEP operational HWRF model: Model upgrades and evaluation of real-time performance in 2013. *Wea Forecast*, 31(3): 877-894
- Tien D D, Ngo-Duc T, Mai H T, et al. 2013. A study of the connection between tropical cyclone track and intensity errors in the WRF models. *Meteor Atmos Phys*, 122(1-2): 55-64
- Wang Y Q. 1995. An inverse balance equation in sigma coordinates for model initialization. *Mon Wea Rev*, 123: 482-488
- Zhang S J, Li T, Ge X Y, et al. 2012. A 3DVAR-based dynamical initialization scheme for tropical cyclone predictions. *Wea Forecast*, 27(2): 473-483
- Zou X, Qin Z, Zheng Y. 2015. Improved tropical storm forecasts with GOES-13/15 imager radiance assimilation and asymmetric vortex initialization in HWRF. *Mon Wea Rev*, 143(7): 2485-2505