

钟水新, 陈子通, 戴光丰, 等. 2014. 地形重力波拖曳参数化对热带气旋强度和路径预报影响的研究 [J]. 大气科学, 38 (2): 273–284, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13131. Zhong Shuixin, Chen Zitong, Dai Guangfeng, et al. 2014. Impacts of orographic gravity wave drag parameterization on typhoon intensity and path forecasting [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 273–284.

地形重力波拖曳参数化对热带气旋强度和路径预报影响的研究

钟水新^{1,2,3} 陈子通^{1,2} 戴光丰^{1,2} 徐道生^{1,2} 黄燕燕^{1,2}
张诚忠^{1,2} 蒙伟光^{1,2} 杨兆礼^{1,2}

1 区域数值天气预报重点实验室, 广州 510080

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所, 广州 510080

3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 本文在 GRAPES_TMM (Global/Regional Assimilation and Prediction System for Tropical Mesoscale Model)——中国南海台风模式版 (面向南海和东南亚) 中发展和引进了 KA95 (Kim and Arakawa, 1995) 地形重力波拖曳参数化方案 (GWDO), 并对 2012 年主要的 9 个登陆台风进行了试验对比研究, 考察了不同标准 Richardson 数 (Ri_c) 的 GWDO 试验对台风路径和强度预报的影响。结果表明, 在引入地形重力波拖曳参数化过程后, 模式对台风登陆时路径和强度的预报能力均要有提高, 对台风预报时长越长, GWDO 的影响也更为显著。对双台风“SAOLA”和“DAMREY”试验结果表明, GWDO 对台风外围距台风中心 150 km 的对流层中下层风速减弱较为明显, 减弱了 GRAPES 区域模式对台风强度预报偏强的现象, 对台风强度长时间预报改善更为明显。不同标准 Ri_c 对重力波拖曳力的计算较为敏感, 当 Ri_c 取 1.0 时, 动能迅速的在低层被频散, 能量无法有效地上传; Ri_c 取 0.25 时, 大部分的能量在中高层被频散。总的来说, Ri_c 取 0.75 时对台风路径和强度预报改进更为显著, 其结果可为业务预报提供指导意义。

关键词 KA95 方案 地形重力波拖曳 GRAPES 模式 台风

文章编号 1006-9895(2014)02-0273-12

中图分类号 P456.7

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13131

Impacts of Orographic Gravity Wave Drag Parameterization on Typhoon Intensity and Path Forecasting

ZHONG Shuixin^{1,2,3}, CHEN Zitong^{1,2}, DAI Guangfeng^{1,2}, XU Daosheng^{1,2}, HUANG Yanyan^{1,2},
ZHANG Chengzhong^{1,2}, MENG Weiguang^{1,2}, and YANG Zhaoli^{1,2}

1 Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou 510080

2 Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration (CMA), Guangzhou 510080

3 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract The scheme of gravity wave drag from sub-grid scale orography (GWDO) is implemented into typhoon models for the South China Sea and southeastern Asia based on the Global and Regional Assimilation and Prediction System for the Tropical Mesoscale Model (GRAPES-TMM). Its performance is evaluated against non-GWDO

收稿日期 2013-03-11, 2013-07-08 收修定稿

资助项目 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201206010、GYHY201006016、GYHY201106003, 灾害天气国家重点实验室开放基金 2012LASW-B03, 国家自然科学基金 41075040、41275053, 广东省气象局重点项目 2013A04

作者简介 钟水新, 男, 1980 年出生, 博士, 助理研究员, 主要从事数值预报和中小尺度天气分析。E-mail: sxzhong@grmc.gov.cn

parameterization of nine typhoons that made landfall in 2012 in addition to the sensitivity of various criteria of the Richardson number (Ri_c) for typhoon path and intensity forecasting. The results reveal that the KA95 scheme improves the overall performance of GRAPES for typhoon forecasting when the GWDO parameterization is implemented, particularly with longer forecasts. Double typhoons Damrey and Saola are used as case studies to show that GWDO parameterization is highly effective for forecasting typhoons in the middle and lower troposphere. Moreover, the calculation of gravity wave drag indicates that significant and negligible low-level wave drag is predicted with large and small Richardson numbers ($Ri_c=1.0$, $Ri_c=0.25$), respectively. By defining a moderate Richardson number ($Ri_c=0.75$), improvements in predicting the paths and intensities of typhoons are achieved.

Keywords KA95 scheme, Orographic gravity wave drag, GRAPES (Global and Regional Assimilation and Prediction System), Typhoon

1 引言

我国幅员辽阔,地形复杂多样,海陆边界错综交织,地形对我国天气和气候乃至东亚大气环流都有显著影响。早在 20 世纪 50 年代,我国科学家就地形对气流的影响进行了探讨。叶笃正(1956)指出,地形对过山气流的影响所达到的高度可以达到对流层顶以上,巢纪平等(1964)在对小地形对气流的影响讨论时指出,山区气流被扰动的状态取决于上游条件和山的高度,当上游状态中的弗罗德(Froude)数小于 1,且山脉高度等于临界高度时,背风面将出现常定的“气压跳跃”,并从理论上研究了“气压跳跃”的形成过程。

近年来,随着数值预报理论与方法的不断发展,数值预报已成为大气科学研究的主要手段之一。在大气模式中,地形作用的描述正确与否,是决定天气预报和气候模拟是否成功的关键因子之一。谭锐志和林元弼(1994)通过对台风暴雨积云参数化试验,指出在山区地域模式对台风降水偏差较大,积云参数化方案在山区降水估计不足,要提高登录台风降水预报的准确率,必须考虑地形的作用。次网格地形重力波拖曳就是地形对大气环流作用中的一种,同时它也是数值预报模式中最重要边界层参数化过程之一。研究表明,在不考虑次网格地形重力波拖曳(Gravity Wave Drag induced by subgrid-scale Orography, 简称 GWDO)参数化过程时,模式对风场的模拟将出现偏差,例如对冬季北半球中高纬高层西风急流的预报往往偏强(Lilly, 1972; Kim and Arakawa, 1995)。若考虑 GWDO,则有利于减弱对西风带偏差以及由西风带偏差引起的冷池等问题(Kim, 1996),改善对动量通量的垂直发散度及强度的预报(Kim and Doyle, 2005),提高模式对北半球大尺度环流系统的总体预报性能,包

括对如温带气旋、冬季大陆高压的强度和移动路径的预报等(Hong et al., 2008)。

Lilly(1972)强调在大尺度大气模式边界层参数化过程中应包括由于次网格尺度地形效应引起的重力波。Boer et al.(1995)首次在大尺度模式低层大气实现重力波拖曳参数化。Palmer et al.(1986)基于 Lindzen 饱和假设理论(Lindzen, 1981)发展了 GWDO 方案,该方案主要考虑高层波破碎对重力波拖曳的影响,并在诸多研究中得到了发展和应用(Miller and Swinbank, 1989; Helfand et al., 1987; Broccoli and Manabe, 1992)。Kim and Arakawa(1995)的研究结果表明,在地形重力波拖曳参数化过程中,大气低层重力波的破碎可使得波能在下层被捕捉,并通过非静力波的共振使得拖曳力增强(Kim and Arakawa, 1995, 简称 KA95 方案),KA95 方案考虑了传统因地形方差引起的高层波破碎及因地形凸性和不对称性而导致大气低层波破碎对 GWDO 的影响。

钱永甫(2000)研究了 GWDO 对气候模拟效果的影响,发现重力波拖曳作用都可在一定程度上可使模拟结果更符合气候实况,并在次年的数值试验中,针对包络地形和 GWDO 对区域气候模拟效果的影响问题上(刘华强和钱永甫, 2001),指出两者的作用在模式积分初期并不明显,随着积分时间的增长,它们对模拟结果的影响程度增大。高守亭和冉令坤(2003)改进了 McFarlane(1987)重力波拖曳参数化方案,改进后的方案不仅考虑了重力波破碎后尚存的动量通量对纬向平均流的拖曳作用,还考虑了在重力波破碎区,耗散作用造成的动量损失对纬向平均气流的影响。王元等(2007)给出了一个用于计算地形重力波拖曳中由线性自由传播重力波造成的波动应力的垂直分布的双波参数化方案。徐国强等(2010)通过对一次降水过程

的模拟试验, 指出 GWDO 使 GRAPES 全球模式预报的流场更接近于大气真实状态, 从而提高了模式对降水预报的准确率。

提高大气模式的预报能力, 除了不断改进资料同化系统外, 模式物理过程的改进和精细化也是必不可少的, 这也是保持模式可持续发展的重点。GRAPES 区域模式是我国发展的中尺度数值模式, 目前用于对华南地区的天气业务预报和科研工作。模式物理过程中尚未考虑地形重力波拖曳参数化的影响。为了完善和改进 GRAPES 区域模式物理过程, 提高预报效果, 我们发展和引进了 KA95 地形重力波拖曳参数化方案, 并应用到南海台风模式中, 对 2012 年主要的登陆台风进行了试验对比研究, 主要考察 GWDO 对登陆台风的路径和强度的影响。

2 模式和试验设计

2.1 中国南海台风模式

本文采用中国南海台风模式进行对比试验, 该模式基于区域 GRAPES 模式, 采用 Arakawa-C 格式、Charney-Philip 垂直跳层设置和半隐式一半拉格朗日时间差分方案, 提供等压场预报和各站点的要素预报产品, 是投入国家业务运行的模式之一。模式采用等温大气静力扣除、改进正定水汽平流方案、高度地形追随坐标设置, 并利用台风重定位技术和人造台风模型技术, 通过三维变分和初值化方法引入数值模式。模式逐时要素预报性能稳定, 多年来, 模式预报产品发挥很大的作用, 对于日常业务预报有很好的参考价值, 读者可登录网站 [http://www.trams.org.cn/\[2013-04-16\]](http://www.trams.org.cn/[2013-04-16]) 查询实时台风预报与检验结果。

2.2 KA95 方案简介

和传统的地形重力波参数化方案不同 (Palmer et al., 1986; McFarlane, 1987; Alpert et al., 1988; Iwasaki and Tada, 1989), KA95 方案不仅考虑了高层波破碎对重力波拖曳的影响, 也考虑了因低层波破碎对下游重力波拖曳的影响: 当气流翻越不规则地形时, 在参考层会产生相应的应力 τ_0 , 它会以重力波的形式向垂直方向发展, 当重力波遇到不稳定条件时波破碎, 这一方面使得拖曳力减弱, 另一方面将重力波向下游传播, 换言之, 剩余的拖曳 τ 将在波破碎后继续扩散, 这种拖曳 τ 的垂直梯度使得重力波得以向下游发展 (Kim and Doyle, 2005)。

依据 Kim and Arakawa (1995), 参考层上的 GWD 为

$$\tau = E \frac{m' \rho_0 |U_0|^3}{\Delta x N_0} G', \quad (1)$$

其中, U_0 、 E 、 m' 和 G' 分别可写成

$$U_0 = \frac{1}{h} \int_{k=1}^{k=k_{\text{pbl}}} U dz, \quad (2)$$

$$E \equiv (\text{OA} + 2)^{C_E Fr_0 / Fr_c}, \quad (3)$$

$$m' \equiv (1 + L_X)^{\text{OA}+1}, \quad (4)$$

$$G' = G_{\max} \frac{Fr_0^2}{Fr_0^2 + C_G \text{OC}^{-1}}, \quad (5)$$

其中, ρ 为密度; N 是 Brunt-Vaisala frequency; U 是水平风速; k_{pbl} 为边界层顶; Δx 为模式的水平尺度; 下标 0 代表是参考层, 也就是重力波产生层; E 为参考层上拖曳力的增强因子, 用来增加收到低层波破碎或是抑制作用导致的拖曳力, 主要会受到地形的非对称 (OA) 以及 Fr_c 所影响; Fr_0 为标准层上的 Froude 数, Fr_c 为临界的 Froude 数。 m 代表网格内山的数量, 受到地形的非对称 (OA) 和有效地形长度 (L_X) 所影响, G 是一个用来断定气流阻塞 (blocking) 与否的渐进函数, 因为经过修正, 所以以 m' 、 G' 表示; OC 代表地形的尖锐性。 C_E 和 C_G 均为常数。

依据理论, 重力波若未满足饱和的假设, 能量可以在不损失的情况下向上传, 即上层的 GWD 等于下层的 GWD ($\tau_i = \tau_{i+1}$), 以此计算上层波的振幅 h_{di} (Palmer et al., 1986), 并利用此振幅, 求取局地修正后的 Richardson 数 (Ri_m , Ri 为 Richardson 数) 如下:

$$h_{\text{di}}^2 = \frac{\Delta x}{m} \frac{\tau_{i+1}}{\rho_i N_i U_i}, \quad (6)$$

$$Fr_{\text{d}} = \frac{N h_{\text{d}}}{U}, \quad (7)$$

$$Ri_m = \frac{Ri(1 - Fr_{\text{d}})}{(1 + \sqrt{Ri \cdot Fr_{\text{d}}})^2}. \quad (8)$$

依据 Lindzen (1981) 的饱和假设, 当满足 $Ri_m < Ri_c$ 时, 重力波在该层波破碎, τ 减小, 部分能量损失直至回复到饱和临界点 (Ri_c)。当未达饱和条件时, 重力波在该层不破碎, 该层之 τ 维持不变。如此, 在 (8) 式中以 Ri_m 代入计算临界振幅 h_{d} :

$$h_{\text{d}} = \frac{U}{N} \left[2 \left(2 + \frac{1}{\sqrt{Ri}} \right)^{1/2} - \left(2 + \frac{1}{\sqrt{Ri}} \right) \right]. \quad (9)$$

利用 (9) 求得振幅, 计算该层剩余 GWD:

$$\tau = -\frac{m}{\Delta x} \rho N U h_d^2. \tag{10}$$

通过上述流程计算得到的 GWDO 的垂直分布直到 $\tau_i = 0$ 或达到模式层顶, 代入 (11) 和 (12) 式:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_x}{\partial z}, \tag{11}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_y}{\partial z}, \tag{12}$$

从而完成 GRAPES 模式物理过程中地形重力波拖曳对风场变化趋势的计算。

2.3 试验设计

本文选取 2012 年 9 个登陆台风进行敏感性试验, 包括 GWDO 试验和未考虑 GWDO 影响的控制试验 (Control experiment, CTL), 如表 1, 可以看出, 2012 年登陆台风较多, 尤其是在 8 月份, 6 个

台风一月内连登我国, 创历史同期之最。文中, 我们首先对每个台风进行了预报其登陆时强度和路径对比试验, 共 9 个预报样本, 以考察地形重力波拖曳对台风登陆强度和路径预报的影响, 如图 1。由图可见, 2012 年主要的登陆台风路径较为复杂, 包括打转台风 VICENTE、TEMBIN 和二次登陆台风 SAOLA 等, 且北上台风较多, 如台风 SAOLA 和 BOLAVEN 等。其次, 对 9 个台风整个生命史的进行了预报对比试验, 包括每个台风从生成到消亡的预报对比, 模式一日起报两次, 分别为 00 时 (协调世界时, 下同) 和 12 时起报, 每次预报 72 小时, 9 个登陆台风共 100 个试验样本数, 考察了不同 Ri_c 的 GWDO 方案对台风强度和路径预报的影响。

在对地形重力波拖曳参数化的过程中, 首先计算参考层 (重力波产生层) 重力波拖曳应力[公式 (1)], 其次依据 Lindzen (1981) 的饱和假设理论,

表 1 2012 年登陆台风个例情况一览表

Table 1 Details of the landing typhoons in 2012

	生命史/d	登录时间	起报登陆时间 (年月日时)	登录地点	中心气压/hPa	移动方向
DOKSURI	4	6 月 29 日 17:50	20120627T00:00	珠海市南水	985	西北
VICENTE	3	7 月 23 日 19:15	20120721T12:00	广东台山	955	西北
DAMREY	5	8 月 1 日 13:30	20120730T12:00	江苏响水	975	偏西
SAOLA	6	8 月 1 日 18:45	20120730T12:00	台湾花莲	950	西北
		8 月 2 日 22:50	20120731T12:00	福建福鼎	985	
HAIKUI	4	8 月 7 日 19:20	20120805T12:00	浙江象山	965	偏西
KAI-TAK	5	8 月 17 日 04:30	20120814T12:00	广东湛江	968	西北
TEMBIN	10	8 月 23 日 20:45	20120820T12:00	台湾省屏東	945	打转, 偏西转偏北
BOLAVEN	8	8 月 28 日 08:15	20120826T00:00	朝鲜西南部	965	偏北
SON-TINH	5	10 月 28 日 15:30	20121026T00:00	越南南定	975	西北

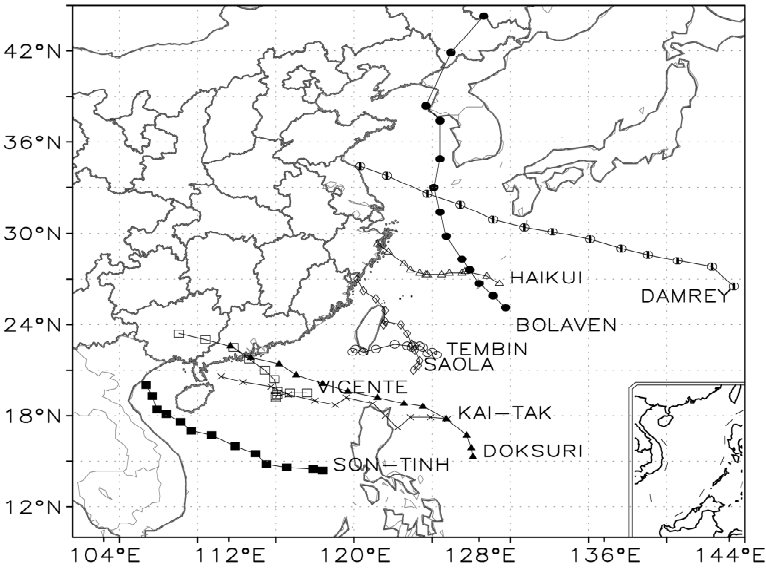


图 1 2012 年 8 月登陆台风实况路径分布
Fig. 1 The distribution of landing paths of the typhoons in August 2012

当未达饱和条件时,重力波在该层不破碎,能量便可以在不损失的情况下向上传,该层之 τ 维持不变。当满足 $Ri_m < Ri_c$ 时,重力波在该层波破碎, τ 减小,部分能量损失直至回复到饱和临界点(Ri_c),重新计算该层临界振幅,并根据此振幅计算该层剩余重力波拖曳力,直到 $\tau = 0$ 或模式层顶,完成模式物理过程中对地形重力波拖曳的参数化过程。

文中, GWDO 和 CTL 试验中所采用的边界层方案、对流参数化方案和路面过程等均一致,使用相同的标准初值化(SI),分别采用 MRF 边界层方案、SAS 积云参数化方案、SLAB 路面过程、SWRAD 短波辐射方案以及 RRTM 长波辐射方案,水平分辨率为 36 km,垂直方向 55 层。模式初始场和侧边界采用 GFS $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 预报场,每 6 小时更新一次侧边界场。

3 结果分析

3.1 GWDO 对台风登陆强度和路径的影响

由对台风登陆预报 CTL 和 GWDO 试验的台风

路径误差和强度误差对比可以看出(图 2),在考虑 GWDO 后,模式对台风登陆时路径和强度的预报能力均要有提高。对台风路径预报而言, GWDO 对 24 小时以内的台风路径预报影响不大, 48 小时至 60 小时台风路径预报改善较为显著, 路径误差平均降低了 21 km, 60 小时台风路径误差由原来的 186 km 降低为 164 km, 降低了 22 km。可见, GWDO 对台风的登陆路径预报而言, 预报时长越长, 改进效果越为明显, 说明在考虑了地形重力波拖曳后, 使得 GRAPES 对台风路径预报可用时效延长。

对台风强度而言, GWDO 对 24 小时以内的台风强度预报影响也较小, 但对 54 至 66 小时的强度预报改善较为明显, 其强度误差平均减低了约 1 hPa, 66 小时强度误差减低了 1.1 hPa。从图上还可以看出, 对台风的预报时长越长, GWDO 对台风强度预报影响也更为显著, 由此可见, 地形重力波拖曳参数化使得 GRAPES 模式在对台风登陆长时间预报上更为准确, 减小了模式的系统偏差, 延长了对台风登陆预报的可用时效。

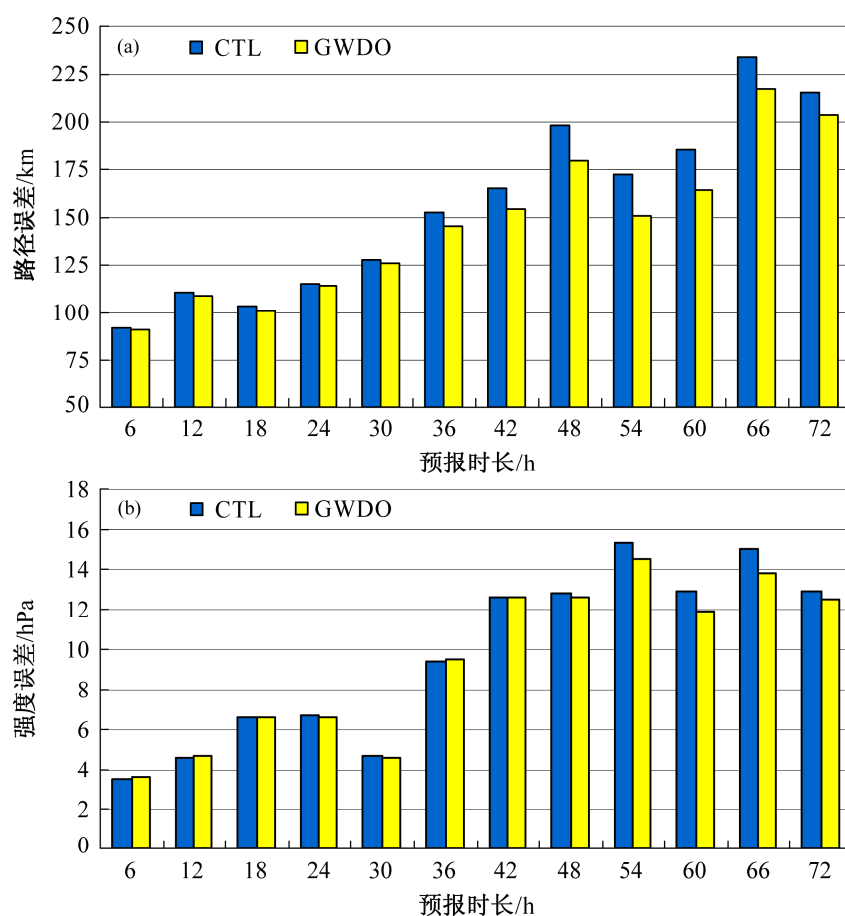


图 2 2012 年 9 个台风(见表 1)登陆预报 CTL 和 GWDO 试验平均误差对比: (a) 路径误差; (b) 强度误差

Fig. 2 The mean error comparison between control (CTL) and GWDO experiments of nine landing typhoons in 2012: (a) Path error; (b) intensity error

3.2 地形重力波拖曳力分析 (以双台风“SAOLA”和“DAMREY”为例)

3.2.1 台风路径对比

台风“SAOLA”和“DAMREY”是2012年登陆我国的第9号和第10号台风,其中,台风“SAOLA”于8月1日18时45分于台湾花莲登陆,登陆时中心气压为950 hPa(如表1),并于2日22时50分在福建福鼎二次登陆,中心气压为985 hPa。台风“DAMREY”与8月1日13:30在江苏响水登陆,登陆时中心气压为975 hPa。从台风登陆实况

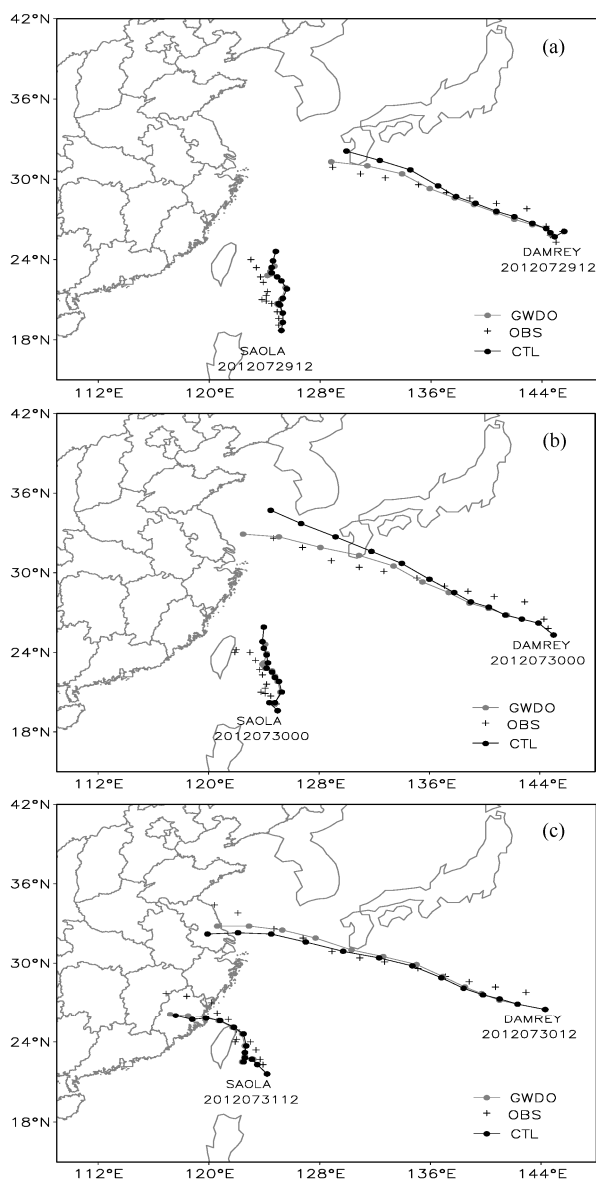


图3 台风“SALLA”和“DAMREY”的72小时路径预报:(a)7月29日12时起报;(b)30日00时起报;(c)30日12时(DAMREY)和31日12时(SAOLA)起报

Fig. 3 The prediction of typhoon paths (72-h forecast) of “SAOLA” and “DAMREY” starting from (a) 1200 UTC 29 July, (b) 0000 UTC 30 July, (c) 1200 UTC 30 July and 1200 UTC 31 July

路径(图1)可以看出,台风“SAOLA”移速相对缓慢,“DAMREY”移速则相对较快。

从台风“DAMREY”和“SAOLA”GWDO和CTL的72小时路径模拟与观测(OBS)对比可以看出(图3),在考虑GWDO后,对双台风的路径预报均有不同程度改进,其中对台风“DAMREY”路径预报改进更为显著。例如,7月29日12时和30日00时起报的72小时台风路径预报,CTL试验

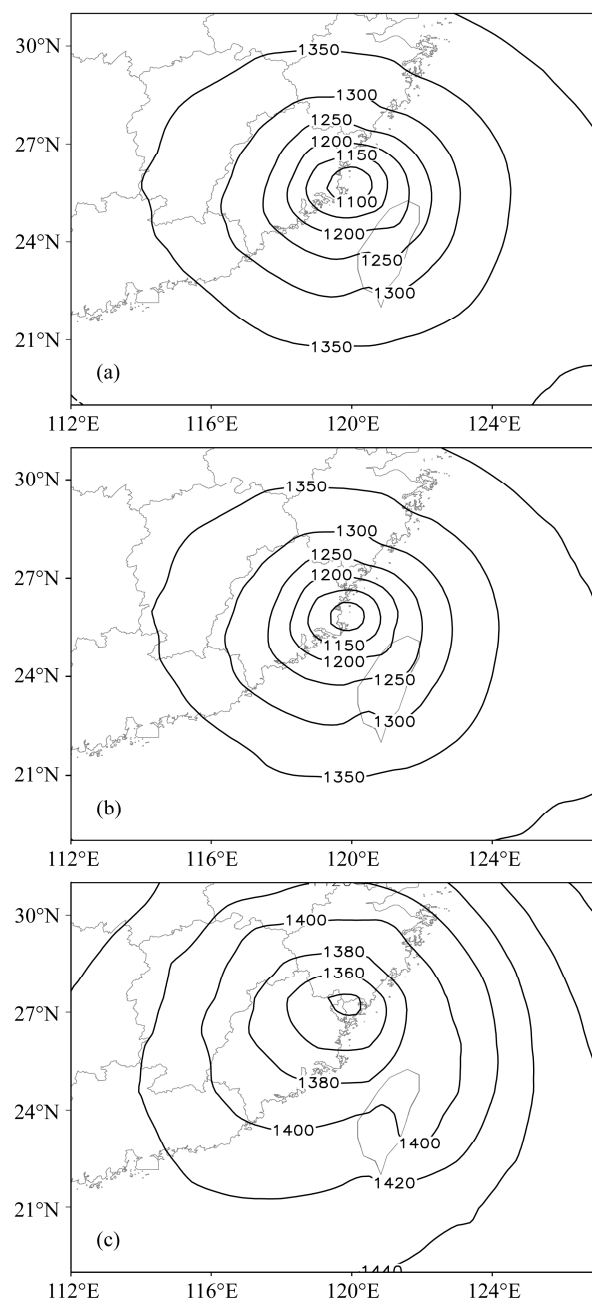


图4 2012年8月3日00时(60小时预报)850 hPa位势高度场:(a)CTL试验;(b)GWDO试验;(c)分析场

Fig. 4 The 850-hPa geopotential height field at 0000 UTC 3 August 2012 (60-h forecast) from experiments (a) CTL and (b) GWDO, and (c) analysis field

对“DAMREY”预报的路径偏北, GWDO 试验路径和实况则更为吻合, 以及 30 日 12 时在对“DAMREY”登陆我国的 72 小时预报, GWDO 试验登陆地点比 CTL 试验更贴近实况。对台风“SAOLA”而言, 移速则相对较缓慢, 如对 29 日 12 时和 30 日 00 时起报的 72 小时台风路径对比可以看出, GWDO 和 CTL 试验均未报出台风西折路径, 两者路径均偏北, 但 GWDO 试验 72 小时的路径移速度比 CTL 要慢, 跟实况路径更为接近。可见, 对台风路径预报而言, 尤其对移速较快的台风“DAMREY”, 地形重力波拖曳参数化的引入, 改进了 GRAPES 模式对台风“DAMREY”和“SAOLA”登陆的路径预报, 预报时长越长, 改进效果越为明显。

3.2.2 台风强度对比

以强台风“SAOLA”为例, 分析 GWDO 对台风强度登陆预报的影响。从 8 月 3 日台风“SAOLA”登陆时 850 hPa 位势高度的预报场和分析场对比可见 (图 4), GWDO 和 CTL 试验对台风“SAOLA”登陆中心强度预报总体偏强。“SAOLA”登陆时台风中心 850 hPa 分析场位势高度约 1340 gpm, 而 CTL 试验中模拟的台风中心强度约 1100 gpm, 强度预报偏强, 但在 GWDO 试验中, 模拟的台风中心强度要比 CTL 试验弱。从 CTL 试验和 GWDO 试验的预报差异可以看出 (图 5), 60 小时和 72 小时的台风中心 850 hPa 位势高度差分别为 24 gpm 和 45 gpm, 说明考虑地形重力波拖曳参数化后, GRAPES 对强台风预报偏强的现象有所改善, 使得大气环流更符合实况, 并且预报时间越久, 强度预报改进愈加显著。

从登陆时沿台风“SAOLA”中心的平均风速垂

直分布可以看出 (图 6), GWDO 和 CTL 试验对台风登陆时强度预报均偏强。但 GWDO 试验预报的台风外围风速比 CTL 试验要偏弱, 其中, 在对距台风中心 30~150 km 风速减弱最为显著, 最强减弱 12 m s^{-1} 。两者与分析场对比可见, GWDO 试验与分析场的台风外围 50 km 附近风速大小较吻合, 说明因地形重力波拖曳的作用, 使得模式对台风外围 150 km 以内的对流层中下层风速预报改善最为显著。

根据 Lindzen (1981) 的饱和理论, 当重力波未满足饱和理论, 能量可以在不损失的情况下向上传, 但当满足饱和假设的前提下, 即当 $Ri_m < Ri_c$ 时, 重力波在该层波破碎, τ 减小, 部分能量损失直至回复到饱和临界点 (Ri_c)。可见, 在计算 GWDO 对风场的作用时, 地形重力波波破碎条件的判断尤为重要, 这决定其拖曳力的大小以及波向下游传播的条件。对强台风“SAOLA”而言, GWDO 对风场的影响在距台风中心 150 km 附近的 500 hPa 较为显著, 表明在该地区, 地形重力波更易满足波破碎条件, 从而对风场产生影响。这也说明不同的 Ri_c 对重力波拖曳力的计算不同, 其标准对地形重力波拖曳进行合理准确的参数化显得尤为重要, 在本节第三部分综合分析了 $Ri_c=0.25$ 和 $Ri_c=0.75$ 对 GWDO 的影响。

综上, CTL 和 GWDO 试验对台风“SAOLA”登录时强度预报偏强, 这可能跟模式物理过程中积云参数化方案 (李响, 2012) 和边界层参数化方案 (Kanada et al., 2012; 王晨稀, 2013) 等的选择有关。单从地形重力波拖曳参数化对其强度预报效果来看, GWDO 一定程度上改善了 GRAPES 模式对台风“SAOLA”外围风场的模拟偏差, 减弱了 GRAPES 区域模式对台风强度预报偏强的现象, 改

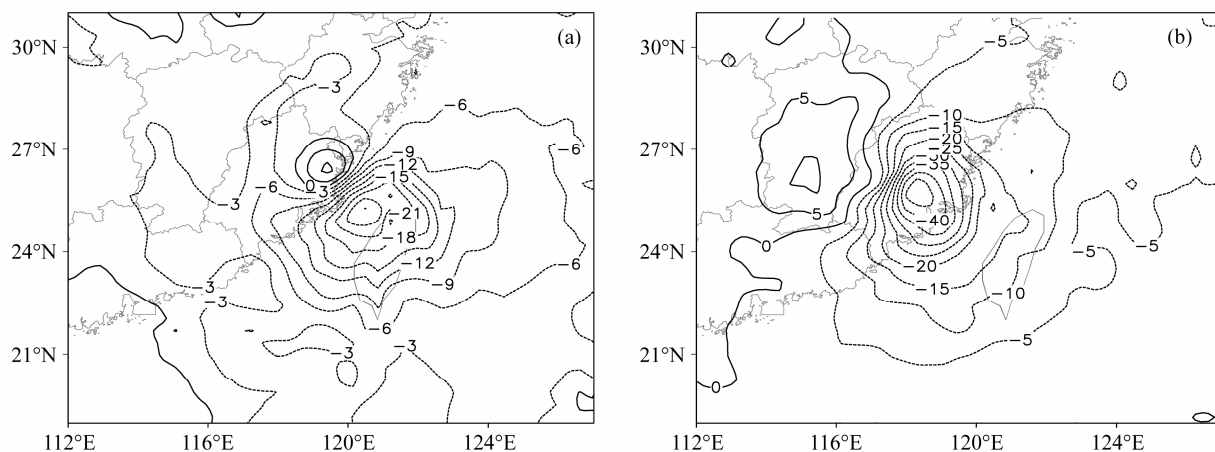
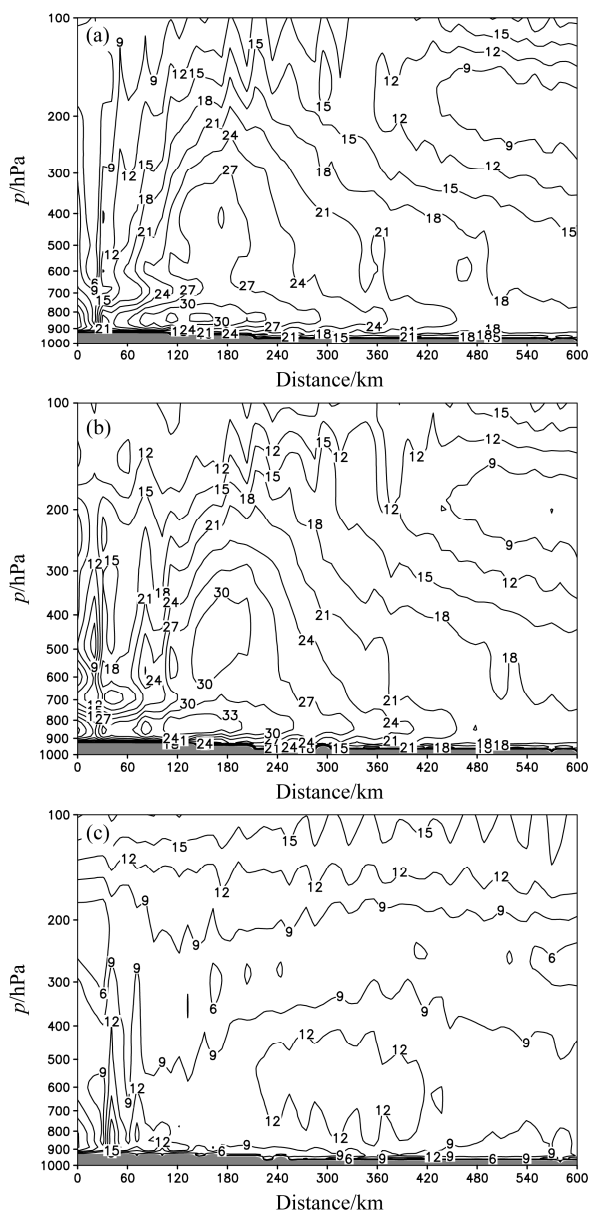


图 5 同图 4, 但为 CTL 试验与 GWDO 试验的差值 (CTL—GWDO)。(a) 60 小时预报; (b) 72 小时预报

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the difference between CTL and GWDO experiments (CTL—GWDO). (a) 60-h forecast; (b) 72-h forecast



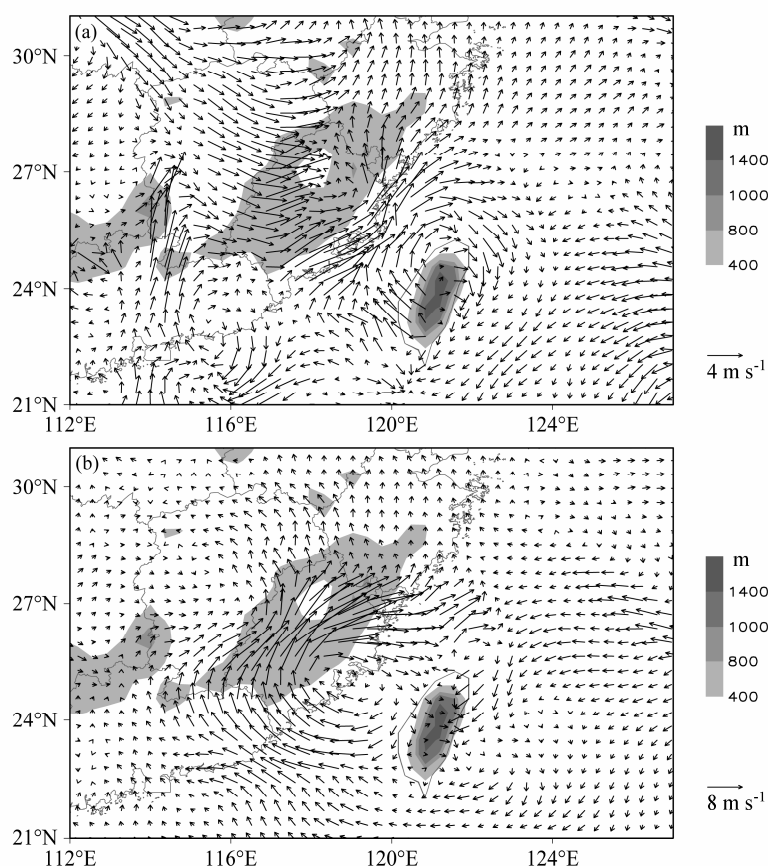


图8 2012年7月31日12时起的850 hPa水平风差值场(GWDO-CTL): (a) 60小时预报; (b) 72小时预报。阴影代表地形高度

Fig. 8 The 850-hPa horizontal wind differences between GWDO and CTL experiments starting from 1200 UTC 31 July 2012: (a) 60-h forecast; (b) 72-h forecast. The shading represents orographic height

取小值时(如0.25), GWDO可描述出高纬大部分拖曳力(Palmer et al., 1986; McFarlane, 1987; Kim and Arakawa, 1995),但也易使低层重力波拖曳偏小。Kim and Arakawa (1995)分析对比了 Ri_c 取0.25和0.75时对重力波波破碎的影响,指出 Ri_c 取0.75时可使副热带急流获得更多的动量沉积,减小低纬热带地区平流层温度偏差。Lott and Miller (1997)在其GWDO方案里取 $Ri_c=1.0$,这样做带来一个弊端是大部分重力波在低层就被频散掉了,导致地形重力波无法有效地上传至更高层。

基于此,我们考察了 $Ri_c=0.25$ (0.75、1.0)对GWDO的影响。图9为区域平均的GWDO风速扰动廓线和最小Richardson数(Ri_m)廓线。由图可见, Ri_c 取0.25(简称GWDO_0.25试验)时,相同层次的 Ri_m 最小, Ri_c 取0.75(简称GWDO_0.75试验)时次之, Ri_c 取1.0时 Ri_m 最大。由重力波破碎条件可知,当 τ 越小,上层波的振幅也越小, F_{RC} 越小,局地修正 Ri_m 越大,说明不同 Ri_c 取值直接影响到重力波拖曳力的大小,重力波拖曳的计算对 Ri_c

的标准较为敏感。从对应的GWDO风速扰动廓线可以看出,GWDO_0.25试验中,重力波能量在中低层(约2 km以下)达不到波破碎条件,导致大部分的能量在中高层被频散,对应风速扰动最强的层结在2.0~2.5 km附近。当 $Ri_c=1.0$ 时,动能迅速的在低层(0.5 km附近)被频散,能量无法有效地上传,因而GWDO产生的风速扰动也相应最小,所以在接下来的批量试验中主要考虑GWDO_0.25试验和GWDO_0.75试验对GWDO的影响,未考虑 Ri_c 取1.0对GWDO的影响。

我们对文中9个台风个例进行逐个对比分析,且对每个台风个例从发生到消亡进行逐日两次预报(00时和12时),每次预报72小时,9个台风个例共100个预报样本,分别对比分析未考虑GWDO(CTL试验)、GWDO_0.25试验和GWDO_0.75试验对台风整个生命史的路径和强度预报的影响。从不同 Ri_c 的GWDO试验对台风路径和强度预报的变化可以看出(图10),在考虑地形重力波拖曳参数化后,GWDO对台风整个生命史

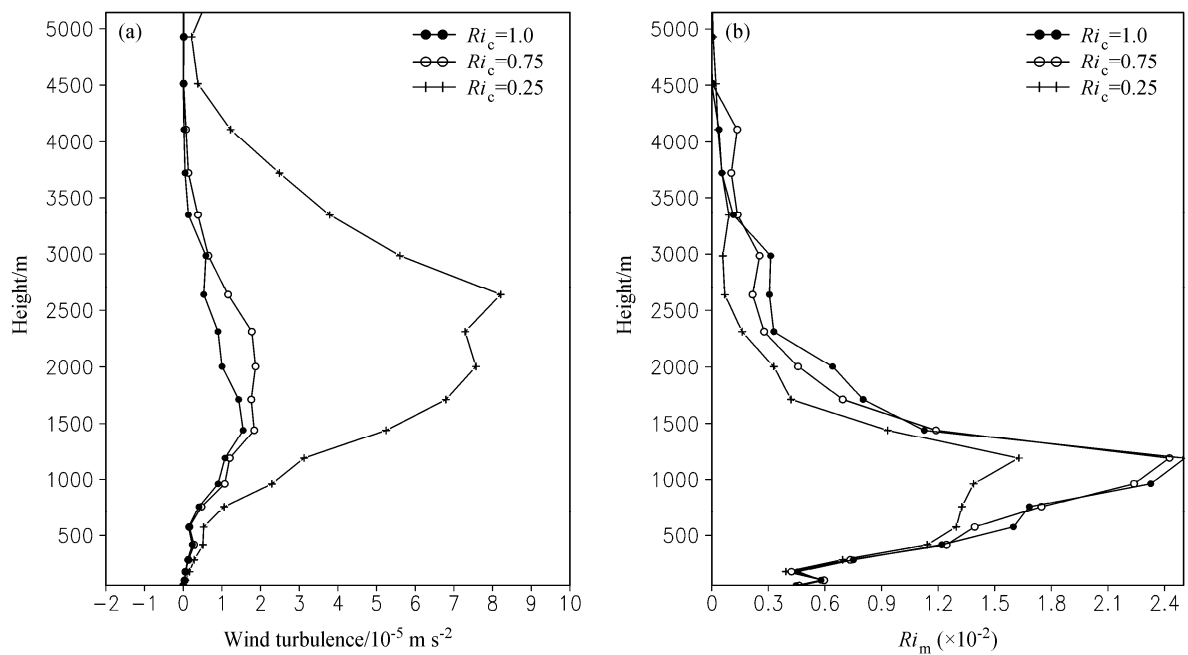


图9 2012年8月3日12时区域平均的(72小时预报)(a)GWDO风速扰动(10^{-5} m s^{-2})和(b) $Ri_m (\times 10^{-2})$ 垂直廓线
Fig. 9 Profiles of simulated domain-mean (a) wind turbulence (unit: 10^{-5} m s^{-2}) and (b) $Ri_m (\times 10^{-2})$ at 1200 UTC 3 August 2012 (72-h forecast)

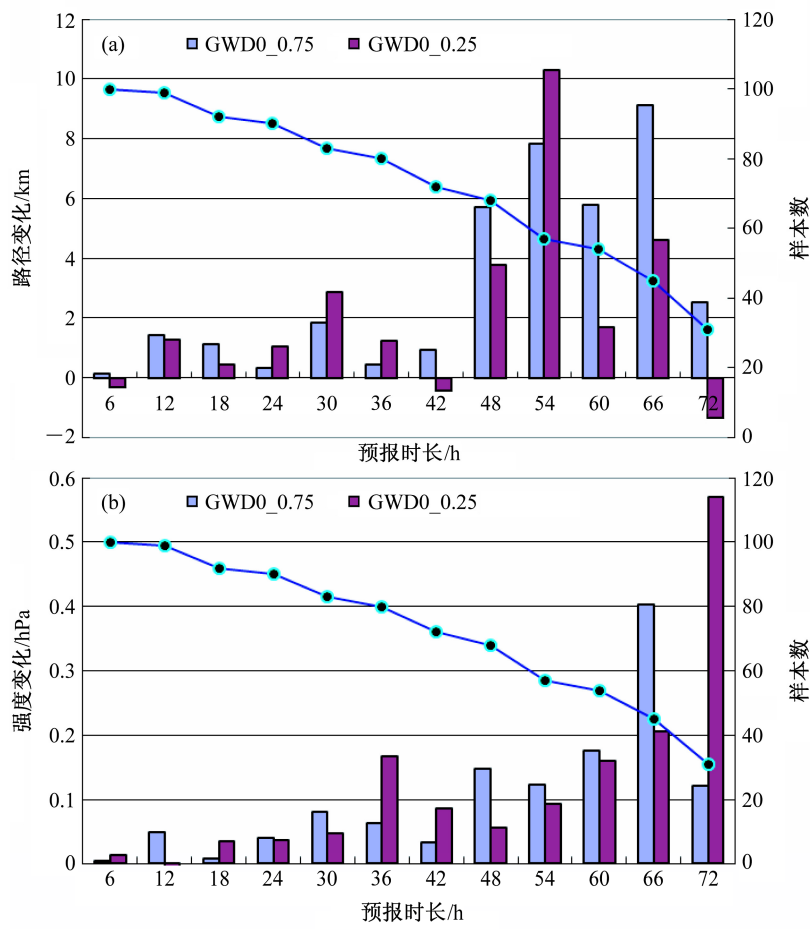


图10 不同 Ri_c 中GWDO试验的台风路径和强度预报变化(CTL—GWDO): (a)台风路径误差变化; (b)台风强度误差变化。实线代表试验样本数
Fig. 10 The differences between CTL and GWDO experiments for different Ri_c : (a) Path difference; (b) intensity difference. The solid line represents the numbers of the experiments

的路径和强度预报总体有正的改进。对台风路径预报而言, 在超过 48 小时台风路径的预报, GWDO 的作用就愈加显著, GWDO_0.75 路径预报平均改进约 7 km, GWDO_0.25 时则路径变化差异较大, 在 54 小时改进超过 10 km, 在 72 小时预报作用路径预报略有降低, 这可能与模式对个别台风预报产生的系统偏差有关。对台风强度预报而言, GWDO 对不同时长预报均有正的改进。总的来说, GWDO_0.75 试验对台风路径和强度预报改进更为显著。

4 结论和讨论

本文在区域 GRAPES_TMM 模式中发展和引进了 KA95 地形重力波拖曳参数化方案, 并应用到南海台风模式中, 对 2012 年主要的 9 个登陆台风进行了试验对比研究, 考察了不同 Ri_c 的 GWDO 试验对台风路径和强度预报的影响, 取得的主要结论有:

(1) 在引入地形重力波拖曳参数化过程后, 模式对台风登陆时路径和强度的预报能力均要有提高, 对台风预报时长越长, GWDO 的影响也更为显著, 说明 GWDO 使得模式在对台风登陆长时间预报上更为准确, 减小了模式的系统偏差。

(2) GWDO 对双台风“SAOLA”和“DAMREY”路径预报均有不同程度改进。GWDO 对台风外围距台风中心 150 km 的对流层中下层风速减弱较为明显, 减弱了 GRAPES 区域模式对台风强度预报偏强的现象, 对长时间的台风登陆强度预报改善更为明显。

(3) 重力波拖曳的计算对 Ri_c 的标准较为敏感, 当 Ri_c 取 1.0 时, 动能迅速的在低层被频散, 能量无法有效地上传; Ri_c 取 0.25, 大部分的能量在中高层被频散。总的来说, Ri_c 取 0.75 对台风路径和强度预报改进更为显著, 其结果可为业务预报提供指导意义。

总之, 重力波拖曳的参数化对完善模式物理过程和减小模式系统偏差都有不可忽视的作用。除地形引起的重力波拖曳外, 还包括由对流强迫引起的重力波拖曳等 (Chun et al., 1996, 2000; Jeon et al., 2010), 后者对改善季节温度和风场的预报以及减小模式系统偏差均有积极的效果, 我们将进一步研究和完善。

致谢 感谢韩国延世大学 Hong Song-You 教授在程序调试方面给予的指导, 感谢两位审稿人对本文提出的宝贵修改意见。

参考文献 (References)

- Abarbanel H D I, Holm D D, Marsden J E, et al. 1986. Nonlinear stability analysis of stratified fluid equilibria [J]. *Phil. Trans. Roy. Soc., London*, 318: 349–409.
- Alpert J C, Kanamitsu M, Caplan P M, et al. 1988. Mountain induced gravity wave drag parameterization in the NMC medium-range forecast model [C]. Preprint, Eighth Conf. on Numerical Weather Prediction, Baltimore, MD, Amer. Meteor. Soc., 726–733.
- Boer G J, McFarlane N A, Laprise R, et al. 1984. The Canadian climate centre spectral atmospheric general circulation model [J]. *Atmos. -Ocean*, 22 (4): 397–429.
- Broccoli A J, Manabe S. 1992. The effects of orography on midlatitude Northern Hemisphere dry climates [J]. *J. Climate*, 5 (11): 1181–1201.
- 巢纪平, 章光锐, 袁孝明. 1964. 二层模式中地形对于气压跳跃形成的初步研究 [J]. *气象学报*, 34 (2): 233–241. Chao Jihping, Chang Kungkuan, Yan Shiaoming. 1964. A preliminary investigation for the formation of pressure jump produced by the mountain in a two-layer model [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 34 (2): 233–241.
- Chun H Y, Song I S, Bark J J, et al. 1996. Impact of a convectively forced gravity wave drag parameterization in NCAR CCM3 [J]. *J. Climate*, 17 (18): 3530–3547.
- Chun H Y, Song M D, Kim J W, et al. 2000. Effects of gravity wave drag induced by cumulus convection on the atmospheric general circulation [J]. *J. Atmos. Sci.*, 58 (3): 302–319.
- 高守亭, 冉令坤. 2003. 重力波上传破碎对中层纬向平均流拖曳的参数化方案 [J]. *科学通报*, 48 (7): 726–729. Gao Shouting, Ran Lingkun. 2003. The parameterization scheme of gravity wave breaking upwelling to middle level mean flow drag [J]. *Chinese Science Bulletin (in Chinese)*, 48 (7): 726–729.
- Helfand H M, Jusem J C, Pfaendner J, et al. 1987. The effect of a gravitywave drag parameterization scheme on GLA fourth order GCM forecast [J]. *J. Meteor. Soc. Jpn, Special volume for the WMO/IUGG Numerical Weather Prediction Symposium, Tokyo, Japan*, pp. 729–742.
- Hong S Y, Jung C, Chang E C, et al. 2008. Lower-tropospheric enhancement of gravity wave drag in a global spectral atmospheric forecast model [J]. *Wea. Forecasting*, 23: 523–531.
- Howard L N. 1961. Note on a paper of John W. Miles [J]. *J. Fluid Mech.*, 10 (4): 509–512.
- Iwasaki T, Yamada S, Tada K. 1989. A parameterization scheme of orographic gravitywave drag with the different vertical partitionings. Part I: Impacts on medium-range forecasts [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67: 11–27.
- Jeon J H, Hong S Y, Chun H Y, et al. 2010. Test of a convectively forced gravity wave drag parameterization in a general circulation model [J]. *Asia-Pacific J. Atmos. Sci.*, 46 (1): 1–10.
- Kanada S, Wada A, Nakano M, et al. 2012. Effect of planetary boundary layer schemes on the development of intense tropical cyclones using a cloud-resolving model [J]. *J. Geophys. Res.*, 117 (D3): D03107.
- Kim Y J. 1996. Representation of subgrid-scale orographic effects in a general circulation model. Part I: Impact on the dynamics of simulated January climate [J]. *J. Climate*, 9: 2698–2717.

- Kim Y J, Arakawa A. 1995. Improvement of orographic gravity wave parameterization using a mesoscale gravity wave model [J]. *J. Atmos. Sci.*, 52 (11): 1875–1902.
- Kim Y J, Doyle J D. 2005. Extension of an orographic-drag parametrization scheme to incorporate orographic anisotropy and flow blocking [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131 (609): 1893–1921.
- 李响. 2012. WRF 模式中积云对流参数化方案对西北太平洋台风路径与强度模拟的影响 [J]. *中国科学: 地球科学*, 42 (12): 1966–1978. Li X. 2012. Sensitivity of WRF simulated typhoon track and intensity over the Northwest Pacific Ocean to cumulus schemes [J]. *Science China: Earth Sciences (in Chinese)*, 42 (12): 1966–1978.
- Lilly D K. 1972. Wave momentum flux-A GARP problem [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 53: 17–23.
- Lindzen R S. 1981. Turbulence and stress owing to gravity wave and tidal breakdown [J]. *J. Geophys. Res.*, 1981, 86 (C10): 9707–9714.
- 刘华强, 钱永甫. 2001. 包络地形和重力波拖曳对区域气候模拟效果的影响 [J]. *大气科学*, 25 (2): 209–220. Liu Huaqiang, Qian Yongfu. 2001. Effects of envelope orography and gravity wave drag parameterization on regional climate simulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 25 (2): 209–220.
- Lott F, Miller M J. 1997. A new subgrid-scale orographic drag parametrization: Its formulation and testing [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 123 (537): 101–127.
- McFarlane N A. 1987. The effect of orographically excited gravitywave drag on the general circulation of the lower stratosphere and troposphere [J]. *J. Atmos. Sci.*, 44 (14): 1775–1800.
- Miles J W. 1961. On the stability of heterogeneous shear flows [J]. *J. Fluid Mech.*, 10 (4): 496–508.
- Miller M J, Palmer T N, Swinbank R. 1989. Parametrization and influence of subgridscale orography in general circulation and numerical weather prediction models [J]. *Meteor. Atmos. Phys.*, 40 (1–3): 84–109.
- Palmer T N, Shutts G J, Swinbank R. 1986. Alleviation of a systematic westerly bias in general circulation and numerical weather prediction models through an orographic gravity wave drag parametrization [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 112 (474): 1001–1039.
- 钱永甫. 2000. 包络地形和重力波拖曳对气候模拟效果的影响 [J]. *应用气象学报*, 11 (1): 13–20. Qian Yongfu. 2000. Effects of envelope orography and gravity wave drag on performance of climate modeling [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 11 (1): 13–20.
- 谭锐志, 林元弼. 1994. 台风暴雨积云参数化试验 [J]. *大气科学*, 18 (3): 331–340. Tan Ruizhi, Lin Yuanbi. 1994. A test of cumulus parameterization schemes for the typhoon rainfall [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 18 (3): 331–340.
- 王晨稀. 2013. 边界层参数化影响“梅花”台风的敏感性试验 [J]. *地球科学进展*, 2013, 28 (2): 197–208. Wang Chenxi. 2013. Experiments of influence of planetary boundary layer parameterization on Muifa typhoon prediction [J]. *Advances in Earth Science (in Chinese)*, 28 (2): 197–208.
- 王元, 唐锦赞, 伍荣生. 2007. 一个双波地形重力波拖曳参数化方案 [J]. *气象学报*, 65 (5): 733–743. Wang Yuan, Tang Jinyun, Wu Rongsheng. 2007. A two-wave scheme for orographic gravity wave drag parameterization [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 48 (7): 726–729.
- Woods J D. 1969. On Richardson's number as a criterion for laminar-turbulent-laminar transition in the ocean and atmosphere [J]. *Radio Sci.*, 4 (12): 1289–1298.
- 徐国强, 杨学胜, 黄丽萍, 等. 2010. GRAPES 中地形重力波拖曳物理过程的引进和应用试验 [J]. *气象学报*, 68 (5): 631–639. Xu Guoqiang, Yang Xuesheng, Huang Liping, et al. 2010. Introducing and application testing of the orographic gravity wave drag parameterization physics in the GRAPES [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 68 (5): 631–639.
- 叶笃正. 1956. 小地形对于气流的影响 [J]. *气象学报*, 27 (3): 243–263. Yeh Tu-cheng. 1956. Topographical effect on the airflow [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 27 (3): 243–263.