

# 高分辨率数值预报模式的尺度自适应物理过程参数化研究

张旭<sup>1,2</sup> 黄伟<sup>1,2</sup> 陈葆德<sup>1,2</sup>

(1 中国气象局上海台风研究所, 上海200030; 2 区域高分辨率数值预报创新中心, 上海200030)

**摘要:** 随着高性能计算能力的提升, 数值天气预报模式的分辨率迅速提升。但由于对流、云和边界层过程参数化方案对于模式分辨率的高度依赖性, 直接或间接地提高模式分辨率会导致诸如“灰色尺度”等问题。“灰色尺度”问题将极大地限制数值天气预报模式在高分辨率条件下性能的提高, 甚至导致预报准确率下降, 这是高分辨率数值天气预报和气候模拟所面临重要的挑战之一。发展了适用于高分辨率的分辨率自适应的次网格混合(包括边界层混合)参数化方案和分辨率自适应的对流参数化方案, 为高分辨率业务天气预报模式提供物理过程方面的理论和实践基础。

**关键词:** 物理过程参数化, 尺度自适应, 灰色区域, 湍流, 对流

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2017.06.013

## A Study of the Scale-Aware Physical Parameterizations in High-Resolution Numerical Weather Prediction Models

Zhang Xu<sup>1,2</sup>, Huang Wei<sup>1,2</sup>, Chen Baode<sup>1,2</sup>

(1 Shanghai Typhoon Institute of CMA, Shanghai 200030

2 Innovative Center of Regional High Resolution NWP, Shanghai 200030)

**Abstract:** The resolution of numerical weather prediction models will continually increase with increasing computer power. Physical processes parameterizations associated with convection, cloud and planetary boundary layer (PBL) depend on the resolutions of model. These motions can be partially resolved by grid scale dynamics. However, a substantial part of turbulent motion still needs to be parameterized, which results in the so-called gray zone problem. The gray zone problem can hugely downgrade the forecast skill of the numerical prediction models. In this study, a scale-aware subgrid mixing (including turbulence in PBL) scheme and a scale-aware cumulus convection scheme are developed. The new schemes will adapt to the model grid size as it is varied through the gray zone. This study will provide theoretical and technical supports for the development of high-resolution numerical weather model and operational prediction.

**Keywords:** physical parameterizations, scale aware, gray zone, turbulence, convection

### 0 引言

随着高性能计算能力的提升, 数值天气预报模式的分辨率迅速提升, 目前许多数值天气预报中心的业务模式水平分辨率已达到2~10 km, 预计在未来几年内模式的水平分辨率可能达到1 km, 甚至1 km以下。在这一分辨率条件下, 深对流可部分地被模式分辨, 地形得以更好表达, 地面特征有了更多细节; 但同时需要在模式物理过程方面作更为深入的研究, 发展新的物理过程参数化方案。大气模式的高分辨率有助于解决一些参数化问题, 但同时也提出了很多挑

战, 例如分辨率在1 km以下时, 如何对“灰色区域”尺度的对流过程进行准确的表达。“灰色尺度”是指某一个分辨率区间, 在该区间内, 一些物理过程既不能完全地被显示表达, 又无法确定一个尺度阈值来区分可分辨尺度和参数化尺度, 以保证参数化的假定条件是合理的。类似地, 湍流与边界层过程也遇到“灰色区域”尺度的问题。模式物理过程中的这些问题将极大地限制数值天气预报模式在高分辨率条件下性能的提高, 甚至产生分辨率提高而预报准确率下降的后果, 这也是新一代数值预报所面临最重要的挑战之一。最近欧洲中期天气预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)的模式物理过程研讨会认为, 下一代数值预报模式的物理参数化过程(包括边界层和云物理的参数化)需要尽可

收稿日期: 2017年6月30日, 修回日期: 2017年10月27日

第一作者: 张旭(1983—), Email: zhangx@typhoon.org.cn

资助信息: 国家自然科学基金青年项目(41505087); 国家自然科学基金面上项目(41575101)

能和模式分辨率一致，物理过程在模式分辨率变化时能够适应其变化，因而被称为分辨率自适应（scale-aware）的模式物理过程。

本文针对高分辨率物理过程参数化，尤其是“灰色区域”尺度物理过程参数化，发展了适用于高分辨率的分辨率自适应的次网格混合（包括边界层混合）参数化方案和分辨率自适应的对流参数化方案，并充分考虑了各个物理过程之间的相互作用，为高分辨率业务天气预报模式提供物理过程方面的理论和实践基础。

## 1 分辨率自适应的次网格混合参数化研究

由引言可知，模式向高分辨率发展不仅对模式动力框架在计算上提出了更高的要求，而且需要在物理上对各种参数化方案进行重新思考与认识。其中以湍流与边界层过程为代表的高分辨率下次网格尺度混合的参数化问题是最重要的方面之一<sup>[1]</sup>。

从尺度与大气边界层（planetary boundary layer, PBL）高度相当的大涡，到尺度为毫米量级的可耗散湍流能量的涡动，大气湍流具有连续的、不同的空间尺度。而在数值模式中，需要给定网格格距，因此必须对连续的尺度进行截断。图1是大气运动的湍流能量谱，其中 $l$ 为含能湍流（energy-containing turbulence）的长度尺度，在深湿对流和对流边界层内， $l$ 约为 $1\text{km}$ <sup>[2]</sup>。

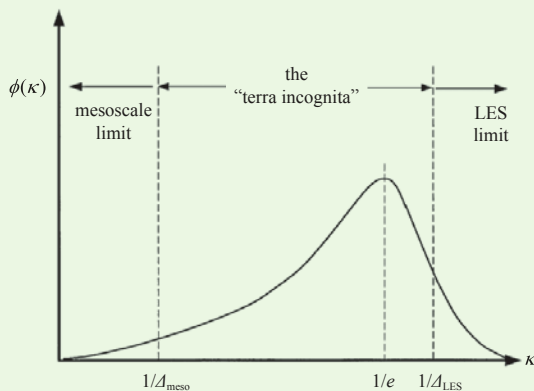


图1 大气运动的湍流能量谱 $\phi(\kappa)$

( $l$ 为含能湍流的长度尺度， $\Delta_{meso}$ 和 $\Delta_{LES}$ 分别为中尺度和大涡模式的网格格距， $\kappa$ 为波数；引自[5])

Fig. 1 A schematic of the turbulence spectrum  $\phi(\kappa)$  ( $\kappa$  is the horizontal wavenumber magnitude;  $l$  is the length scale of the energy-containing eddies;  $\Delta_{meso}$  and  $\Delta_{LES}$  are the grid sizes in the mesoscale model and LES, respectively. Adapted from [5])

当模式网格距 ( $\Delta$ ) 远大于含能湍流的长度尺度 ( $l$ ) 时 ( $\Delta \gg l$ )，例如传统的分辨率较粗的中尺度 (mesoscale) 数值预报模式 (水平分辨率  $10 \sim 100 \text{ km}$ )，通常可认为大气边界层内所有的湍流运动均为次网格尺度，需要对所有的湍流进行参数

化。网格内具有足够多的湍流统计样本，参数化需要表征的是湍流样本集合平均 (ensemble average) 的效应，网格空间内具有相同的统计特征，满足水平均一性条件 (horizontal homogeneity)，所以主要考虑垂直方向上的湍流混合作用，而忽略水平方向上的湍流混合。因此在中尺度模式中，通常使用只考虑垂直混合的一维PBL参数化方案来表征次网格湍流的作用，如局地Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) 方案<sup>[3]</sup>和非局地Yonsei University (YSU) 方案<sup>[4]</sup>。

当 $\Delta \gg l$ ，经常使用大涡模式 (large-eddy simulation, LES)。LES的网格距通常要求小于 $100\text{m}$  (位于惯性子区)，模式动力过程能够直接解析尺度较大的含能湍流，仅仅对小尺度涡动进行参数化闭合处理，常使用三维Smagorinsky方案<sup>[6]</sup>或1.5阶三维湍流动能 (3-dimensional turbulent kinetic energy, 3dTKE) 闭合方案<sup>[7]</sup>来表征次网格湍流的影响。一般而言，模式网格尺度不同，所使用的湍流参数化方案也应不同。次网格混合的参数化方案“本质上”应该依赖于模式网格的尺度。随着目前中尺度数值预报模式的分辨率越来越高，当模式网格距 $\Delta$ 与含能湍流的 $l$ 相当时 ( $\Delta \sim l$ )，模式的动力过程可解析 (或表达) 一部分湍流运动，但对另一部分湍流仍需进行参数化。Wyngaard<sup>[5]</sup>将该区域称为“Terra Incognita (未知领域)” (图1)，通常也被称为湍流运动的“灰色区域 (gray-zone)”。次网格混合的参数化方案依赖于模式网格的尺度，“灰色区域”尺度下湍流参数化问题即不同于传统的PBL参数化，也不同于LES的湍流参数化，因此需要在该尺度下对次网格混合参数化问题进行研究。

本研究旨在对3dTKE方案进行改进，同时调整垂直和水平混合长度，从而设计一种能够适应网格距变化的三维湍流参数化方案。

### 1.1 大涡标准试验与分析方法

为了评估边界层方案在“灰色区域”尺度下的表现，首先需要建立基于高分辨率LES的标准试验，并将其视为模拟大气的“真值”。本研究所选用的LES模式为WRF v3.7的LES版本，使用适当的次网格湍流参数化方案，WRF作为一种LES模式得到了广泛的使用<sup>[8]</sup>。

本研究利用WRF-LES对理想的干对流边界层进行模拟，模式积分区域为 $30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$ ，水平分辨率为 $\Delta_{LES} = 50 \text{ m}$ ，顶层高度为 $2 \text{ km}$ ，垂直取100层。水平侧边界使用周期性边界条件。试验由固定地表热通量 ( $Q_0 = 0.24 \text{ K} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和东西向地转风 ( $U_g = 10 \text{ m/s}$ ) 驱动。LES的次网格湍流参数化采用1.5阶的3dTKE闭合方案。模式积分 $4 \text{ h}$ ，时间步长为 $0.2 \text{ s}$ 。初始位温

( $\theta$ , 单位为K) 廓线为

$$\theta = \begin{cases} 300 & 0 < z \leq 925 \text{ m} \\ 300 + (z - 925) \times 0.0536 & 925 \text{ m} < z \leq 1075 \text{ m} \\ 308.05 + (z - 1075) \times 0.003 & z > 1075 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $z$  为高度。

基于水平网格距为 50 m 的 LES 结果, 使用 Dorrestijn 等<sup>[9]</sup>的方法构造分辨率从 250~9000 m 的参考湍流场 (REfERENCE data, REF), 以此作为各分辨率模拟的“真值”。该方法所构造的参考场可提供网格与次网格尺度的湍流统计信息, 被广泛用于研究模式在各个分辨率上的湍流特征<sup>[2,10]</sup>。构造方法如下:

对于任一水平  $\Delta$ , 整个水平计算区域内  $\phi$  的总通量输送包括网格 (可分辨的) 与次网格 (无法分辨的) 部分, 下文分别以上角  $R(\Delta)$  与  $S(\Delta)$  表示:

$$\overline{w'\phi'} = \overline{w'\phi'}^{R(\Delta)} + \overline{w'\phi'}^{S(\Delta)}, \quad (2)$$

式中,  $w$  为垂直速度。网格尺度的湍流通量可表示为:

$$\overline{w'\phi'}^{R(\Delta)} = K^{-1} \sum_k (\overline{w_{j,k}^{\Delta_k}} - \langle w \rangle) (\overline{\phi_{j,k}^{\Delta_k}} - \langle \phi \rangle). \quad (3)$$

次网格尺度通量则由下式表示:

$$\overline{w'\phi'}^{S(\Delta)} = K^{-1} \sum_k \{ J^{-1} \sum_j [(w_{j,k} - \overline{w_{j,k}^{\Delta_k}})(\phi_{j,k} - \overline{\phi_{j,k}^{\Delta_k}}) + f_{j,k}^{w\phi}] \}, \quad (4)$$

式中, “ $\overline{\quad}$ ” 代表对于整个水平区域  $D \times D$  的平均, “ $\langle \quad \rangle$ ” 表示相对于区域平均的扰动,  $f_{j,k}^{w\phi}$  是  $\Delta_{LES}$  的次网格输送量, 由 LES 的次网格参数化方案得到。下角  $j, k$  分别代表第  $k$  个次网格和该次网格中第  $j$  个 LES 网格。上角  $\Delta_k$  表示对第  $k$  个次网格内的平均。标准场中包含  $k$  个  $\Delta \times \Delta$  的次网格,  $K = (D/\Delta)^2$ , 而在每个  $\Delta \times \Delta$  区域内, 有  $j$  个  $\Delta_{LES} \times \Delta_{LES}$  网格,  $j = (\Delta/\Delta_{LES})^2$ 。

用上述方法分别得到  $\Delta$  为 500、1000、3000 和 9000 m 的参考场, 可与新 3dTKE 方案在各个分辨率下的模拟结果进行比较。

## 1.2 分辨率自适应的实现方法

因为原 3dTKE 方案只适用于 LES, 为了对原 3dTKE 方案进行扩展以适应于“灰色区域”尺度, 需要确定两个关键的参数, 分别为中尺度分辨率下的非局地项和垂直混合长度。非局地项的廓线由 LES 的结果拟合而来, 具体详见文献[11]。中尺度分辨率下的垂直混合长度有以下形式:

$$\frac{1}{l_v} = \frac{1}{l_{Meso}} = \frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_T} + \frac{1}{L_B}, \quad (5)$$

式中,  $L_S$  为近地面稳定性所控制的混合长度,  $L_T$  则依赖于 PBL 的湍流结构,  $L_B$  由热力稳定度所限制。

对于特定的分辨率, 模式次网格的热通量可分为局地项 (local, 简称为 L) 和非局地项 (nonlocal, 简称为 NL):

$$\overline{w'\theta'}^{\Delta} = -K_{Hv}^{\Delta} \frac{\partial \overline{\theta}}{\partial z} + \overline{w'\theta'}^{\Delta, NL} = \overline{w'\theta'}^{\Delta, L} + \overline{w'\theta'}^{\Delta, NL}. \quad (6)$$

非局地项乘以由模式分辨率决定的权重函数  $P_{NL}(\Delta/z_i)$ :

$$\overline{w'\theta'}^{\Delta, NL} = \overline{w'\theta'}^{NL} P_{NL}(\Delta/z_i). \quad (7)$$

由此可见, 当模式分辨率达到 LES 尺度时,  $P_{NL}(\Delta/z_i) = 0$ , 因此式 (5) 则恢复为 LES 次网格模式的闭合形式。式 (7) 中,  $z_i$  为 PBL 高度,  $P_{NL}(\Delta/z_i)$  的具体形式参见文献[11]。

## 1.3 新 3dTKE 方案的理想个例试验

1.2 节对原 3dTKE 方案进行了改进, 使之具有分辨率自适应的功能, 适用于从 LES 尺度到中尺度的所有分辨率, 以下进行了理想对流边界层试验以考察新 3dTKE 方案在各个分辨率上的适用性。

图 2 所示为新 3dTKE 方案和传统的一维 PBL 方案所模拟的理想对流边界层的位温垂直廓线。所采用的 PBL 方案包括 MYJ, MYNN [Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino: MYNN level-2.5 (MYNN2.5) 和 MYNN level-3 (MYNN3)] 和 BouLac 方案 (Bougeault-Lacarrere)。从图 2 可以看出, 新 3dTKE 方案可较好地模拟出位温廓线的垂直分布, 在混合层内的结果与 LES (黑色实线) 最为吻合, 垂直廓线几乎不随水平分辨率变化, 而且可较好地表征夹卷层的位温垂直分布。其余各 PBL 方案的位温垂直廓线随着网格距的减小逐渐接近 LES 廓线; 夹卷层中, 位温随网格距减小而减小; 边界层高度随网格距减小而增加。总之, 新的 3dTKE 方案较传统的 PBL 方案对于对流边界层位温的垂直分布具有较好的模拟能力。

图 3 为新 3dTKE 方案与各 PBL 方案在不同分辨率下总热通量的垂直廓线。与位温廓线相似, 新 3dTKE 方案的廓线几乎不随水平分辨率变化。其余各 PBL 方案的热通量在夹卷层内随水平分辨率有明显的变化, 但在混合层内非常接近。可以看到, 总热通量不随分辨率而变化, 恰恰说明了新 3dTKE 具有很好的分辨率收敛性, 具有尺度自适应的功能。

该工作首先建立了高分辨率的 LES, 并将 LES 模拟结果平均到“灰色区域”尺度下, 确定了解析的湍流通量 (包括湍流动能) 和次网格湍流通量在“灰色区域”尺度下的比例, 并给出了该比例随模式网格距变化的函数关系。然后, 对 LES 资料进行深入分析, 通过条件取样方法将次网格湍流通量分为局地和非局地通量, 并确定了两随模式分辨率变化的函数。在 3dTKE 中加入了由大涡模拟资料分析诊断的非局地作用, 并根据其随模式分辨率变化的函数, 实现了模式次网格混合对分辨率自适应的突破, 并使得新的

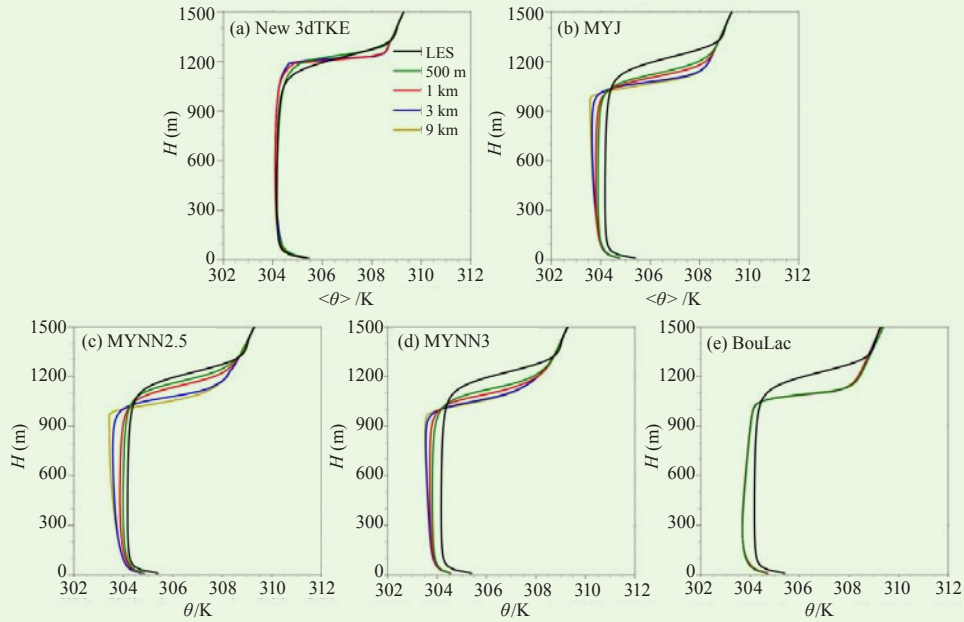


图2 新3dTKE方案与各PBL方案(彩色实线)及LES(黑色实线)的平均位温垂直廓线  
(a) 3dTKE, (b) MYJ, (c) MYNN2.5, (d) MYNN3, (e) BouLac

Fig. 2 Vertical profiles of the horizontally averaged potential temperature for (a) newly-developed 3dTKE scheme, (b) MYJ, (c) MYNN2.5, (d) MYNN3 and (e) BouLac at different resolutions (9 km, 3 km, 1 km, 500 m and 250 m).

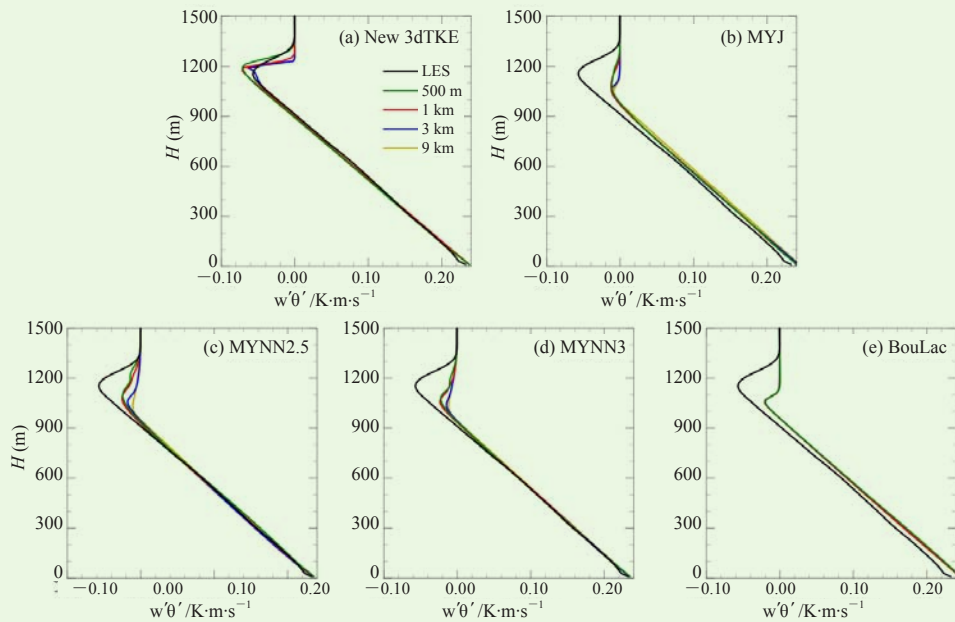


图3 同图2, 但为总热通量

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the total vertical heat flux.

3dTKE方案不仅适用于大涡尺度的模拟,而且适用于中尺度天气模拟,为1km模式湍流与边界层过程的合理参数化奠定了基础。该工作最大特色在于突破了传统大气边界层方案只有一维方向的缺陷,将模式的垂直混合统一于三维混合中。改进的3dTKE方案对位温垂直廓线的模拟接近于LES的结果;改进的3dTKE对次网

格热通量的表征更加合理,与LES的结果更为接近。

## 2 尺度自适应的对流参数化研究

高分辨率条件下对流天气系统的数值预报中是否需要对流参数化方案一直未能达成共识。例如,一些研究结果显示模式网格在1~4km时,不使用对流参数化可得到更真实的对流体,诸如雷暴、中尺度对

流系统、飚线等的模拟<sup>[12]</sup>。另一方面, Deng等<sup>[13]</sup>的研究发现在模式水平分辨率为4km时, 对流参数化方案的使用可有效减少格点暴雨问题 (grid point storm problem)。Hong等<sup>[14]</sup>认为对流初始化包含对流参数化方案比仅采用微物理过程性能更好的主要原因: 对流方案存在时可更快触发深对流云, 仅靠模式动力过程和微物理过程则因缺少触发使对流发生偏晚, 偏晚对流发生时, 又容易使对流偏强。许多研究认为模式分辨率在1km以下可显式预报对流系统<sup>[15]</sup>, 但同时也认为即使分辨率到1km以下, 模式对于一些对流中的卷入、卷出和垂直传输过程仍然难以准确显式解析。

经典的基于质量通量传输的对流参数化方案<sup>[16]</sup>假定模式网格足够大, 大到可以忽略网格内的对流云所占的面积。在这种假定下, 模式网格内没有净的质量垂直传输, 也就是说网格内小面积对流云活动造成的强烈上升和网格内大面积环境大气的缓慢补偿下沉近于相互抵消, 对流参数化方案正是通过计算环境大气的补偿下沉效应, 获得次网格云活动对网格尺度的反馈。这样, 次网格云中的上升和向下气流以及环境补偿下沉假定局限在局地网格内, 所有的对流引起的质量通量都与网格内补偿下沉抵消了。当模式水平分辨

率提高时, 网格内的对流云区域占网格的面积不再接近0的假定, 准平衡假定不再成立<sup>[17]</sup>。因而在现有的水平分辨率为几千米的数值天气预报模式中直接应用次网格云质量通量的这一假定便成为问题。

由于可观测云的发生过程的外场资料缺乏, 云可分辨模式 (cloud resolving model, CRM) 和大涡模式在研究云参数化中被作为试验平台广泛使用<sup>[18-19]</sup>。Arakawa等<sup>[20]</sup>利用分辨率为2km的CRM结果, 评估了不同分辨率下的次网格云过程。这一研究指出次网格对流云量是次网格云参数化过程的关键参数, 且提出了一个统一的次网格云参数化框架。

本研究旨在利用中纬度地区LES试验进一步评估次网格云特征, 并试图在区域数值预报模式中引入尺度自适应的对流参数化方案, 改进模式预报性能。

### 2.1 LES 试验的一些结果

利用LES对一个理想超级单体的模拟结果和多个其他较粗分辨率模拟 (分别为200m, 400m, 1km和3km) 结果进行了比较。图4给出的是区域平均的湿静力能、水汽和水凝物通量的垂直廓线, 水平分辨率需要到200m, 垂直通量才能和LES试验的结果一致。

对次网格云量的统计结果 (图5) 表明, 次网格

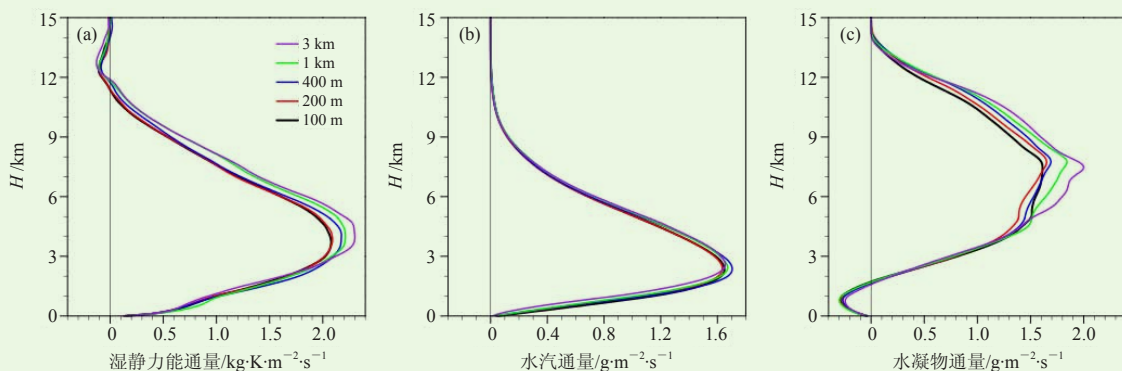


图4 不同水平分辨率模拟的平均湿静力能通量 (a)、水汽通量 (b) 和水凝物通量 (c) 平均廓线  
Fig. 4 Vertical profiles of the horizontally averaged moist static energy divided by  $c_p$  (a), water vapor (b), and hydrometeors (c) at various horizontal resolutions

云量依赖模式分辨率变化, 随着模式水平分辨率提高, 次网格云量逐步提高; 同时我们还发现, 次网格云量在不同分辨率条件, 在垂直方向上存在着变化。

### 2.2 自适应对流参数化的实现

对流参数化方案是一个求解次网格垂直传输及其效应的过程。变量  $\psi$  的次网格传输可表达为:

$$\overline{w'\psi'} \equiv \overline{w\psi} - \overline{w}\overline{\psi} = \sigma w_c \psi_c + (1-\sigma) \tilde{w}\tilde{\psi} - \overline{w}\overline{\psi}, \quad (8)$$

式中,  $\sigma$  为次网格云量, 下角  $c$  代表云中变量。当  $\sigma \ll 1$ , 环境垂直速度远小于云中垂直速度, 环境热力

变量 ( $\psi$ ) 和网格平均的  $\psi$  约相等, 式 (8) 可写为:

$$\overline{w'\psi'} \approx \sigma w_c (\psi_c - \overline{\psi}). \quad (9)$$

定义式 (9) 为满足准平衡假定的次网格垂直输送, 也即

$$(\overline{w'\psi'})_E = \overline{w'\psi'}. \quad (10)$$

根据Arakawa等<sup>[20]</sup>和LES的结果, 当模式水平分辨率提高  $\sigma$  不再接近0时, 有

$$\overline{w'\psi'} = (1-\sigma)^2 (\overline{w'\psi'})_E, \quad (11)$$

则在对流参数化中次网格效应可表示为

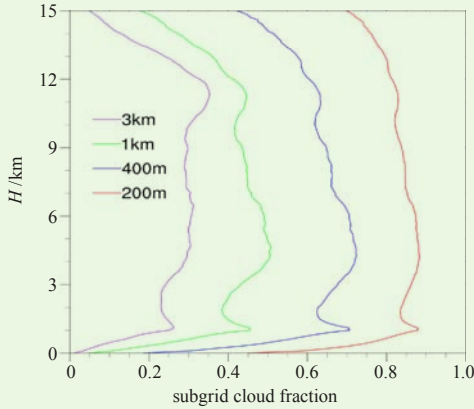


图5 以100 m统计的不同分辨率次网格云量的垂直分布  
Fig. 5 Averaged coarse-graining vertical profiles of subgrid cloudiness fraction

$$\left(\frac{\partial \bar{\psi}}{\partial t}\right)_{sgc} = -\frac{\partial}{\partial z} \left( (1-\sigma)^2 (\overline{w'\psi'})_E \right). \quad (12)$$

利用这一关系，并考虑 $\sigma$ 在垂直方向的变化，在SAS方案中引入了次网格通量的尺度自适应关系，并利用一个理想台风个例在WRF中进行了测试。初步的试验结果表明，这一方案可自动适应模式网格的变化，在3km分辨率条件下，可明显减弱原对流参数化中的对流加热，从而改变台风强度和降水的分布（图6）。

### 3 结论与讨论

本文针对高分辨率物理过程参数化，尤其是“灰色区域”尺度物理过程参数化，发展了适用于高分辨率的分辨率自适应的次网格混合（包括边界层混合）参数化方案和分辨率自适应的对流参数化方案，一定程度上解决了由于模式分辨率的提高所带来的“灰色区域”尺度的问题，为高分辨率数值天气预报模式物理过程参数化提供了理论和实践基础。

除了边界层过程与对流参数化以外，模式中其他

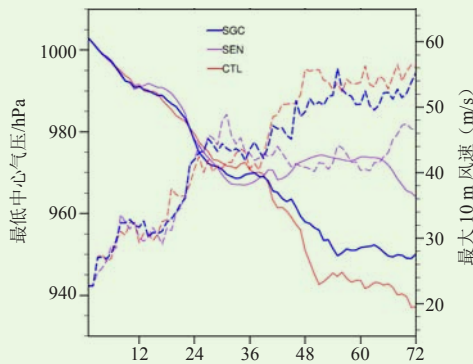


图6 三组试验模拟的台风最低中心气压和最大近地面风速随时间演变

Fig. 6 Temporal evolution of surface pressure at minimum centers (left axes, solid line) and maximum wind speeds at 10m height (right axes, dashed line).

物理过程也至关重要。模式微物理在模式动力-微物理-辐射相互作用中可极大地影响对流的发展，微物理也是高分辨率数值预报模式的关键物理过程。目前，业务数值预报模式的微物理过程中各水凝物的互相转换具有较大不确定性，亟需对这些物理过程进一步加深理解，并在高分辨率数值预报模式中进行改进。

### 参考文献

- [1] Dudhia J. A history of mesoscale model development. *Asia-Pac J Atmos Sci*, 2014, 50(1): 121-131.
- [2] Shin H H, Hong S Y. Analysis of resolved and parameterized vertical transports in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *J Atmos Sci*, 2013, 70: 3248-3261.
- [3] Janjic Z I. Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 scheme in the NCEP Meso model. NOAA/NWS/NCEP Office Note, 437, 2002: 61.
- [4] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Wea Rev*, 2006, 134: 2318-2341.
- [5] Wyngaard J C. Toward numerical modeling in the “terrainognita.” *J Atmos Sci*, 2004, 61: 1816-1826.
- [6] Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations: I. The basic experiment. *Mon Wea Rev*, 1963, 91: 99-164.
- [7] Deardorff J W. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model. *Bound Layer Meteoro*, 1980, 18: 495-527.
- [8] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the Advanced Research WRF version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-4751STR, 1980: 113. [Available online at [http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v3\\_bw.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v3_bw.pdf)].
- [9] Dorrestijn J, Crommelin D T, Siebesma A P, et al. Statistical parameterization of shallow cumulus convection estimated from high-resolution model data. *Theor Comput Fluid Dyn*, 2013, 27:133-148.
- [10] Honnert R, Masson V, Couvreux F. A diagnostic for evaluating the representation of turbulence in atmospheric models at the kilometeric scale. *J Atmos Sci*, 2011, 68: 3112-3131.
- [11] Shin H H, Hong S Y. Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Mon Wea Rev*, 2015, 143: 250-271.
- [12] Weisman M L, Skamarock W C, Klemp J B, et al. The resolution dependence of explicitly modeled convective systems. *Mon Wea Rev*, 1997, 125(4): 527-548.
- [13] Deng A, Stauffer D R. On improving 4-km mesoscale model simulations. *J Appl Meteor Climatol*, 2006, 45(3): 361-381.
- [14] Hong S Y, Dudhia J. Next-generation numerical weather prediction: bridging parameterization, explicit clouds, and large eddies. *Bull Amer Meteor Soc*, 2012, 93: ES6-ES9.
- [15] Craig G C, Dörnbrack A. Entrainment in cumulus clouds: what resolution is cloud-resolving? *J Atmos Sci*, 2008, 65(12): 3978-3988.
- [16] Arakawa A, Schubert W H. Interaction of a cumulus cloud ensemble with the large-scale environment, Part I. *J Atmos Sci*, 1974, 31(3): 674-701.
- [17] Arakawa A, Jung J H, Wu C M, et al. Toward unification of the multiscale modeling of the atmosphere. *Atmos Chem Phys*, 2011, 11(8): 3731-3742.
- [18] Khairoutdinov M F, Randall D A. A cloud resolving model as a cloud parameterization in the NCAR Community Climate System Model: preliminary results. *Geophys Res Lett*, 2001, 28: 3617-3620.
- [19] Siebesma A P, Bretherton C S, Brow A, et al. A large eddy simulation intercomparison study of shallow cumulus convection. *J Atmos Sci*, 2003, 60: 1201-1219.
- [20] Arakawa A, Wu C M. A unified representation of deep moist convection in numerical modeling of the atmosphere. Part I. *J Atmos Sci*, 2013, 70: 1977-1992.