

模式水平分辨率影响积云对流 参数化效果的数值试验

周天军 钱永甫

(南京大学大气科学系, 江苏省南京市 210093)

摘要 利用一个有限区域嵌套细网格数值预报模式, 设计了 3 种不同分辨率的模式网格, 通过对一次降水过程的预报, 检验了模式水平分辨率对积云对流参数化效果的影响。结果表明: 模式水平分辨率的变化将直接影响到积云对流参数化的效果, 从而影响降水场和形势场。文中还讨论了积云对流参数化的作用, 发现当模式水平分辨率较粗时, 模式中有无积云对流过程对形势场预报结果的影响无明显规律可循, 但是当模式水平分辨率提高到一定程度时(高于 1.0°), 引入积云对流过程, 将使在低层大气预报的高度场与实际场的相关系数明显提高, 在高层则有所降低。

关键词 水平分辨率 积云对流参数化

中图法分类号 P435

大气中的凝结现象可以分为由大尺度上升运动产生的和由对流作用产生的两种。目前, 预报对流性降水有两种方法: 一是对流调整; 二是积云对流参数化, 即将大气中的凝结作为一种次网格过程使用参数化方法进行计算。在模式中用格点变量计算次网格积云总效果的参数化方法最初是在热带气旋发展的研究中提出的^[1-2], 之后该方法被推广到温带地区, 现已广泛地运用于各种数值模式中。

积云对流参数化方法的实质是由格点或可分辨尺度气象场反映网格空间中次网格积云对流的总效果。当水平分辨率提高时, 原来所要考虑的次网格过程将部分地被格点尺度过程所包含, 水平分辨率提高越大, 可分辨尺度的潜热释放相对于次网格积云对流潜热释放的作用也将越大。因此, 模式水平分辨率的改变必将直接影响到次网格积云对流参数化的效果。为评估这种影响的大小, 有必要就积云对流参数化对模式水平分辨率的敏感性问题进行较为细致的探讨。Ro senthal 等^[3-6]曾就模式水平分辨率对预报质量特别是环流形势预报的影响进行过讨论, 相比之下, 关于模式水平分辨率影响积云对流参数化效果的工作还做得不太多。

1995 年 5 月 2 日收到, 7 月 17 日收到修改稿

第一作者简介: 周天军, 男, 25 岁, 硕士, 毕业于南京大学大气科学系。现在工作单位: 中国气象局总体规划研究设计室, 北京, 100081

本文利用一个物理过程比较完善的有限区域嵌套细网格数值预报模式, 设计了 3 种不同分辨率的模式网格, 通过对一次实际降水过程的预报, 分析讨论了模式水平分辨率对积云对流参数化效果的影响。

1 模式简介

本研究所用的模式是在钱永甫等设计的 p - σ 混合坐标系原始方程模式的基础上发展的有限区域单向影响嵌套细网格数值预报模式, 大气模式分为 5 层, 在 400hPa 以上采用 p 坐标系, 400hPa 以下采用 σ 坐标系。有关大气模式的详细情况见文献 [7]。

模式中的土壤或海洋分为表层和深层, 海洋未考虑水流的动力作用。由热量和水分守恒原理, 可推得两层土壤或海水中的平均温度预报方程及土壤的湿度预报方程。具体过程详见文献 [8, 9]。

侧边界采用 Perkey 和 Kreitzberg^[10] 提出的单向影响嵌套倾向订正方案。

模式物理过程包括水汽饱和所引起的大尺度凝结以及条件性不稳定所产生的积云对流凝结所释放的潜热、太阳短波辐射、地气系统长波辐射、地面摩擦和大气内部湍流交换作用等。地形的热力作用以及不同物理特性下垫面所产生的影响均包含在模式中。模式积云对流参数化方案采用修正的郭氏方案^[11]。

2 个例选取与试验方案

选取的个例是 1983 年 7 月 23—25 日的一次降水过程。在地面天气图上^[12], 由 23 日 08:00 (北京时, 下同) 至 24 日 08:00, 从我国云南沿贵阳、长沙至胶东半岛南缘有一西南—东北向的大范围带状降水区域, 降水中心在阜阳、连云港直至东海一线, 24h 降水中心值为 69mm, 贵阳附近暴雨中心 24h 总降水量达 98mm。

本文设计了 3 种不同分辨率的模式网格, 它们分别为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$; $1.0^\circ \times 1.0^\circ$; $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 。受计算机条件所限, 当模式水平分辨率提高时, 模式区域相应缩小, 但均覆盖了我们所研究的主要降水区域。3 种分辨率的试验方案如表 1 所示。

表 1 数值试验方案

Table 1 The numerical experimental schemes

方 案	水平格距	模式区域	格点数	侧边界条件	时间步长	时间积分方案
LGL	$2.5^\circ \times 2.5^\circ$	$0^\circ - 45^\circ$ $80^\circ E - 160^\circ E$	33×19	倾向订正方案	6m in	3h 欧拉后差 3h 中央差交替
MGL	$1.0^\circ \times 1.0^\circ$	$5^\circ - 40^\circ$ $100^\circ E - 140^\circ E$	41×36	倾向订正方案	3m in	3h 欧拉后差 2h 中央差交替
SGL	$0.5^\circ \times 0.5^\circ$	$10^\circ - 40^\circ$ $105^\circ E - 135^\circ E$	61×61	倾向订正方案	2m in	3h 欧拉后差 2h 中央差交替

初始场用的是欧洲中心(ECMWF)的 7 层等压面资料, 大尺度倾向由 ECMWF 资料计算获得; 海温初始场利用月平均海温资料; 模式中采用真实地形资料。模式物理过程在有、无积云对流两种条件下, 3 种分辨率的试验均从 1983 年 7 月 23 日 20:00 起作了 48h 预报。

3 试验结果讨论

首先分析预报总降水量及积云对流性降水随模式水平分辨率的变化, 然后讨论有、无积云对流参数化过程时 3 种分辨率模式高度场的预报结果。图 1a, b, c 分别是 L GL, M GL, SGL 24h 预报的总降水量。比较图 1a, b, c 可见, 随着模式水平分辨率的提高, 总降水量的预报有明显变化。

对降水的落区与走向, L GL 中预报的 10 0mm 等值线所包含的雨区范围显然过大, 苏北雨区漏报, 日本海有大范围降水区域, 实际降水中的西南-东北向的带状结构没有反映出来; 在 M GL 中, 当模式水平分辨率达到 1.0 时, 出现了与实际雨区分布极为相近的西南至东北向的带状降水区域, 苏北雨区、鲁西雨区都预报得较为准确, 在 L GL 中日本海上的大范围雨区已经消失; 当模式水平分辨率进一步提高到 0.5 时, 如 SGL 的结果所示, 苏北雨区预报得更为详尽, 海南岛、福建省内的雨区预报得较为准确, 只是受模式区域所限, 雨区的带状结构已不明显。

在总降水量的预报上, 随着模式水平分辨率的提高, 总降水量有明显增大的趋势。以西南地区雨带为例, 当模式水平分辨率为 2.5 时, 中心降水量为 35.5mm, 当模式水平分辨率增至 1.0 时, 中心降水量增至 66.5mm, 并且出现一强度为 30.5mm 的次中心。但总降水量随模式水平分辨率提高而增大的趋势是有一定限度的, 当模式水平分辨率增至 0.5 时, 于 1.0 时的情况比较, 预报的降水量在苏北雨区变化不大, 中心降水为 56.9mm, 略少于 1.0 时的 57.4mm。

对降水中心的预报, 随着模式水平分辨率的提高, 可分辨的降水中心强度逐渐减少, 这在海南岛、福建雨区的预报上体现得较为明显。

为了客观地评价积云对流性降水对总降水量的贡献, 表 2 给出了 3 种分辨率模式预报的总降水中积云对流性降水所占的百分比。由于模式格点数不同, 我们不能比较随着模式水平分辨率的提高, 积云对流性降水在总降水中所占百分比的变化。但从表 2 可以很明显地看出, 在 3 种分辨率条件下, 决定模式预报总降水量的主要是积云对流性降水。因此, 对于本试验, 模式水平分辨率影响预报总降水的雨区分布、雨带走向、降水量及降水中心的可分辨尺度, 其实质是影响积云对流参数化的效果。

表 2 积云对流性降水在预报总降水中的百分比

Table 2 The percentage of cumulus convective precipitation to the forecasted total precipitation

试验方案	水平格距	24h 预报	48h 预报
L GL	2.5° × 2.5°	84.32%	80.73%
M GL	1.0° × 1.0°	88.83%	86.11%
SGL	0.5° × 0.5°	74.45%	71.21%

为了更明显地反映模式水平分辨率变化对积云对流参数化效果的影响, 图 2a, b, c 分别给出了 L GL, M GL, SGL 24h 预报的积云对流性总降水的分布。由图可见, 积

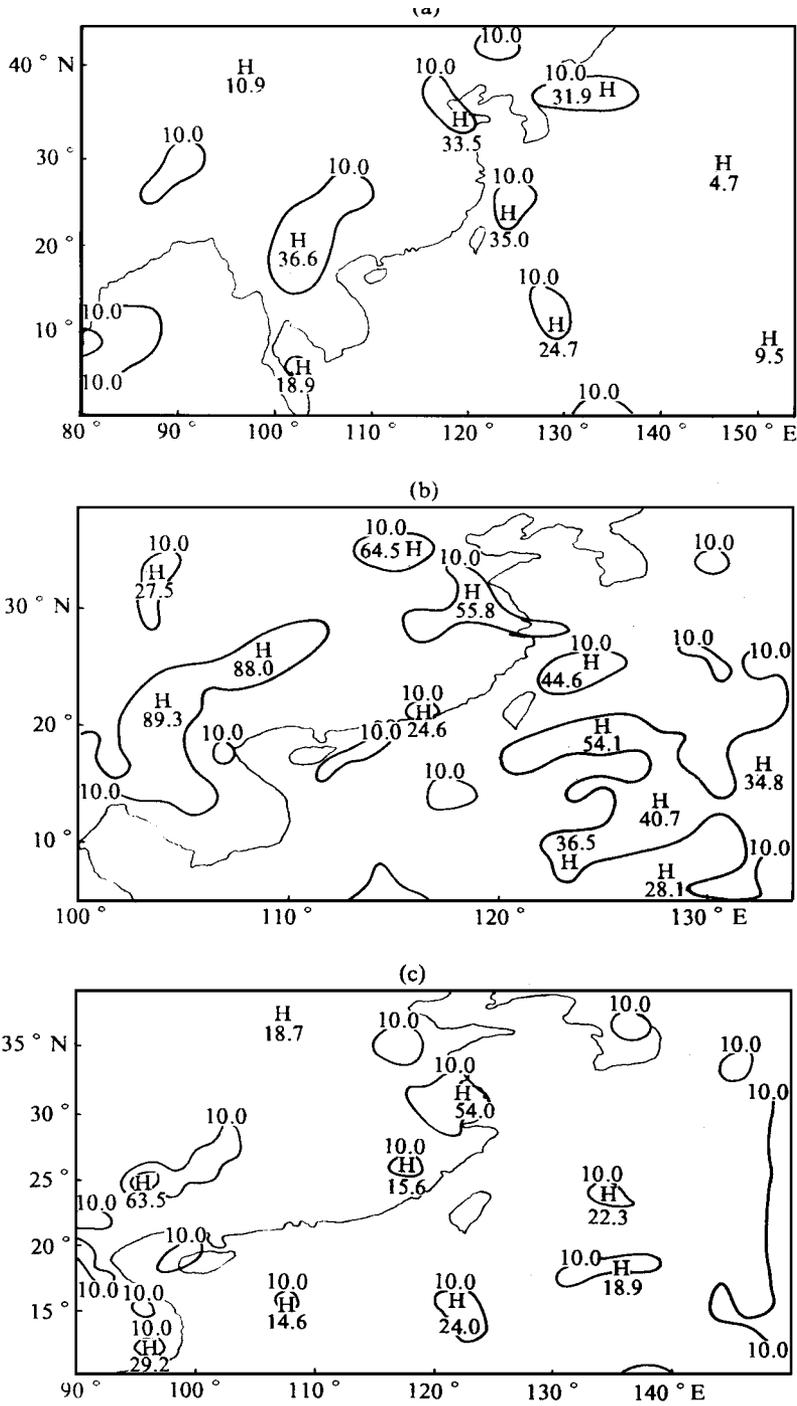


图 2 24h 预报的积云对流降水(单位: mm)

说明同图 1

Fig 2 The forecasted cumulus convective rainfall in 24h (unit:mm).

The illustration is the same as Fig. 1

云对流性总降水的雨区分布基本上与预报的总降水的分布一致, 这进一步验证了表 2 的结论, 同时也表明, 随着模式水平分辨率的提高, 积云对流参数化方案的效果是使预报的积云对流性降水呈明显增大的趋势。但是这种增大也有一定的限度, 对本文而言是 1.0° ; 即从 1.0° 到 0.5° (在赤道附近约为 45km) 降水量增大的趋势不再明显, 只是提高了雨区降水中心的可分辨尺度。

48h 预报的积云对流性降水(图略) 分布也有类似的结果。与 24h 预报的结果相比, 从 2.5° 到 1.0° ; 降水分布及雨带结构随模式水平分辨率的增加而日趋合理, 降水量明显增大的趋势更为显著。以西南的降水中心为例, 分辨率为 1.0° 时, 降雨中心强度为 185.0mm , 且出现一中心强度为 172.0mm 的次中心, 这较 2.5° 分辨率时的预报结果(104.0mm) 要大得多。但是, 模式水平分辨率提高到 0.5° 时, 在对部分雨区的预报有所改善, 降水中心可分辨尺度有所提高的同时, 部分雨区的降水中心强度不是增加而是有所减少, 如苏北雨区降水中心强度由 1.0° 时的 130.0mm 降至 110.0mm , 山西 57.7mm 的降水中心减至 42.0mm , 鲁西 111.0mm 的降水中心受模式区域所限已不再明显, 朝鲜半岛出现 122.0mm 的降水中心。

可见, 模式水平分辨率与积云对流参数化效果间的关系是复杂的, 关于积云对流参数化效果对模式水平分辨率的敏感性很难简单地地下结论, 尚需要做更为深入的探讨研究。积云对流参数化方案在原理上, 一方面要求网格要充分小, 以致对大尺度运动各种量的确定可考虑为一个单元; 另一方面, 它又要求网格要充分大, 使其内部可以包含大量的对流单元, 这本身就是一种矛盾的对立统一关系。在对积云内部云物理过程及其与大尺度环流间的相互作用尚未弄清楚之前, 很难对积云对流参数化的作用进行最终的评价。对此, Yamasaki^[13] 也曾有过相似的论述。尽管如此, 近年来随着国内(特别是业务单位) 计算能力的大幅度提高, 高分辨率模式的发展有了坚实的基础, 这使得深入探讨积云对流参数

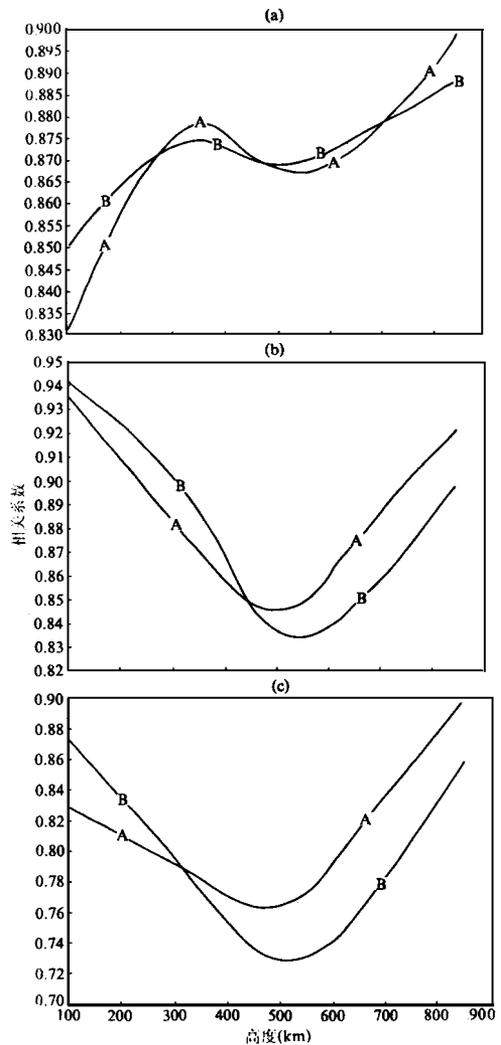


图 3 24h 预报高度场的相关系数
说明同图 1

Fig. 3 Correlation coefficients of the forecasted height field. The illustration is the same as Fig. 1.

化效果与模式水平分辨率间的关系,使其能在高分辨率模式中发挥更佳的作用成为可能。另一方面,为适应中尺度(特别是中 β - γ 尺度)数值预报业务发展的需求,目前,显式的降水处理方法已被提出并得到较快发展,但是从天气尺度到中 α 尺度的数值预报或数值模拟,在一个较长的时期内,尚难以找到一种可以完全取代参数化方法处理云物理过程的新方案,这使得在参数化方法方面的分析探讨仍需继续加强。

模式水平分辨率的改变将对积云对流参数化的效果产生直接影响,而对流性降水凝结潜热的释放必将部分地改变该地区大气层的温度场结构,从而对形势预报产生影响。为了检验这种影响的大小,我们对有、无积云对流参数化情况 24h 预报的高度场进行了相关性检验。图 3 是 24h 预报高度场同实际场(ECMWF 资料)的相关系数随高度的分布。其中图 3a, b, c 分别是 2.5°; 1.0°; 0.5°分辨率的结果, A 线为考虑了积云对流参数化的情况, B 线为未考虑积云对流参数化的结果。由图 3 可见,当模式水平分辨率较粗时,模式中引入积云对流过程对形势预报的影响较为复杂,表现在预报场与实际场的相关性上,部分层相关系数升高,而另一部分层相关系数又有所降低。但是,当模式水平分辨率提高到一定程度时(高于 1.0°),模式中引入积云对流过程将使低层大气预报的高度场与实际场的相关性明显提高,而在高层则相关性变差。

以上仅从积云对流参数化效果受水平分辨率影响的角度讨论了对形势预报产生的作用。关于水平分辨率对形势预报的直接影响,受篇幅和本文主题所限不再论及。不过,据 Robert 估计^[14],对于形势预报,在模式各因子引起的误差中,水平截断误差占 38%,稍高于次网格尺度物理过程引起的 34% 的比例。

应当指出,由于模式物理过程的复杂性,模式分辨率的改变对其它物理过程也会产生影响,因此,降水和形势场的改变是总体效应,但积云对流参数化的作用可能是主要的。

4 结 论

通过以上分析讨论可得到以下几点结论:

(1) 对于降水预报而言,简单地提高分辨率,在格距大于 100km 时效果是明显的,但格距小于 100km 时就不太明显,这表明并不是模式分辨率越高预报效果就越好,还应考虑各种物理过程参数化方案及相互作用。

(2) 模式水平分辨率的适度提高,明显地改善了对降水落区及雨带走向的预报,也使预报降水中心的可分辨尺度有所提高。对降水量的预报,随着水平分辨率的适度提高,积云对流性降水相应增多,总降水量随之增加,但是分辨率提高到一定程度之后,积云对流性降水不再随水平分辨率的提高而增大,相反部分地区则有所减少。因此,对模式水平分辨率影响积云对流参数化效果的内在机制,尚需深入探讨。

(3) 模式水平分辨率的改变,将通过影响积云对流参数化效果而间接地影响形势场的预报。当模式水平分辨率较粗时,模式中有、无积云对流过程对形势场预报结果的影响无明显规律可循。与不计积云对流过程的预报比较,考虑积云对流时,模式预报形势场与实际场的相关系数在一部分大气层上有所提高,而另一部分大气层上则有所降低。但是,当模式水平分辨率提高到一定程度时(高于 1.0°),模式中引入积云对流过

程, 将使低层大气的预报高度场与实际场的相关系数明显提高, 在高层则有所降低。

参考文献

- 1 Kuo H L. On formation and intensification of tropical cyclone through latent heat released by cumulus convection. *J Atmos Sci*, 1965, 22: 40—63
- 2 Kuo H L. Further studies of the parameterization of the influence of cumulus convection on large scale flow. *J Atmos Sci*, 1974, 31: 1232—1240
- 3 Rosenthal S L. Numerical simulation of tropical cyclone development with latent heat release by resolvable scales. I model description and preliminary results. *J Atmos Sci*, 1978, 35: 258—271
- 4 匡本贺, 冯光柳. 模式的水平分辨率对暴雨预报的影响. *大气科学*, 1989, 13(4): 497—501
- 5 姜达雍. 中期数值天气预报的问题和设想. *中期数值天气预报文集*. 北京: 气象出版社, 1982
- 6 吕世华, 钱永甫. 有地形数值模式中水平分辨率对预报质量的影响. *高原气象*, 1985, 4(1): 23—33
- 7 Qian Yongfu. A five-layer primitive equation model with topography. *高原气象*, 1985, 4(2, 增刊): 1—28
- 8 钱永甫. 地表热平衡温度的一种计算方法. *气象科学*, 1988, 8(3): 14—27
- 9 Qian Yongfu. Effects of different sea surface temperature over the western Pacific on summer monsoon properties. *Acta oceanologica sinica*, 1993, 12(4): 535—547
- 10 Perkey D J, C W Kreitzberg. A time-dependent lateral boundary scheme for limited area primitive equation model. *MWR*, 1976, 104: 744—755
- 11 钱永甫, 颜宏, 王谦谦等. 行星大气中地形效应的数值研究. 北京: 科学出版社, 1988. 63—68
- 12 中央气象台气象台. *历史天气图*. 1983
- 13 Yamasaki M. A numerical experiment of the interaction between cumulus convection and large scale motion. *Pap Meteor Geophys*, 1975, 26: 63—91
- 14 欧洲中期数值天气预报中心. *中期数值天气预报科学基础* (中译本). 北京: 气象出版社, 1987. 169—171

NUMERICAL EXPERIMENTS OF EFFECT OF MODEL HORIZONTAL RESOLUTION ON CUMULUS PARAMETERIZATION

Zhou Tianjun Qian Yongfu

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, Jiangsu 210093)

Abstract In this paper, an one-way nested limited area primitive equation model is used to study effects of horizontal resolution on cumulus parameterization. It is found that the change of horizontal resolution has notable effect on cumulus parameterization, and leads to the variation in the forecasted rain field and the synoptic situation. The role of cumulus parameterization in numerical model is also discussed. The results show that, when model horizontal grid length decreased to less than 1.0° , including the cumulus parameterization can increase remarkably correlation coefficient between the forecasted and the observed height field in the lower atmosphere layer, but it decrease evidently in the upper layer.

Key words Horizontal resolution Cumulus parameterization