

文章编号: 1004-4965 (2007) 06-0569-06

多积云参数化方案热带气旋路径集合预报试验

郝世峰¹, 崔晓鹏², 潘劲松¹

(1. 浙江省气象科学研究所, 浙江 杭州 310017;

2. 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029)

摘 要: 利用 MM5 模式采用 5 种积云参数化方案选项研究了 2004~2006 年共 8 个热带气旋路径的集合预报。结果表明, 热带气旋路径预报对积云参数化方案的选取是敏感的, 积云参数化方案之间优劣互补, 而选择无积云参数化方案选项对热带气旋路径的预报有积极的贡献。采用 3 种路径集合预报方案研究的结果表明, 集合方法对热带气旋路径预报有明显的改善, 其中无积云参数化 Grell、Betts-Miller 和 Kain-Fritsch 4 种积云参数化方案选项组合的集合预报效果最好, 平均路径误差最小。

关 键 词: 集合预报; 积云参数化; 数值试验

中图分类号: P457.8

文献标识码: A

1 引 言

随着数值预报技术的不断发展, 数值预报的准确度在不断提高, 但由于大气是一个具有高度非线性混沌系统, 因此对于数值模式而言, 初始场的微小误差和模式本身的系统误差, 在一定长度的数值积分后, 预报结果都会与真实大气状态具有显著的偏差^[1], 而上述这 2 种误差是永远无法消除的, 因此数值预报存在着不确定性。为解决这一问题, Epstein^[2]和 Leith^[3]提出了集合预报的思想和方法。集合预报就是通过对初始状态中误差范围的估计给出初始状态的集合, 再从这些初始状态出发通过数值模式得到预报结果的集合, 或从单个初始状态出发通过多模式或单模式控制参数的变化得到预报结果的集合, 再通过对预报结果的集合分析得到最终的预报产品。集合预报技术是目前数值预报技术发展的一个重要方向。相对于中期集合预报而言, 短期集合预报更为复杂, 其初始场扰动的影响比中期预报要大得多, 同时模式本身的系统误差, 特别是强降水事件对模式的物理过程是极为敏感的, 造成强降水预报的误差很大。在我国, 改进初值场和研究扰动法的集合预报工作做了较多, 而关于模式系统误差对集合预报结果影响的研究相对较少。陈静等^[4]对

华南降水的研究表明, 不同积云参数化方案可引起扰动能量传播方式不同, 最终使得大气的动力和热力结构出现差异, 导致预报结果的不同。

我国热带气旋路径的集合预报研究还处于初级阶段, 带地区初始扰动理论还很不成熟, 没有一个很好的集合预报初值形成方法^[5]。袁金南等^[6]用模式的初始资料生成了初值成员集合, 研究了南海热带气旋路径集合预报, 对路径预报有一些明显的改善。由于在热带地区非绝热过程对模式初始扰动起到至关重要的作用和影响^[7], ECMWF 将非绝热过程引入伴随模式中, 考虑湿度场, 计算热带地区的初始奇异向量, 对西太平洋两次台风路径和强度作了集合预报试验, 取得了“正”的影响效果^[8-9]。因此在研究影响热带气旋路径预报的诸因子中, 除了初始场质量的因素外, 模式本身非绝热加热项的系统误差也是一个必须考虑的重要因素。虽然在影响热带气旋运动的诸因子中, 大尺度环境引导气流是影响热带气旋运动最重要和最基本的, 但在弱环境场中, 热带气旋内部非对称结构对热带气旋的运动会产生显著影响, 热带气旋内部的中尺度对流系统的存在就是热力非对称结构的一种表现。数值研究表明^[10], 热带气旋有向其内部对流不稳定区运动的趋势, 并且对流越强, 这种作用力越强。在弱环境流场中, 非对称结构往往可成为主

收稿日期: 2006-07-21; 修订日期: 2006-12-20

基金项目: 浙江省自然科学基金项目“多参数化方案集合预报应用研究”(Y505286)资助

作者简介: 郝世峰, 男, 河北人, 高级工程师, 硕士, 主要从事数值预报研究。E-mail: shifenghao@yahoo.com.cn

导因子导致热带气旋打转、转折或偏离环境引导气流方向。这种情况下,积云参数化方案的优劣就起到了主要的作用,它直接影响着预报的热带气旋内部的热力和动力结构,进而影响路径预报。

本文通过采用不同的积云参数化方案,利用中尺度模式 MM5 研究多积云参数化方案热带气旋路径的集合预报问题,为热带气旋路径预报提供参考依据。

2 模式、资料和积云参数化方案的选取

本文采用美国 PSU/NCAR 非静力中尺度模式 MM5 v3,水平分辨率为 45 km,垂直分为 30 层,模式顶位于 100 hPa,模式采用 Lambert 地图投影,水平范围为 $4\ 770\text{ km} \times 3\ 465\text{ km}$,时间步长 120 s,预报时效 72 h。为了研究积云参数化方案对热带气旋路径预报的影响,模式的积云参数化方案选项分别选取无积云参数化方案 (None), Kuo 方案 (大尺度水汽辐合方案), Grell 方案 (单云模式方案), Betts-Miller (BM) 方案 (对流调整方案) 和 Kain-Fritsch (KF) 方案 (对流有效位能释放方案)。模式的其他参数化方案在研究中选取一致,其中边界层方案选取 MRF 方案。选取的个例为 2004~2006 年间的 8 个热带气旋 (表 1)。预报起始时间为登陆前的 36~48 h,其中 2004 年台风个例使用的是美国 AVN 资料,2005 和 2006 年台风个例使用的是美国 GFS 资料,资料分辨率均为 $1^\circ \times 1^\circ$,模式初始场由分析场得到,边值由预报场得到。

表 1 2004~2006 年 8 个热带气旋个例情况

序号	编号	起报时间/UTC
1	0407	2004070100
2	0414	2004081100
3	0418	2004082300
4	0505	2005071712
5	0509	2005080400
6	0513	2005082900
7	0515	2005090912
8	0601	2006051600

3 集合预报试验

通过分析 8 个热带气旋个例在 5 种积云参数化方案下的 72 h 路径预报 (台风定位以海平面气压的最低值位置为准)发现,热带气旋路径预报对积云参数化方案的选取是较为敏感的,特别是在登陆前后,热带气旋的预报路径都出现明显的发散 (图 1),其

中 0513 号热带气旋的路径预报最具代表性。

为了检验积云参数化方案对热带气旋路径预报的影响,以 0513 号热带气旋为例分析了不同积云参数化方案对 500 hPa 高度场和经过台风中心热、动力垂直结构的影响。模式 12 h 预报的 500 hPa 高度场分析表明 (图 2a),积云参数化方案对高度场的影响在短期内并不显著,5 个成员的等值线分布比较集中,热带气旋位置相近,只是副高脊线西伸程度有些差异。但从沿台风中心的热、动力结构的垂直剖面图来看,5 个成员预报结果却存在着明显的差异,如图 1b~1f,相当位温的差异主要分布在台风中心附近,500~200 hPa 差异最大,垂直速度的差异更为显著, KF 方案预报的台风中心西部垂直速度明显的大于其他几个方案的预报。由于大气的垂直温湿结构与垂直运动之间是相互影响的,因此垂直热动力结构的差异会随着预报时间的延长而逐渐扩大。从 36 h 的预报结果来看 (图 3b~3f),垂直速度的差异依然非常显著,位温场的差异进一步扩大,500~200 hPa 相当位温的差别非常明显,台风的東西两侧虽然都存在着冷中心,但分布和强度明显不同,这与不同积云参数化方案所描述的对流活动及潜热释放的差异有着直接的关系。低层台风中心附近 KF 方案预报的相当位温明显高于其他方案, Kuo 方案的预报值最低。从 500 hPa 形式来看 5 840、5 880 gpm 等值线仍然比较集中,和 12 h 预报结果相比各成员的副高强度均有所增强。从 5 800 gpm 等值线的位置分布和图 1 中 0513 号台风路径来看,此时台风位置已经存在较大的差异。对比成员间预报结果可以发现,不同积云参数化方案对大气的温湿结构和垂直速度预报的影响要远大于对 500 hPa 高度场预报的影响,垂直热、动力结构的差异会随着模式的积分而逐渐扩大,最终造成热带气旋路径预报的差异。

为了进一步检验各积云参数化方案对热带气旋路径预报的效果,本文分析了各方案的 24、48、72 h 路径预报平均距离误差,并采用如下 3 种集合方案作预报与上述各集合成员单独的预报结果作对比。(1) 采用无积云参数化方案 (None)、BM、KF 4 个成员作集合;(2) 采用 Grell、BM、KF 3 个成员作集合;(3) 采用全部 5 个成员作集合。热带气旋路径的集合方法采用集合成员的平均路径。图 1 显示的路径预报表明,热带气旋路径预报对积云参数化方案的选取是较为敏感的,5 个成员的 48~72 h 热带气旋路径预报明显发散 (图 1 中空圈圆路径),其中以 0513 号热带气旋的路径预报最具有代表性。采用 3 种集合

方案的热带气旋路径预报之间差异不大,发散性很小,路径比较集中(图1中实心三角路径),某些个例预报路径与实况十分接近;至于集合预报路径与实况路径之间仍存在的差异,应该与数值模式本身存在的其他系统误差和不确定性(如初始场误差等)以及热带气旋个例的特异性有关。表2~4给出了各集合成员和采用上述3种集合预报方案路径预报的定量结果,总体看来,Kuo方案的路径预报误差较其他方案大,Grell、BM、KF方案比较接近。值得注意的是,无积云参数化方案的路径预报并不差,特别是72 h的路径预报要优于其

他参数化方案(228.52 km)。这说明积云参数化方案在对流活动描述上的系统误差会随着预报时间的延长而逐渐增大,给热带气旋路径预报带来较大的误差,而不采用积云参数化方案时,至少在当前模式分辨率下,对较长时间路径预报有很好的效果。在采取集合方案之后,路径预报改善明显:方案一和方案三的48 h和72 h预报都要略优于方案二,这与方案二中没有包含无积云参数化方案这个集合预报成员有关,说明无积云参数化方案这个集合成员,至少在目前的模式分辨率下对热带气旋48 h和72 h

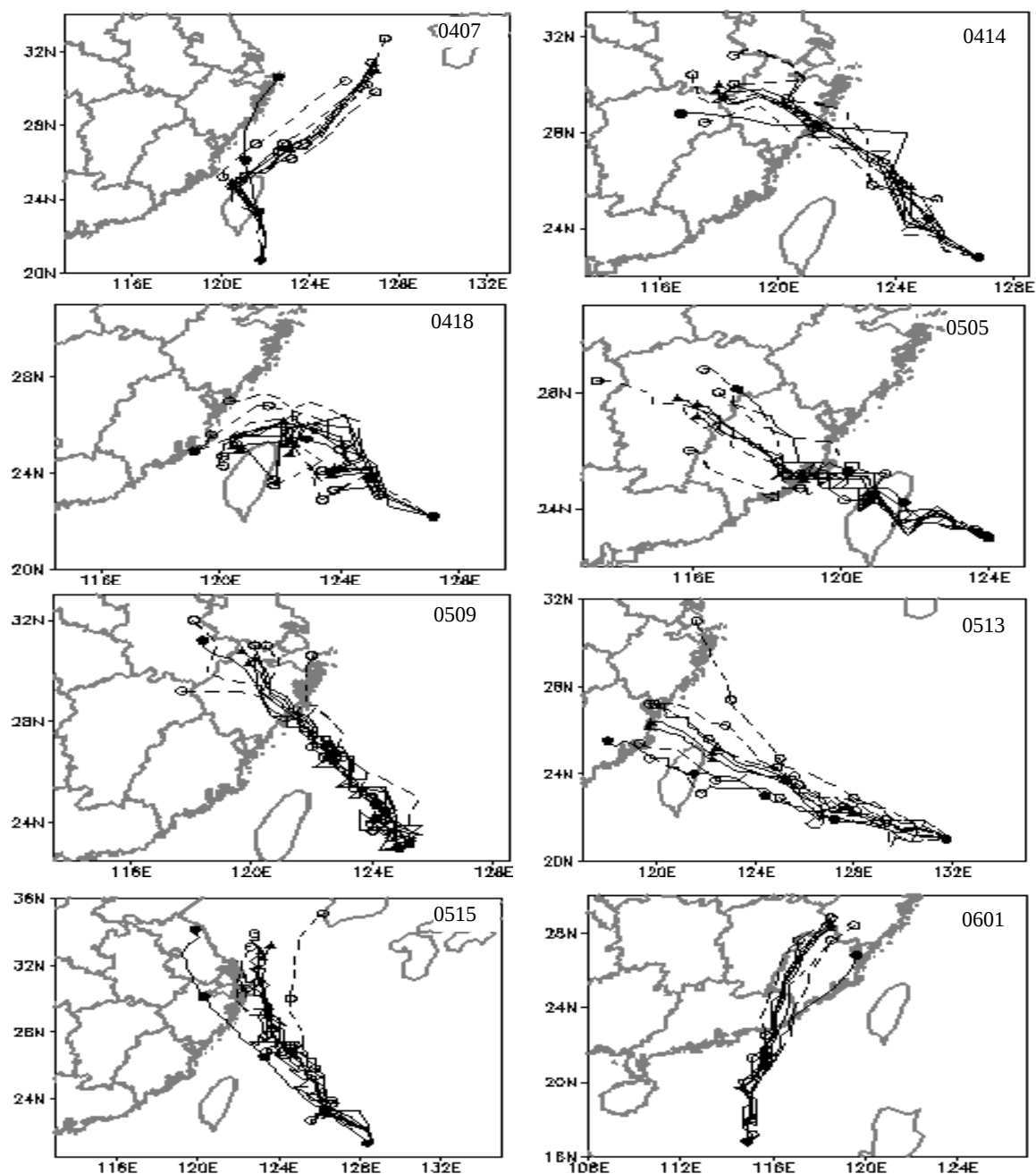


图1 8个热带气旋个例的72 h路径预报 实圆心为实况路径;空心为各成员路径;三角为集合路径。
图右上角的数字为台风个例。

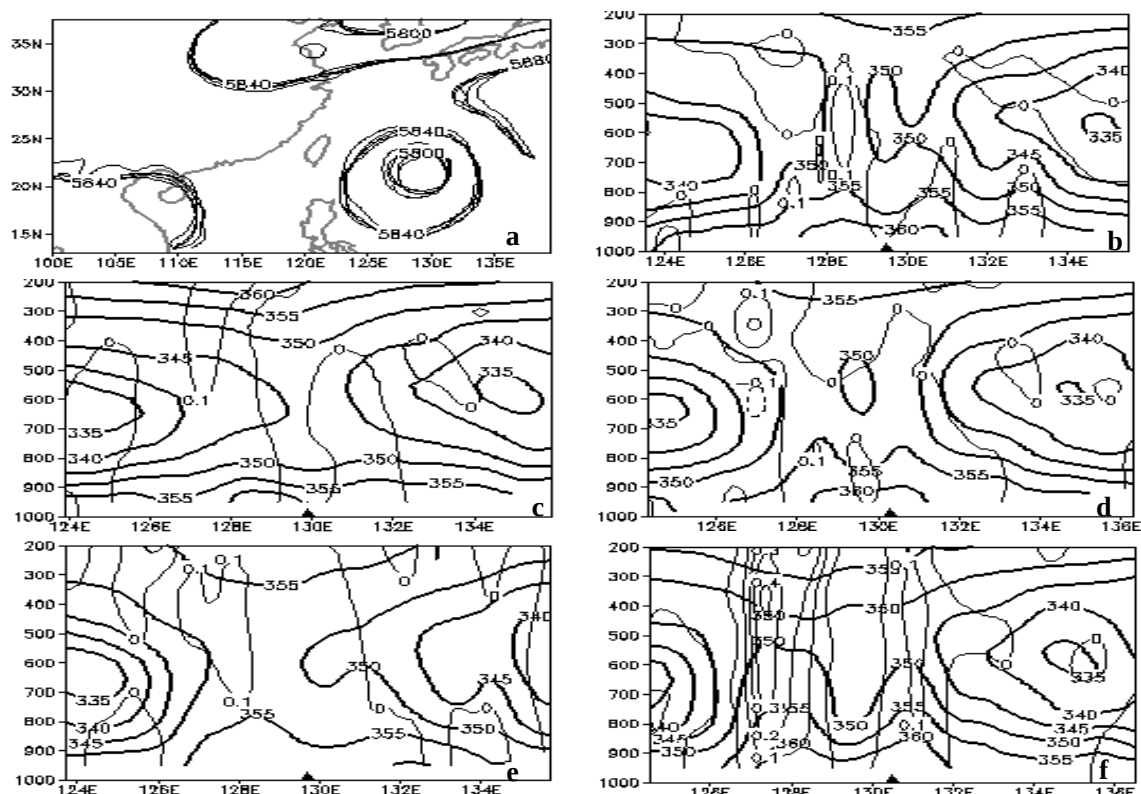


图2 分别采用5种积云参数化方案预报的0513号热带气旋12 h预报500 hPa位势高度(a, 单位:gpm)及经过热带气旋中心的相当位温(粗线, 单位:K)和垂直速度(细线, 单位:m/s)的纬向垂直剖面
b. 无积云参数化方案; c. Kuo 方案; d. Grell 方案; e. BM 方案; f. KF 方案。三角形为台风中心位置。

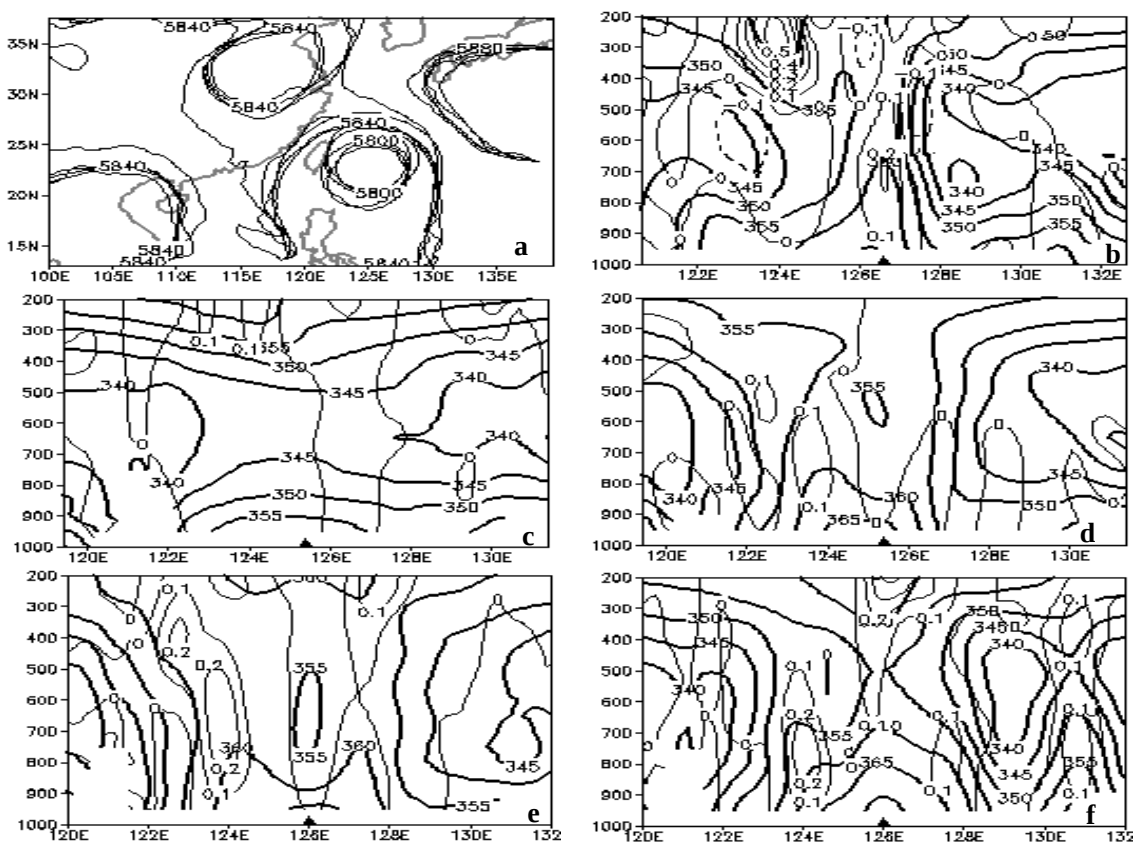


图3 同图2, 但为36 h 预报。

路径预报是很有利的。而方案三较方案一预报效果稍差，这可能与方案三中包含了预报效果较差的 Kuo 参数化方案的缘故。集合预报的 24 h 和 48 h 的路径预报误差较各集合成员的单独预报减小约 30~50 km，对 72 h 路径预报的改进效果稍差，但是由表 2 可以看出，误差主要来自对 0407 和 0515 号这两个热带气旋个例的预报，有意思的是 Kuo 方案对这两个个例的路径预报恰恰是最好的，明显优于其他的方案，这也说明了积云参数化方案之间的优劣是互补的，而采用集合的方法对路径预报会有一定的改善。如果进一步去掉 0407 和 0515 个例的影响，72 h 预报

的平均路径误差有明显的改善，三个集合方案中，方案一平均距离误差为 148 km，与各成员单独预报相比平均改善 50 km 左右，效果显著（图表略）。

以上分析可知，本文简单的集合方法便可以大大改进热带气旋的路径预报，说明集合预报对热带气旋路径预报是很有利的。但由于个例之间的差异性，如大尺度环流条件的不同、模式初始扰动的不确定性以及本文探讨的积云参数化方案之间的差异混淆交织在一起，使得情况变得十分复杂。集合预报方案的确立需认真考察和进行大量试验，从而建立较好的热带气旋路径集合预报方案。

表 2 72 h 路径预报误差分析 单位：km。

热带气旋编号	None	Kuo	Grell	BM	KF	方案一	方案二	方案三
0407	426.04	271.89	402.96	425.03	524.28	437.00	444.90	402.83
0414	117.47	305.46	166.07	97.23	169.06	117.53	126.21	153.15
0418	116.82	172.36	123.96	110.74	193.33	68.53	90.28	70.64
0505	139.33	382.94	63.91	246.58	201.58	120.71	146.44	165.41
0509	195.29	75.31	297.67	158.63	173.29	189.90	191.54	145.74
0513	114.57	454.43	109.37	273.59	184.46	136.88	186.15	197.19
0515	420.17	349.54	442.59	568.84	249.92	388.15	396.42	372.19
0601	298.53	151.32	297.39	199.25	297.20	257.46	244.36	234.91
平均	228.52	270.40	237.99	259.98	249.14	214.52	228.28	217.75

表 3 48 h 路径预报误差分析 单位：km。

热带气旋编号	None	Kuo	Grell	BM	KF	方案一	方案二	方案三
0407	154.21	157.28	138.86	146.02	173.16	92.55	91.71	89.14
0414	180.78	166.33	202.12	106.24	141.81	127.25	124.03	122.58
0418	176.72	169.55	183.06	44.73	132.73	46.56	69.90	57.05
0505	107.61	212.01	89.02	154.58	153.66	114.32	121.24	124.88
0509	53.84	46.15	105.46	78.99	59.81	57.91	64.93	46.76
0513	79.28	263.00	90.64	176.99	148.48	95.71	124.67	124.38
0515	185.59	166.99	218.70	319.95	134.20	190.05	200.06	180.54
0601	141.24	63.23	161.52	103.92	135.72	101.65	99.08	90.02
平均	134.90	155.56	148.67	141.42	134.94	103.25	111.95	104.41

表 4 24 h 路径预报误差分析 单位：km。

热带气旋编号	None	Kuo	Grell	BM	KF	方案一	方案二	方案三
0407	184.64	271.09	178.81	199.60	188.90	136.58	137.79	149.27
0414	177.66	166.61	159.66	155.12	136.27	99.24	100.44	98.63
0418	149.74	163.74	129.51	131.31	141.64	92.58	91.04	97.76
0505	77.43	108.51	81.02	85.13	90.09	75.81	77.00	79.36
0509	111.80	52.69	84.40	37.60	64.29	51.20	45.20	46.15
0513	84.33	104.33	61.15	98.98	90.46	40.43	49.53	49.02
0515	122.29	64.17	124.96	99.60	79.08	79.00	72.15	70.72
0601	55.83	52.20	50.03	27.71	58.16	39.67	36.61	36.04
平均	120.46	122.91	108.69	104.38	106.11	76.81	76.22	78.36

4 结 论

利用美国 PSU/NCAR 非静力中尺度模式 MM5 v3 采用 5 种积云参数化方案选项，通过对 2004~2006 年共 8 个热带气旋路径的集合预报研究，得到如下结

论。

（1）热带气旋路径预报对积云参数化方案的选取是较为敏感的，由于各积云参数化方案在对流活动描述上存在着差异，导致预报热、动力场的差异，进而导致热带气旋路径预报的差异（发散）。积云参

数化方案之间优势互补,Kuo 方案虽然总体上路径预报误差最大,但对于某些热带气旋个例的路径预报,效果却最好;无积云参数化方案的路径预报效果并不差,尤其是 72 h 路径预报要优于其他方案,对热带气旋路径预报有重要的参考价值。

(2) 采用三种路径集合预报方案试验的结果表明,集合预报可以减小模式系统误差的影响,降低热带气旋路径预报误差,其结果要优于任何集合成员的单独预报。三种集合方案的预报结果比较接近,其中无积云参数化方案、Grell、BM、KF 4 种积云参数化方案选项组合的集合预报效果最好,平均路径预报

误差最小。

本文由于个例有限,还需大量试验作进一步验证。模式系统误差不可避免,采用多积云参数化的集合预报对减小数值模式的系统误差影响有一定作用,但由于预报个例(热带气旋)之间的差异性与集合成员(积云参数化方案选项)之间的差异性交织在一起,给集合方案的建立带来一定困难,集合成员的选取及集合分析方法的确立需要建立在认真考察和大量试验的基础上。这些都将是今后的研究重点。

参 考 文 献:

- [1] LORENZ E N. Deterministic nonperiodic flow[J]. J Atmos Sci, 1963, 20(2): 130-141.
- [2] EPSTEIN E S. Stochastic dynamic predication[J]. Tellus, 1969, 21(6): 739-759.
- [3] LEITH C E. Theoretical skill of Monte Carlo forecasts[J]. Mon Wea Rev, 1974, 102(6): 409-417.
- [4] 陈静, 薛纪善, 颜宏. 华南中尺度暴雨数值预报的不确定性与集合预报试验[J]. 气象学报, 2003, 61(4): 432-446.
- [5] 周霞琼, 端义宏, 朱永祺. 热带气旋路径的集合预报方法研究 I——正压模式结果的初步分析[J]. 热带气象学报, 2003, 19(1): 1-8.
- [6] 袁金南, 万齐林, 黄燕燕, 等. 南海热带气旋路径集合预报试验[J]. 热带气象学报, 2006, 22(2): 105-112.
- [7] 李泽春, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用[J]. 应用气象学报, 2002, 13(1): 1-15.
- [8] PURI K, BARKMEIJER J, PALMERTN J N. Ensemble predication of tropical cyclones targeted diabatic singular vectors[Z]. ECMWF Technical Memorandum, 1999: 298.
- [9] PALMER T N, BARKMEIJER R, BUIZZA R, et al. The future of ensemble predication[Z]. ECMWF Newsletter No 88, Summer/Autumn 2000: 2-8.
- [10] 陈联寿, 徐祥德, 谢以扬, 等. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应[J]. 大气科学, 1997, 21(1): 83-90.

ENSEMBLE PREDICTION EXPERIMENTS OF TRACKS OF TROPICAL CYCLONES BY USING MULTIPLE CUMULUS PARAMETERIZATION SCHEMES

HAO Shi-feng¹, CUI Xiao-peng², PAN Jin-song¹

(1. Zhejiang Institute of meteorology, Hangzhou 310017, China;

2. LACS, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract :Ensemble prediction experiments of tracks of eight tropical cyclones occurring between 2004~2006 over the western Pacific are performed by using MM5 with five cumulus parameterization schemes. The results show that the predictions of the tracks of the tropical cyclones are sensitive to the selection of cumulus parameterization schemes. Each scheme has its own advantage and disadvantage, and the predications without cumulus parameterization schemes are not the worst, sometimes even better than the others. And all of the three ensemble methods improve the predictions of the tracks significantly, among which the ensemble method without parameterization schemes, the Grell, Betts-Miller and Kain-Fritsch schemes are the best.

Key words: ensemble prediction; cumulus parameterization; numerical experiment