

不同物理过程参数化对模式台风的影响及其动力结构的研究*

刘还珠 陈德辉 滕俏彬

(国家气象中心, 北京 100081)

提 要

文章介绍了国家气象中心的台风路径数值预报模式(以下简称台风模式), 在不同物理过程参数化下的数值试验及其结果的诊断分析. 对1992年第10号热带气旋和1996年第8号热带气旋个例的数值试验结果表明, 该模式能较好地预报热带气旋移动路径和登陆地点, 且考虑复杂物理过程的台风模式较简单过程的模式能更好地描述热带气旋中心附近高低层的热力状况. 研究还发现, 500或700 hPa湿位涡第一项 $MPV1$ 负值中心的绝对值大小的变化可反映热带气旋的强弱; 且850 hPa上升运动最大中心的位置对未来6~12 h热带气旋的移向有较好的指示作用. 通过对热带气旋中心附近三维热力结构及流场配置分析发现, 强上升运动→暖湿空气凝结→潜热释放→气温上升→高层辐散流出→地面气压下降→低层辐合→上升运动加剧的正反馈机制可能是促使热带气旋向辐合上升区移动的动力原因.

关键词: 台风数值预报模式 物理过程参数化 热带气旋结构

引 言

自1992年以来, 国家气象中心以LAFS有限区业务模式为基本框架, 对较简单物理过程参数化方案进行了改进, 开发了一个双重嵌套台风数值预报模式^[1]. 数值预报的试验结果表明, 新的物理过程参数化方案对台风路径的预报能力有明显的提高^[2]. 对5个热带气旋个例的试验比较, 24和48 h中心位置预报误差分别为188 km和337 km, 比原方案分别减少了38 km和109 km. 由此可见, 物理过程参数化方案对热带气旋预报起了重要的作用. 本文旨在进一步分析比较不同物理过程参数化条件下, 所模拟的热带气旋结构特征的差异, 寻求影响热带气旋路径预报的动力原因. 同时, 通过与实况的分析比较, 发现一些对热带气旋路径预报有指示意义的物理因子, 以进一步完善和改进台风模式及其物理过程参数化方案, 从而提高模式对热带气旋路径的预报能力.

* 本文由中国气象局“九五”项目“预报逐级指导技术研究”课题资助.
1996-11-18收到, 1997-07-14收到修改稿.

1 台风路径预报模式及数值试验方案

国家气象中心的台风模式是一个单向、同步、双重嵌套有限区域模式^[3]。同时,台风模式系统中采用了目前国际上较先进的人造台风模型构造技术,即用经过修改部分参数后的 Iwasaki(1987)^[4]初值化方案,根据台风警报(如台风中心气压、位置、最大风速、前6 h 台风中心移动速度等),构造出一轴对称结构的台风环流模型,以取代分析场中的

表 1 二组数值试验所选用的物理过程参数化方案

	复杂方案	简单方案
大尺度凝结	饱和溢出法	同复杂方案
深对流	Kuo-74 方案	Kuo-74 方案
垂直湍流扩散	Louis(1979)	摩擦耗散
浅对流	Tiedte(1987)	无
辐射过程	Lacis(1974), Fels(1975)	无
地表过程	地表热量平衡	无
土壤热传导	3层模式	无

弱台风涡旋。此外,台风模式系统中采用粗网格模式区域内嵌套一细网格模式,并均采用一致的动力框架和物理过程参数化方案^[1, 5]。

为了研究不同物理过程参数化方案所模拟的热带气旋结构间的差异,我们使用这一台风模式分别进行了二组试验(表 1)。第一组试验采用原简单物理过程参数化方案(以下简称

简单方案);第二组试验采用较完善的新物理过程参数化方案^[2](以下简称复杂方案),其中,辐射过程参数化每隔 2 h 计算一次。所选择试验的热带气旋是一个转向、且突然加速的台风(9210 号, JANIS)。

图 1 给出了 9210 号热带气旋的移动路径,该热带气旋于 1992 年 8 月 5 日 00:00(世界时,下同)之前生成于关岛以西的西太平洋洋面上,然后沿西北偏北方向北上,强度也迅速加强,并于 8 月 6 日后,热带气旋移动方向逐渐向东偏转。8 月 8 日登陆日本列岛后,热带气旋移向转为东北偏东方向,移速加快,最后于 8 月 9 日后移出模式预报区域,减弱为中纬度气旋。8 月 6 日是该热带气旋转向前后的关键一天,因此,本文选择以 8 月 6 日 00:00 起步的 24 h 和 48 h 的模拟结果进行个例诊断分析。尽管复杂方案 48 h 预报的热带气旋中心与实况也有较大的差异,但毕竟比简单方案的结果有很大的改进。此外,为了进一步了解复杂方案预报台风

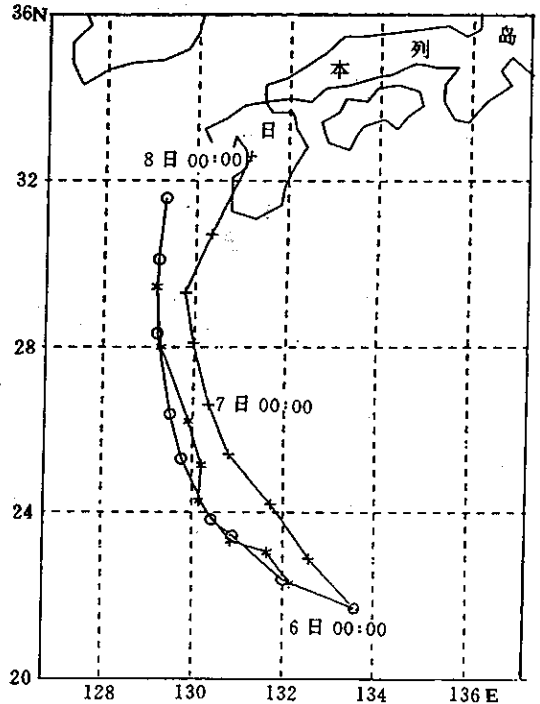


图 1 9210 号热带气旋移动路径图(时间间隔 6 h)
 ('+'为实况、'*'为简单方案、
 'o'为复杂方案模式热带气旋移动路径)

的实际效果, 还针对 1996 年强度最强, 且于 8 月 1 日 10:00 在我国福建省福清市登陆的 9608 号台风(HERB), 用其登陆前 7 月 30 日 00:00 和 31 日 00:00 作为初始场分别作 24、48 h 预报. 在此基础上, 进行物理量诊断分析, 并与表示实况的客观分析场相比较, 以探求新方案下模式台风与实况热带气旋结构间的差异, 从而得到一些有意义的结果.

2 不同物理过程参数化对模式热带气旋的影响

利用两种试验方案所获得的模式输出结果, 经后处理得到标准等压面上的基本要素场, 进而对上述 9210 号热带气旋进行了假相当位温、湿位涡、垂直速度等物理量的分析, 以探讨不同物理过程参数化方案所模拟的热带气旋结构特点及不同方案结果间的差异.

由简单方案和复杂方案的输出结果求得的 500 hPa 湿位涡第一项($MPV1$), 即 $MPV1 = -g(\zeta + f)\partial\theta_w/\partial p$. 在热带气旋附近, 由两种方案求得的 $MPV1$ 中心均为负值(图略), 且随热带气旋的发展, $MPV1$ 中心的绝对值增大, 在热带气旋发展达最强盛的 12~18 h, 其中心数值的绝对值达最大. 这表明, 此时气旋性涡度及对流不稳定性都达最强. 两种试验方案 $MPV1$ 结果间的主要差异是, 复杂方案中 $MPV1$ 中心向西北方向移动的速度较简单方案快, 且它的移向与热带气旋的移向也更为接近. 同时复杂方案中热带气旋附近的 $MPV1$ 负值区的范围比简单方案的大, 在热带气旋发展最盛期, 这种差异更明显.

图 2 为每隔 6 h 沿热带气旋移动路径方向所作的垂直剖面图. 由图可见, 数值模式预报出的热带气旋与实际热带气旋的基本特征十分一致, 即该热带气旋是一个具有极强的反时针旋转的暖性气旋, 其中心附近温度较高, 湿度较大, 是 θ_w 高值区; 且热带气旋中心附近上升运动最强. 此外, 在近地层约 3 km 以下有较强的向中心辐合的气流, 到对流层上层有气流辐散, 最大流出层次约在 12~14 km; 且从 3~9 km 的中间层径向气流不明显, 主要为气旋性切向气流. 同时, 由于上升气流很强, 将低层辐合的暖湿气流由这条通道输向高层, 进而又由对流层上层(平流层下层)气流的辐散, 造成流出空气与周围空气混合后, 再下沉, 组成了热带气旋的径向垂直环流圈.

进一步比较这两组模拟结果还可以看到, 复杂方案中热带气旋中心低层的加热区比简单方案的宽阔, 这也与前面分析的 $MPV1$ 负值区的分布情形一致. 此外, 复杂方案中热带气旋中心附近在前进方向上垂直环流区也明显大于简单方案的结果, 特别是在热带气旋发展达强盛期(6 日 18:00). 此时, 中心附近强上升气流区宽度, 复杂方案达 600 km, 而简单方案仅 300 km 左右; 且上升运动区周围的下沉区的宽度也明显大于简单方案. 另外, 复杂方案的强上升运动区位于热带气旋中心移向的前方, 这里低层仍是较宽广的暖湿中心的一部分, 但在 7~9 km 处它的 θ_w 却明显高于热带气旋中心处, 这可能是暖湿气流上升凝结释放的潜热加热了那里的空气之缘故.

从上述的诊断分析可以看到, 尽管热带气旋的温度场从中心到其外围区有明显的对称性特点, 但由于其内部的对流运动和其它物理过程的作用使得它的风场呈现出明显的

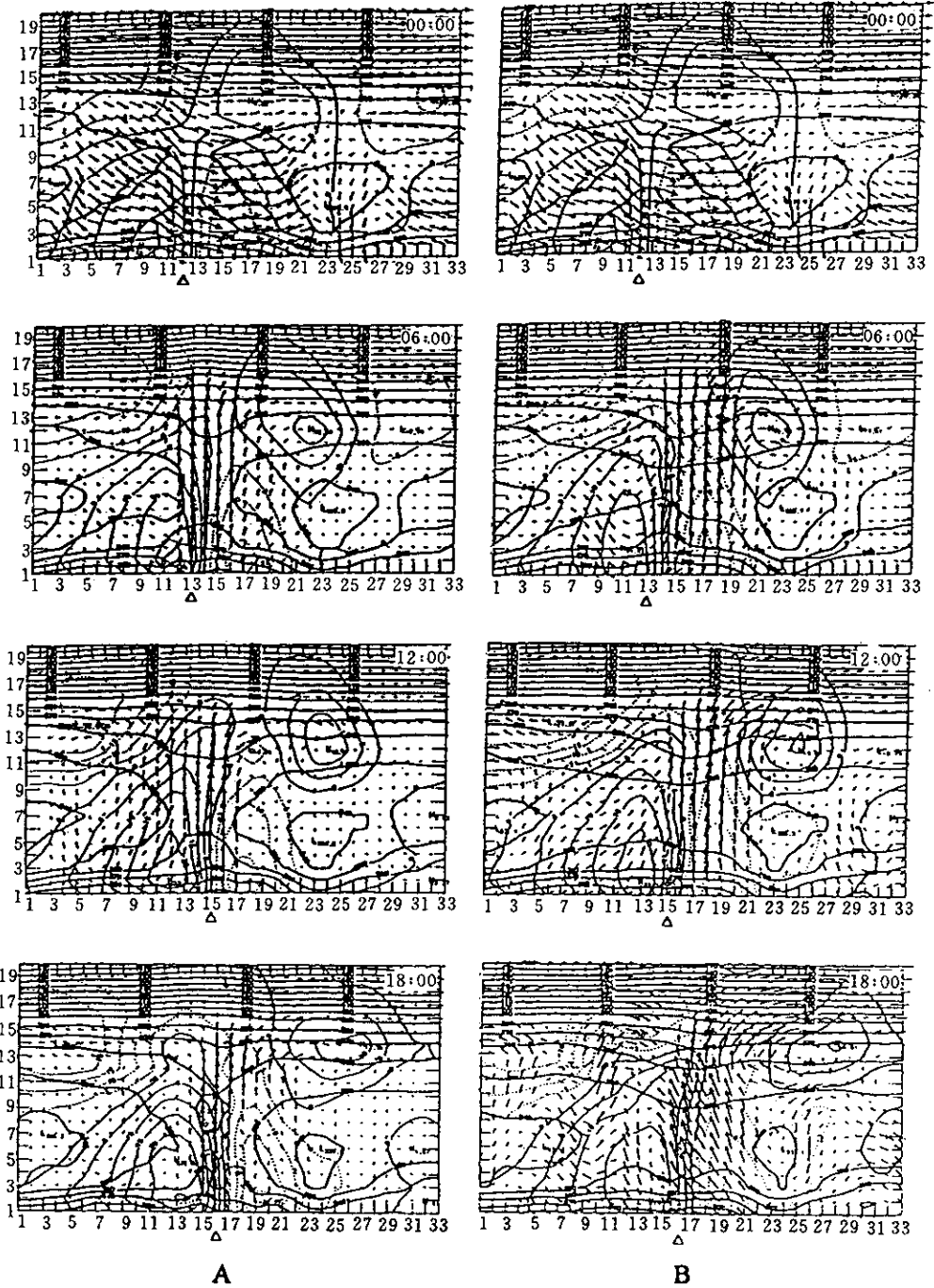


图2 1992年8月6日00:00模式热带气旋积分00:00~18:00(每隔6h)沿热带气旋移动路径的三维热力-流场结构剖面图(A)简单方案结果(B)复杂方案结果(图中矢量为平行于剖面方向的风与 ω 的合成,粗实线为等 θ_e 线,细实线为流出剖面方向风速等值线,细虚线为流入剖面方向的风速等值线,纵坐标为高度(km),横坐标为投影格点数,“ Δ ”为该时刻热带气旋所在位置)

非对称性,特别表现在热带气旋中心及其附近的垂直运动场上。

3 模式热带气旋动力、热力结构与实况的差异

由上分析知,复杂方案对热带气旋路径的预报比简单方案有明显的改进。基于复杂物理过程参数化方案,本文考察了该模式对热带气旋路径预报的实际效果,并分析它与实况间的差异,这对进一步改进热带气旋模式也将大有裨益。

9608号热带气旋是1996年强度最强且在福建省福清市登陆的一次热带气旋过程。本文以1996年7月30日00:00和31日00:00为初始场分别作48h预报,其结果与实况热带气旋路径作对比(图略)发现,该模式对此热带气旋的移向有很好的预报能力,特别是对其登陆位置的预报较准确。模式热带气旋与实况热带气旋间的主要差异是,以7月30日00:00为初始场的模式热带气旋移动比实况偏慢约1个纬距,以31日00:00为初始场的预报则比实况略快0.6个纬距;在经向方向模式与实况间的差别不大。

为了更好地了解模式对热带气旋发展演变过程的预报特征,选取7月30日00:00至8月2日00:00每隔12h的客观分析资料,由高度、风、相对湿度等基本量推算出假相当位温、压能等物理诊断量,同时计算对应预报时效的模式结果,并将前者作为实况,两者比较而得出模式热带气旋动力和热力结构与实况的差异。

850 hPa水平风场(u 、 v)与假相当位温(θ_{se})合成图可以较清晰地揭示热带气旋中心的位置及中心附近的温湿场和流场的分布特征。图3a为热带气旋发展较强盛期(31日00:00)的实况结果。由图可见, θ_{se} 高值中心与流场辐合中心相吻合。12h后 θ_{se} 高值由442 K猛增到521 K,为热带气旋登陆前发展达鼎盛时期(图略),可见 θ_{se} 强度与流场的演变可以较好地反映热带气旋强度的变化。此外,分析连续8个时次物理量场的演变(图略)可以得到,分析场气旋性环流中心基本上位于地面实际热带气旋中心的西北侧,且热带气旋中心移动方向与850 hPa上 θ_{se} 暖舌方向(NW向)十分一致。在相应的24h预报结果图上(图3b),尽管温湿场及流场分布基本上能表达热带气旋中心附近的高温高湿及气旋辐合等特点,但是此处 θ_{se} 中心的强度显然不如实况,且向NW方向伸展的暖舌也不够明显。这表明模式热带气旋表达中心附近高温高湿的能力不够。而模式热带气旋中心附近气旋性风场的风速偏强,位置偏于热带气旋中心的东南侧,且强风范围偏大。同时,热带气旋中心东侧的南风分量亦偏强,南风北界也偏北(可伸展到 $32^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$ 附近)。这又是30、31日的36、48h的模式预报热带气旋中心位置比实况偏北的原因。

本文第2节中通过分析9210号热带气旋已指出,500 hPa湿位涡第一项 $MPV1$ 能较好地表示热带气旋中心的位置和强度,此规则同样反映在9608号热带气旋的实况及模拟结果中。此外,在700 hPa上 $MPV1$ 变化特征也较好地表示了热带气旋在移动和发展过程中的演变特点(图略),特别是在热带气旋发展达最盛期(7月31日12:00) $MPV1$ 中心的绝对值达最大,它也表明了此刻台风的气旋性涡度和对流不稳定性都达到最强。模式热带气旋结果与实况比较主要差异是,其 $MPV1$ 中心强度及负值区范围不及实况,这可能是模式热带气旋近低层空气暖湿不足而使得对流不稳定性较弱所致。

综上分析比较可得,模式热带气旋在近低层温度和湿度比实况明显偏小,热带气旋

东侧的偏南风范围偏大,强度偏强,因而反映出对流层低层的 θ_{se} 及 $MPV1$ 等量都比实况弱,且中心位置也有所偏移.

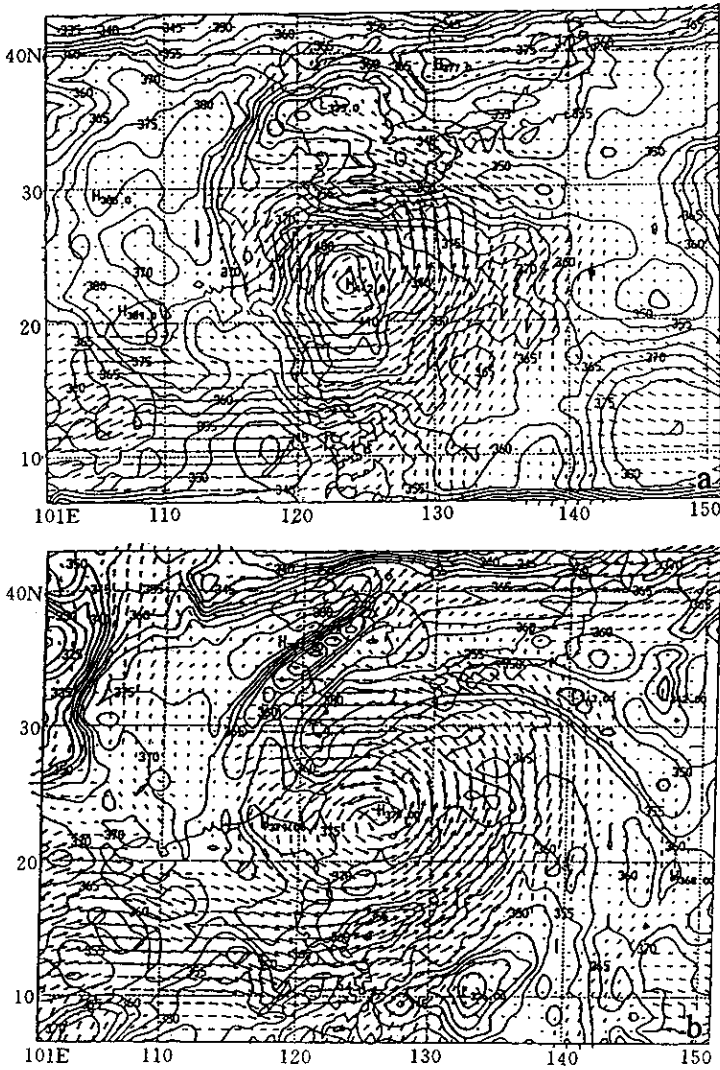


图3 9608号热带气旋850 hPa水平风场及假相当位温合成图
(a) 7月31日00:00实况 (b) 24h模式预报

4 模式热带气旋的三维结构分析

图4为9608号热带气旋沿实际路径方向所作的动力和热力结构垂直剖面图.由图可见,热带气旋中心附近的温度高、湿度大,是 θ_{se} 高值密集区,且对流层低层为强反时针旋转的气旋,在对流层上层有反气旋涡度存在,并有较强的辐散气流等.这与第2节所述的特点基本一致.差异是在1996年7月31日12:00的个例中,对流层下层 θ_{se} 值高

达 500 K 以上, 且台风中心附近的强上升运动可伸展到 15~18 km, 最强上升运动区位于中心移向前方, 呈现出明显的非对称性.

由图 4a 还可以看到在热带气旋中心前方 300 hPa 以上有一对垂直于图面风的流入和流出中心, 反映这里存在着较强的反气旋性涡度并对应有高层气流流出. 与之相对应, 200~850 hPa 散度差分布(图略)显示, 这里存在着较强的正值区, 这无疑是低层强辐合的反映, 也正是强上升运动得以维持的重要因素.

比较图 4a、b 可见, 模式热带气旋与实况间的差异主要表现在: ① 模式热带气旋中心附近的上升运动强度和范围不及实况, 且低层加热区的强度也远比实况弱, 在模式初始化后的流场中发现, 热带气旋中心附近的上升运动为弱下沉运动所取代. 由文献[2]可知, 该模式是用非线性正规初值化方案对加入人造热带气旋模型的初始场进行初值化处理, 在消除虚假高频振荡, 使模式计算更加稳定的同时, 也过份地抑制了上升运动, 使加入人造气旋模型中的上升运动变为弱的下沉运动, 也影响到后来的模式预报. ② 在模式热带气旋移向前方, 上升运动强度很弱, 特别是在模式热带气旋上方(7~9 km)的加热区附近出现了一个与实况热带气旋中高层的反气旋性涡度相反的气旋性涡度, 从而在中高层加热区处出现了下沉运动. 这既抑制了低层上升运动的向上发展, 又进一步使得模式热带气旋移动前方的上升运动区范围变窄, 故以 30 日 00:00 为初始场预报的热带气旋移速慢于实况热带气旋的移速. 而以 31 日 00:00 为初始场的预报结果中(图略), 虽然热带气旋中心附近低层的加热区远不及实况强, 但模式热带气旋上层 7~9 km 处气团增暖明显地比实况热带气旋强, 且它位于模式热带气旋前方的上升运动最强区, 这又加剧了下述的正反馈机制, 从而使得模式热带气旋的移速又快于实况.

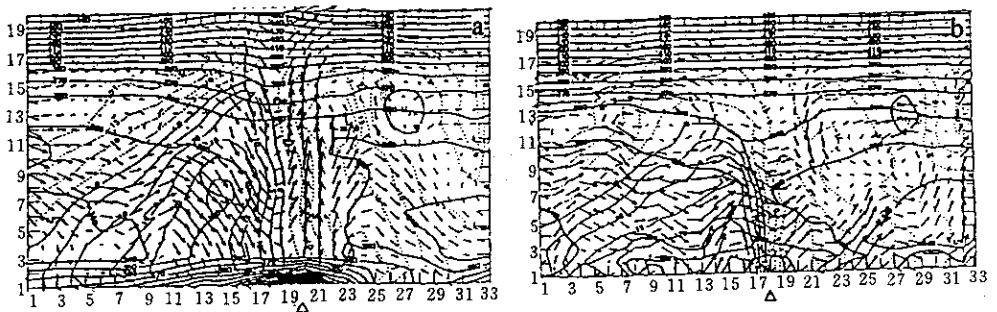


图 4 沿 9608 号实况热带气旋及模式热带气旋移动路径的三维热力流场结构剖面图
(a) 7 月 31 日 00:00 实况 (b) 24 h 模式预报(说明同图 2)

5 热带气旋移动的动力剖析

综上所述我们认为, 由于热带气旋的暖心结构, 在静力平衡的约束下, 地面气压下降, 下垫面的摩擦, 使得低层辐合加强. 前面提到的简单方案中热带气旋中心附近低层加热区较狭窄, 近低层的辐合上升运动区靠近热带气旋中心, 这种情况下使热带气旋移速缓慢. 而在考虑了地表物理过程影响及下垫面属性(如陆面、冰面、洋面等)影响的复

杂方案中,热带气旋中心附近的低层加热区较为宽阔,且热带气旋前进方向的径向垂直环流区也较大,强上升区偏离中心移向前方,且上层(7~9 km)暖区位于强上升区附近.由此可见除了热带气旋暖心作用使得低层辐合加强外,与热带气旋发生发展的 CISK 理论相类似^[6],还由于潜热的释放更增强了中心附近的暖性.并且对流层中高层暖心的位置偏离台风中心,该处也正是垂直上升运动最强区.因此,强上升运动→暖湿空气凝结→潜热释放→气温上升→高层辐散流出→地面气压下降→低层辐合→上升运动加剧,这样一个正反馈机制促使热带气旋在不断发展过程中朝着强辐合上升区前进,因而复杂方案中热带气旋中心移速较快,更接近实际情况.

为了更进一步了解热带气旋中心移动与强上升运动的关系,本文还分析了每隔 6 h 850 hPa 垂直速度演变(图略),发现在简单方案中,热带气旋发展最强盛的 12:00~24:00,上升运动达最强,但中心移动缓慢.24:00后,随着热带气旋的减弱,上升运动强度也很快衰减.而由复杂方案结果求得的上升运动区则呈带状分布,但其中心强度不及简单模式.表 2 是简单方案与复杂方案上升运动最大中心所在位置与热带气旋位置对照表.由表可见,复杂方案的最大上升运动区朝西北方向的移动速度快于实际热带气旋的移速,但其最大中心的移向与 6~12 h 后热带气旋的走向颇为一致,这对预报热带气旋未来的移动趋势有较好的指示作用.在简单方案中,上升运动的最大中心所在位置与 6 h 后的热带气旋位置虽较接近,但其中心向西北方向的移动速度却比实际热带气旋移速慢.从对热带气旋移动路径预报的方面考虑,它不及复杂方案的结果好.此时,由于上升运动最强中心也是辐合最强区,上述结果表明,热带气旋是朝着辐合最强的方向移动,换言之,最大上升运动区的移向对未来台风的移向有很好的指示意义.

此外,9608号热带气旋由7月30、31日00:00分析场初始化后,由于抑制了短波发展,使得上升运动强度明显弱于实况.即便如此,它增强减弱的趋势仍能很好地反映热带气旋的强弱,即对流层低层上升运动的增强和减弱与热带气旋强弱的变化是一致的.

表 2 9210 号热带气旋上升运动最大中心所在位置与热带气旋位置对照表

时间(世界时)	复杂方案	实况位置	简单方案
8月6日00:00	(25.0°N, 132.5°E)	(21.7°N, 133.2°E)	(25.0°N, 132.5°E)
8月6日06:00	(26.0°N, 130.0°E)	(22.8°N, 132.2°E)	(24.5°N, 132.5°E)
8月6日12:00	(26.0°N, 130.0°E)	(24.2°N, 131.2°E)	(25.0°N, 130.0°E)
8月6日18:00	(26.0°N, 127.5°E)	(25.4°N, 130.2°E)	(25.5°N, 130.0°E)
8月7日00:00	(27.0°N, 127.0°E)	(26.5°N, 129.6°E)	(26.0°N, 128.5°E)
8月7日06:00	(30.0°N, 130.0°E)	(28.1°N, 129.3°E)	(28.0°N, 128.0°E)
8月7日12:00	(32.0°N, 128.0°E)	(29.3°N, 129.1°E)	(28.5°N, 129.5°E)
8月7日18:00	(35.0°N, 129.5°E)	(30.8°N, 129.7°E)	(30.0°N, 129.5°E)
8月8日00:00	(35.5°N, 130.0°E)	(32.6°N, 130.5°E)	(31.5°N, 128.0°E)

6 结论及讨论

以不同物理过程参数化方案对 9210 号热带气旋的数值试验和对 9608 号热带气旋数

值预报与实况的对比, 可得出以下主要结论:

(1) 现行国家气象中心热带气旋业务预报模式能较好地预报热带气旋的移动路径, 模式热带气旋的结构特征也与实况热带气旋基本相似, 且它较原 LAFS 模式简单物理过程参数化方案下对热带气旋路径预报能力有明显的提高;

(2) 由热带气旋中心附近的三维热力、流场结构配置情况的分析发现, 现行的复杂物理过程的热带气旋模式能更好地描述热带气旋中心附近高低层的加热情况, 因此对强上升运动区的预报也比简单物理过程更趋合理. 另外, 热带气旋中心前方 300 hPa 以上有一反气旋性涡度存在, 表明高层有较强辐散, 并与低层的强辐合区相配合, 以维持强上升运动的发展. 强上升运动→暖湿空气凝结→潜热释放→温度上升→高层辐散流出→地面气压下降→低层辐合→上升运动加强, 是促使热带气旋在不断发展过程中朝强辐合上升区推进的一种正反馈机制;

(3) 诊断分析发现, 850 hPa 上升运动最大中心的位置对未来 12h 热带气旋的移向有较好的指示作用. 同时, 利用这些动力因子, 可大致确定热带气旋的移向、移速; 而热力因子则与热带气旋强度变化相匹配, 700 hPa 或 500 hPa 湿位涡第一项 $MPV1$ 负值中心绝对值大小的变化可反映热带气旋的强弱, 它是这种热带气旋涡度及热带气旋中心附近对流不稳定程度的一种综合表达;

(4) 诊断分析结果还表明, 尽管热带气旋的温度场从中心到外围有明显的对称性特点, 但由于其内部的对流运动及其它物理过程间的相互作用, 使得热带气旋风场, 以及热带气旋中心及其附近的垂直运动场呈现出明显的非对称性, 这也是目前热带气旋模式与原简单物理过程模式的重大区别;

(5) 模式初始场的垂直运动及对流不稳定比实况弱, 这或许是初值化过分地抑制了短波发展的缘故.

虽然目前的热带气旋模式比原 LAFS 模式在物理过程参数化方案上有较大改进, 但它对热带气旋发展强盛期对流层下层的高温、高湿强度的预报仍不够理想, 且模式热带气旋闭合气旋性环流中心附近风速亦偏大, 上升运动偏弱, 对流层低层辐合位置的预报与实况也尚存在一定差别, 对热带气旋中心位置的预报仍有一定的误差, 特别是在路径突变时, 这可能是由于模式对边界层热力和动力过程的表达还不够完善所致, 这些问题有待进一步研究和改进.

参 考 文 献

- 1 王诗文, 李建军. 台风路径实时数值预报的初步试验. 应用气象学报, 1994, 5(4): 462~469.
- 2 陈德辉, 王诗文, 汪厚君. 改进的物理过程参数化对台风路径数值预报的影响. 应用气象学报, 1996, 7(1): 1~8.
- 3 王诗文, 陈德辉, 李健军, 麻素红. 台风路径数值预报模式的改进及其在业务上的应用. 见: 国家气象中心编, 科技年报. 1996.
- 4 Toshiki Iwasaki, Hisashi Nakano and Masato Sugi. The performance of a typhoon track prediction model with cumulus parameterization. *J. Meteo. Soc. Japan*, 1987, 65: 555~570.
- 5 郭肖容, 阎之辉. 有限区分析预报系统(LAFS)介绍. 见: 国家气象中心编, 中期数值天气预报及其产品应用(上). 1992, 264~315.

6 钮学新. 热带气旋动力学. 北京: 气象出版社, 1992. 37~78.

RESEARCHES ON THE INFLUENCE OF PARAMETERIZATION OF PHYSICAL PROCESS ON MODELING TYPHOON AND ITS DYNAMICAL STRUCTURE

Liu Huanzhu Chen Dehui Teng Qiaobin
(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Abstract

The numerical experiments and their diagnostic analyses of the NMC's typhoon track numerical prediction model, with different parameterization scheme of physical processes were presented. The numerical experiments on Janis (1992) and Herb (1996) typhoons showed that the tracks and their landfall locations could be well simulated by this model. Moreover, by using the model with the improved parameterization scheme of physical processes, the thermal regime on high and low level nearby the typhoon centre could be better described than that in the original one.

Meanwhile, the results from the diagnostic analyses of both the real and simulated typhoon exhibited that the absolute value of the first term of $MPV1$ at 500 or 700 hPa was well related to the intensity of the typhoon. Moreover, the location of the pressure energy and the ascending motion centre could indicate the direction of the typhoon's movement in the next 6~12 hours. Furthermore, results from analysing 3D thermodynamic structure and the wind field across the typhoon centre showed that the process of strong ascending motion→condensing of warm and moist air→releasing of latent heat→increasing of the temperature→divergence at the high level→dropping of surface pressure→stronger convergence at low level→ascending motion may be a positive feedback mechanism which caused the typhoon moving forwards to the strong convergence ascending motion area.

Key words: Typhoon numerical model Parameterization of physical processes Tropical cyclone structure