

# 消去分析台风方法的对比研究\*

黄小刚 费建芳 陆汉城

(解放军理工大学气象学院,南京 211101)

## 摘 要

详细分析了 GFDL 飓风模式和 MM5 模式消去分析台风的原理,通过 10 个台风个例的对比分析指出,GFDL 方案从平均意义上求取分析台风中心位置和半径的方法,优于 MM5 方案采用涡度极值来确定分析台风中心以及将分析台风中心半径定为常数的方法。而 MM5 方案考虑要素场之间的协调,较 GFDL 方案更为合理。试验结果表明:通过将两者优点相结合对 MM5 方案进行修正,能够更加合理、彻底地消去分析台风。

关键词:分析台风;GFDL 方案;MM5 方案

## 引 言

近年来,热带气旋数值预报的研究得到了较大的发展,美国地球流体动力实验室 GFDL 自 20 世纪 90 年代初开发的多重嵌套移动网格飓风模式(the multiply nested movable mesh (MMM) hurricane model)经过多年的发展,预报精度得到了显著的提高<sup>[1-2]</sup>,PSU/NCAR 最新推出的 MM5 3.5 以上版本也引入了 Bogus 台风模块<sup>[3]</sup>,虽然模式各不相同,但是其构造台风初始场的基本思路是一致的,就是在原始分析场中消去分析台风,即加入一个人造台风涡旋:

$$\langle \text{初始场} \rangle = \langle \text{全球分析场} \rangle - \langle \text{分析台风} \rangle + \langle \text{人造台风} \rangle$$

人造台风的构造方法前人已经做了很多工作<sup>[4-7]</sup>,而分析台风的消除方法主要还是以 GFDL 和 MM5 提出的方法为主。本文着重介绍了两种不同的消去分析台风方法,通过深入分析其优缺点,以期在我们自己开发的台风模式过程中有所借鉴。

## 1 方案简介

### 1.1 GFDL 方案

该方案利用平滑与滤波技术相结合方法消去分析台风。将一个初始场  $h$  (例如地面气压、经向和纬向风分量、温度或相对湿度等),分解为基本场  $h_B$  和

扰动场  $h_D$ :

$$h = h_B + h_D \quad (1)$$

然后把扰动场分解为背景扰动场和台风扰动场,其中台风扰动场就是分析台风。把扰动场中的台风扰动场  $h_{av}$  剔除,即可得到剔除了分析台风的环境场  $h_E$ :

$$h_E = h_B + (h_D - h_{av}) = h - h_{av} \quad (2)$$

具体公式推导过程,可参见参考文献[1]和[2]。

对于分析台风位置的确定,改进的 GFDL 方案<sup>[2]</sup>考虑了距离的影响,加入了距离权重。以最接近观测台风位置的格点为中心,用式(3)计算扰动风速  $V_{Dij}$  在  $11^\circ \times 11^\circ$  范围内的质心。

$$\lambda_0^* = \frac{\sum w_{ij} V_{Dij} \lambda_j \Delta S_{ij}}{\sum w_{ij} V_{Dij} \Delta S_{ij}}, \quad \varphi_0^* = \frac{\sum w_{ij} V_{Dij} \varphi_j \Delta S_{ij}}{\sum w_{ij} V_{Dij} \Delta S_{ij}} \quad (3)$$

$$w_{ij} = \begin{cases} 1, & r \leq d \\ \exp\left[-\left|\frac{r-d}{D}\right|^2\right], & r > d \end{cases}$$

式(3)中, $d = 200 \text{ km}$ ,  $D = 400 \text{ km}$ ,  $\lambda_0^*$ ,  $\varphi_0^*$  为分析台风中心经纬度,  $\Delta S_{ij}$  是网格对应的面积,  $V_{Dij} = (u_{Dij}^2 + v_{Dij}^2)^{1/2}$  为边界层顶的扰动风速,  $r$  为分析点距台风中心的位置。

GFDL 方案中,分析台风滤波半径由边界层顶的扰动风速角向平均值  $\bar{V}_D(r)$  决定,从分析台风中心向外,  $\bar{V}_D(r)$  增大到极大值后将缓慢下降并稳定在一个

\* 2005-03-23 收到,2005-08-19 收到再改稿。

小值附近,方案设定了两个条件,其一是取  $\bar{V}_D(r) < 6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  和  $-\partial \bar{V}_D(r)/\partial r < 4 \times 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,其二为  $\bar{V}_D(r)$  随半径减小至  $3 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,按顺序取满足条件的距离为滤波半径,若两条件均无法满足,则将滤波半径设为  $1200 \text{ km}$ 。

## 1.2 PSU/NCAR MM5 方案

PSU/NCAR MM5 方案(以下简称 MM5 方案)首先以台风真实位置为中心,将  $400 \text{ km}$  范围内正涡

度最大的点(南半球为负涡度最小)看作是分析台风的中心位置,这样保证了每层都分别对应有相应的台风中心位置。以分析台风中心为原点,半径  $300 \text{ km}$  的圆覆盖的面积定为分析台风影响范围(图 1)。

由台风水平风分量  $u, v$  组成的流场,可以看作是不可压缩流体的平面无旋运动,既存在速度势,也存在流函数<sup>[8]</sup>。MM5 方案将分析台风水平风场看作是 无散运动和无旋运动的叠加,由背景风场计算

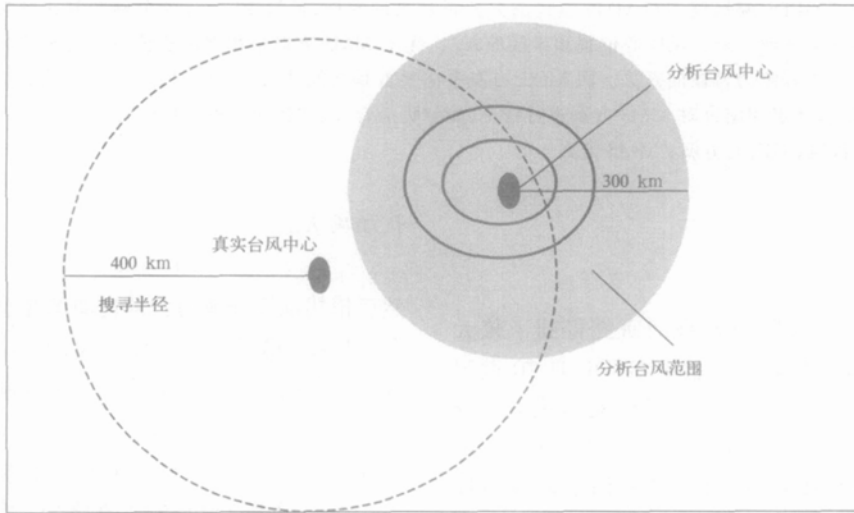


图 1 MM5 方案寻找分析台风方法示意图<sup>[3]</sup>

流函数和速度势,得到了分析台风的无散运动和无旋运动速度场,背景场减去这两项的值,就得到消去了分析台风的风场。计算公式如下:

$$\nabla^2 \psi = \zeta \quad (4)$$

$$v_\psi = k \times \nabla \psi \quad (5)$$

$$\nabla^2 \chi = \delta \quad (6)$$

$$v_\chi = \nabla \chi \quad (7)$$

其中,  $\zeta$  为相对涡度,  $\psi$  为流函数,  $v_\psi$  为平移运动速度场,  $\delta$  为散度,  $\chi$  为速度势,  $v_\chi$  为旋转运动速度场。

对于位势高度而言,通过计算地转风  $v_g$ ,将分析台风外围的位势高度设为零,解泊松方程(8),就得到了分析台风的位势高度场  $\phi'$ ,将初猜场中的位势高度场减去该项,就得到消去了分析台风的位势高度场。计算公式如下:

$$v_g = k \times \nabla \phi \quad (8)$$

$$\nabla^2 \phi' = \zeta_g f_0 \quad (9)$$

式(9)中  $\zeta_g$  为地转涡度。

对于温度场扰动  $T'$ ,可利用流体静力学关系得

到。

$$\frac{\partial \phi'}{\partial \ln P} = -RT' \quad (10)$$

对于湿度扰动,该方案首先利用经验公式计算出饱和水汽压  $e_s$  和混合比  $q_s$ :

$$e_s = 0.6112 \times 10 \times \exp[17.07 \times (t - 273.13) / (t - 29.65)] \quad (11)$$

$$q_s = 0.622 \times \frac{e_s}{p - e_s} \quad (12)$$

式(12)中,  $t$  为初猜场中的温度。由混合比可得到通过初猜场计算的比湿  $q$ 。

$$q = r_h \times q_s \quad (13)$$

式中,  $r_h$  为初始场的相对湿度。重复计算式(10)和(11),其中  $t$  由消去分析台风后的温度场  $t_0$  代替,得到  $e'_s$  和  $q'_s$ ,消去分析台风扰动场后的湿度场  $r_{h0}$  就由下式直接构造,

$$r_{h0} = 100\% \times q/q'_s \quad (14)$$

这样,初猜场中的分析台风就完全消去了,具体流程见图 2。

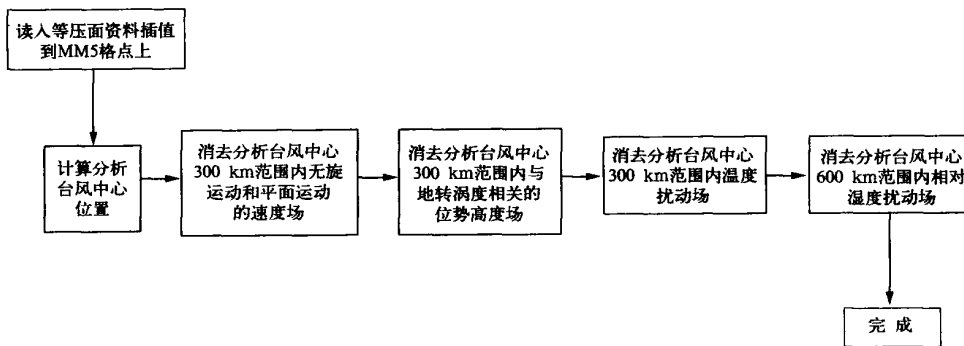


图2 消去分析台风方案流程图

## 2 个例比较分析

随机选取 10 个台风个例进行比较分析(表 1),背景资料为 NECP/NCAR  $1^{\circ} \times 1^{\circ}$  格点再分析资料,地面至 100 hPa 高度内分为 22 层。GFDL 方案的计算网格为等压面上的经纬网格,MM5 方案为经 Regrid 模块客观分析后的等压面上的 Lambert 投影矩形网格。表 1 列出了由 GFDL 方案求得的分析台风中心位置和半径(括号内数值),在本文个例中,MM5 方案求得的 700 hPa 以下分析台风中心位置基本一致,台风中心轴线的断裂主要发生在中上层,因此只列出台风中心轴线存在突然断裂的层次,以

及相邻两层的分析台风中心位置,实际个例中可能不止一处发生断裂,本文只列出其中之一。可见由 GFDL 方案求得的分析台风中心位置与观测之间差距不大,说明再分析资料由于同化了卫星、雷达等非正规观测,在表现台风中心位置方面具有较强的能力。同时各分析台风之间的半径各不相同,这充分考虑了实际台风的信息,有利于完整消除分析台风。而 MM5 方案除 0302 和 0317 号台风外,台风中心轴线都存在明显的突然断裂现象,这与观测是不符的,而分析式(10)可以看出,这种突然断裂最明显的后果就是通过垂直差分不能求得合理的台风温度扰动场,这将在下文中进行详细讨论。

表 1 台风基本信息与不同方案求取结果

台风编号	时间(世界时)	台风中心位置	GFDL 方案中心位置及半径	MM5 方案	
				高度/hPa	中心位置
0104	2001-07-04 T12:00	19.2° N, 120.4° E	19.7° N, 120.0° E 1100 km	650	21.2° N, 122.4° E
				600	19.7° N, 122.5° E
0302	2003-04-14 T06:00	10.6° N, 146.3° E	10.6° N, 146.2° E 790 km		
0306	2003-06-16 T12:00	18.1° N, 123.4° E	18.3° N, 123.2° E 750 km	500	17.6° N, 122.6° E
				450	17.4° N, 123.7° E
0310	2003-08-05 T12:00	19.5° N, 130.8° E	19.5° N, 130.5° E 880 km	400	21.4° N, 131.4° E
				350	17.6° N, 131.4° E
0313	2003-08-30 T18:00	18.4° N, 132.2° E	18.8° N, 132.2° E 1010 km	150	15.9° N, 130.1° E
				100	20.9° N, 130.4° E
0314	2003-09-09 T00:00	21.8° N, 130.3° E	22.0° N, 130.1° E 540 km	500	22.4° O, 131.2° E
				450	21.4° N, 130.6° E
0317	2003-10-23 T06:00	19.0° N, 132.4° E	18.6° N, 132.3° E 980 km		
0320	2003-11-15 T00:00	12.9° N, 117.8° E	12.7° N, 117.3° E 510 km	500	12.6° N, 117.3° E
				450	12.7° N, 114.9° E
0402	2004-05-16 T00:00	11.1° N, 127.2° E	11.5° N, 127.1° E 910 km	200	9.4° N, 126.3° E
				150	11.5° N, 127.3° E
0404	2004-06-07 T18:00	17.9° N, 119.1° E	17.6° N, 119.6° E 680 km	250	17.7° N, 122.3° E
				200	15.5° N, 117.5° E

对 0104 号台风进行重点分析, GFDL 方案认为各层是一致的, 所求分析台风中心为 (19.7° N, 120.0° E), 而 MM5 方案确定的分析台风中心各层差别很大。其中 650 hPa 与 850 hPa 分析台风中心之间距离更是达到了 421 km, 这显然是不符合观测实际的。研究表明<sup>[9]</sup>: 在距台风中心半径 400 km 以内, 平均的垂直运动是上升的, 但这只是一个平均状态。在中层台风眼壁附近, 气流的上升运动非常强, 其中包含有很多的小尺度局地运动, 同时受资料和网格的限制, 背景场中的台风流场和理论有一定的差距。因此单纯从涡度极值的角度来考虑台风中心的位置在实践中发现并非整层适用的。而 GFDL 方案从平均意义上求分析台风中心, 就避免了一些小尺度现象的干扰, 同时能够减少由经纬网格到矩形网格插值过程中引起的误差。

图 3 为 0104 号台风个例由 GFDL 方案求得角向平均扰动风速径向变化示意图, 通过该方案求得分析台风半径为 1 100 km。而 MM5 方案将分析台风半径设为常数 300 km。由于台风范围受台风结构、强度、移动等的影响, 不同的台风在背景场中表现出来的分析台风半径是不一样的。因此 GFDL 方案从实际数据出发求得的分析台风半径比 MM5

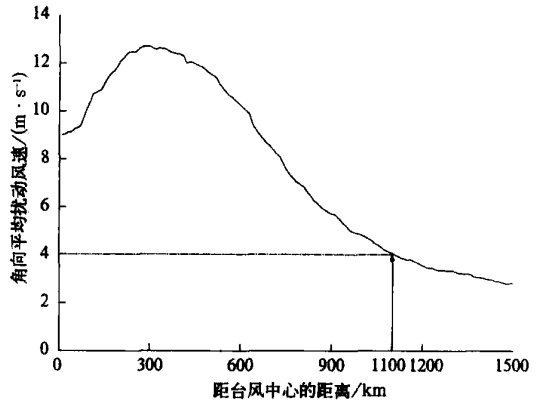


图 3 0104 号台风由 GFDL 方案得到角向平均扰动风速径向变化示意图 (箭头所指为满足条件的分析台风半径位置)

方案更加合理。

图 4 给出了 850 hPa 风场经过 MM5 方案处理的结果, 该方案巧妙地将分析台风风场分解为无散运动和无旋运动的叠加, 物理意义非常清晰。然而由图 4d 可见, 由于分析台风位置不准, 且半径取得过小, 分析台风未能完全消除。

由式(10)可见, 温度扰动场由相邻两层的位势高度扰动场诊断求得, 由于 MM5 方案中, 相邻两层

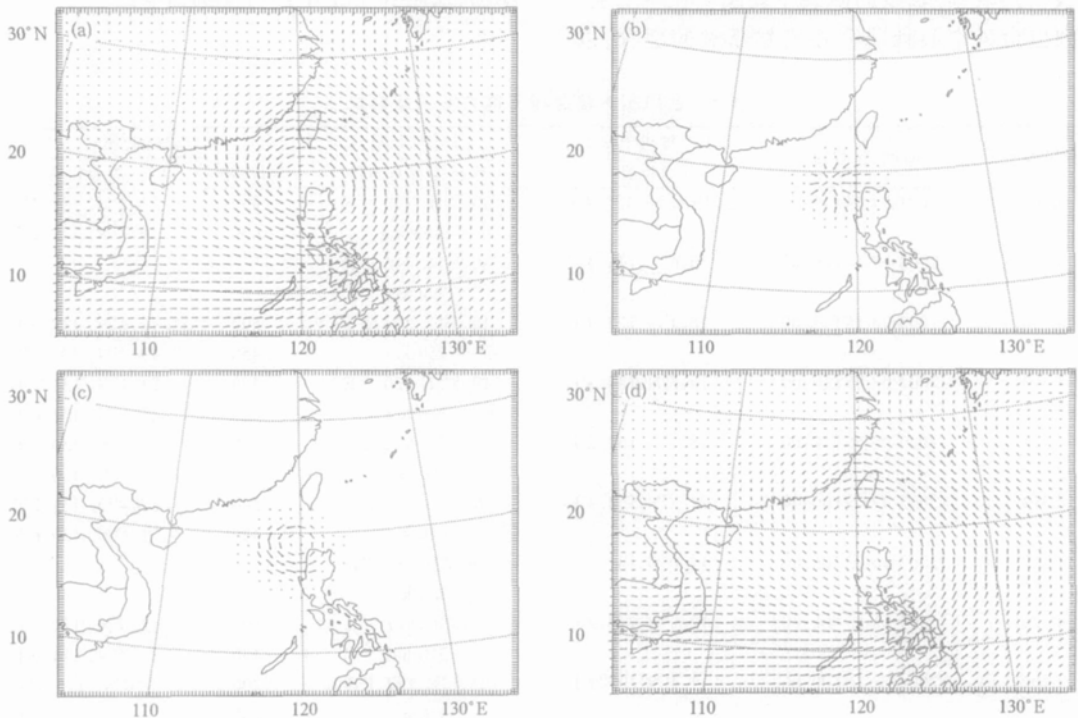
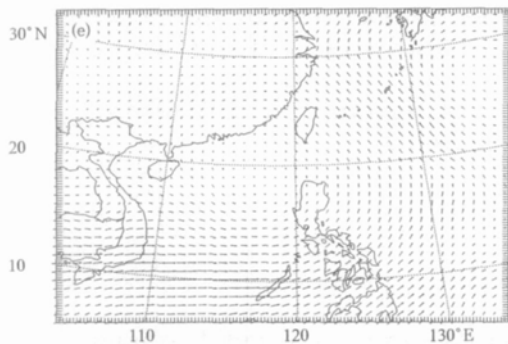


图 4 0104 号台风 850 hPa 分析台风风场分析结果(单位: m/s)  
(a) 背景场, (b) 无散运动速度场, (c) 无旋运动速度场, (d) 由原 MM5 方案得到的消去分析台风后的风场, (e) 由改进 MM5 方案得到的消去分析台风后的风场



续图 4

分析台风中心位置可能距离很远,且位势高度扰动场的分布一般为随台风中心附近向外由负变正。因此得到的分析台风温度扰动场就会有两个中心,且一边为正,一边为负。只要上下两层中心位置之间

差异较大,诊断的分析台风温度场就会出现这种情况,与个例无关。如图 5a 所示,400 hPa 温度扰动场出现了非正常的偶极子现象。

通过以上的分析可见,GFDL 方案在求取分析台风中心位置和台风半径方面考虑了不同台风自身的特点,但在消去分析台风过程中没有考虑变量间的联系,而 MM5 方案从分析风场出发,通过诊断方程使变量间保持了平衡。但在求分析台风中心位置和台风半径时存在不足。因此本文将两者的优点结合起来,通过采用 GFDL 方案确定台风中心位置和半径,对 MM5 方案进行修正。图 4e 中,由于中心位置得到修正,同时台风半径扩大到 1100 km,使得分析台风得到更加彻底的消去。图 5b 中,由于分析台风各层的中心位置保持一致,诊断得到台风的暖中心非常明显,这符合观测实际。

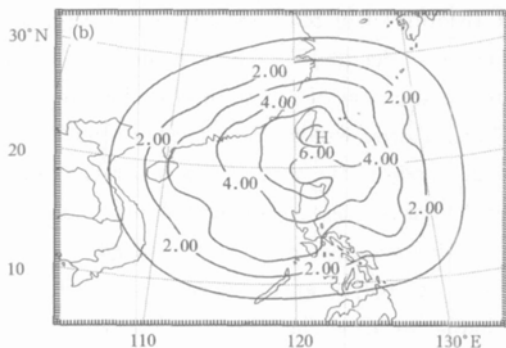
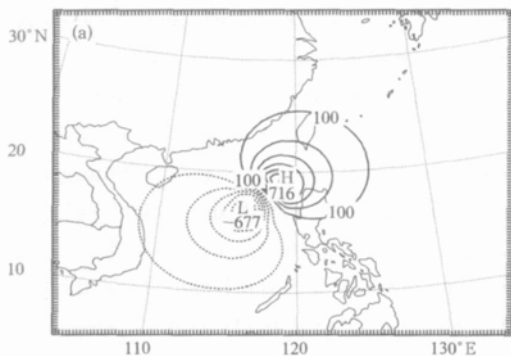


图 5 0104 号台风 400 hPa 分析台风温度扰动场(单位:K)  
(a)由原 MM5 方案求取,(b)由改进的 MM5 方案求取

### 4 小 结

通过对两种常见的消去分析台风方法的对比分析可见,GFDL 方案在确定分析台风位置和半径时,充分考虑了要素场本身的特性,能较好消去分析台风的各个要素场,但没有考虑要素之间的相关。MM5 方案的不足在于用各层涡度极值来确定分析台风中心以及将分析台风半径常数化,这对不同的台风是不合适的,但其为每层确定分析台风中心,以及要素之间通过公式诊断使要素场保持平衡的思想,却是值得借鉴的。改进 MM5 方案的试验表明:通过将两者优点相结合,能够扬长避短,更好地消去分析台风。

### 参 考 文 献

- [1] Kuyhara Y, Bender M A, Ross R J. An initialization scheme of hurricane models by vortex specification. *Mon Wea Rev*,1993, 121(7):2030-2045.
- [2] Kuyhara Y, Bender M A, Tuleya R E, et al. Improvements in the GFDL hurricane prediction system. *Mon Wea Rev*, 1995, 123(9):2791-2801.
- [3] Low-Nam S, Davis C. Development of a Tropical Cyclone Bogussing Scheme for the MM5 System. Preprints of the Eleventh PSU/NCAR Mesoscale Model Users Workshop. June 25-27, 2001, Boulder, Colorado. 130-134.
- [4] Leslie L M, Holland G J. On the bogussing tropical cyclones in numerical models: a comparison of vortex profiles. *Meteor Atmos Phys*,1995, 56(1):101-110.
- [5] Wang Yuqing. On the bogussing tropical cyclones in numerical m

- odels: the influence of vertical structure. *Meteor Atmos Phys*, 1998, 65(1): 153-170.
- [6] 王国民,王诗文,李建军. 一个人造台风方案及其在移动套网格模式中的应用. *热带气象学报*, 1996, 12(1): 9-17.
- [7] 黄小刚,费建芳,张根生,等. 一种台风海面非对称风场的构造方法. *热带气象学报*, 2004, 20(2): 129-136.
- [8] 杨增普,魏岗,仲孝恭,等. *流体力学*. 南京:东南大学出版社, 1994:45.
- [9] 杨信杰,钱家声,陆胜元,等. *天气学原理*. 南京:空军气象学院, 1987:282.

## A Contrast Test of the Methods to Remove the Analyzed Typhoon

Huang Xiaogang Fei Jianfang Lu Hancheng

(*Institute of Meteorology, PLA Univ of Sci & Tech, Nanjing 211101*)

### Abstract

The theories about removing the analyzed typhoon which used in GFDL hurricane model and MM5 model are introduced in detail. The GFDL model uses a sophisticated filtering scheme, and the filter domain defining the location and extent of the tropical cyclone in the global analysis is determined from the distribution of the low-level disturbance winds. Each level's filter domain is same and there is no correlativity in the fields. The MM5 model modifies the vorticity, geostrophic vorticity, and divergence, then solve for the change in the non-divergent stream function, geopotential and velocity potential and compute a modified velocity field. The MM5 scheme sets the radius same so that the analyzed typhoon features may be removed more or less for various cases. The comparison analysis about ten cases shows that, owing to the error in data and brought from the projection, the location between two levels has big departure for some cases, and make the fields cannot be removed reasonably, such as temperature. So the method seeking the analyzed typhoon center and radius in the average meaning used by GFDL is more advantageous, on the other hand, the harmony of fields is considered in MM5 scheme, and it is more reasonable than GFDL in this facet. The modified method which correcting MM5 scheme through combining these two schemes' advantages is also tested for these cases and the results showed the analyzed typhoon may be removed more reasonably and thoroughly.

**Key words:** analyzed vortex; GFDL scheme; MM5 scheme