

尺度自适应大气边界层参数化改进及其对一次海雾的数值模拟研究*

卢绪兰¹ 彭新东²

LU Xulan¹ PENG Xindong²

1. 山东省气象科学研究所, 济南, 250031

2. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京, 100081

1. *Shandong Institute of Meteorological Sciences, Jinan 250031, China*

2. *State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China*

2020-03-05 收稿, 2020-09-17 改回.

卢绪兰, 彭新东. 2021. 尺度自适应大气边界层参数化改进及其对一次海雾的数值模拟研究. *气象学报*, 79(1): 119-131

Lu Xulan, Peng Xindong. 2021. Scale-aware parameterization of atmospheric planetary boundary layer and its application to sea fog simulation. *Acta Meteorologica Sinica*, 79(1):119-131

Abstract Turbulent mixing in the atmospheric planetary boundary layer (PBL) is one of the most important process to transport energy to maintain atmospheric movement. As the model grid spacing is close to the length scale of energetic turbulent eddy, turbulence can only be partly resolved. This is called the "grey-zone" problem. Traditional PBL schemes are not suitable for the description of turbulent transport in numerical models. In order to improve the capability of PBL scheme in multi-scale models, including the "grey-zone" simulation, the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) scheme was improved by introducing non-local turbulent parameterization of heat and moisture turbulent flux and mesh-scale dependent turbulent length scale for self-adapting arrangement in a wide range of model resolutions based on the Reynolds average numerical simulation. The self-adapting MYNN scheme is then used to simulate a sea fog case in the Huanghai region that occurred on 26 February 2014 using the one-way nesting Weather Research and Forecast (WRF) model with horizontal resolutions of 3 km and 1 km, and 1.5 km and 0.5 km, respectively. Results are compared with simulations using the original MYNN scheme. The new MYNN scheme demonstrates capability for reasonable simulation of vertical turbulent transport of heat and moisture in a kilometer-resolution model. Compared with satellite images, the integrated low-level cloud water shows a similar horizontal coverage of sea fog in the simulations with different resolutions using the self-adapting MYNN scheme. Vertical profiles of temperature and humidity also illustrate structural distributions that agree better with the ERA-interim reanalysis data compared with results simulated with the original scheme. Preliminary results show that the self-adapting MYNN scheme can be applied in multi-scale models.

Key words Planetary boundary layer, Self-adapting parameterization, Grey-zone, Sea fog, Numerical simulation

摘要 大气边界层湍流运动是地球大气运动最重要的能量输送过程之一。当数值模式分辨率接近活跃含能湍涡长度尺度时, 湍流运动被部分解析, 被称为“灰色区域”, 传统的边界层方案不适合此时模式湍流问题的描述。为了提高模式边界层方案在包括“灰色区域”的不同网格尺度上的描述能力, 适应不同分辨率模式的需要, 在雷诺平均湍流理论基础上, 修正 Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) 方案湍流长度尺度参数和非局地湍流的参数表达, 改进湿度和温度在“灰色区域”的湍流输送参数化及对网格尺度的自适应能力。利用改进的 MYNN 尺度自适应方案, 分别采用 3 km 和 1 km、1.5 km 和 0.5 km 分辨率单向嵌套网格 WRF 中尺度模式, 对 2014 年 2 月 26 日的一次黄海海雾过程进行模拟试验, 检验不同分辨率下改进后的 MYNN 大气边界层参数

* 资助课题: 国家自然科学基金项目(42075151)、国家重点研发计划项目“重大自然灾害监测预警与防范”(2018YFC1507005)。

作者简介: 卢绪兰, 主要从事数值天气预报研究。E-mail: 2959004344@qq.com

通信作者: 彭新东, 主要从事数值天气预报研究。E-mail: pengxd@cma.gov.cn

化方案的合理性和对海雾的模拟效果。尺度自适应 MYNN 大气边界层参数化方案在千米级网格尺度上获得稳定、合理的湍流垂直输送计算结果。参照雾区卫星云图,不同分辨率模式低层云水混合比模拟结果具有稳定表现,模拟的雾区分布和温度、湿度等物理量结构都较好地再现了再分析“观测事实”,初步表明该参数化方案有较高的网格尺度自适应能力。

关键词 大气边界层, 尺度自适应参数化, 灰色区域, 海雾, 数值模拟

中图法分类号 P435

1 引言

大气边界层是大气中靠近下垫面、厚度为几百米到约 2 km、其运动主要受下垫面摩擦和热力作用而表现为湍流的粘性大气。在大气边界层内,动量、热量和水汽的湍流垂直通量呈现最大值,是整个大气层重要的动量汇,也是热量和水汽源(Nakanishi, et al, 2004; 刘敏等, 2005)。由于受到下垫面直接动力、热力强迫,边界层大气主要表现为湍流特征(黄文彦等, 2014),湍流在下垫面与大气间的动量、热量和水汽交换中起重要作用,大气边界层物理过程对物质、能量的垂直输送是大气运动最重要的能量来源(Stull, 1988),最终完成太阳辐射能到大气动能的转换。

大气边界层湍流是由不同尺度的有组织湍涡组成,其空间尺度从毫米到百米尺度(杨玉华等, 2016),时间尺度从秒到数十分钟,大气数值模式的千米—一百千米网格距无法完全分辨大气边界层湍流运动,需要通过参数化描述(徐慧燕等, 2013)。现在的大气数值模式可分为两大类:(1)中尺度大气模式,使用基于雷诺平均的湍流参数化方案,其适用于空间十—百千米网格的模式。通常模式水平网格距大于 4 km,远大于活跃湍流长度尺度,所有湍流均为次网格尺度过程(Zhou, et al, 2014),模式无法直接分辨,必须通过参数化方法表达高阶雷诺平均来模拟湍流输送过程,也被称为雷诺平均 Navier-Stokes(RANS)模式;(2)大涡模拟(LES),适用于 10—100 m 非常精细的网格,水平网格距远小于活跃湍流长度尺度,此时数值模式可以直接解析尺度较大的湍涡(Zhou, et al, 2014),仅需对作用较弱、尺度较小的湍涡进行参数化处理(江川等, 2013)。不过这两种方案的适用网格大小并不重叠,随着计算能力的提高,模式分辨率达到千米级,与活跃湍流的长度尺度相当时,部分湍流特性被数值模式所分辨,另一部分湍流运动仍需参数化描述,便出现了湍流参数化的“灰色区域”问题(Shin, et al, 2013; Zhang, et al, 2018),此时的湍流参数化

问题不同于传统湍流参数化方案,也不适用于大涡模拟,那么基于雷诺平均的湍流参数化方案必须做出相应的调整来满足不同网格尺度模式的需要。

对于这个“未知领域”的湍流参数化问题,Wyngaard(2004)做出了开创性的研究,证实灰色区域的大气边界层参数化对网格尺度的依赖性,并提出从 RANS 到 LES 的过渡方法。Nakanishi 等(2009)已经在 RANS 型大气边界层参数化中考虑大涡模拟结果优化参数,Cheng 等(2010)模拟了网格尺度在 50—4000 m 的有云大气边界层,显示模拟结果对水平网格强烈依赖。为了发展可描述灰色区域大气边界层特征的网格尺度自适应参数化方案,须了解次网格湍流变量的特性如何随网格尺度的变化而变化。灰色区域湍流参数化方案设计需要评估不同网格尺度上网格可分辨湍流变量和次网格湍流的比例(Honnert, et al, 2011)。按照这一思路,Shin 等(2013)首次利用热量垂直输送的大涡模拟廓线乘以一个网格尺度依赖函数来实现非局地湍流的尺度自适应计算,Shin 等(2015)又以同样方法对涡动扩散理论计算局地湍流量进行处理,实现了灰色区域对流边界层局地和非局地湍流通量的计算处理。Zhang 等(2018)则进一步考虑三维大气边界层湍流扩散问题,通过湍流混合长度和水平扩散系数的网格尺度依赖关系,构建了对流边界层湍流通量的尺度自适应参数化方案。

Nakanish(2001)基于 Mellor-Yamada 参数化方案(Mellor, et al, 1974)和观测资料,对雷诺平均的湍流闭合常数进行了重新评估,并提出了新的湍流长度尺度表达,建立了 MYNN 方案。Nakanishi 等(2004, 2006, 2009)进一步考虑凝结物理过程的影响,并采用大涡模拟结果调整和优化闭合常数,消除了方案的计算不稳定现象,考虑浮力对湍流通量和大气稳定度对湍流长度尺度的计算影响,改进了方案性能。目前,MYNN 方案还引入了 Chaboureau 等(2002)提出的质量通量计算来改善非局地过程描述,以及 Ito 等(2014)的中尺度和大涡模拟湍流长度尺度加权计算方案改善其网格尺度自适应能

力。Huang 等(2017)利用中国多种下垫面的通量观测资料修正了MYNN方案稳定度指标和闭合常数计算,改善了低层大气动量、热量和水汽通量的模拟。Hariprasad 等(2014)和饶莉娟(2014)通过不同大气边界层参数化方案对大气边界层和雾的模拟发现,MYNN对雾具有更好的模拟能力(黄健等,2010)。

海雾是海洋大气边界层低层由于水汽饱和凝结而形成的水平能见度小于1 km的一种天气现象。海雾是受湍流交换、冷凝沉降、风切变、辐射、夹卷等大气边界层物理过程的影响而形成的,稳定大气边界层中的湍流交换在海雾形成发展中起关键作用(肖艳芳等,2017),因此适合用来检测大气边界层参数化方案的效果。石红艳等(2005)对长江中下游地区一次辐射雾进行了模拟,发现适当选取物理参数化方案和水平网格分辨率,有助于改善辐射雾的模拟。Li 等(2012)采用MYNN边界层参

数化方案对一次黄海海雾过程进行模拟,分析了低空急流相关的动能产生项对海雾生成和维持的贡献,指出海雾形成期湍流混合的重要性。黄翊等(2017)利用中国观测资料改善MYNN方案中湍流长度尺度和湍流通量的计算,极大改进了雾(特别是海雾)的模拟。

选取2014年2月26日黄海海雾作为研究对象,因为此次海雾覆盖范围广、位置少变、持续时间长,便于使用卫星云图来检验MYNN边界层参数化方案的尺度自适应改进效果,利用WRF4.0版讨论不同分辨率情况下数值模式对海雾的模拟效果,检验尺度自适应大气边界层参数化的合理性。

2 个例简介

在日本葵花卫星可见光云图(图1)上,2014年2月26日09时(北京时,下同)黄海海面自辽东半岛南侧到山东半岛南侧出现大片乳白色高反照率

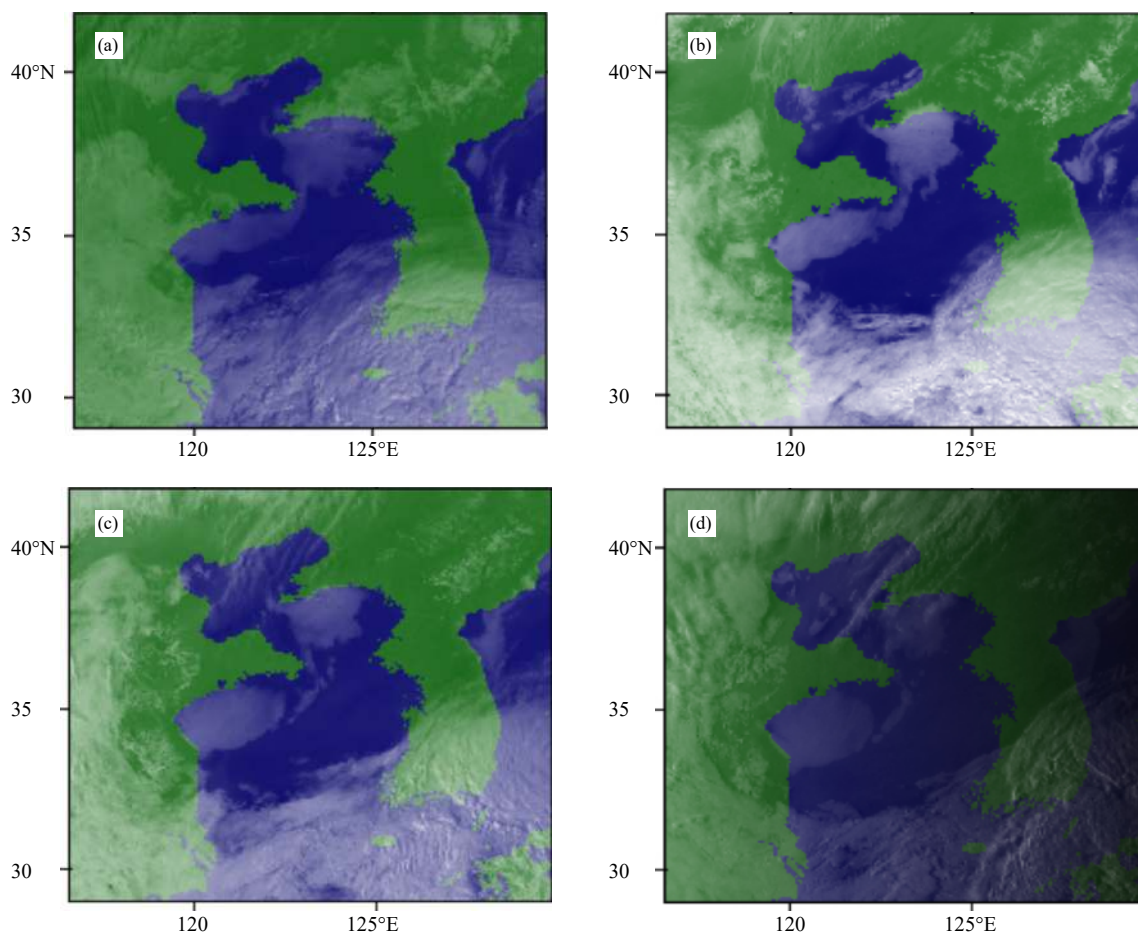


图1 2014年2月26日09时(a)、12时(b)、15时(c)、17时(d)葵花卫星云图

Fig. 1 Visible cloud images at 09:00 BT (a), 12:00 BT (b), 15:00 BT (c), and 17:00 BT (d) 26 Feb 2014 by Himawari satellite

区域,分布均匀光滑,边界清晰,是可见光云图上典型的海雾形态特征(张纪伟等,2009)。事实上,从红外云图(图略)可以确认,06时黄海雾区已经形成。根据葵花卫星每小时一次的观测数据,可捕捉海雾的发展、变化过程。上午雾区稳定存在,14—15时海雾变浓,山东半岛东部区域雾区消散变小,但山东半岛南部雾区向南扩大。16—18时,南、北雾区均变淡,其中辽东半岛南侧的北部雾区消散明显,山东半岛南侧黄海雾区仍维持清晰的边缘界限,可见此次海雾事件维持时间较长,适合数值模拟研究。

雾的形成除必要的低层水汽条件外,离不开适当的天气条件配合。图2给出了26日08时的ERA-interim再分析资料中位势高度、温度和风场形势,从500 hPa图(图2a)上可以看到,黄海海区位于槽前脊后,中层以偏南风为主,风速较大,黄海

海区上空有较强的暖平流,从南部海面带来充足的暖湿水汽,有利于黄海区域低层静稳层结的维持。850和925 hPa形势图(图2b、c)上,黄海区域为2—4 m/s的弱偏北风,山东半岛和黄海海域被主体位于日本海的西伸高压舌控制,层结稳定,大气扩散能力差,同时与中层暖湿平流配合,低层稳定层结维持。黄海海域处于地面高压前部近似均压场(图2d)中,气压梯度小,地面风非常弱,是海雾发生十分有利的条件,地面与925 hPa间有弱的浅层逆温(图3)。此次海雾是偏南暖气流移至冷海面发生冷却并达到饱和而形成的。

3 MYNN 大气边界层参数化方案的网格尺度自适应改进

湍流问题在中尺度大气模式中历来作为次网格尺度过程进行参数化处理。对于中尺度模式而

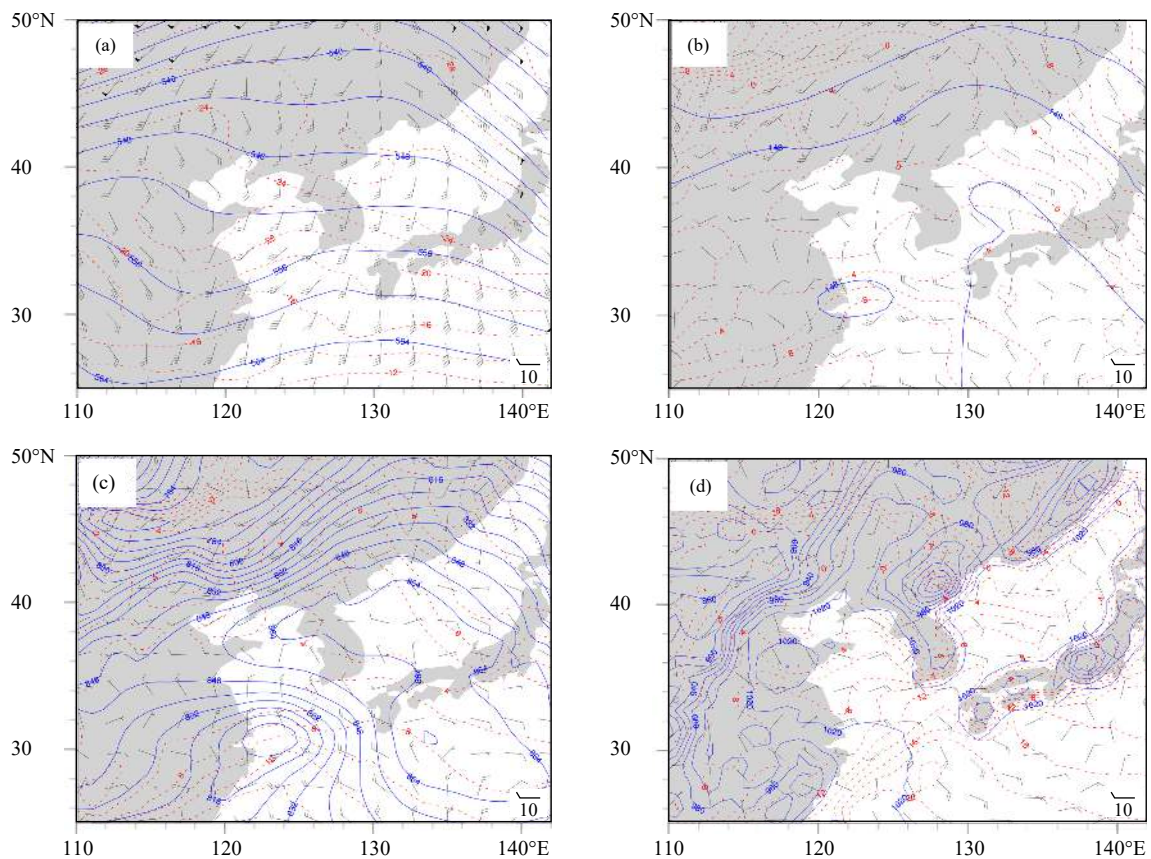


图2 2014年2月26日08时ERA-interim再分析资料的位势高度(实线,单位,dagpm)、气温(虚线,单位,°C)和风场(风标)(a. 500 hPa, b. 850 hPa, c. 925 hPa, d. 地面)

Fig. 2 Geopotential height (solid line, unit: dagpm), temperature (dashed line, unit: °C) and horizontal wind (barbs) from ERA-interim reanalysis data at 08:00 BT 26 Feb 2014 at (a) 500 hPa, (b) 850 hPa, (c) 925 hPa and (d) surface

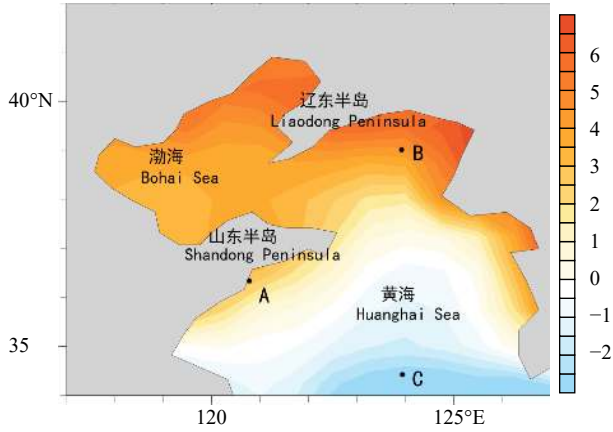


图3 ERA-interim 再分析资料 925 hPa 与地面 2 m 的温差 (单位: $^{\circ}\text{C}$)

Fig. 3 Temperature difference between 925 hPa and 2 m above the surface from ERA-interim (unit: $^{\circ}\text{C}$)

言,所有尺度的湍流都无法被分辨,模式对大涡尺度湍流贡献通过网格尺度的平均变量进行参数化计算;但在大涡模拟中,尺度较大的湍流被模式分辨,次网格的小涡湍流输送一般采用 Smagorinsky (1963) 或 Deardorff (1974) 的方法进行参数化计算。所以,当中尺度模式的分辨率达到千米量级,一部分湍流被模式所分辨,总的湍流输送量应考虑次网格湍流的尺度较大湍流和尺度较小的湍流的共同作用。

3.1 MYNN 大气边界层参数化方案

由于模式分辨率的提高,使网格距接近大涡特征尺度时,部分湍流特性被模式直接分辨。为使大气边界层参数化方案具有在不同分辨率模式中的通用性,须提高参数化方案的网格尺度自适应能力,这里考虑 MYNN 大气边界层参数化方案随模式分辨率变化,对其进行从 RANS 到 LES 的渐变改造,表达中尺度到大涡尺度两种情况下湍流输送过程的计算和过渡。

文中大写字母表示平均量,小写字母表示湍流量,湍流作用对中尺度预报量平均量的贡献可写为

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle uw \rangle \\ \frac{\partial V}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle vw \rangle \\ \frac{\partial \theta_1}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle w\theta_1 \rangle \\ \frac{\partial Q_w}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \langle wq_w \rangle \end{cases} \quad (1)$$

式中, U 、 V 是网格平均水平风速分量, θ_1 是湿位温, Q_w 为总比湿, u 、 v 、 w 、 θ_1 和 q_w 分别为三维风场风速分量、湿位温和总比湿的次网格扰动量。 $\langle uw \rangle$ 、 $\langle vw \rangle$ 、 $\langle w\theta_1 \rangle$ 和 $\langle wq_w \rangle$ 分别表示垂直方向次网格纬向、经向动量通量,热量通量和水汽通量。在 MYNN level-2.5 方案中,湍流动能 (TKE) 需要通过求解如下方程 (Nakanishi, et al, 2009) 来确定。

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z} \left\langle w \left(q^2 + \frac{2p}{\rho_0} \right) \right\rangle + 2 \left(\langle wu \rangle \frac{\partial U}{\partial z} + \langle wv \rangle \frac{\partial V}{\partial z} \right) + 2 \frac{g}{\theta_0} w\theta_v - 2\varepsilon \quad (2)$$

而 $\langle \theta_1^2 \rangle$ 、 $\langle \theta_1 q_w \rangle$ 、 $\langle q_w^2 \rangle$ 可根据

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial z} \langle w\theta_1^2 \rangle + 2 \langle w\theta_1 \rangle \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} \langle w\theta_1 q_w \rangle + \langle wq_w \rangle \frac{\partial \theta_1}{\partial z} + \langle w\theta_1 \rangle \frac{\partial Q_w}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial}{\partial z} \langle wq_w^2 \rangle + 2 \langle wq_w \rangle \frac{\partial \theta_w}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

诊断计算,式中, θ_0 为大气位温, θ_v 为虚位温, ρ 为空气密度, p 为气压, $e = q^2/2$ 为湍流动能, $q = (u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}$ 。

在 RANS 方案中,局地次网格通量可以通过平均变量的垂直梯度表达。

$$\begin{cases} -\langle uw \rangle = LqS_M \frac{\partial U}{\partial z} \\ -\langle vw \rangle = LqS_M \frac{\partial V}{\partial z} \\ -\langle w\theta_1 \rangle = LqS_H \frac{\partial \theta_1}{\partial z} = Lq \left(S_{H2.5} \frac{\partial \theta_1}{\partial z} + \Gamma_\theta \right) \\ -\langle wq_w \rangle = LqS_H \frac{\partial Q_w}{\partial z} = Lq \left(S_{H2.5} \frac{\partial Q_w}{\partial z} + \Gamma_q \right) \\ -\langle w\theta_v \rangle = -\beta_\theta \langle w\theta_1 \rangle - \beta_q \langle wq_w \rangle \end{cases} \quad (4)$$

式中, S_M 、 S_H 为动量和热量的稳定度函数, L 为湍流长度尺度,下标 2.5 表示 level-2.5 模式, β_θ 和 β_q 是与凝结相关的水汽转换参数。MYNN level-3 方案中, Γ_θ 、 Γ_q 表达非局地湍流逆梯度输送过程。

3.2 湍流长度尺度参数优化

局地湍流参数化中湍流长度尺度为关键因子。在中尺度模式的 RANS 理论中,湍流长度尺度 L_{MESO} 受地表摩擦、大气边界层湍流强度和浮力共同影响,本研究使用 Huang 等 (2017) 根据中国 5 种不同下垫面的实时通量观测资料统计结果修正的 L_{MESO} 计算公式

$$\frac{1}{L_{\text{MESO}}} = \frac{1}{L_S} + \frac{1}{L_T} + \frac{1}{L_B} \quad (5)$$

式中, L_S 为地表摩擦长度尺度, L_T 为湍流长度尺度, L_B 为浮力长度尺度。

$$L_S = \begin{cases} kz \frac{0.25}{3.21\sigma + 0.25} & 0 \leq \sigma < 1 \\ 0.072kz & \sigma \geq 1 \\ 0.35kz(1 - 5.0\sigma)^{0.056} & \sigma < 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$L_T = 0.18 \int_0^\infty qz dz / \int_0^\infty q dz \quad (7)$$

$$L_B = \begin{cases} 0.21 \frac{q}{N} & \frac{\partial \theta}{\partial z} > 0, \sigma \geq 0 \\ \left[0.21 + 3 \left(\frac{q_c}{L_T N} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \frac{q}{N} & \frac{\partial \theta}{\partial z} > 0, \sigma < 0 \\ \infty & \frac{\partial \theta}{\partial z} > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, σ 是无量纲高度, $q_c = \left[\frac{q}{\theta_0} \langle W\theta_v \rangle L_T \right]^{\frac{1}{2}}$ 是速度尺度。

3.3 湍流通量和参数的尺度自适应考虑

在LES大涡尺度下,假定需要参数化的湍流尺度与网格大小接近,网格尺度落入惯性子区,通常使用Deardorff(1974)混合长度

$$L_{\text{LES}} = \begin{cases} \min \left[0.76e^{\frac{1}{2}} \left| \frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right|^{-\frac{1}{2}}, \Delta S \right] & N^2 > 0 \\ \Delta S & N^2 \leq 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, N^2 是Brunt-Väisälä频率。

Ito等(2014)采用大涡模式在无环境风条件下给出了大气对流边界层水平扩散系数的垂直廓线计算,为中尺度模式提供高质量湍流水平扩散参数化。为实现从RANS到LES的顺利过渡,Shin等(2015)用一个权重函数将 L_{MESO} 和 L_{LES} 统一考虑,将局地湍流通量计算从雷诺平均理论和大涡理论结合,实现了从湍流中尺度参数化到大涡尺度的过渡。Zhang等(2018)也采用类似方法在三维湍流动能模式中实现了对灰色区域湍流输送的计算。这里也采用相同做法,引入权重函数 P_{TKE} , P_{TKE} 是 Δ/z_i (Δ 为水平网格尺度, z_i 是大气边界层高度)的函数,通过 L_{MESO} 和 L_{LES} 的加权平均得到混合长度尺度 L_A 。因此, L_A 具有尺度自适应性,可以实现从中尺度到大涡模拟的顺利过渡。这里

$$P_{\text{TKE}} = \frac{(\Delta/z_i)^2 + 0.07(\Delta/z_i)^{2/3}}{(\Delta/z_i)^2 + 0.142(\Delta/z_i)^{2/3} + 0.071} \quad (10)$$

从而定义一个依赖于模式网格大小的湍流长度尺度

$$L_A = P_{\text{TKE}}(\Delta/z_i)L_{\text{MESO}} + [1 - P_{\text{TKE}}(\Delta/z_i)]L_{\text{LES}} \quad (11)$$

实现从RANS到LES的连续大气边界层湍流计算。

3.4 非局地湍流计算

MYNN level-2.5(简称MYNN2.5)方案是局地湍流闭合方案。非局地湍流主要描述系统性湍流运动,可理解为由相干结构的有组织大涡造成,而局地湍流是由小涡造成(Zhang, et al, 2018)。相干结构可以造成热量的逆梯度输送,对湍流的生成、发展和演变起重要作用。近年来,更多采用混合质量通量来计算非局地湍流,也是一种计算非局地湍流贡献的更直接的方式。一般地,局地湍流用湍流交换系数来参数化,而非局地湍流用质量通量和逆梯度输送项来计算。

这里采用Shin等(2015)的方法,将湍流通量分为局地小涡产生的局地湍流通量和由相干结构上升气流产生的非局地湍流通量,局地湍流和湍流尺度紧密相关,其自适应处理采用式(11)完成,而非局地项与湍流尺度无关,在此通过网格尺度依赖函数对非局地项进行尺度自适应处理。

$$\begin{aligned} \langle w'q' \rangle_{\Delta}^{\text{NL}} &= \langle w'q' \rangle^{\text{NL}} P_{\langle w'q' \rangle} \\ \langle w'\theta' \rangle_{\Delta}^{\text{NL}} &= \langle w'\theta' \rangle^{\text{NL}} P_{\langle w'\theta' \rangle} \end{aligned} \quad (12)$$

式中,下标 Δ 表示网格尺度自适应结果,上标NL表示非局地项。

$$\begin{aligned} P_{\langle w'q' \rangle}(\Delta/z_i) &= 0.5 \frac{(\Delta/z_i)^2 + 0.03(\Delta/z_i)^{0.25} - 0.308}{(\Delta/z_i)^2 + 0.03(\Delta/z_i)^{0.25} + 0.308} + 0.5 \\ P_{\langle w'\theta' \rangle}(\Delta/z_i) &= 0.243 \frac{(\Delta/z_i)^2 + 0.936(\Delta/z_i)^{7/8} - 1.110}{(\Delta/z_i)^2 + 0.312(\Delta/z_i)^{7/8} + 0.329} + 0.757 \end{aligned} \quad (13)$$

$\langle w'q' \rangle^{\text{NL}}$ 、 $\langle w'\theta' \rangle^{\text{NL}}$ 的计算参见Honnert等(2011)和Shin等(2015)。

4 数值模拟

4.1 数值模式

采用WRF 4.0版有限区域非静力模式,选用Thompson微物理参数化方案(Thompson, et al, 2008)、RRTMG长波和短波辐射方案(Iacono, et al, 2008),并关闭积云对流参数化,对2014年2月26日发生在黄海区域的一次海雾过程进行模拟研

究并对新开发的网格尺度自适应 MYNN 大气边界层参数化方案做检验。这里使用嵌套模式,分别在 3 km 和 1.5 km 分辨率模式中嵌套一个 1 km 和 500 m 的分辨率模式,模式中心位于(36°N, 124°E),模式层顶为 100 hPa,垂直分 44 层,850 hPa 以下有 12 层,分别为 $\eta=1.0000, 0.9975, 0.9250, 0.9850, 0.9775, 0.9700, 0.9540, 0.9340, 0.9090, 0.8800, 0.8506, 0.8212$, 海拔高度分别约对应于 0、36、62、113、164、230、325、467、662、896、1152 和 1433 m。

4.2 初始和边界条件

模式初始场和边界条件由欧洲中期预报中心(ECMWF)的 ERA-interim 再分析资料经插值得到,原始资料水平分辨率为 $0.75^\circ \times 0.75^\circ$,垂直方向为 37 层,每天 4 个时次。模式于 2014 年 2 月 24 日 20 时开始模拟。在海雾模拟结果检验中,由于缺少海面实际观测资料,主要采用可见光卫星云图进行定性对比分析。

5 结果分析

每年的 2—4 月是黄海海雾多发期,而本研究选取的就是 2014 年 2 月 26 日一次黄海海雾天气过程,通过数值模拟,考察改进的大气边界层参数化方案在高分辨率模式中对近地面雾的模拟影响。选取 WRF 三维模式两层嵌套区域模拟的低层云水混合比分析近地层雾的模拟情况,并与日本葵花卫星云图定性对比,以便分析不同分辨率下网格尺度自适应 MYNN2.5 方案对雾的模拟效果和特征。

5.1 雾云图特征与模拟

雾作为大气低层的水汽凝结现象,可以说是接地的云,可以用模式微物理量的云水混合比来表征。傅刚等(2004)尝试用包含微物理过程方案的中尺度模式模拟海雾。高山红等(2010)给出海雾的模拟定义方法,云水混合比大于 0.016 g/kg ,且雾顶高度不高于 400 m 被认为是海雾。一些研究(程相坤等, 2013; 曹祥村等, 2009)利用云水混合比对大雾的雾区形状和分布进行定义和分析,也得到大雾天气时云水混合比大值区一般分布在 300 m 以下,所以可用模式低层云水混合比来描述雾的消过程。在此采用 300 m 以下模式面模拟的云水混合比垂直积分平均值来表现雾的分布。

图 4 给出了模式底层(300 m 以下模式层)云水汽混合比积分平均值,与卫星云图(图 1)对比可以

看出,原 MYNN 大气边界层参数化方案在 3 km 分辨率模式中虽然对北部雾区向南延伸模拟过大,总体雾区的刻画较好,成功地模拟出黄海“海马”状雾区分布;1.5 km 网格分辨率模式模拟的山东半岛南部雾区变窄变小,但基本分布仍然和云图接近。随着模式分辨率进一步提高到 1 和 0.5 km,网格分辨率接近大涡特征尺度,基于 RANS 中尺度模式的大气边界层湍流参数化方案描述的湍流输送开始出现偏差,导致模拟的山东半岛南部雾区严重萎缩或消失(图 4c、d),这也证实采用中尺度参数化方案模拟灰色区域湍流已不能适应模式需求。当网格尺度接近大涡尺度时,次网格湍流逐渐减弱,新的尺度自适应 MYNN 方案通过湍流尺度来调整垂直湍流输送强度。对于 3 km 分辨率模式,由于网格尺度远大于大涡尺度,此时大气边界层参数化与原方案没有显著差异,模拟雾区也与原方案基本一致,但在南部雾区的南端,新方案模拟雾区面积较大,与卫星云图也更加接近。在嵌套的 1 km 分辨率网格模式中,网格分辨率已经接近“灰色区域”,大涡尺度湍流逐渐被分辨,考虑湍流长度尺度和非局地湍流的网格尺度自适应问题后,1 km 网格模式的不稳定参数由中尺度和大涡尺度的长度尺度共同决定,且天气尺度系统控制下的非局地湍流输送贡献也得到考虑,改进的 MYNN 方案模拟出与 3 km 网格模式相似的模拟结果,山东半岛南侧的雾区明显扩大,与可见光云图显示雾区基本一致,说明局地和非局地湍流网格尺度自适应 MYNN 方案可以明显改进大气边界层参数化在灰色区域的海雾模拟效果,改善高分辨率模式的大气边界层特征描述。同时,1.5 和 0.5 km 分辨率嵌套模式也给出了类似的结果,山东半岛南部雾区的模拟得到很大改善,与 3 和 1 km 分辨率模式模拟雾区呈现出很高的一致性,特别是对于 0.5 km 分辨率模式,网格分辨率已经处于“灰色区域”,海雾分布和地理位置模拟更加准确,体现了对本次雾区模拟的改进。

就尺度自适应 MYNN 参数化方案而言,在 3.0、1.5、1.0 和 0.5 km 分辨率模式中表现出更好的一致性,反映了该方案对网格尺度更好的适应性和应变能力,初步证实了尺度自适应方案开发的有效性,尺度自适应参数化方案对精细网格雾区模拟、大气边界层物质和热量垂直输送的改善有重要作用。

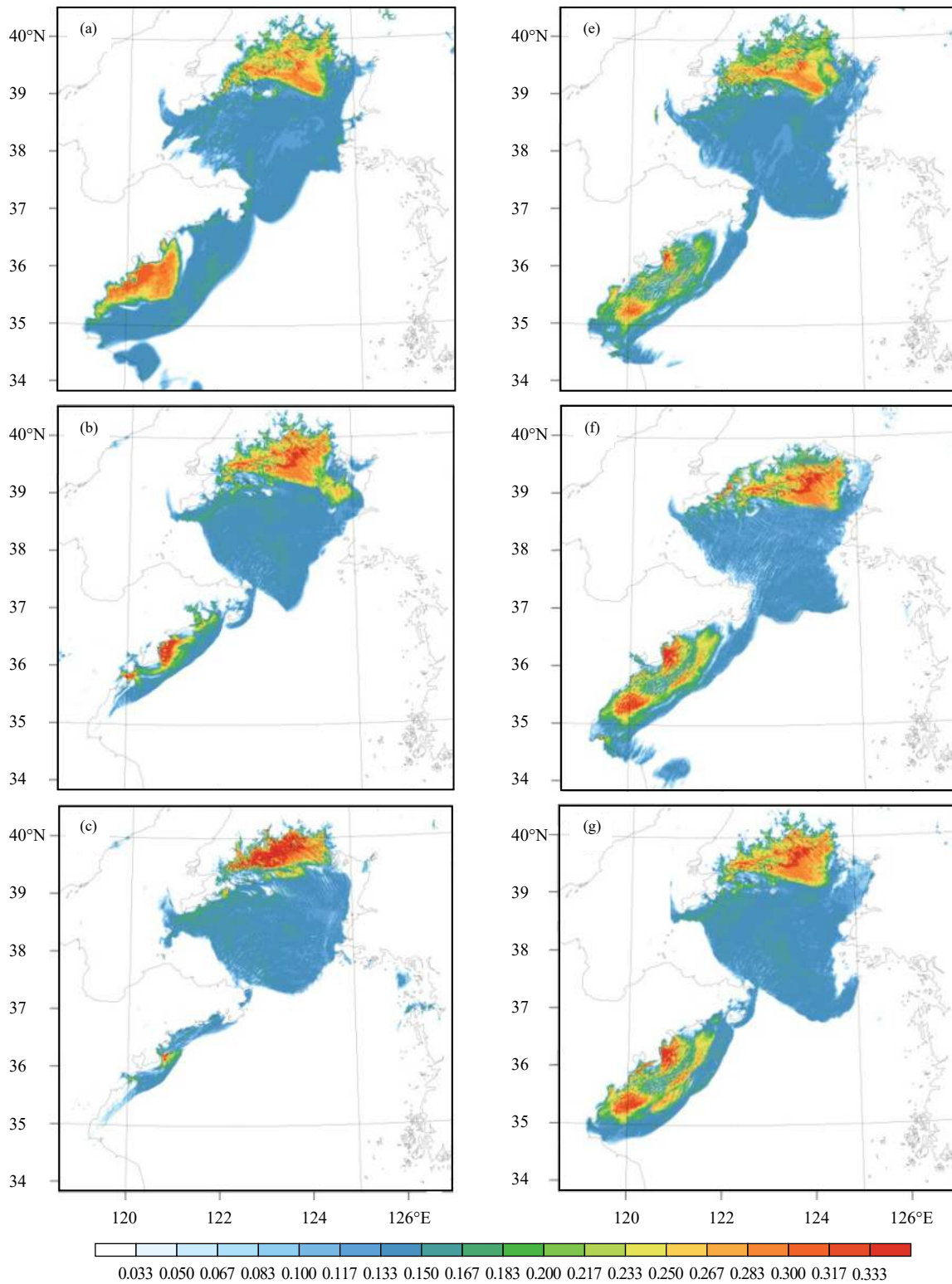
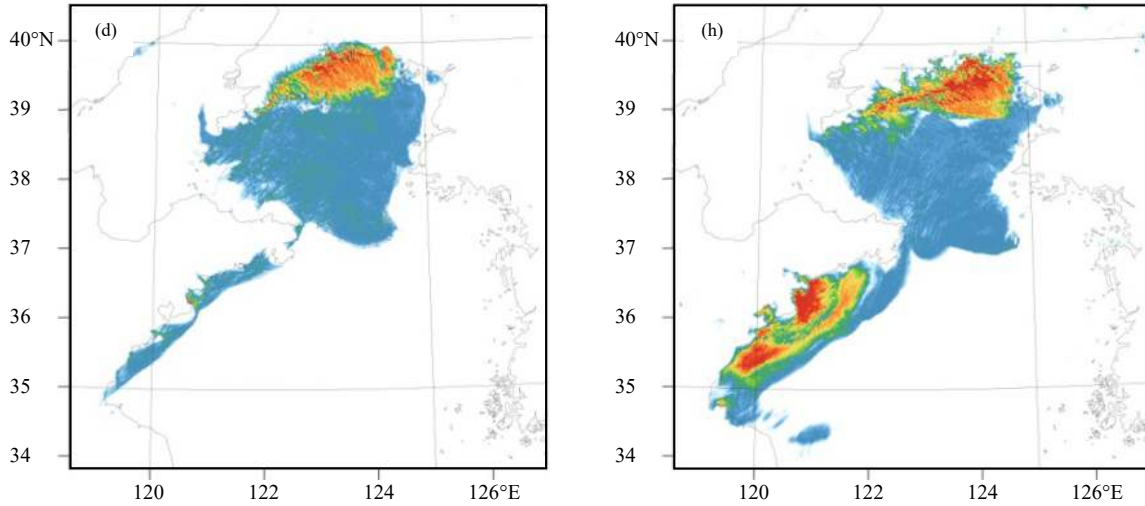


图4 2014年2月26日12时原MYNN方案(a—d)和尺度自适应MYNN方案(e—h)在3 km(a, e)、1.5 km(b, f)、1 km(c, g)和0.5 km(d, h)分辨率模式中模拟底层云水混合比(色阶, 单位: g/kg)积分平均值

Fig. 4 Vertically integrated mean mixing ratio of cloud water (shaded, unit: g/kg) below 300 m simulated by the original MYNN (a—d) and the self-adapting MYNN (e—h) with 3 km (a, e), 1.5 km (b, f), 1 km (c, g) and 0.5 km (d, h) resolutions at 12:00 BT 26 Feb 2014



续图 4

Fig. 4 Continued

5.2 湍流长度尺度变化和大气边界层高度发展

局地大气边界层参数化中稳定度函数、湍流动能、热量通量、水汽通量等都依赖于湍流长度尺度。湍流长度尺度发生改变时,大气边界层水汽和热量局地湍流强度的计算也会受到影响。所以模拟大气边界层发展和湍流强弱很大程度决定于湍流长度尺度计算。

图 5 给出原方案和尺度自适应改进后 MYNN 方案在不同分辨率模式 2014 年 2 月 26 日 12 时 A 点的湍流长度尺度垂直廓线和雾区 A、B 点与非雾区 C 点的大气边界层高度随时间变化曲线。在 3 km 模式中 MYNN 的湍流长度尺度最大值出现在近地层 80 m 高度,数值仅有 50 m,湍流仅在近地层活跃,对于近地层海雾发展区域的稳定大气边界层结构维持有利;随模式分辨率提高,湍流长度尺度减小,最大值在垂直方向仍位于 80 m 高度。模式分辨率为 1.5 和 1 km 时,逐渐接近“灰色区域”,虽然决定大气边界层湍流强度的湍流长度尺度在原 MYNN 方案中有所减小,但与 3 km 分辨率模式的湍流长度尺度相差不大,出现湍流高估现象,与在“灰色区域”上采用描述所有湍流作用的中尺度参数化方案会造成湍流高估的理论分析结果一致。在 0.5 km 分辨率模式中高层的湍流长度尺度则略有增大。考虑了尺度自适应的 MYNN 方案中,由于 3 km 水平网格分辨率远超大涡尺度,位于灰色区域之外,此时 $P_{TKE}=1$,湍流长度尺度为中尺度主混合层所决定,湍流长度尺度的垂直变化与原方案保

持一致,在模式底层 80 m 高度出现极大值,在 150 m 高度以上迅速减小,在 250 m 高度减小为 0,充分体现了这次伴随静稳大气层结海雾过程的湍流活动主要在接近地面薄层。模式分辨率接近灰色区域时,部分大涡尺度的可分辨湍流得到显式计算,尺度自适应 MYNN 方案中湍流长度尺度大幅度减小,从而削弱次网格湍流贡献,改进近地层湍流强度模拟和保持灰色区域湍流计算与 3 km 模式结果的一致性,从而改善了海雾的模拟。当模式分辨率进一步提高到 0.5 km 的大涡尺度时,次网格湍流接近 0,可分辨的大涡贡献部分占主导地位。这样随着模式分辨率变化,湍流长度尺度发生变化,从而影响物理量湍流通量,实现大气边界层参数化的尺度自适应描述。

与大气边界层稳定性和湍流活动相关,大气边界层高度直观反映湍流混合层的发展高度,也与湿物理过程的发展密切相关。在大气边界层水汽充足的情况下,对于稳定大气边界层条件,由于垂直扩散高度较小,有利于雾的形成。图 5b 中给出了 3 和 1 km 分辨率模式中 MYNN 方案和尺度自适应 MYNN 方案模拟雾区 A、B 点和非雾区 C 点的大气边界层高度演变,从大气边界层高度的发展也可以确认,26 日雾区 A、B 两点的大气边界层高度始终在 150 m 以下,B 点甚至在 100 m 以下,说明两个方案在 3 km 模式中都刻画了非常稳定的大气边界层,同时大气边界层维持非常微弱的偏西风,形成了海雾生存的绝佳条件。但对于非雾区 C 点,原

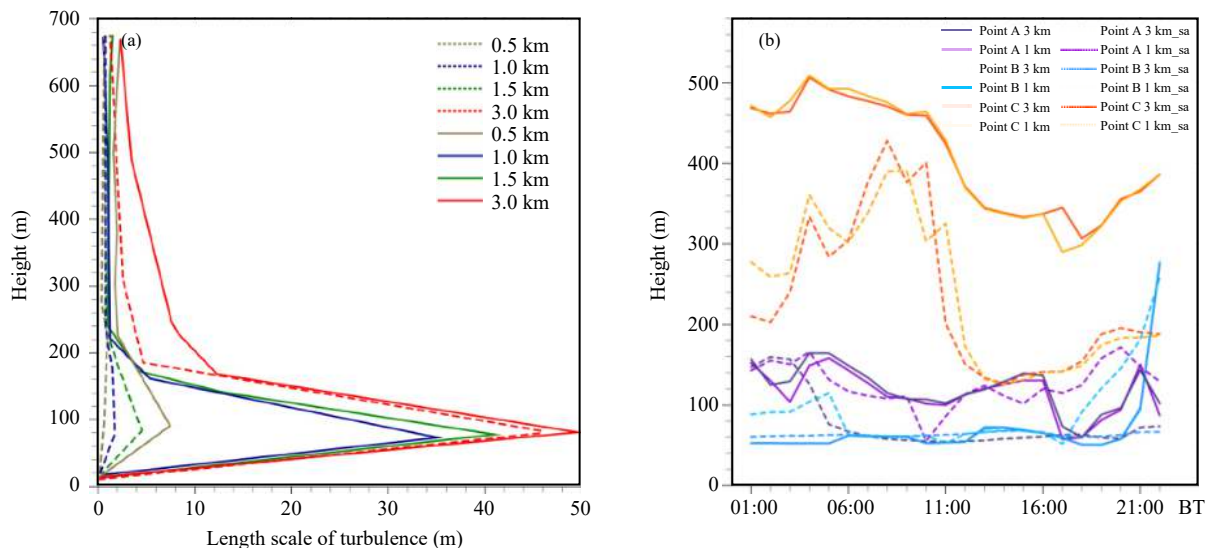


图5 原MYNN(实线)和尺度自适应方案(虚线)模拟2014年2月26日(a)12时位于图3中A点湍流长度尺度垂直廓线和(b)雾区A、B点和非雾区C点(见图3)大气边界层高度时间变化在不同分辨率模式的表现

Fig. 5 Vertical profiles of turbulent length scale at (a) 12:00 BT on point A and (b) time series of PBL height at points A, B and C in Fig. 3 simulated with the original MYNN (solid) and the self-adapting (dashed) schemes on 26 Feb 2014

MYNN方案和尺度自适应方案12时前模拟出较高的大气边界层,随后有所降低,尺度自适应方案给出的大气边界层高度在下午更低,但由于水汽条件不足,并未成雾。

5.3 大气边界层温、湿度结构和垂直通量

大气边界层能量和水汽的湍流输送是大气运动维持的能量来源,也是大气边界层结构形成的主要动力过程,而大气边界层的温、湿度结构也直接关系到大气边界层内天气现象(如雾)的形成和维持。图6是不同分辨率模式由原MYNN方案和尺度自适应方案模拟的26日12时大气边界层温度和相对湿度廓线,并给出ERA-interim再分析资料对应的离散值分布,可以清楚地看到在200 m高度以下,新旧方案都成功模拟了大气边界层逆温结构和相对湿度在低层随高度迅速降低的分布状态,这种强逆温稳定结构和底层饱和的高湿状态正是大气边界层雾形成和维持的良好环境。从温度垂直廓线可以明显观察到,当模式分辨率为0.5 km达到大涡尺度时,原MYNN中尺度湍流参数化模拟温度廓线出现显著偏差,但尺度自适应MYNN的模拟温度廓线与原方案在3 km分辨率模式的模拟结果相近,并且与ERA-interim再分析结果接近。在灰色区域和大涡尺度分辨率模式中都能合理刻画温度垂直分布。从相对湿度的垂直分布同样可以发

现,尺度自适应方案的4个分辨率结果相似度高、离散度小,不同分辨率模式给出了一致的湿度分布结果,但原MYNN方案的中尺度参数化则在1和0.5 km分辨率的灰色区域上都给出与3 km分辨率模式较大离差的结果。

进一步分析方案改进前、后大气边界层内热量和水汽通量的模拟结果。在不同分辨率模式中,尺度自适应改进前、后模式模拟的大气边界层湍流热量通量和水汽通量垂直廓线(图7)显示,原MYNN方案也给出了随分辨率升高热通量和水汽通量减少的趋势,但缺少非局地湍流参数化贡献。尺度自适应处理后的MYNN大气边界层方案除增加了局地湍流热通量和水汽通量的自适应计算外,还增加非局地湍流的参数化,对热通量和水汽通量分别处理,改进了原方案湍流动能闭合中对感热和潜热湍流输送统一参数化计算的问题。从结果看,尺度自适应MYNN在增加对非局地湍流的参数化后,感热通量和潜热通量相对原方案显著降低,且随分辨率升高逐步降低。感热和潜热通量集中于100 m高度以下近地面大气边界层内,对海表面雾区的形成和维持有利。

6 结论

通过改进湍流长度尺度计算、对大气边界层控

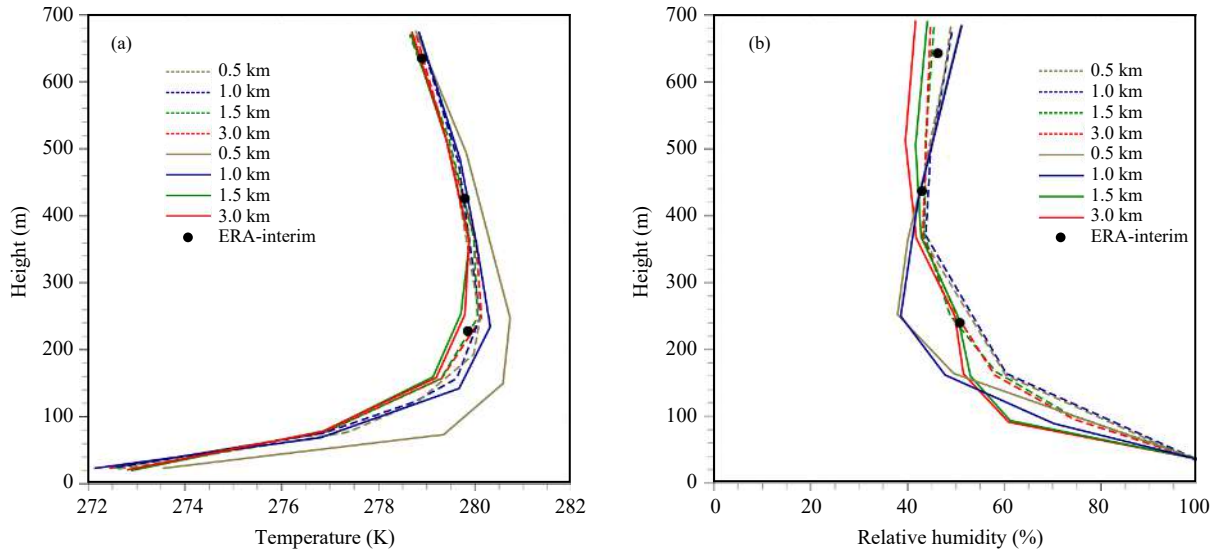


图 6 26 日 12 时雾区 A 点的温度 (a) 和相对湿度 (b) 垂直廓线 (实线为原 MYNN 方案, 虚线为尺度自适应方案)

Fig. 6 Vertical profiles of temperature (a) and relative humidity (b) at point A at 12:00 BT 26 February with the original (solid) and the self-adapting (dashed) MYNN scheme

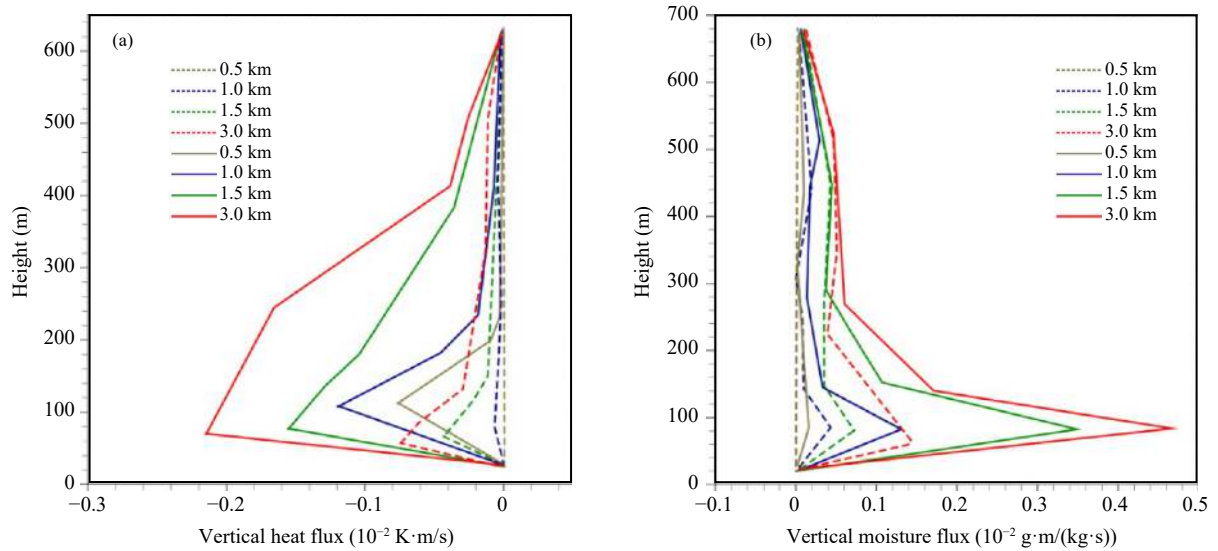


图 7 26 日 12 时雾区 A 点热量 (a) 和水汽 (b) 垂直通量 (实线为原 MYNN 方案, 虚线为尺度自适应方案)

Fig. 7 Vertical profiles of heat (a) and moisture (b) fluxes at point A at 12:00 BT 26 February with the original (solid) and the self-adapting (dashed) scheme

制局地湍流强弱的湍流长度尺度和非局地湍流输送的尺度自适应处理, 对 MYNN2.5 参数化方案进行了网格尺度自适应改造和优化, 改善了 MYNN 方案在高分辨率模式中湍流高估的现象, 实现了湍流长度尺度随模式网格大小变化, 从而达到在 MYNN2.5 参数化方案中调整网格可分辨大涡尺度和不可分辨次网格湍流部分的贡献, 增强了方案对不同分辨率模式应用的柔韧性。同时, 水汽和热量

非局地湍流输送自适应参数化的引入, 改善了模式预报量在不同分辨率模式中的数值表达一致性, 增强了大气边界层参数化方案对热量和水汽湍流的描述能力。

采用尺度自适应 MYNN2.5 方案对 2014 年 2 月 26 日的一次黄海海雾过程进行了数值模拟试验, 通过模拟结果和卫星云图的对比发现, 尺度自适应 MYNN 方案模拟的稳定大气边界层雾区在不

同分辨率模式中的模拟结果具有较高的一致性, 在 1 km 和 0.5 km 灰色区域分辨率模式中的黄海海雾区与 3 km 中尺度模式的雾区模拟相似, 改进了 MYNN2.5 对网格大小的自适应能力和不同网格分辨率模式的应用范围, 增强了“灰色区域”尺度模式的实际预报能力。

考虑尺度自适应湍流长度尺度和非局地湍流作用的大气边界层 MYNN2.5 方案可以修正“灰色区域”中原参数化方案中被高估的湍流强度, 并改进其对大尺度系统控制下的非局地湍流的描述。在不同分辨率模式对大气边界层温、湿度结构的模拟中, 尺度自适应方案改进效果明显, 包括不同分辨率模式湍流垂直通量和物理量垂直变化等。在这次海雾过程的模拟中, 尤其是当模式分辨率接近或位于灰色区域时, 尺度自适应 MYNN 湍流方案明显改善了大气边界层温度和湿度垂直结构, 模拟的雾区范围和地理分布更加准确, 改进了千米级高分辨率模式的海雾模拟效果。

参考文献

- 曹祥村, 邵利民, 易海祁等. 2009. 一次冬季平流辐射雾过程的观测分析及数值模拟研究. *海洋学报*, 31(4): 39-50. Cao X C, Shao L M, Yi H Q, et al. 2009. Observational analysis and numerical simulation of an advection-radiation sea fog event in winter. *Acta Oceanol Sinica*, 31(4): 39-50 (in Chinese)
- 程相坤, 程航, 徐杰等. 2013. 一次黄海海雾成因分析及数值模拟试验. *气象与环境学报*, 29(6): 15-23. Cheng X K, Cheng H, Xu J, et al. 2013. Forming reason of a sea fog event and its numerical simulation over the Yellow Sea. *J Meteor Environ*, 29(6): 15-23 (in Chinese)
- 傅刚, 王菁茜, 张美根等. 2004. 一次黄海海雾事件的观测与数值模拟研究——以 2004 年 4 月 11 日为例. *中国海洋大学学报*, 34(5): 720-726. Fu G, Wang J Q, Zhang M G, et al. 2004. An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow Sea on 11 April, 2004. *Period Ocean Univ China*, 34(5): 720-726 (in Chinese)
- 高山红, 齐伊玲, 张守宝等. 2010. 利用循环 3DVAR 改进黄海海雾数值模拟初始场 I: WRF 数值试验. *中国海洋大学学报*, 40(10): 1-9. Gao S H, Qi Y L, Zhang S B, et al. 2010. Initial conditions improvement of sea fog numerical modeling over the Yellow Sea by using cycling 3DVAR Part I: WRF numerical experiments. *Period Ocean Univ China*, 40(10): 1-9 (in Chinese)
- 黄健, 王斌, 周发琇等. 2010. 华南沿海暖海雾过程中的湍流热量交换特征. *大气科学*, 34(4): 715-725. Huang J, Wang B, Zhou F X. 2010. Turbulent heat exchange in a warm sea fog event on the coast of South China. *Chinese J Atmos Sci*, 34(4): 715-725 (in Chinese)
- 黄文彦, 沈新勇, 王卫国等. 2014. 边界层参数化方案对边界层热力和动力结构特征影响的比较. *地球物理学报*, 57(5): 1399-1414. Huang W Y, Shen X Y, Wang W G, et al. 2014. Comparison of the thermal and dynamic structural characteristics in boundary layer with different boundary layer parameterizations. *Chinese J Geophys*, 57(5): 1399-1414 (in Chinese)
- 黄翊, 彭新东. 2017. 边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响. *大气科学*, 41(3): 533-543. Huang Y, Peng X D. 2017. The impact of an improved planetary boundary layer parameterization scheme on the simulation of fog. *Chinese J Atmos Sci*, 41(3): 533-543 (in Chinese)
- 江川, 沈学顺. 2013. 基于大涡模拟评估 GRAPES 模式对对流边界层的模拟性能. *气象学报*, 71(5): 879-890. Jiang C, Shen X S. 2013. Assessment of the simulative performance of the GRAPES model on the convective boundary layer based on the large eddy simulations. *Acta Meteor Sinica*, 71(5): 879-890 (in Chinese)
- 刘敏, 郭鹏. 2005. Ekman 层风速随高度分布方程的数值解试验. *中国科学院上海天文台年刊*, (26): 31-38. Liu M, Guo P. 2005. Numerical solution of the distributed equation of the wind field with respect to height in Ekman layer. *Ann Shanghai Astron Observ Chinese Acad Sci*, (26): 31-38 (in Chinese)
- 饶莉娟. 2014. YSU 与 MYNN 边界层方案的黄海海雾模拟效果比较 [D]. 青岛: 中国海洋大学. Rao L J. 2014. Comparison of the effect of YSU and MYNN PBL schemes on the modeling of the Yellow Sea fogs [D]. Qingdao: Ocean University of China (in Chinese)
- 石红艳, 王洪芳, 齐琳琳等. 2005. 长江中下游地区一次辐射雾的数值模拟. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 6(4): 404-408. Shi H Y, Wang H F, Qi L L, et al. 2005. Numerical simulation of radiation fog event in Yangtze River. *J PLA Univ Sci Technol*, 6(4): 404-408 (in Chinese)
- 肖艳芳, 张杰, 崔廷伟等. 2017. 海雾卫星遥感监测研究进展. *海洋科学*, 41(12): 146-154. Xiao Y F, Zhang J, Cui T W, et al. 2017. Review of sea fog detection from satellite remote sensing data. *Mar Sci*, 41(12): 146-154 (in Chinese)
- 徐慧燕, 朱业, 刘瑞等. 2013. 长江下游地区不同边界层参数化方案的试验研究. *大气科学*, 37(1): 149-159. Xu H Y, Zhu Y, Liu R, et al. 2013. Simulation experiments with different planetary boundary layer schemes in the lower reaches of the Yangtze River. *Chinese J Atmos Sci*, 37(1): 149-159 (in Chinese)
- 杨玉华, 刘长海, Dudhia D 等. 2016. 基于大涡模拟对两类典型边界层参数化方案的评估分析. *高原气象*, 35(1): 172-180. Yang Y H, Liu C H, Dudhia D, et al. 2016. Evaluation of two typical PBL parameterization schemes based on large-eddy simulation result. *Plateau Meteor*, 35(1): 172-180 (in Chinese)
- 张纪伟, 张苏平, 吴晓京等. 2009. 基于 MODIS 的黄海海雾研究——海雾特征量反演. *中国海洋大学学报*, 39(S1): 311-318. Zhang J W, Zhang S P, Wu X J, et al. 2009. The research on Yellow Sea sea fog based on MODIS data: Sea fog properties retrieval and spatial-temporal distribution. *Period Ocean Univ China*, 39(S1): 311-318 (in Chinese)

- Chaboureau J P, Bechtold P. 2002. A simple cloud parameterization derived from cloud resolving model data: Diagnostic and prognostic applications. *J Atmos Sci*, 59(15): 2362-2372
- Cheng A N, Xu K M, Stevens B. 2010. Effects of resolution on the simulation of boundary-layer clouds and the partition of kinetic energy to subgrid scales. *J Adv Model Earth Syst*, 2(1): 3
- Deardorff J W. 1974. Three-dimensional numerical study of the height and mean structure of a heated planetary boundary layer. *Bound Layer Meteor*, 7(1): 81-106
- Hariprasad K B R R, Srinivas C V, Singh A B, et al. 2014. Numerical simulation and intercomparison of boundary layer structure with different PBL schemes in WRF using experimental observations at a tropical site. *Atmos Res*, 145-146: 27-44
- Honnert R, Masson V, Couvreur F. 2011. A diagnostic for evaluating the representation of turbulence in atmospheric models at the kilometeric scale. *J Atmos Sci*, 68(12): 3112-3131
- Huang Y, Peng X D. 2017. Improvement of the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino planetary boundary-layer scheme based on observational data in China. *Bound Layer Meteor*, 162(1): 171-188
- Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. 2008. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models. *J Geophys Res*, 113(D13): D13103
- Ito J, Niino H, Nakanishi M. 2014. Horizontal turbulent diffusion in a convective mixed layer. *J Fluid Mech*, 758: 553-564
- Li P Y, Fu G, Lu C G, et al. 2012. The formation mechanism of a spring sea fog event over the Yellow Sea associated with a low-level jet. *Wea Forecasting*, 27(6): 1538-1553
- Mellor G L, Yamada T. 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers. *J Atmos Sci*, 31(7): 1791-1806
- Nakanishi M. 2001. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data. *Bound Layer Meteor*, 99(3): 349-378
- Nakanishi M, Niino H. 2004. An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. *Bound Layer Meteor*, 112(1): 1-31
- Nakanishi M, Niino H. 2006. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound Layer Meteor*, 119(2): 397-407
- Nakanishi M, Niino H. 2009. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer. *J Meteor Soc Japan*, 87(5): 895-912
- Shin H H, Hong S Y. 2013. Analysis of resolved and parameterized vertical transports in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *J Atmos Sci*, 70(10): 3248-3261
- Shin H H, Hong S Y. 2015. Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions. *Mon Wea Rev*, 143(1): 250-271
- Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations. I: The basic experiment. *Mon Wea Rev*, 91(3): 99-164
- Stull R B. 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 666pp
- Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. 2008. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon Wea Rev*, 136(12): 5095-5115
- Wyngaard J C. 2004. Toward numerical modeling in the "terra incognita". *J Atmos Sci*, 61(14): 1816-1826
- Zhang X, Bao J, Chen B. 2018. A three-dimensional scale-adaptive turbulent kinetic energy scheme in the WRF-ARW model. *Mon Wea Rev*, 146(7): 2023-2045
- Zhou B W, Simon J S, Chow F K. 2014. The convective boundary layer in the terra incognita. *J Atmos Sci*, 71(7): 2545-2563