

文章编号: 2096-1618(2017)03-0297-07

模式初值敏感性对中期数值天气预报的影响

牛嫣静¹, 车玉章¹, 彭新东^{1,2}, 范广洲¹

(1. 成都信息工程大学大气科学学院 高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225; 2. 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:为进一步研究准定常外源强迫条件下中期数值天气预报对初值的敏感性问题,采用 ECMWF ERA-interim 再分析资料及 NCEP 再分析资料作为模式初值,利用 CAM3.0 模式,对 1982–2011 年 1 月准定常短波辐射强迫情况下 30 个天气个例的 15 天预报结果进行分析,着重讨论预报结果对初值的依赖性,得出以下主要结论:模式确定性预报试验中,在 10 天内预报技巧显著,初值影响随预报时间延长而降低,10 天以上仍有一定预报技巧。初值对 15 天以内的数值天气预报都有一定的影响,优良初值可提高预报质量。

关键词:气象学;数值天气预报;初值敏感性;CAM3.0 模式;再分析资料

中图分类号:P456.7

文献标志码:A

doi:10.16836/j.cnki.jcuit.2017.03.011

0 引言

作为初值问题^[1-3],数值天气预报是通过一定数值方法对大气运动方程组进行数值求解,获得将来时刻的大气状况。另一方面,地球大气并非一个孤立的系统,其存在上下边界,并受地表、海面动力、热力过程和太阳辐射等外源的强迫,这些外强迫提供大气运动的能量源和汇^[4]。因此,数值天气预报不仅是一个初值问题,也是一个边值(外强迫)问题,数值预报的改进自然集中在模式初值改善、外源描述和模式本身的改进 3 个方面。近年来,随着非常规(卫星、雷达)观测资料的应用和资料同化方法的成熟,模式初始场得到大幅改善,短期数值天气预报预报精度提高^[4];高性能计算方法应用、模式动力过程的详细表述、物理过程的精细化,以及大气外源描述和耦合模式应用等也使数值模式总体性能不断提高,确定性预报时效延长^[5]。

然而,大气表现为一个复杂的非线性系统^[6-7],数值模型对初值的误差非常敏感^[8],初值误差随着时间的发展会不断扩大,使预报结果慢慢偏离系统的应有真实状态。一般情况下认为短期数值天气预报的主要问题是初值问题,但是气候预测的主要问题则是外源强迫所带来的边值问题^[9]。那么,如果从确定性预报的观点出发,给定初值的数值积分结果是否可信,正是研究 15 天以内提高数值预报准确率的重要一点。在月尺度延伸期预报研究方面,Miyakoda 等^[8-9]通过改进模式 and 数据处理,试着将数值预报延伸到月尺度,并

用大气环流模式开展月平均预报,显示出一定的预报技巧;郑庆林等^[10]对初值精度、模式中的云辐射过程、以及下垫面和地形作用对月预报的影响进行了研究。但对 15 天左右的数值天气预报,由于大气初始能量处于耗尽边缘,其动力和热力特性与月尺度状况存在差异。郑志海^[11]建立了一个可运行的 6–15 天中期延伸期预报系统。丑纪范等^[12]提出提取可预报分量进行延伸期预报的理论,

当前,气象常规和非常规观测资料非常丰富,观测资料的同化技术也发展到较高的水平,在此基础上的模式初值精度得到很大提高。另一方面,全球和区域的再分析资料在研究中得到了非常多的应用,其中使用最普遍的有 NCEP/NCAR 的再分析资料和 ECMWF 的再分析资料。这两种资料既有相似性也有着一定的区别。Dell Aquila 等^[13]分别使用这两种再分析资料,分析了冬季北半球中纬度区域的 500 hPa 高度场,发现在 1979 年前后使用两种资料所反映的高频波动有着很大的不同之处。Annamalai^[14]则在使用再分析资料研究亚洲季风演变时,发现在研究季节平均的一些气候特征的时候,ECMWF 再分析资料要比 NCEP 再分析资料的结果好。Bromwich 等^[15]对 ECMWF 和 NCEP 再分析资料进行了研究对比,发现在南半球中高纬度的对流层高度场和地面气温场资料方面 ECMWF 再分析资料更接近实况。荀学义等^[16]也发现在高原北部地区使用 NCEP 再分析资料更符合实际状况,而在高原中部地区和高原南部地区则使用 ECMWF 再分析资料的效果更好。

文中撇开资料同化本身,使用大气环流模式 CAM 3.0,分别使用 NCEP/NCAR 再分析资料和 ECMWF

ERA-interim 再分析资料作为 CAM 3.0模式的为初值,选取 1982–2011 年间 1 月的 30 个个例(用数字 1~30 表示)进行 15 天的预报,起报时间均为 9 日,采用 *ACC* 和 *RMSE* 指数对 15 天确定性预报结果进行统计分析,研究 15 天数值天气预报对模式初值的依赖性,评价改进初值对提高 15 天数值预报质量的可能性。

1 资料与模式

1.1 资料

再分析资料是对观测资料进行优化后的资料,目前认为是对真实大气状况最好的描述,在分析天气状况和作为模式的初始场时得到了广泛的应用。文中分别使用 ECMWF 再分析资料和 NCEP/NCAR 再分析资料,作为全球大气环流模式的初值,考虑 1982–2011 年 1 月 9–24 日固定时段、太阳高度角准定常情况下的短波太阳辐射,比较初值对 15 天以内数值预报的影响。

1.1.1 ECMWF ERA-interim 再分析资料

- 时间段:1982–2011 年间 1 月 9–15 日
- (2)水平分辨率:1.0°×1.0°
- (3)垂直分层:17 层
- (4)时间:每日 4 次

1.1.2 NCEP/NCAR 再分析资料

- 时间段:1982–2011 年间 1 月 9–15 日
- 水平分辨率:2.5°×2.5°
- 垂直分层:17 层
- 时间:每日 4 次

1.2 模式简介

采用模式是 CAM 模式 3.0 版^[19],动力框架为欧拉谱展开(T42)动力框架,纵坐标是 sigma-p 混合坐标,垂直分为 26 层,模型层的顶部 2.917 hPa;时间积分方案是欧拉型蛙跳格式,重力波半隐式积分。

1.3 预报结果检验指标

ACC(距平相关系数)和 *RMSE*(均方根误差)是对模式预报结果的进行检验和评价最普遍实用的方法。表达式为

$$ACC = \frac{\sum \sum (f_{i,j} - c_{i,j})(a_{i,j} - c_{i,j})}{\sqrt{\sum (f_{i,j} - c_{i,j})^2} \sqrt{\sum (a_{i,j} - c_{i,j})^2}}$$
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (f_{i,j} - a_{i,j})^2}{N}}$$

其中,*f*为预报场,*c*为平均场,*a*为分析场,*i,j*为经纬格点,*N*为空间上总格点数。当两变量的距平

场位相是一致时,*ACC* 是 1.0,反之,当两变量距平场位相是相反时,*ACC* 是 -1.0。*RMSE* 则代表预报值的偏差,*RMSE* 绝对值越小,代表模式预报结果越好。

2 结果分析

2.1 ECMWF ERA-interim 资料为初值 500 hPa 位势高度

用 ERA-interim 资料作为 CAM3.0 模式的初值,选取了 1982–2011 年间 1 月的 30 个个例,进行 15 天的预报,对初值信息的重要程度进行分析。图 1 为 30 个个例,全球区域 500 hPa 位势高度场 1~5 天、1~10 天和 1~15 天平均 *ACC* 和 *RMSE* 的分布情况。需要指出,这里的平均 *ACC* 和 *RMSE* 是 500 hPa 每隔 6 小时预报全球位势高度场和再分析资料的空间相关系数和均方根误差的时间平均结果。图 1 可以看出 30 个个例的 *ACC* 均渐渐减小,*RMSE* 均逐渐增大,且增加幅度逐渐减小。1~5 天的 *ACC* 有 26 个个例在 0.8 及以上,4 个个例在 0.7~0.8;22 个个例 1~10 天的 *ACC* 在 0.6 及以上,另有 7 个个例在 0.5~0.6;1~15 天的 *ACC* 大部分(24 个)在 0.4 及以上,只有 6 个个例在 0.3~0.4,1993 年个例则达到了 0.7 以上。1~5 天预报平均 *RMSE* 都在 65 gpm 以下,1~10 天 *RMSE* 在 60~90 gpm,而 1~15 天平均 *RMSE* 除两个个例外,均在 100 gpm 以下的范围变化。由此可以看出 CAM3.0 模式对全球中短期及 10~15 天的延伸期的大气环流形势仍然具有一定的预报能力,可见初值质量在 10 天以上的确定性预报中仍有很重要的作用,更接近实际的初值可能会使 10 天以上的预报技巧。

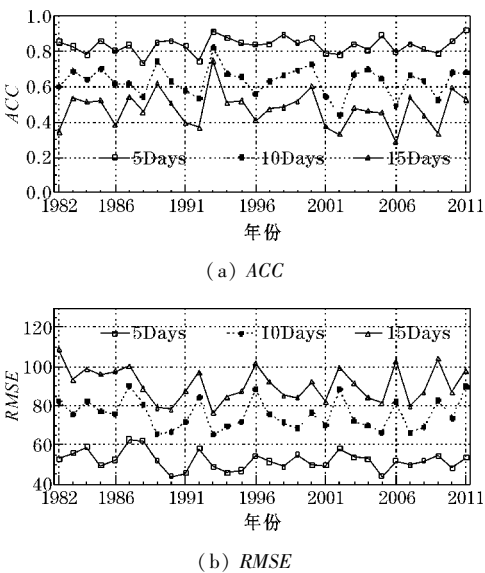


图 1 全球区域 500 hPa 位势高度场的 *ACC* 和 *RMSE*

由于大气运动是一个非常复杂的过程,不同区域的预报效果也有很大的区别。为更加全面地检验 15 天确定性预报对初值的依赖性,分别计算了北半球、南半球、热带和中国 4 个区域的模式预报场 *ACC* 和 *RMSE* 统计结果。

其中经纬度选择:

- 北半球:20°N~87°N,0°E~360°E
- 南半球:87°S~20°S,0°E~360°E
- 热带:20°S~20°N,0°E~360°E
- 中国:15°N~55°N,75°E~125°E

北半球(图 2a) 30 个个例 1~5 天的位势高度场 *ACC* 均在 0.8 上下微小浮动,1~10 天的 *ACC* 30 个个例中有 22 个在 0.6 及以上,而有 8 个个例 *ACC* 在 0.4~0.6;1~15 天的位势高度场 *ACC* 除 5 个个例外其他都在 0.4 及以上。预报技巧在南半球(图 2b)相对较低,1~5 天的 *ACC* 大部分个例在 0.7~0.8 变化,而 1~10 天 *ACC* 也有 12 个个例低于 0.6,1~15 天平均 *ACC* 有 14 个个例低于 0.4,其余在 0.4~0.8。热带地区(图 2c)1~5 天的 *ACC* 30 个个例均高于 0.4,1~10 天的 *ACC* 除 4 个个例介于 0.2~0.4 外,大部分和 1~5 天的 *ACC* 接近,1~15 天的 *ACC* 也有 16 个个例在 0.4 及以上。可以看出,相对于北半球和南半球,热带地区的预报技能要差一些。中国区域(图 2d)位势高度的 *ACC* 分布类似于北半球,由于青藏高原大地形的存在,预报技巧稍低于北半球。1~5 天的 *ACC* 有 10 个例大于 0.8,1~10 天有 4 个低于 0.4,1~15 天的平均 *ACC* 只有 10 个个例低于 0.4,有 3 个例甚至达到了 0.7。总体来看,以 ERA-interim 为初值的 CAM3.0 模式对北半球预报最好,南半球区域次之,热带区域最差,且不管是全球区域还是四个区域都可以看出模式对 1993 年的个例预报最好,而对 2006 年的个例预报比较差。

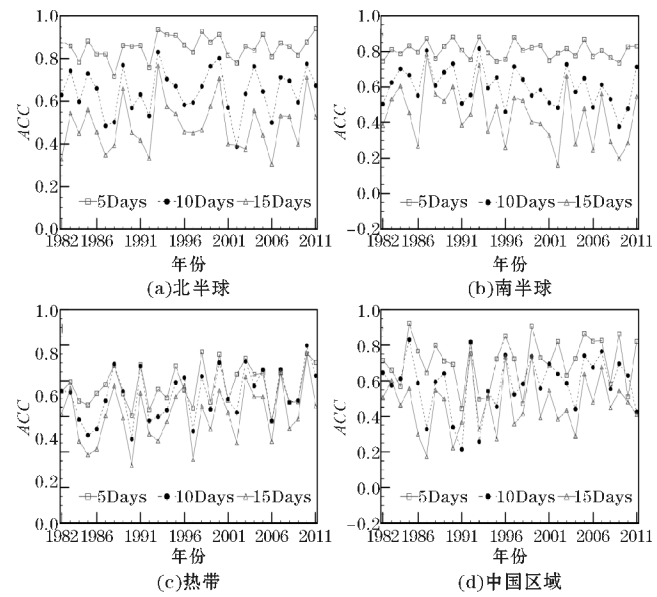


图2 500 hPa 位势高度场的 *ACC*

2.2 ERA-interim 资料作为初值检验 500 hPa 温度预报场

图 3 是 30 个个例全球区域 500 hPa 温度场的 *ACC* (图 3a) 和 *RMSE* (图 3b)。30 个个例 1~5 天的 *ACC* 基本维持在 0.5 以上, *RMSE* 均在 4.0 K 以下; 1~10 天的 *ACC* 有 8 个个例低于 0.4, 其他个例的 *ACC* 分布在 0.4~0.6, 而 *RMSE* 在 3.6~4.4; 1~15 天的 *ACC* 只有 1 个个例低于 0.2, 其他在 0.2~0.4 变化, *RMSE* 大都在 4.0~4.8, 且能看出 *RMSE* 随预报时效的延长而增长, 但增长减缓。综合 *ACC* 和 *RMSE* 来看, 初值对 10~15 天温度场预报仍然显示出一定的确定性, 但不确定性显著增加, 预报温度场的型相关降到 0.4 以下。图 4 是 30 个个例分别在北半球(图 4a)、南半球(图 4b)、热带(图 4c)、中国(图 4d)四个区域 500 hPa 温度场 *ACC*。可以看出, 总体上, 1~5 天、1~10 天和 1~15 天的温度预报与高度场的预报相似, 北半球的预报技巧最高, 热带区域最差, 中国区域略好于南半球。

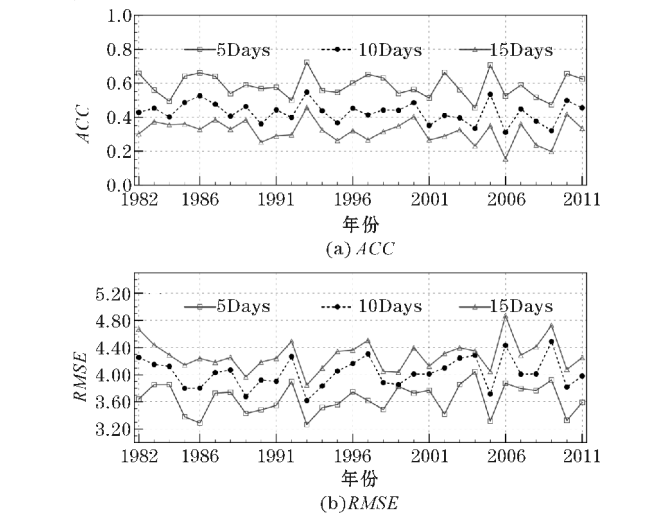


图3 30 个个例全球区域 500 hPa 温度场的 *ACC* 和 *RMSE*

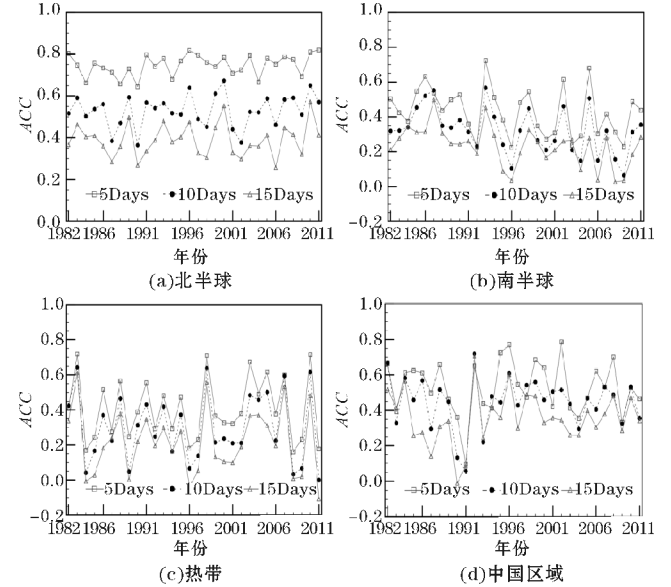


图4 30 个个例 500 hPa 温度 *ACC*

2.3 个例分析

综合分析得出 30 个个例的模拟中,1993 年的个例预报最为成功,2006 年的个例预报则较差,挑选这两个个例从空间场上对其成功与失败的原因进行初步分析。图 5 是 1993 年 500 hPa 位势高度的分析场(左列)和预报场(右列)。从图中可以看出 10 日 00 时(图 5a)北半球乌拉尔地区存在一高脊,东亚大槽主体位于鄂霍次克海西南侧,美洲西部维持一强大的高压脊。到 13 日 00 时(图 5b),乌拉尔山的高压脊维持在原地,但显著加强。极涡南压,东亚大槽加深。18 日 00 时(图 5c),高压脊原地继续加强,位于东太平洋上空的大槽继续加深。到 23 日(图 5d),北半球中高纬平直环流占主导地位,槽脊移动相对较快。南半球的系统也有相似的情形。从图 5 右列图上可以看出, CAM3.0 对 10 日 00 时(图 5e)和 13 日 00 时(图 5f)的

预报最好,很好的模拟出了高空高低压配置,在数值上也有很好的模拟。18 日 00 时(图 5g)的环流形势模拟也比较好,对 23 日(图 5h)的模拟相对稍差。可见,环流形势预报的好坏与系统的移动速度关系密切,稳定少动的系统预报较好。

图 6 是 2006 年个例的分析场(左列)和预报场(右列)。从左列的分析场可以看出中高纬地区平直环流为主,整个流型变化较快,第 2 天(图 6e)和第 5 天(图 6f)的预报场与分析场接近,但之后由于槽脊系统移速较快,预报偏差很大。

1993 年的个例环流形势以大槽大脊为主,南半球系统也移速缓慢,确定性数值预报技巧高,而 2006 年的个例以纬向环流为主,槽脊移动快,预报技巧相对低,文中还对其他个例也做了分析,同样可以得出这样的结论,因此,对于 15 天以内的预报,持续的稳定径向环流个例预报效果明显高于移动性纬向环流个例。

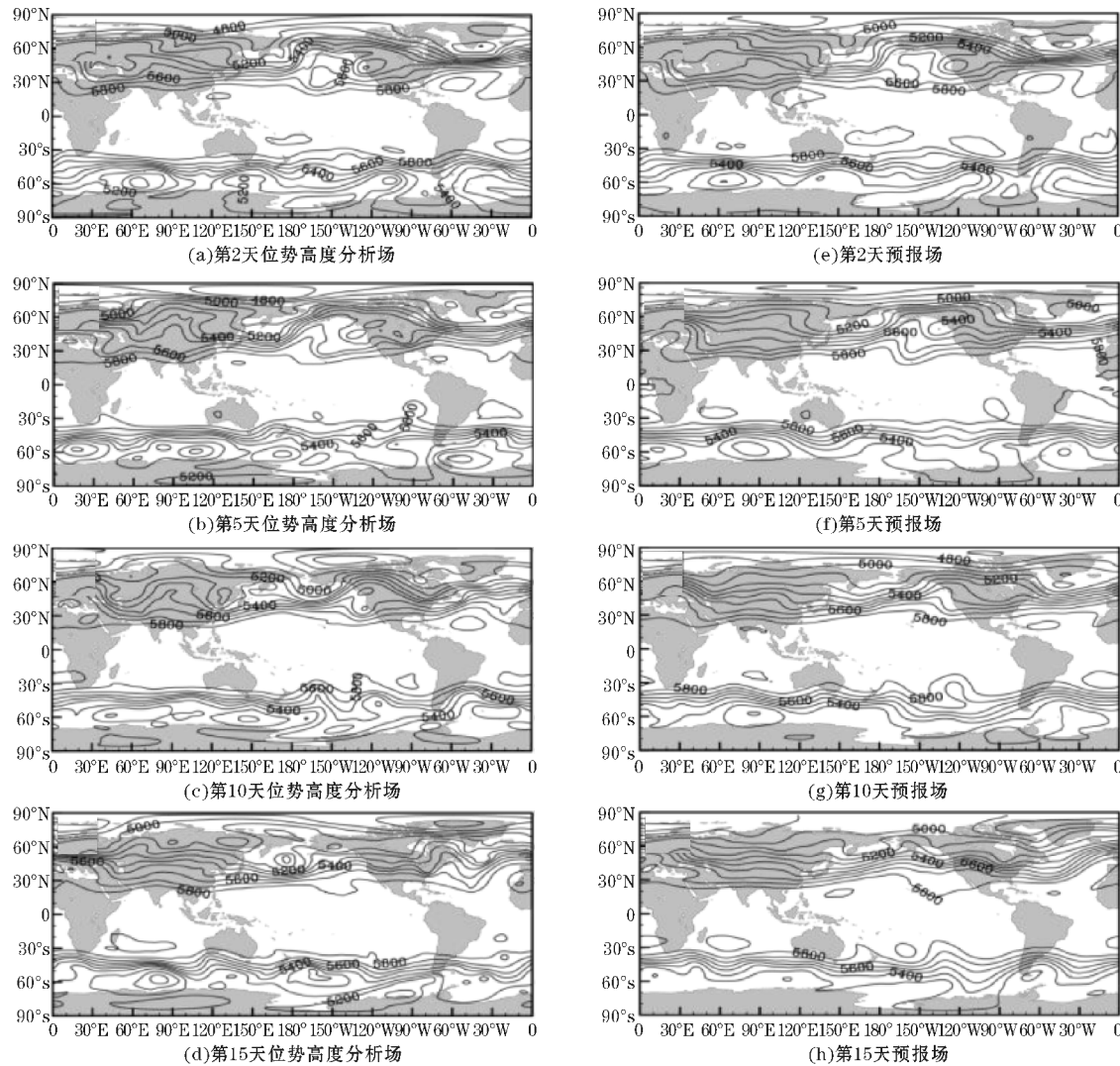


图 5 1993 年个例 500 hPa 位势高度分析场(左列)与预报场(右列)

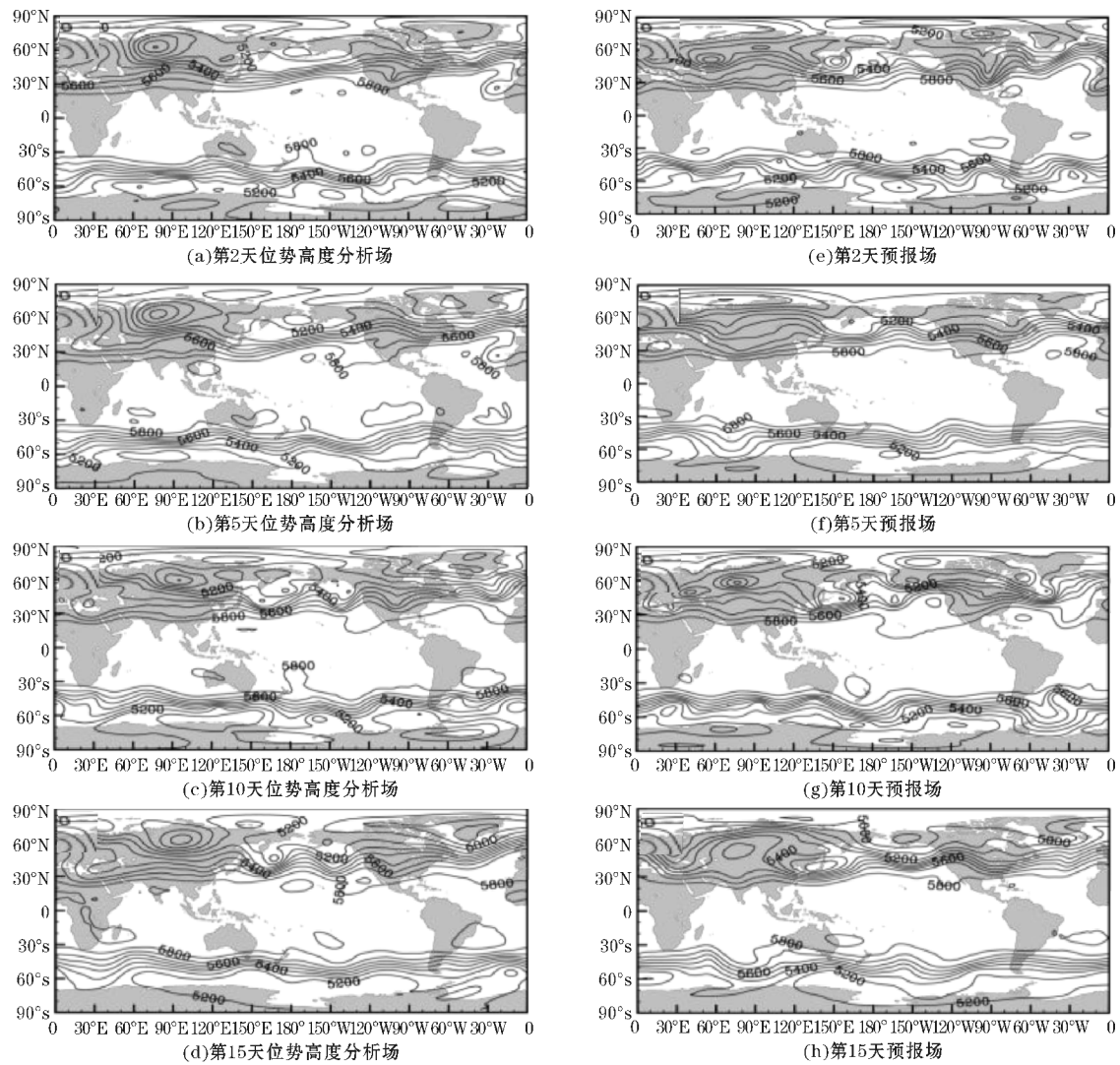


图6 但为2006年个例500 hPa位势高度分场与预报场

2.4 初值的敏感性试验

数值天气预报是一个初值问题,初值直接决定确定性预报的质量。用ERA-interim资料作为初值分析了500 hPa高度场和温度场预报质量,发现初值不仅在10天以内的数值预报中占据重要地位,而且对10~15天的数值预报也有不可忽视的作用。为进一步探讨15天以内数值预报对初值的敏感性,采用NCEP再分析资料代替ERA-interim作为初值,研究模式结果对初始场的敏感性。为了便于比较,此处定义两个指数:

$$mass1 = 1 - ACC2/ACC1$$
$$mass2 = 1 - RMSE1/RMSE2$$

其中,ACC1是使用ERA-interim资料作为模式的初值的时候,500 hPa位势高度距平相关系数,RMSE1是对应的均方根误差,ACC2是使用NCEP资料作为模式的初值的时候,500 hPa位势高度距平相关系数,RMSE2是对应的均方根误差,当 $mass1(mass2) > 0$ 时,说明使用ERA-interim资料作为模式的初值比NCEP

资料作为模式的初值时预报效果好,其绝对值大小是相应的资料作为模式的初值时的其所占优势的程度。

从图7和图8中分别给出了 $mass1$ 和 $mass2$ 分别分别在第5,10,15天模拟中的平均值。图中可以看到,1~5天,北半球30个个例的值,有19个的,11个的,绝对值为, $mass2$ 和 $mass1$ 的结果相似,有12个,因此在北半球两种资料作为初值的1~5天的预报结果相似。北半球1~10天有18个的,有20个;1~15天有17个,21个,值多数在0.1以上,综合 $mass1$ 和 $mass2$ 来看,北半球对于1~10天和1~15天以ERA-interim资料为初值的预报结果比以NCEP资料为初值的预报结果好。中国区域的状况和北半球的差不多。而南半球1~5天和1~10天30个个例的 $mass1$ 和 $mass2$ 都大于0;1~15天的 $mass1$ 有3个 $mass1 < 0$,2个 $mass2 < 0$,其余的都大于0,所以在南半球ERA-interim资料作为初值的预报效果比NCEP资料作为初值的预报效果好的多。热带区域1~5天、1~10天和1~15天的30个个例中,都有18个 $mass1 > 0$;1~5天和1~10天的个

例中,10个 $mass2 > 0$, 1~15天的个例中,15个 $mass2 > 0$,可以看出中短期的预报使用 ERA-interim 资料作为初值的效果较好,10~15天的延伸期预报,则使用这两种资料作为初值的预报效果类似。可见,1~15天内数值天气预报对 ERA-interim 或 NCEP 再分析资料为初值的敏感性都较高,在不同地理区域其预报效果有所不同。

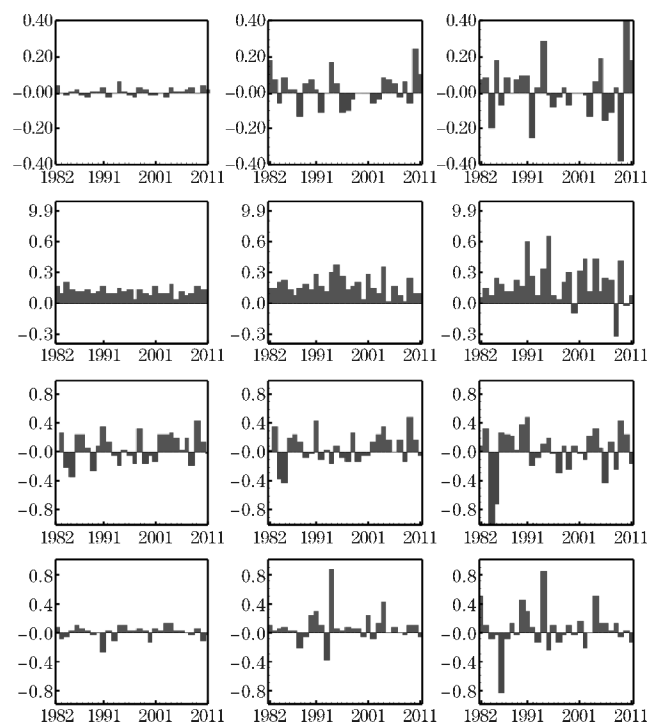


图7 北半球(第一行)、南半球(第二行)、热带(第三行)、和中国区域(第四行)30个个例的 $mass1$ 分布图

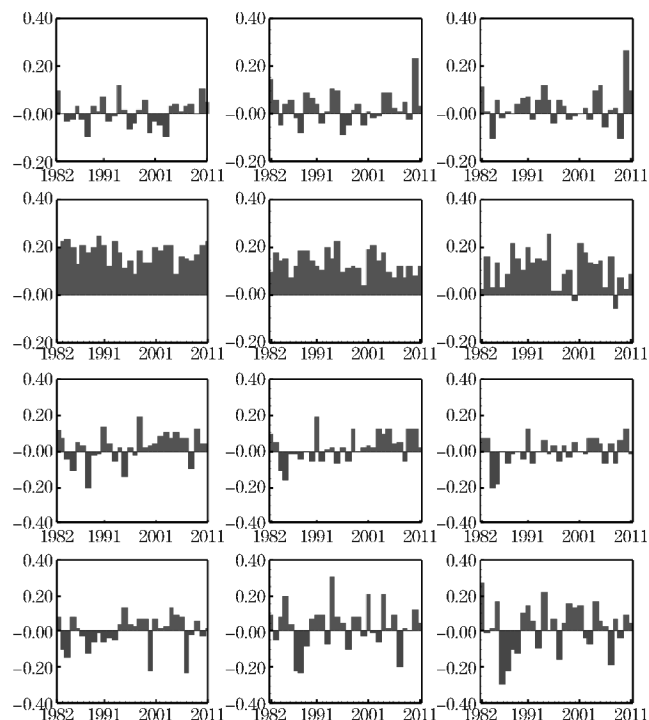


图7 北半球(第一行)、南半球(第二行)、热带(第三行)、和中国区域(第四行)30个个例的 $mass2$ 分布图

3 结束语

首先用 ERA-interim 资料作为 CAM3.0 模式的初值对 1982–2011 年的 30 个个例在确定性预报的前提下,向后预报 15 天,分析利用再分析资料作为初值对 15 天内的数值天气预报结果的影响。然后再进一步采用 NCEP 再分析资料为模式初值进行相同预报试验,对两种初值的确定性预报结果进行对比,研究了 15 天数值预报结果对再分析资料的初值敏感性。

(1) 以 ERA-interim 再分析资料作为初始值,500 hPa 全球区域位势高度预报场的 1~5 天距平相关系数 ACC 基本维持在 0.8~0.95,均方根误差 $RMSE$ 在 65 gpm 以下。1~10 天和 1~15 天预报平均 ACC 在 0.6 上下和 0.4~0.6 变化,而 $RMSE$ 则分别在 60~90 gpm 和基本小于 100 gpm 范围变化,且 $RMSE$ 随预报时间延长而逐渐减小。可见模式确定性预报试验中,在 10 天以上仍然具有一定预报技巧。500 hPa 温度场的预报较位势高度稍差,但也显示出一定的预报技巧,反映初值在 10~15 天预报中具有不可忽视的作用,模式结果仍然可以反映初值信息。(2) 30 个个例统计显示,以 ERA-interim 为初值的 CAM3.0 模式在两半球中高纬较好,其中北半球预报最好,热带区域最差,对于个例评估发现,对持续稳定的径向环流(阻塞)个例,形势场稳定,预报效果明显好于快速移动性的纬向环流个例。(3) 北半球 ERA-interim 资料在 1~5 天的预报中与 NECP 资料的预报效果差别不大,但是在 1~10 天和 1~15 天的预报中效果比 NECP 资料好。在中国区域结果与北半球的结果类似,但是在南半球无论是在 1~5 天,1~10 天,还是 1~15 天 ERA-interim 资料的预报效果都比 NECP 资料的预报效果好,这可能是因为 ERA-interim 资料在南半球上同化了更多的卫星资料,使得在南半球 ERA-interim 资料质量更好的原因造成的。这就说明初值对 15 天以内的数值天气预报的结果都有一定的影响,优良初值可提高预报质量。

参考文献:

- [1] 顾震潮. 作为初值问题的天气形势数值预报与由地面天气历史演变作预报的等值性[J]. 气象学报, 1958, 29(2): 93–98
- [2] 丑纪范. 天气数值预报中使用过去资料的问题[J]. 中国科学, 1974, 17(6): 635–644.
- [3] 丑纪范. 数值天气预报的创新之路——从初值问题到反问题[J]. 气象学报, 2007, 65(5): 673–682.
- [4] 陈德辉, 薛纪善. 数值天气预报业务模式现状与

- 展望[J]. 气象学报,2004,62(5):623-633.
- [5] Lorenz E. N. A study of the predictability of a 28-variable atmospheric model [J]. *Tellus*, 1965, 17(3):321-333.
- [6] Lorenz E. N. Atmospheric predictability as revealed by naturally occurring analogues[J]. *Journal of the Atmospheric sciences*, 1969, 26(4):636-646.
- [7] Rabier F, Klinker E, Courtier P, et al. Sensitivity of forecast errors to initial conditions [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1996, 121:121-150.
- [8] Miyakoda K, T Gordon, R Caverly. Simulation of a blocking event in January 1977 [J]. *Monthly Weather Review*, 1983, 111:846-869.
- [9] 郑志海. 月动力延伸预报研究进展回顾[J]. *气象科技进展*, 2013, 1:25-30.
- [10] 郑庆林, 宋青丽. 一个改进的 T42L10 谱模式及其在月预报中的应用[J]. *应用气象学报*, 1993, 4(增刊):50-56.
- [11] 郑志海. 基于可预报分量的 6-15 d 数值天气预报业务技术研究[D]. 兰州:兰州大学, 2010:2-100.
- [12] 丑纪范, 郑志海, 孙树鹏. 10~30 d 延伸期数值天气预报的策略思考——直面混沌[J]. *气象科学*, 2010, 30(5):569-573.
- [13] Dell Aquila A, Lucarini V, Ruti P M, et al. Hazy spectra of the northern hemisphere mid-latitude atmospheric variability in the NCEP-NCAR and ECMWF reanalyses [J]. *Climate Dynamics*, 2005, 25(6):639-652.
- [14] Annamalai H, Slingo J M, Sperber K R, et al. The mean evolution and variability of the Asian summer monsoon: Comparison of ECMWF and NCEP-NCAR reanalyses [J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(6):1157-1186.
- [15] Bromwich D H, Fogt R I. Strong Trends in the Skill of the ERA-40 and NCEP-NCAR Reanalyses in the High and Midlatitudes of the Southern Hemisphere, 1958-2001 [J]. *Journal of Climate*, 2004, 17(23):4603-4619.
- [16] 荀学义, 胡泽勇, 孙俊, 等. ECMWF 和 NCEP 再分析资料在青藏高原高度场变化中的对比分析[J]. *冰川冻土*, 2011, 33(1):80-87.
- [17] 丑纪范, 谢志辉, 王式功. 建立 6-15 天数值天气预报业务系统的另类途径[J]. *军事气象水文*, 2006, 12:4-9.
- [18] Collins W D, P J Rasch, B A Boville, et al. The Formulation and Atmospheric Simulation of the Community Atmosphere Model Version 3 (CAM3) [J]. *Journal of Climate*, 2006, 19:2144-2161.
- [19] Jolliffe I. T., Stephenson D. B.. *Forecast Verification: A Practitioners Guide in Atmospheric Science* [M]. New York: Wiley, 2003.

Impact of the Initial Conditions on the Medium-range Numerical Weather Prediction

NIU Yan-jing¹, CHE Yu-zhang¹, PENG Xin-dong^{1,2}, FAN Guang-zhou¹

(1. College of Atmosphere Sciences, Chengdu University of Information Technology, and Key Laboratory of Sichuan Province of Plateau Atmosphere and Environment, Chengdu 610225, China; 2. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The National Center for Atmospheric Research Community Atmosphere Model version 3.0 is used for the hind-cast of 30 cases in January of 1982-2011 in order to make better understanding of the sensitivity of the medium-range numerical weather prediction (NWP) to initial conditions under quasi-steady foreign forcing. The ERA-interim reanalysis data and the National Center for Environmental Prediction reanalysis data are used as the initial conditions. The dependence of the 15-day numerical results on initial conditions is investigated by inter-comparison of model results with the disturbed reanalysis data. The results of deterministic prediction show a certain forecasting skill in the forecasts within 10-day period. The impact of initial condition decreases with the time integration, and the 15-day NWP shows dependency on the initial conditions, and the forecasting skill might improve significantly with the refinement of initial conditions.

Keywords: meteorology; numerical weather prediction; sensitivity of initial conditions; CAM3.0 model; reanalysis data