

张宇, 郭振海, 张文煜, 等. 2010. 中尺度模式不同分辨率下大气多尺度特征模拟能力分析 [J]. 大气科学, 34 (3): 653–660. Zhang Yu, Guo Zhenhai, Zhang Wenyu, et al. 2010. Analysis of mesoscale numerical model's ability of atmospheric multi-scale characteristics simulation in variety resolution [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (3): 653–660.

中尺度模式不同分辨率下大气多尺度特征 模拟能力分析

张宇^{1, 2} 郭振海¹ 张文煜² 黄鹤³

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000

3 天津市气象科学研究所, 天津 300074

摘要 本文利用不同水平分辨率下的中尺度大气数值模式 ARPS (Advanced Regional Prediction System) 模拟我国内蒙古奈曼旗农牧交错带 2001 年 7 月 23 日 18 时至 27 日 18 时天气演变过程, 以研究中尺度模式水平分辨率提高对多种时空尺度天气过程, 尤其是更小时空尺度过程的模拟改进。为此, 本文提取不同分辨率下 u 、 v 、 w 、 θ 、 p 气象要素的模拟结果进行分析。秩和检验和方差分析表明, 模式分辨率提高对气象五要素的模拟具有一定的影响, 但对不同要素的影响程度有所不同, 其中, 对 p 、 θ 、 w 影响最大, 对 u 、 v 的影响次之, 对流层下部和边界层对分辨率最为敏感, 对流层中上部次之。谱分析和小波分析都表明分辨率的提高有利于再现大气运动的多尺度特征, 但在不同大气分层和不同模式变量中又有所不同。总的来说, 高层效果好于低层, 具有强周期变化规律的变量效果好于周期性弱的变量。

关键词 ARPS 分辨率提高 统计分析 谱分析 小波分析

文章编号 1006-9895 (2010) 03-0653-08

中图分类号 P435

文献标识码 A

Analysis of Mesoscale Numerical Model's Ability in Atmospheric Multi-Scale Characteristics Simulation for Different Resolutions

ZHANG Yu^{1, 2}, GUO Zhenhai¹, ZHANG Wenyu², and HUANG He³

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 Key Laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000

3 Tianjin Institute of Meteorological Science, Tianjin 300074

Abstract This article simulated a weather developing process in the agro-pastoral transitional zone of Inner Mongolia from 1800 UTC 23 July to 1800 UTC 27 July, 2001 with mesoscale atmospheric numerical model ARPS (Advanced Regional Prediction System). To understand the change of mesoscale numerical model's ability in atmospheric multi-scale movement simulation, especially for smaller space-time scale motion at different model resolutions, the authors analyzed simulation results of u , v , w , θ , p for different model resolutions. The rank sum test and Analysis

收稿日期 2009-05-26, 2009-11-18 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421402

作者简介 张宇, 男, 1984 年出生, 硕士研究生, 主要从事大气边界层观测分析和数值模拟。E-mail: zhyu07@lzu.cn

通讯作者 郭振海, E-mail: gzh@mail.iap.ac.cn

of variance (ANOVA) show that the model resolution improvement can affect the five variables' simulation to different extents. The impact on p , θ and w is the greatest, the impact on u and v takes second place. The lower troposphere and the boundary layer are the most sensitive to the resolution, followed by the upper troposphere. The spectrum analysis and wavelet analysis show that enhancing resolution can improve the model's ability in the atmospheric multi-scale characteristics simulation and the improvement is different for different atmospheric layers and meteorological elements. In general, the simulation effect in upper layers is better than in lower layers, and the simulation effect of variables with strong cycle signals is better than that with weak cycle signals.

Key words ARPS, resolution improvement, statistical analysis, spectrum analysis, wavelet analysis

1 引言

中尺度数值模式水平分辨率是影响其计算结果的主要因素之一(欧洲中心, 1987), 从最初的几十公里到现今的十公里经过了几十年的发展(Mass and Kuo, 1998), 模拟结果也得到了极大的改进。目前, 计算机技术飞速发展, 使得利用更高水平分辨率的中尺度数值模式预报或研究成为了可能。尽管不乏对水平分辨率提高引起的数值模式模拟结果的改进研究尝试, 但是, 到目前为止, 仍然缺乏对这种改进的客观评估方法。

20 世纪末以来, 对分辨率提高引起的中尺度模式模拟结果改进进行了一些研究尝试, 这些研究主要是通过对不同水平分辨率的大尺度平均气象要素的变化来进行研究。例如, Nakamura (1978) 在理想地形下研究了分辨率的不同造成的模拟结果差异; Rosenthal (1978) 和 Yamasaki (1975) 曾就模式水平分辨率对热带风暴及积云对流参数化的影响进行过讨论; 纪立人等 (2005) 和周祖刚等 (1999) 研究了采用 T-F 类坐标系的数值模式中不同水平分辨率下地形精细度对模拟结果的影响。这些研究均表明分辨率的提高明显改善了模拟结果, 但也有研究得出了不同的结果。例如, (Anthes et al., 1983) 在对一个温带气旋个例的模拟中发现, 单纯提高水平分辨率对模拟效果的改善只起到了微乎其微的作用; 廖洞贤 (1996) 则认为在初始资料不变的情况下, 分辨率的提高不一定能改进模拟结果。这些研究均针对模拟结果在宏观上的变化, 不能反映分辨率提高对模式在各个大气尺度细节模拟能力上的影响。

大气运动本质上是多种时空尺度运动相互作用的结果 (Vinnichenko, 1970), 水平分辨率的提高必然引起对这些时空尺度过程模拟能力的变化, 较高水平分辨率的模式对相应时空尺度系统的模拟可

能更准确, 谱分析和小波分析是进行这方面研究的理想方法(魏凤英和朱福康, 2003; 全利红等, 2007)。因此, 利用大气运动不同时空尺度过程非线性相互作用结果的特性, 通过谱分析和小波分析方法研究不同分辨率条件下不同时空尺度的大气运动特征, 来分析水平分辨率提高对数值模式模拟结果的影响是可行的。为此, 本文利用 ARPS 中尺度气象模式进行不同分辨率下的数值模拟, 通过对不同点和不同高度上模式变量时间序列的谱分析和小波分析, 研究分辨率提高对不同尺度大气运动过程的影响。

2 试验设计

2.1 模式简介

本文选用的中尺度气象模式是由美国 Oklahoma 大学的风暴预报中心 (CAPS) 在美国国家科学基金会和联邦航空管理局联合资助下开发的 ARPS (Advanced Regional Prediction System), 是非静力平衡的三维动力学气象预报模式, 适用范围较广。该模式使用 T-F 类追随地形的坐标系统, 水平方向为等间距网格, 垂直方向采用可变格距网格系统。模式将风矢量分量和各状态分量表示成基态值(平均值)和扰动量的和, 并求解完整的动力学和热力学方程组 (Xue et al., 2000)。该模式是中尺度气象预报或研究的常用模式, 具有很好的模拟能力 (Xue et al., 2003)。

2.2 模拟方案

本次试验对我国内蒙古奈曼旗农牧交错带 2001 年 7 月 23 日 18 时至 27 日 18 时 (国际标准时, 下同) 天气演变过程进行模拟。该地区位于我国半干旱与半湿润区的交接地带, 具有典型的干旱半干旱区下垫面特征和特殊的气候特征。对该地区进行气象和环境方面的研究有助于认识干旱半干旱气候的形成和变化机理, 对于改进数值模式, 提高

气候预测能力都有重要的意义。夏季是植被生长比较旺盛的季节, 下垫面植被分布能够呈现出较大的差异, 此时天气活动也比较频繁。本次研究的时间段中存在一个较强的降水过程, 选取这个时间进行研究应具有一定的代表性。此外, 2001年7月和8月在该地区进行了国家973研究计划“我国未来生存环境演变和北方干旱化趋势预测研究”大气边界层观测试验(赵海英等, 2006), 选取该时间段和地区进行研究也是为利用试验观测资料进行下一步的对比研究打下基础。

模拟采用54、35、25、18、15、12、9、6、3 km水平分辨率九重嵌套的模拟方案, 其对应的时间积分步长分别为60、40、25、20、15、12、10、8、4 s。其中, 54 km分辨率的初始场和边界条件由NCEP $1^\circ \times 1^\circ$ 分析资料提供, 35 km分辨率的初始场和边界条件由54 km的模拟结果提供, 依次高一级分辨率的初始场和边界条件都由低一级分辨率的模拟结果提供。各分辨率下垂直方向都分为60层, 且平均层间距为200 m。九个分辨率下模式的模拟区域中心都为(42.5°N, 119.5°E), 这样可以保证所有分辨率下(42.5°N, 119.5°E)都在网格点上, 方便其后对这一点上的模拟结果进行对比分析。所有分辨率都采用相同的微物理方案(6-category water/ice microphysics of Lin. et al)、积云对流参数化方案(new Kain-Fritsch scheme)、边界层方案(1.5-order TKE closure)和土壤方案(5-layer OUSoil scheme)。

表1 对流层分层方案

Table 1 Hierarchical scheme in the troposphere

	对流层		对流层	对流层	
	近地层	边界层	下部	中部	上部
模式分层	1	2~16	17~28	29~44	45~60
距地表高度/km	<0.01	0.01~1.5	1.7~3.7	3.9~6.9	7.1~12.0

表2 秩和检验结果

Table 2 The result of rank sum test

	水平分辨率								
	3 km	6 km	9 km	12 km	15 km	18 km	25 km	35 km	54 km
近地层	0.9871	0.9858	0.9876	0.9920	0.9926	0.9877	0.9865	0.9851	0.9852
边界层	0.9831	0.9866	0.9878	0.9876	0.9839	0.9864	0.9824	0.9789	0.9799
对流层下部	0.9267	0.9784	0.9768	0.9726	0.9696	0.9740	0.9769	0.9686	0.9744
对流层中部	0.9838	0.9751	0.9814	0.9861	0.9859	0.9845	0.9808	0.9891	0.9854
对流层上部	0.9835	0.9725	0.9820	0.9899	0.9866	0.9903	0.9771	0.9897	0.9776

注: 表中数据为新旧数据序列相等概率。

本次模拟的大气顶在距地面12 km左右, 基本上涵盖了中纬度整个对流层高度。由于不同大气高度上的运动系统对天气演变所起的作用有很大差异, 其变化的物理影响因子也各有侧重, 因此为分别研究分辨率改变对不同高度上大气运动模拟的影响, 这里将整层大气分为5个部分讨论, 每部分数据为该部分所包含模式层的平均, 其与模式分层对应见表1。

3 对比分析

3.1 数据采集及统计检验

研究采用九个分辨率下(42.5°N, 119.5°E)上60层的 u 、 v 、 w 、 p 、 θ 这五个气象要素4天的时间序列, 每个时间序列的时间间隔为各自的积分时间步长。由于各个分辨率下的时间步长各不相同, 造成时间序列数据量也各有不同。为便于不同分辨率间的比较, 本次研究设定统一的时间间隔, 即各积分步长的最小公倍数, 将各时间序列采样至以最小公倍数为间隔的新序列, 然后分别对各分辨率下的新旧序列间进行统计分析和谱分析对比。在验证新旧序列间无显著差异后, 将新序列应用于下一步的研究。

下文采用Wilcoxon秩和检验(Gibbons, 1985)来对新旧序列进行检验, 并将在显著水平为0.05下的检验相等概率取五个变量检验结果的平均(结果见表2)。

由表2中数据可看出, 除水平分辨率为3 km时对流层下层新旧数据序列相等概率较低为0.9267外, 其余情况下概率都在0.95以上。秩和检验所得另一项检验显著结果都为0, 也即经过采样后的新数据序列与原数据序列无显著差别, 因此使用经过采样后的时间序列样本进行下一步的研究是可行的。

为分析分辨率的改变能否显著的影响模拟结果,对采样后具有同一时间间隔的新时间序列作单因素方差分析(ANOVA)。这里分辨率即为影响模拟结果的因素,每个分辨率下每层的模拟结果为一组样本,比较在9个分辨率间进行,分析结果见表3。

表3中数据表明,在大多数情况下单纯改变分辨率对模拟结果是有很大影响的,即模拟结果相等概率接近0。但是对于对流层中的 u 、 v ,模式对分辨率的改变则表现得很不敏感,即相等概率接近于1,这在一定程度上反映了 u 、 v 对分辨率的不敏感性。但是经深入分析后又发现,在将参与比较的水平分辨率去掉相近的情况,即仅保留3、15、54 km后可发现相等概率有所降低,为0.4左右。这说明分辨率的改变对 u 、 v 仍有影响,但十分有限且远不如对另外三个模式变量的影响大。

表3 方差分析结果

Table 3 The result of analysis of variance (ANOVA)

	模式变量				
	u	v	w	p	θ
近地层	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
边界层	0.0000	0.0075	0.0000	0.0000	0.0000
对流层下部	0.0058	0.9839	0.0000	0.0000	0.0000
对流层中部	0.9989	0.9820	0.0000	0.0000	0.0000
对流层上部	0.7525	0.9989	0.0089	0.0000	0.0000

注:表中数据为不同分辨率下模拟结果相等的概率。

3.2 谱分析

由于实际大气运动无论在时间变化或空间变化上都存在各种尺度的波动现象,因此能否准确地模拟出这些不同尺度的波动也是考察数值模式质量的一个重要指标,而随着水平分辨率的提高,这种多尺度结构能否在模拟中得到再现或加强,也成为佐证分辨率对模式影响作用的重要因素。

下文首先采用功率谱估计的方法(Kutzbach and Bryson, 1974)对样本序列进行分析,以得到模拟结果多尺度结构的整体特征。在得到功率谱后进一步用红色噪声谱(Gilman et al., 1963)为期望谱进行显著性检验,并认为大于期望谱的功率谱峰值是可信的,其代表的相应时间尺度也是存在的(图1)。

图1列举了近地层 u 在3 km、15 km、54 km分辨率下模拟数据谱分析的结果,从中可初步得出三个特征。第一,随着分辨率的提高,能够满足可信检验的红色噪音期望谱越来越强,也即样本序列功率谱越来越难以通过显著性检验。图1中54 km和15 km分辨率下的功率谱绝大部分都通过了显著性检验,而3 km下的功率谱只有部分通过检验。第二,分辨率的提高确实能影响模式结果中的多尺度结构特征,但是这种影响并不稳定。图1中54 km分辨率下几乎看不到显著的多尺度特征表现,即局部极值,而在15 km分辨率下周期为360分钟处却出现了一个较为显著的时间尺度特征,这意味着在15 km分辨率下模拟出了周期为6小时的中

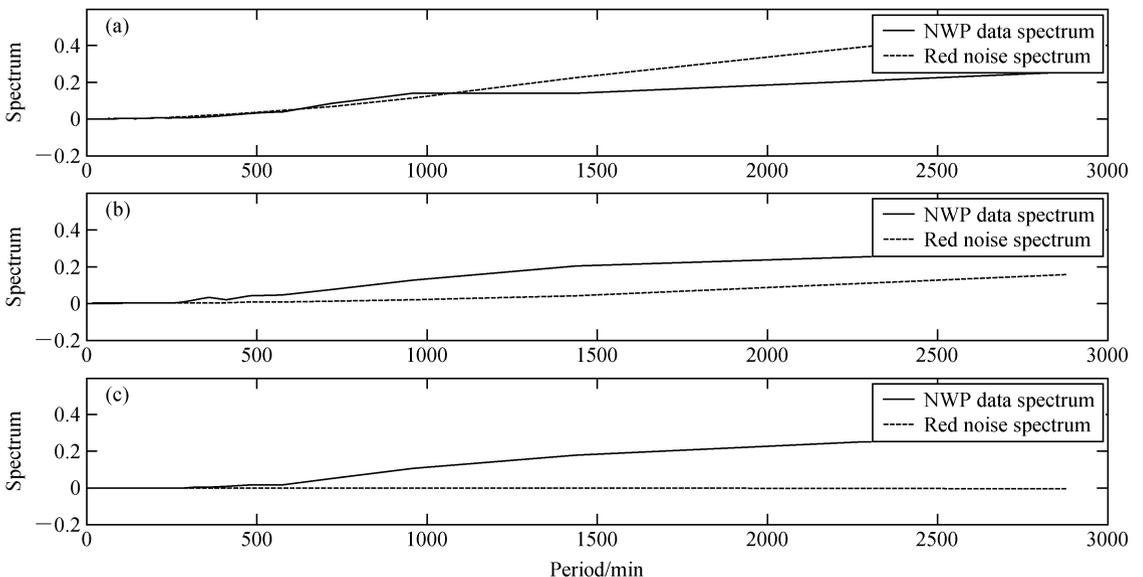


图1 近地层 u 在不同分辨率下的功率谱及其显著性检验:(a) 3 km;(b) 15 km;(c) 54 km

Fig. 1 Power spectrum and significance test of u in the surface layer: (a) 3 km; (b) 15 km; (c) 54 km

表 4 u 在不同大气分层中不同分辨率下功率谱的最小周期 (单位: min)Table 4 The least period by power spectrum analysis of u for different resolutions (units: min)

	水平分辨率								
	3 km	6 km	9 km	12 km	15 km	18 km	25 km	35 km	54 km
近地层	47.21	80.00	96.00	102.85	110.76	130.90	205.71	205.71	288.00
边界层	80.00	110.76	160.00	120.00	130.90	144.00	205.71	205.71	130.90
对流层下部	60.00	96.00	96.00	160.00	144.00	205.71	205.71	240.00	360.00
对流层中部	720.00	720.00	720.00	720.00	720.00	720.00	720.00	720.00	720.00
对流层上部	480.00	480.00	720.00	720.00	480.00	480.00	720.00	720.00	720.00

尺度运动。但在 3 km 分辨率下这个时间尺度特征又消失了, 这时又在周期为 960 分钟处出现了一个较显著极值, 反映了周期为 16 小时左右的中尺度运动。第三, 随着分辨率的提高, 功率谱所能反映的最小尺度不断变小, 即分辨率越高其再现的小尺度大气运动的能力越强。定义功率谱值第一次出现 10^{-4} 量级以下值对应的周期为可模拟出的最小周期, 即为当前分辨率下的多尺度模拟极限。以 u 为例, 其在不同大气分层中不同分辨率下功率谱最小周期见表 4。

由表 4 中数据可得, 对于 u 在对流层中部和上部, 功率谱可识别的最小周期基本上没有太大的变化。这与上文统计分析所得的 u 模拟在对流层中上部基本上不受分辨率影响的结论是一致的。值得注意的是, 35 km 和 25 km 模拟结果在从 54 km 到 18 km 分辨率的过渡中无显著变化, 在边界层的表现甚至不如 54 km, 在 9 km 分辨率上也存在类似的现象。这在一定程度上说明存在一些冗余分辨率, 这些分辨率下的模拟效果不会比低于它的分辨率好, 也暗示了在模式嵌套时存在最佳的分辨率嵌套组合使得模拟结果随着分辨率的提高而得到最快的提升。对其它模式变量的谱分析也体现出了类似的特征, 限于篇幅原因, 此处不一一列图表详细说明。

3.3 小波分析

小波分析是最近三十年来应用数学领域的一大突破, 被誉为“数学显微镜”, 在许多领域里都有广泛的应用。小波变换可以将时间信号按尺度不同展开为小波函数族的线性叠加, (Argoul et al, 1989) 在 1989 年第一次将其引入湍流分析, 并通过 Mexican hat 小波对大气信号的分解证明了小波分析在大气科学中应用的可行性。同谱分析相比, 小波分析不仅能分析出大气运动的多尺度特征, 而且能够

再现这些不同尺度的信号随时间的演变, 这一点对深入分析不同尺度大气运动的时空演变特征具有重要的意义。

本文采用四阶 Daubechies 小波对模拟结果作 7 层分解 (Cohen and Ryan, 1995; Torrence and Compo, 1998) 以重构天气演变中不同尺度的信号。为便于不同变量间相互对比并考察模式整体性能, 本次研究对不同分辨率下每个模式变量的时间序列进行小波分解和重构。7 层分解重构得到的细节系数 d 分别对应 20 分钟 (第 1 层, $2^1 \times 10$ min)、40 分钟 (第 2 层, $2^2 \times 10$ min) ……1280 分钟 (第 7 层, $2^7 \times 10$ min) 时间尺度的信号, 而重构得到的近似系数 a 则为剔除相应细节系数成分后信号的剩余部分。这里仍以 u 在近地层 3 km 分辨率下的模拟结果为例进行分析说明。

由图 2 可看出, 从近似系数 a_3 到 a_7 , 数据序列的波形都发生了较大的变化, 说明其对应的细节系数 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 在原始序列中占有较为重要的地位。但 a_7 相对于原始数据序列已经失真, 因此将其对应的 d_7 剔除分析范围。 a_1 和 a_2 的波形相对于原始序列变化不大, 其对应的细节系数 d_1 和 d_2 主要是一些高频突变信息和振幅较低的噪音信息, 而这些信息在原始信号中所占比例很小, 这也是 a_1 和 a_2 区别不大的原因。

由图可知, 在原始信号中占有重要地位的 d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 具有较稳定的波形和较大的振幅, 这其中尤以 d_4 和 d_5 最为显著, 而 d_3 的振幅相对较弱, d_6 仍以反映突变的成分为主。由此可以得出, 原始序列中存在以 d_4 和 d_5 代表的 160 分钟和 320 分钟为周期的尺度特征。这两个尺度特征在谱分析中虽有体现但却十分微弱, 而谱分析中较为显著的周期为 960 分钟的时间尺度在小波分析中也有体现 (d_7), 但将其剔除后却会引起原始序列较大失真。

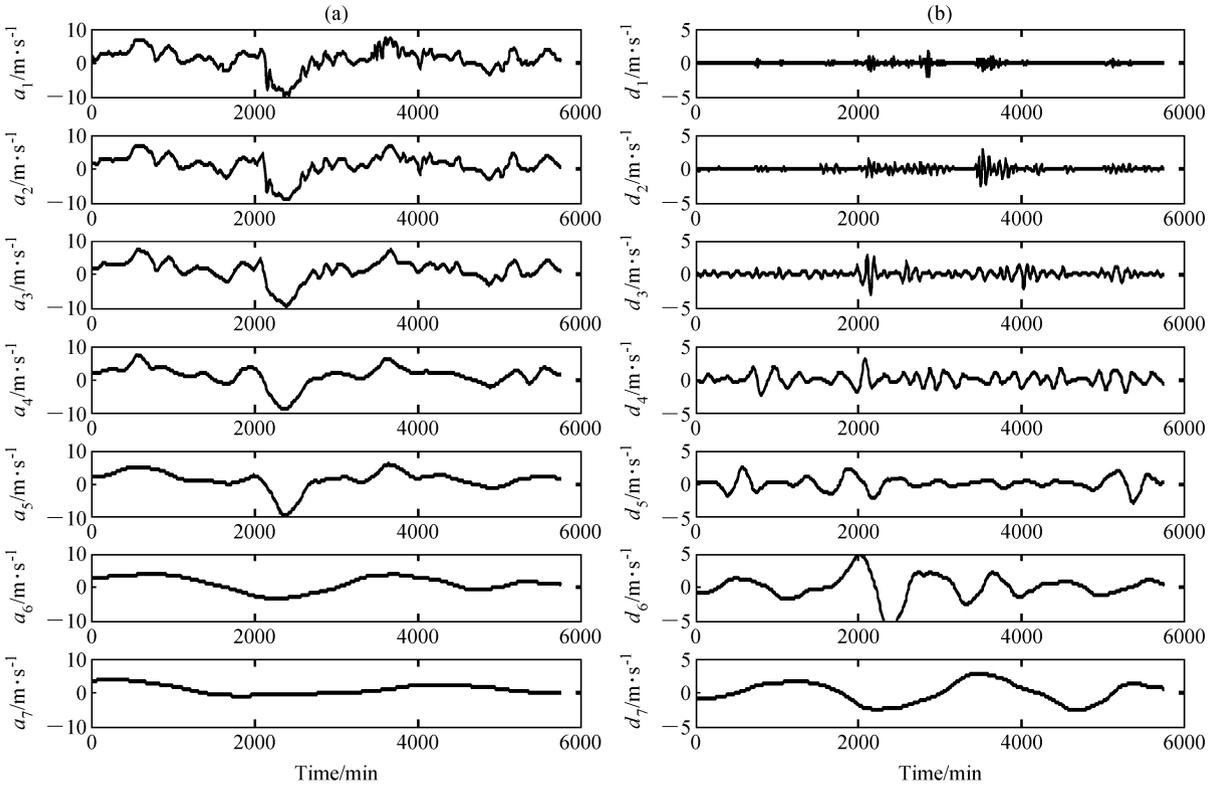


图2 近地层 u 在 3 km 分辨率下的四阶 Daubechies 小波分析: (a) 近似系数; (b) 细节系数

Fig. 2 Wavelet analysis with fourth order Daubechies wavelet of u at a resolution of 3 km in the surface layer: (a) Approximate coefficients; (b) detail coefficients

这一点说明这个时间尺度有可能是作为更大时间尺度的一个延伸而非一个独立的尺度存在,限于样本的时间长度这里无法完整再现该尺度。

本文以 u 在各分辨率下的数据为例做小波分解重构(图3)。由分析图可看出,在近地层、边界层、对流层下部,该细节系数振幅随分辨率的提高不断增大,这意味着其代表的尺度特征在模拟结果中也不断得到加强。但对流层中部却没有体现出这一点,仅在 6 km 和 3 km 分辨率下出现了较大的改变。这与之前统计分析的结论是一致的,不过与之前分析得出 35 km 和 25 km 分辨率模拟结果无显著变化的结论不同的是,小波分析显示这两个分辨率下细节系数的振幅虽然变化不大但波形确有较显著的改变。另外,小波分析显示不同分辨率下细节系数体现的大气运动突变,即局部振幅极大值在位置和强度上也有所不同。这一点在图3中并未显现出明显的规律,反映大气运动突变的振幅极大值有可能突然出现,如图3d中 3 km 分辨率细节系数所示,这可能意味着该分辨率下模式模拟出了新的天

气系统。有时突变在低一级的分辨率中有所体现,而在高一级的分辨率中消失,然后在更高一级的分辨率中又重新出现。如图3c中 18 km、15 km 和 12 km 分辨率细节系数所示,这可能意味着分辨率不同时模式对特定天气系统的尺度特征模拟能力也有所不同。不过,出现较多的情况是低分辨率下出现的突变现象在高分辨率只是表现为一种常态存在,或者类似的突变越来越多,这也说明随着分辨率的提高能够模拟的大气运动越来越复杂。

为更全面地了解不同模式变量对分辨率的敏感性,这里再以气压(p)为例进行分析(图4)。图中所示为细节系数 d_4 ,它代表了 160 分钟左右的时间尺度特征,接近气象分析中 3 小时变压的尺度特征。由图可看出,这一尺度下细节系数在各分辨率间过渡较为自然突变不多,在其他细节系数中也是如此(图略),这可能和气压本身具有较强的周期变化规律有关。结合 u 和 p 的小波分析结果可得出它们细节系数的振幅从大气底层到高层都成逐渐减弱的趋势,一定程度上说明了大气运动从高空到

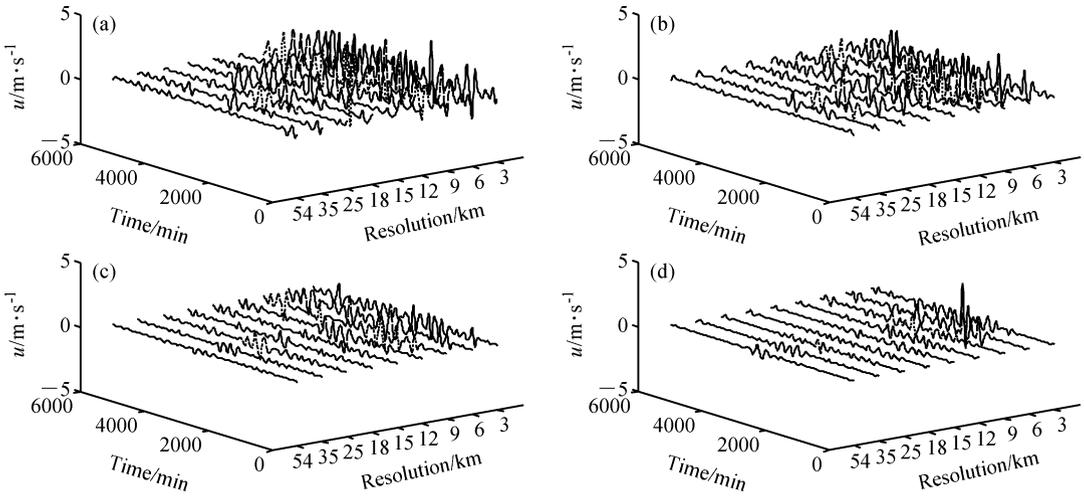


图 3 u 在不同分辨率下小波分析细节系数 (d_4): (a) 近地层; (b) 边界层; (c) 对流层下部; (d) 对流层中部

Fig. 3 The detail coefficients of wavelet analysis of u at different resolutions with fourth order Daubechies wavelet analysis; (a) The surface layer; (b) the boundary layer; (c) the lower troposphere; (d) the middle troposphere

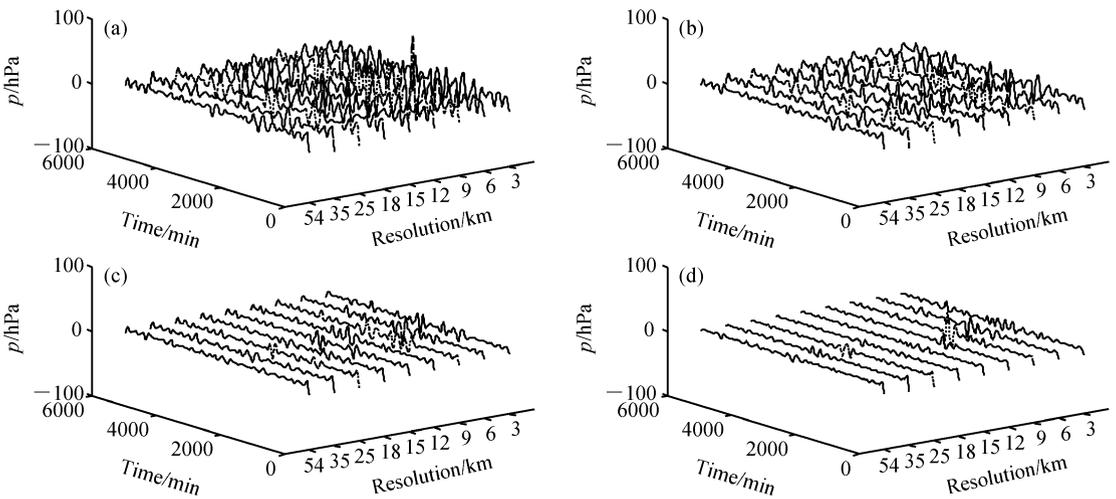


图 4 同图 3, 但为气压

Fig. 4 The same as Fig. 3, but for the pressure

地面表现的越来越复杂。 u 的细节系数在底层大气中表现出近似随机的波动, 说明越靠近大气底层模式的模拟结果越不稳定, 模拟难度也越来越大。其它模式变量所得的小波分析结果和以上两者具有相似之处, 限于篇幅此处不再赘述。

4 结论

通过以上对比分析, 可得出以下几个结论:

(1) 模式水平分辨率的改变能对模拟结果产生统计上可信的影响, 这种影响在不同模式变量和大气分层中强弱有所不同。就本例来说, 对 w 、 p 、 θ

的影响要大于其它模式变量, 对于 u 、 v 在对流层下部和大气底层中的影响要大于对流层中上部。分辨率的不断提高对模拟结果没有稳定的影响, 存在一些对模拟影响不显著的冗余分辨率。

(2) 谱分析表明, 随着分辨率的提高模式体现的多尺度特征可信度逐步降低, 并且这种多尺度结构特征随分辨率的改变没有明显的规律可循。不过谱分析的结果也说明随着分辨率的提高, 数值模式越来越能够模拟更小尺度上的大气运动, 虽然模拟的可信度有待提高。

(3) 小波分析的结果揭示出数值模式不仅能模

拟出大气运动的多尺度特征, 而且还能模拟出不同尺度上的大气运动突变。但这种能力随分辨率的改变表现的并不稳定, 这对通过提高分辨率来改善模式性能是不利的。其次, 小波分析的结果反映了这种不稳定性随着模拟大气高度的降低而增加, 即目前中尺度数值模式对大气底层的模拟能力要比对自由大气的模拟能力差。另外, 分析结果也表明在大气底层中, 中尺度模式水平分辨率的提高对于改善如气压, 温度之类具有较强周期变化规律的模式变量的模拟效果要好于风速等周期变化不明显的变量。这些结论同时也说明, 中尺度数值模式中边界层部分仍是比较薄弱的一环, 单纯的提升水平分辨率对改善大气边界层模拟效果的作用有限。

参考文献 (References)

- Argoul F, Arnéodo A, Grasseau G, et al. 1989. Wavelet analysis of turbulence reveals the multifractal nature of the Richardson cascade [J]. *Nature*, 338: 51–53.
- Anthes R A, Ying-Hwa K, Gyakum J R. 1983. Numerical simulations of a case of explosive marine cyclogenesis [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 111: 1174–1188.
- Cohen A, Ryan R D. 1995. *Wavelets and Multiscale Signal Processing* [M]. London: Chapman and Hall.
- Gibbons J D. 1985. *Nonparametric Statistical Inference* [M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker.
- Gilman D L, Fuglister F J, Mitchell J M Jr. 1963. On the power spectrum of “red noise” [J]. *J. Atmos. Sci.*, 20: 182–184.
- Hogg R V, Ledolter J. 1987. *Engineering Statistics* [M]. New York: MacMillan.
- 纪立人, 陈嘉滨, 张道民, 等. 2005. 数值预报模式动力框架发展的若干问题综述 [J]. *大气科学*, 29 (1): 120–130. Ji Liren, Chen Jiabin, Zhang Daomin, et al. 2005. Review of some numerical aspects of the dynamic framework of NWP model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 29 (1): 120–130.
- Kutzbach J E, Bryson R A. 1974. Variance spectrum of Holocene climatic fluctuations in the North Atlantic sector [J]. *J. Atmos. Sci.*, 31: 1958–1963.
- 廖洞贤. 1996. 论当前大气动力模式中存在的若干问题 [J]. *应用气象学报*, 7 (2): 238–245. Liao Dongxian. 1996. The discussion of some problems existing in current atmospheric dynamic models [J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 7 (2): 238–245.
- Mass C F, Kuo Y H. 1998. Regional real-time numerical weather prediction: Current status and future potential [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79: 253–263.
- Nakamura Hajime. 1978. Dynamical effects of mountains on the general circulation of the atmosphere [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 56: 317–367.
- 欧洲中期天气预报中心. 1987. 中期天气预报科学基础 (中译本) [M]. 北京: 气象出版社, 169–171. ECMWF. 1987. *Scientific Foundation of Medium Range Weather Forecasts (Chinese translation)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 169–171.
- Rosenthal S L. 1978. Numerical simulation of tropical cyclone development with latent heat release by resolvable scales I: Model description and preliminary results [J]. *J. Atmos. Sci.*, 35: 258–271.
- 全利红, 胡非, 程雪玲. 2007. 用小波系数谱方法分析湍流湿度脉动的相干结构 [J]. *大气科学*, 31 (1): 57–63. Quan Lihong, Hu Fei, Cheng Xueling. 2007. Analysing coherent structures of humidity time series by the spectral analysis of the wavelet transform coefficients [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 31 (1): 57–63.
- Torrence C, Compo G P. 1998. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 79 (1): 61–78.
- Vinnichenko N K. 1970. The kinetic energy spectrum in the free atmosphere—1 second to 5 years [J]. *Tellus (Ser. A)*, 22: 158–166.
- 魏凤英, 朱福康. 2003. 一种分离暴雨过程天气尺度和次天气尺度特征的方法 [J]. *大气科学*, 27 (2): 191–203. Wei Fengying, Zhu Fukang. 2003. A method based on singular spectrum for separating synoptic scale and subsynoptic scale features of meteorological field [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 27 (2): 191–203.
- Xue M, Droegemeier K K, Wong V, et al. 2000. The advanced regional prediction system (ARPS)—A multiscale nonhydrostatic atmospheric simulation and prediction tool. Part I: Model dynamics and verification [J]. *Meteor. Atmos. Physics*, 75: 161–193.
- Xue M., Wang D H, Gao J D, et al. 2003. The advanced regional prediction system (ARPS), storm-scale numerical weather prediction and data assimilation [J]. *Meteor. Atmos. Physics*, 82: 139–170.
- Yamasaki M. 1975. A numerical experiment of the interaction between cumulus convection and large scale motion [J]. *Pap. Met. Geophys.*, 26: 63–91.
- 赵海英, 郭振海, 张宏昇, 等. 2006. 农牧交错带陆面过程的数值模拟研究 [J]. *气候与环境研究*, 11 (4): 535–545. Zhao Haiying, Guo Zhenhai, Zhang Hongsheng, et al. 2006. Numerical simulation research of land surface process in the region between cropland and pasture [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 11 (4): 535–545.
- 周祖刚, 张维桓, 郝为锋, 等. 1999. 高分辨率 η 模式的数值试验 [J]. *大气科学*, 23 (5): 597–604. Zhou Zugang, Zhang Weihuan, Hao Weifeng, et al. 1999. A numerical experiment with the higher resolution η -coordinate model [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 23 (5): 597–604.