刘梦娟，张旭，陈葆德. 2018. 边界层参数化方案在“灰色区域”尺度下的适用性评估 [J]. 大气科学, 42 (1): 52−69. Liu Mengjuan, Zhang Xu, Chen Baode. 2018. Assessment of the suitability of planetary boundary layer schemes at “grey zone” resolutions [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 42 (1): 52−69, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16269.

边界层参数化方案在“灰色区域”尺度下的适用性评估

刘梦娟[1, 2] 张旭[1, 3] 陈葆德[1, 3]

1 上海区域高分辨率数值预报创新中心，上海 200030
2 上海中心气象台，上海 200030
3 中国气象局上海台风研究所，上海 200030

摘 要 随着数值预报模式分辨率的提高，当模式网格距与含能湍涡的长度尺度相当时，模式动力过程可解析一部分湍流运动，而剩余的湍流运动仍需参数化，此时便产生了湍流参数化的“灰色区域”问题。对传统的 PBL（Planetary Boundary Layer）方案在“灰色区域”下的适用性评估，是改进 PBL 方案以使其能够适应分辨率变化的前提和基础。本研究基于干对流边界层的大涡模拟试验，比较了 WRF（Weather Research and Forecast Model）模式中四种常用的边界层参数化方案 [YSU (Yonsei University)、MYJ (Mellor-Yamada-Janjic)、MYNN2.5（Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 2.5）、MYNN3）] 在“灰色区域”尺度下的表现。研究表明，混合层内总热通量对所使用的参数化方案和水平分辨率均不敏感。不同参数化方案中次网格与网格通量的比例表现出对水平网格距不同的依赖性。局地 PBL 方案（MYJ、MYNN2.5）在混合层内的平均位温随网格距减小而增大，次网格通量随网格距减小而减小，较参考湍流场对次网格通量有所低估。YSU 方案的非局地项几乎不随水平格距改变而变化，对次网格通量的表征并未表现出较强的分辨率依赖性，且过强的非局地次网格输送使混合层内温度层结呈弱稳定，抑制了可分辨湍流输送，不易于激发次级环流。MYNN3 方案的非局地次网格通量（负梯度输送项）随网格距减小而减小，使其对次网格通量的表征具有较好的分辨率依赖性。PBL 方案在“灰色区域”尺度下的适用性与具体分辨率有关。以分辨率 500 m 为例，四种 PBL 方案中不存在一种最佳方案，能对边界层的热力结构和湍流统计特征均有准确的描述。

关键词 边界层参数化方案 灰色区域 大涡模拟 非局地输送

文章编号 1006-9895(2018)01-0052-18 **中图分类号** P456.7 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.16269

Assessment of the Suitability of Planetary Boundary Layer Schemes at “Grey Zone” Resolutions

LIU Mengjuan[1, 2], ZHANG Xu[1, 3], and CHEN Baode[1, 3]

1 *Shanghai Innovative Center of Regional High Resolution Numerical Weather Prediction, Shanghai* 200030
2 *Shanghai Central Meteorological Observatory*, *Shanghai* 200030
3 *Shanghai Typhoon Institute of China Meteorological Administration*, *Shanghai* 200030

Abstract As the resolution in numerical weather prediction models increases, turbulent motion can be partially resolved by grid scale dynamics. However, a substantial part of turbulent motion still needs to be parameterized, which results in

收稿日期 2016-11-24；**网络预出版日期** 2017-04-25

作者简介 刘梦娟，女，1987 年出生，助理工程师，主要从事边界层观测资料、数值模拟研究。E-mail: mengjuan.liu@gmail.com

通讯作者 张旭，E-mail: zhangx@mail.typhoon.gov.cn

资助项目 国家自然科学基金项目 41505087、41575101，国家重点研发计划“政府间科技合作项目”重点专项 2016YEE0109700

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41505087, 41575101), National Key Research and Development Program of China (2016YFE0109700)

the so-called “grey zone” problem. Assessment of the suitability of traditional PBL (Planetary Boundary Layer) schemes at “grey zone” resolutions would provide foundation for future improvement of PBL schemes, making them more adaptive to the variation of resolutions. In this study, the authors assess the performance of four PBL schemes that are commonly used in WRF, i.e. YSU (Yonsei University), MYJ (Mellor-Yamada-Janjic), MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 2.5) and MYNN3 in the simulation of convective PBL at “grey-zone” resolutions using LES (Large-Eddy Simulation). Results indicate that at higher resolutions, domain-averaged potential temperature increases in the mixing layer with local PBL schemes such as MYJ and MYNN2.5, while subgrid scale flux decreases and falls below the reference value constructed from LES. The nonlocal terms in YSU hardly change with grid size and do not show distinct scale-sensitivity. In contrast, the counter-gradient term in MYNN3 decreases with reduced grid-size and exhibits a certain degree of scale-sensitivity. The strong nonlocal subgrid mixing in YSU results in a weak, stable stratification in the mixing layer and suppresses resolved-scale turbulence mixing, thus impeding the onset of convectively induced secondary circulations in the model. The suitability of PBL schemes at “grey zone” resolutions varies with certain resolutions. For example, at the resolution of 500 m, none of the four PBL schemes performs well to accurately simulate both the thermal structure and turbulent statistics in the PBL.

Keywords PBL parameterization schemes, Grey zone, LES (Large-Eddy Simulation), Nonlocal mixing

1 引言

数值天气预报是业务天气预报的重要技术支撑，而大气数值模式的发展是数值天气预报的基础。尽可能提高模式水平分辨率是提高数值天气预报准确率的一个重要方面。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（Davies et al., 2005; Saito et al., 2006; Charles and Colle, 2009; 陈敏等，2011；Baldauf et al., 2011; Seity et al., 2011；陈葆德等，2013；Benjamin et al., 2016）。Hong and Dudhia（2012）预计在未来几年内一些数值天气预报中心的模式水平分辨率可达 1 km，甚至 1 km 以下。模式向高分辨率发展不仅在计算上对模式动力框架提出了更高的要求，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湍流混合的参数化问题是最重要的方面之一（Dudhia, 2014; 刘辉志等，2013）。

从尺度与行星边界层（Planetary Boundary Layer，简称 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，需要给定网格距，因此必须对连续的尺度进行截断。大气运动中含能湍涡的长度尺度 l_e 在深湿对流和对流边界层内可达公里量级（Shin and Hong, 2015）。

当模式网格距 Δ 远大于含能湍涡的长度尺度 l_e 时，例如，传统的分辨率较粗的中尺度数值预报模式（水平分辨率 10～100 km），通常可认为大气边界层内所有湍流运动均为次网格尺度，需要对所有湍流进行参数化。此时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，所以主要考虑垂直方向上的湍流混合作用。因此，在中尺度模式中，通常使用一维大气边界层参数化方案（以下简称 PBL 方案）来表征次网格湍流混合的作用，如局地 MYJ（Mellor-Yamada-Janjic）方案（Janjić, 2001）和非局地 YSU（Yonsei University）方案（Hong et al., 2006）。

当模式网格距 Δ 远小于含能湍涡的长度尺度 l_e 时，经常使用大涡模式（Large-Eddy Simulation，简称 LES）进行湍流模拟。LES 的水平网格距通常要求小于 100 m，以确保分辨率落在惯性子区，此时模式动力过程能够直接解析尺度较大的含能湍涡，仅对小尺度涡动进行参数化闭合处理，常使用三维 Smagorinsky 方案（Smagorinsky, 1963）或 1.5 阶三维湍流动能（3-Dimensional Turbulent Kinetic Energy，简称 3D-TKE）闭合方案（Deardorff, 1980）来表征次网格湍流的作用。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。次网格湍流混合的参数化方案“本质上”应依赖于模式网格的尺度。

随着目前中尺度数值预报模式的水平分辨率越来越高，当模式网格距 Δ 与含能湍涡的长度尺度 l_e 相当时，模式的动力过程可解析一部分湍流运动，而剩余的湍流运动仍需参数化。Wyngaard（2004）将该区域称为“Terra Incognita”（未知领域），通常也被称为湍流参数化的“灰色区域”。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既不同于传统的 PBL 参数化，也不同于 LES 参数化。

基于上述问题，人们所期望的是设计一种适应网格距变化的湍流参数化方案。但目前，在“灰色区域”尺度下尚没有较为合适的方案，因此对现有的传统 PBL 方案进行全面的评估，考察其在“灰色区域”尺度下的表现和适用性及其随水平网格距变化的特征，是改进 PBL 方案，使其能够适应分辨率变化的前提和基础。在分辨率较粗的中尺度下，国内外学者对 PBL 方案做了较多评估（邓国等，2005；Hu et al., 2010；邱贵强等，2013；徐慧燕等，2013；张小培和银燕，2013；周强和李国平，2013；黄文彦等，2014；王子谦等，2014; Cohen et al., 2015; 高笃鸣等，2016；Muñoz-Esparza et al., 2016）。但针对 PBL 方案在“灰色区域”尺度下的评估仍较少：Zhou et al.（2014）设计了一系列对流边界层的理想试验，使用 LES 及 PBL 方案（Sun and Chang，1986）分析了网格距从 3600 m 向 25 m 变化过程中的模式表现，结果表明当网格距落入“灰色区域”时，模式动力过程激发了具有尺度依赖性的对流，从而使准确模拟该尺度下的边界层湍流过程变得更加困难。Shin and Dudhia（2016）评估了 WRF 模式中 4 种非局地 PBL 方案 [YSU，ACM2（Asymmetric Convective Model 2），EDMF（Eddy Diffusivity Mass Flux），TEMF（Total Energy Mass Flux）]和一种局地 PBL 方案（MYNN2.5）在次公里网格距下的表现，分析表明以上 5 种 PBL 方案均对尺度不敏感。然而，上述工作在 PBL 方案的选择、所考察的网格距等方面仍不够全面。本研究选取的四种 PBL 方案，涵盖了 PBL 参数化常用的两大类方法（K 廓线构造方法及湍流动能闭合方法），且四种 PBL 方案对局地与非局地作用的表征方法各有不同。本研究借助理想干对流边界层的大涡模拟，构造不同分辨率下的参考湍流场，考察了这四种 PBL 方案在“灰色区域”尺度下的表现和适用性，为发展适用于高分辨率数值模式的次网格湍流混合方案提供了科学参考和实践基础。

2 大涡标准试验与分析方法

2.1 大涡标准试验

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 WRFv3.7 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（Moeng et al., 2007; Skamarock et al., 2008）。

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 km×30 km，水平分辨率为 $\Delta_{\mathrm{LES}}=50$ m，顶层高度为 2 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 K m s^{-1}）和东西向地转风（U_{g}=10 m s^{-1}）驱动。LES 的次网格湍流参数化采用 1.5 阶的 3D-TKE 闭合方案。模式积分 4 h，时间步长为 0.2 s。初始位温 θ 廓线为

$$\theta=\begin{cases}300\ \mathrm{K}, & 0\ z\leqslant 925\ \mathrm{m},\\ 300\ \mathrm{K}+(z-925\ \mathrm{m})\times 0.0536\ \mathrm{K\ m^{-1}}, & \\ \qquad 925\ \mathrm{m}\ z\leqslant 1075\ \mathrm{m}, & \\ 308.05\ \mathrm{K}+(z-1075\ \mathrm{m})\times 0.003\ \mathrm{K\ m^{-1}}, & \\ \qquad z\ 1075\ \mathrm{m}, & \end{cases} \tag{1}$$

其中，z 为高度。

2.2 分析方法

基于水平网格距为 50 m 的 LES 结果，使用 Dorrestijn et al. (2013) 的方法构造分辨率从 250 m 至 9000 m 的参考湍流场（reference，简称 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（Cheng et al., 2010; Honnert et al., 2011; Dorrestijn et al., 2013; Shin and Hong, 2013; Zhou et al., 2014），构造方法如图 1 所示：在得到 LES 的模拟结果后，设 LES 的水平计算区域为 $D\times D$，“灰色区域”内任一水平网格距为 Δ，Δ 应介于 D 与 Δ_{LES} 之间。此时标准场中包含 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 $\Delta_{\mathrm{LES}}\times\Delta_{\mathrm{LES}}$ 网格，$J=(\Delta/\Delta_{\mathrm{LES}})^2$。对于水平网格距为 Δ 的参考场，每个格点上的变量 ϕ 可由对网格内 LES 结果做平均得到：

$$\overline{\phi}^{\Delta_k}=(J)^{-1}\sum_j\phi_{j,k}, \tag{2}$$

其中，下标 j, k 分别代表第 k 个次网格和该次网格中第 j 个 LES 网格。Δ_k 表示第 k 个次网格。

对于任一水平网格距 Δ，整个水平计算区域内 ϕ 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（下文分别以上标 R(Δ) 与

S(Δ) 表示）：

$$\langle w'\phi'\rangle = \langle w'\phi'\rangle^{\mathrm{R}(\Delta)} + \langle w'\phi'\rangle^{\mathrm{S}(\Delta)}, \quad (3)$$

其中，w 为垂直速度。网格尺度的湍流通量可表示为

$$\langle w'\phi'\rangle^{\mathrm{R}(\Delta)} = K^{-1}\sum_k \left(\overline{w}^{\Delta_k} - \langle w\rangle\right)\left(\overline{\phi}^{\Delta_k} - \langle\phi\rangle\right), \quad (4)$$

次网格尺度通量则由下式表示：

$$\langle w'\phi'\rangle^{\mathrm{S}(\Delta)} = K^{-1}\sum_k \left\{ J^{-1}\sum_j \left[(w_{j,k} - \overline{w}^{\Delta_k})(\phi_{j,k} - \overline{\phi}^{\Delta_k}) + f_{j,k}^{w\phi} \right] \right\}, \quad (5)$$

其中，〈 〉代表对于整个水平区域 $D\times D$ 的平均。' 表示相对于区域平均的扰动。$f_{j,k}^{w\phi}$ 是 Δ_{LES} 的次网格输送量，由 LES 的次网格参数化方案得到。

用上述方法分别得到 $\Delta = 250$ m、500 m、1000 m、3000 m、9000 m 的参考场，可与 PBL 方案在各个分辨率下的模拟进行比较。由下文可知，9000 m 时次网格热通量占 100%，为典型的中尺度分辨率，$\Delta = 3000$ m 时可解析小部分通量输送，$\Delta = 250$～1000 m 时参考场的通量输送一部分由次网格参数化表征，一部分可被模式动力过程解析。通过比较这 5 个网格距上的不同 PBL 试验结果，可以考察现有 PBL 方案在“灰色区域”尺度下的表现和适用性。

2.3 边界层参数化方案简介

本文选取了 4 种有代表性的 PBL 方案，对其进行评估与对比，分别为 YSU 方案、MYJ 方案、MYNN2.5（Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino Level 2.5）和 MYNN3 方案（Nakanishi and Niino, 2004, 2006, 2009）。具体方案如下：

（1）YSU 方案

YSU 方案为一阶非局地 K 闭合方案。相比于局地方案，非局地方案不仅考虑各层之间物质和通量交换，同时也考虑了相邻模式格点上的交换。

对任意变量 ϕ，其通量 $\overline{w'\phi'}$ 可表示为

$$-\overline{w'\phi'} = K_\phi\frac{\partial \Phi}{\partial z} - K_\phi b\frac{(\overline{w'\phi'})_0}{w_{s0}z_i} - (\overline{w'\phi'})_{z_i}\left(\frac{z}{z_i}\right)^3, \quad (6)$$

①　②　③

其中，Φ 代表网格尺度变量，ϕ' 代表扰动场，K_ϕ 为湍流扩散系数，z 为高度，z_i 为边界层高度，$(\overline{w'\phi'})_0$ 为地面通量，$(\overline{w'\phi'})_{z_i}$ 为逆温层通量，w_{s0} 为 $z = 0.5z_i$ 处的混合层特征速度，b 为比例系数。等式右侧①项为变量 ϕ 的局地梯度项，对于一阶方案，K_ϕ 由经验廓线确定。如其动量扩散系数 K_{M} 可表示为

$$K_{\mathrm{M}} = \kappa w_s z\left(1 - \frac{z}{z_i}\right)^2, \quad (7)$$

其中，κ 为冯卡尔曼（von Kármán）常数，w_s 为混合层特征速度。

公式（6）中①项代表了垂直层次间的湍流交换，②项为非局地的负梯度输送，③项代表了夹卷层湍流输送的作用。②、③两项均为非局地项。为考察局地一阶方案在“灰色区域”下的表现，设计了一组敏感性试验，该组试验对 YSU 方案进行了调整，使公式（6）中非局地项②项和③项均为 0，只保留梯度输送项①，因此命名该组试验为 LYSU（Local YSU）。

（2）MYJ 方案

MYJ 为 1.5 阶局地 TKE（Turbulent Kinetic Energy）方案。与 MYNN2.5 及 MYNN3 一样，采用 Mellor-Yamada 闭合模型（Mellor and Yamada, 1982）。高阶闭合模型因增加了更多的控制方程，从而对湍流输送有更强的物理约束性。

MYJ 方案中动量扩散系数 K_{M} 的表示方法与 K 闭合方案不同，即

$$K_{\mathrm{M}} = lqS_{\mathrm{M}}, \quad (8)$$

其中，S_{M} 为稳定度函数，l 为湍流混合长，由诊断方程得到：

$$l = l_0 kz/(kz + l_0), \quad (9)$$

其中，$l_0 = a\int_0^{z_i}(|z|q\mathrm{d}z)/\int_0^{z_i}(q\mathrm{d}z)$，$a$ 为常数。

$q^2/2 = (1/2)(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$（$u'$ 为东西方向水平风速扰动分量，v' 为南北方向水平风速扰动分量，w' 为垂直速度扰动分量），为湍流动能，由 TKE 预报方程得到：

$$\frac{\partial q^2}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial z}\overline{w'(u'^2 + v'^2 + w'^2 + 2p'/\rho_0)} - 2(\overline{u'w'}\frac{\partial U}{\partial z} + \overline{v'w'}\frac{\partial V}{\partial z}) + 2\frac{g}{\Theta_0}\overline{w'\theta_v'} - 2\varepsilon, \quad (10)$$

①　②　③　④

其中，ρ_0 为空气密度参考态，U 为东西方向水平风速网格尺度量，V 为南北方向水平风速网格尺度量，g 为重力加速度，Θ_0 为位温参考态，θ_v 为虚位温，ε 为耗散率。①项代表 TKE 的垂直扩散，②项代表 TKE 的切变产生项，③项代表浮力产生项，④项代表耗散

项。因此，这类方案亦被称作 TKE 方案。本研究中，MYJ、MYNN2.5 及 MYNN3 均为 TKE 方案。

（3）MYNN2.5 方案

MYNN2.5 方案同样为 1.5 阶局地 TKE 方案。与 MYJ 方案不同之处主要在于混合长的诊断方程。MYNN2.5 方案中混合长的诊断方程较为复杂，如下式：

$$\frac{1}{l}=\frac{1}{l_{\mathrm{S}}}+\frac{1}{l_{\mathrm{T}}}+\frac{1}{l_{\mathrm{B}}}, \tag{11}$$

其中，l 由三种不同的长度尺度构成，l_{S} 为近地层长度尺度，l_{T} 为与边界层高度有关的长度尺度，l_{B} 与浮力长度尺度有关，诊断方程表明该混合长于由三种长度尺度中最短的一项所决定。

（4）MYNN3 方案

MYNN3 方案相比 MYNN2.5 方案，阶数更高，增加了 $\overline{\theta'^2}$ 等高阶量的预报方程，如

$$\frac{\partial\overline{\theta'^2}}{\partial t}=-\frac{\partial}{\partial z}\overline{w'\theta'^2}-2\overline{w'\theta'}\frac{\partial\Theta}{\partial z}-2\varepsilon_\theta, \tag{12}$$

其中，θ 为位温，$\overline{w'\theta'}$ 代表热量通量，ε_θ 为 $\overline{\theta'^2}/2$ 的耗散率。其中热量通量可表示为

$$-\overline{w'\theta'}=lqS_{\mathrm{H2.5}}\frac{\partial\Theta}{\partial z}+lq\Gamma_\theta, \tag{13}$$

①　　②

其中，①项代表局地梯度输送，②项代表了负梯度方向的输送，即非局地作用，其中 $\Gamma_\theta\equiv S'_{\mathrm{H}}\partial\Theta/\partial z$，$S'_{\mathrm{H}}$ 为无量纲稳定度函数。因此亦可认为 MYNN3 为非局地方案。

综上可知，本研究所选的四种方案涵盖了业务数值模式中常用且计算效率较高的 PBL 方案，包含了低阶与高阶、局地与非局地方案。具体试验设计如表 1，通过分析比较这四种方案，考察不同类型的 PBL 方案在“灰色区域”下的表现，并从方案原理出发深入分析与比较“灰色区域”下高阶闭合、非局地项等的作用，为下一步发展“灰色区域”下次网格混合参数化方案提供了参考。

表 1　PBL（Planetary Boundary Layer）试验设计参数（模式层高均为 2 km，积分 8 小时）

Table 1　List of model settings in PBL (Planetary Boundary Layer) test (model depth: 2 km; integration length: 8 h)

湍流参数化方法	$\Delta_{x,y}$ / m	Δ_t / s	n_z	$n_{x,y}$
LES(Large-Eddy Simulation)	50	0.2	100	600
PBL(LYSU, MYJ, MYNN2.5, MYNN3)	250	1	100	360
	500	2	100	180
	1000	4	100	180
	3000	10	100	180
	9000	30	100	180

注：$\Delta_{x,y}$ 为水平网格距，Δ_t 为时间步长，n_z 为垂直方向格点数，$n_{x,y}$ 为水平方向格点数。

本研究中 LES 试验的大涡翻滚的特征时间 $\tau_*(\sim z_i/w_*)$ 约为 10 分钟，积分 4 小时后，$t\geqslant 4t_0$（$t_0=6\tau_*$），LES 已达到统计意义上的准平衡态（Moeng and Sullivan, 1994）。以 $\Delta=500$ m 为例，计算该时刻各 PBL 方案近地层及浮力特征值，如表 2 所示。由于不同的边界层方案对应不同的近地层方案，地表摩擦速度 u_* 不同（表 2），从而导致地表动量通量不同。另外，在干对流边界层下，边界层内湍流运动主要由地表热力强迫引起。因此本研究着重考察热量通量在“灰色区域”下的表现。由于篇幅所限，不在本文中对动量通量做具体讨论。

表 2　Δ = 500 m 时各 PBL 方案近地层及浮力特征值

Table 2　Summary of surface and bulk PBL parameters when distance of model grid (Δ) is 500 m

方案	w_* / m s^{-1}	u_* /m s^{-1}	z_i / m	ζ	R_E	R
REF	2.08	0.50	1160	−28.55	−0.24	−
YSU	2.06	0.58	1140	−18.27	−0.25	0.36
MYJ	2.03	0.53	1080	−22.85	−0.12	1.13
MYNN2.5	2.05	0.54	1120	−21.41	−0.19	−0.01
MYNN3	2.03	0.56	1080	−18.57	−0.14	0.50

注：w_* 为对流特征速度，u_* 为地表摩擦速度，z_i 为边界层高度，R 为混合层总热通量相对误差，无量纲数 $\zeta=z_i/L$（其中，L 为奥布霍夫长度），夹卷率 $R_E=\langle w'\theta'\rangle_{z_i}/\langle w'\theta'\rangle_{\mathrm{SFC}}$ 为边界层高度容量与地面热通量之比。

3　试验结果

本研究中 LES 试验积分 4 小时后，已达到统计意义上的准平衡态。因此，选取模式积分 4 小时后的结果进行比较。

3.1　平均场

图 2 为各 PBL 方案在不同分辨率下平均位温的垂直廓线。其中 YSU 方案（图 2a）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。其余方案（包括不含非局地项的 LYSU）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。

进一步比较平均位温梯度廓线（图 3），LES 的位温梯度在混合层内的垂直分布呈下半层为负，上半层为正，随高度逐渐增加的特点。YSU 方案的位温梯度自 400 m 左右高度向上均为正梯度，即稳定

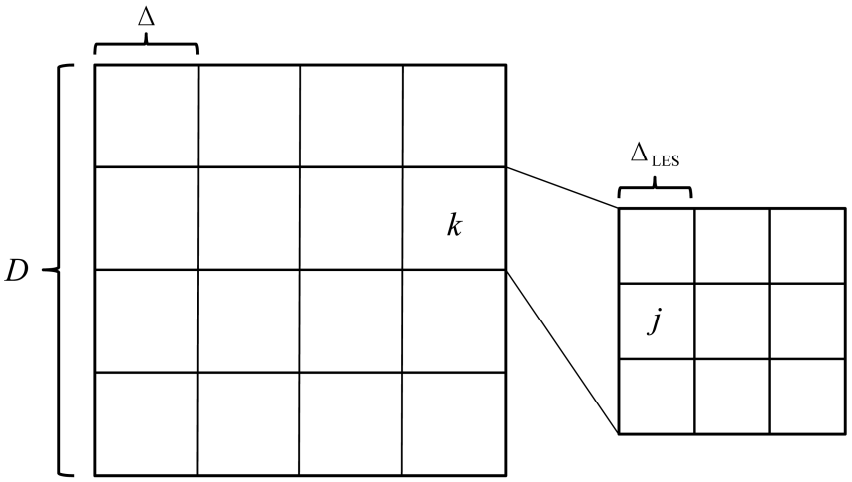


图 1 从 LES（Large-Eddy Simulation）试验构造参考湍流变量示意图

Fig. 1 Schematic diagram illustrating the construction of REF (reference) from LES (Large-Eddy Simulation)

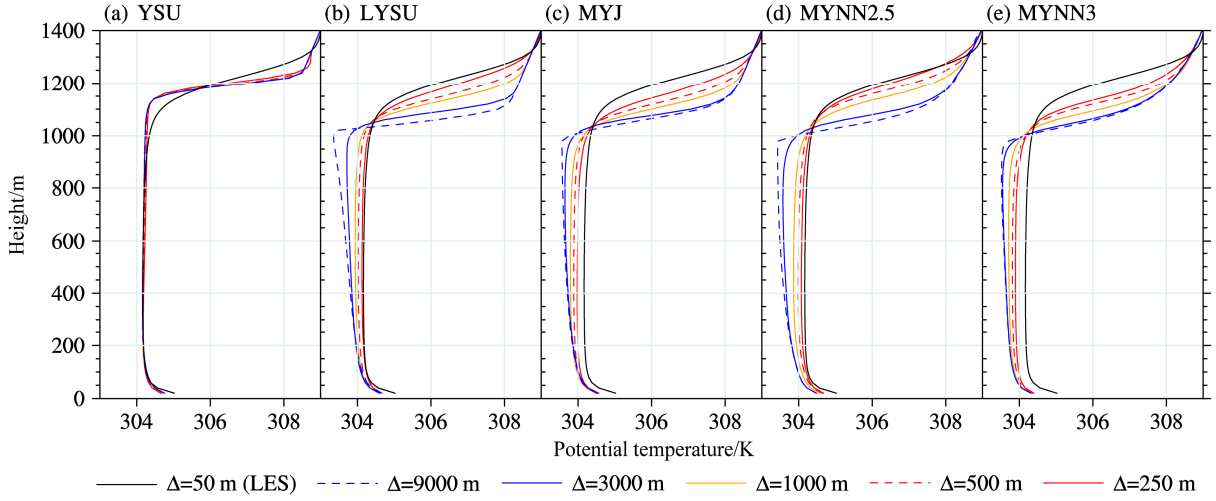


图 2 模式积分 4 小时后 PBL（Planetary Boundary Layer）方案及 LES（黑色实线）的平均位温垂直廓线

Fig. 2 Vertical profiles of domain-averaged potential temperature after 4 h integration simulated by PBL (Planetary Boundary Layer) schemes and LES. The black solid lines indicate results from LES

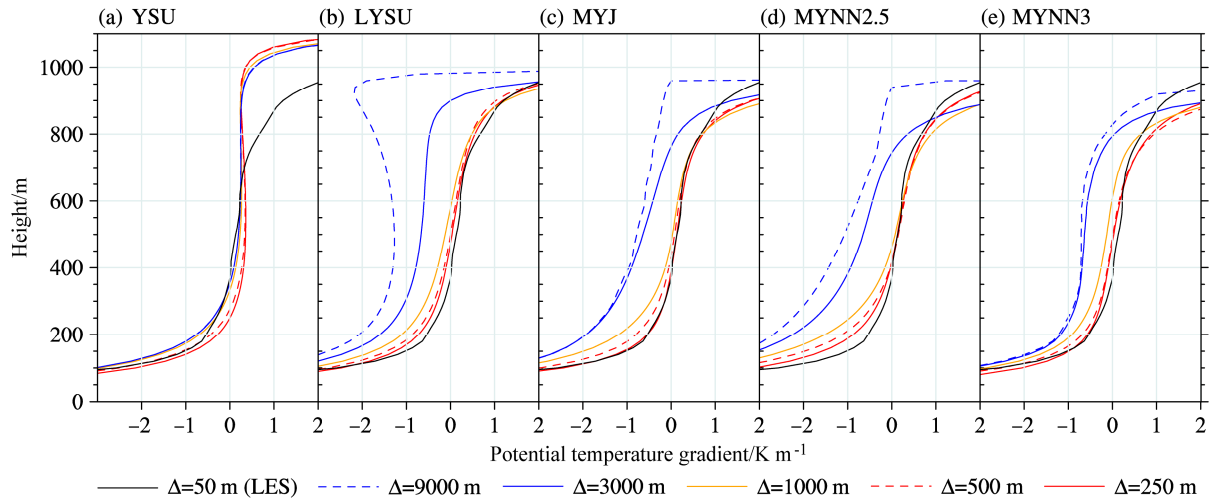


图 3 模式积分 4 小时后 PBL 方案及 LES（黑色实线）的平均位温梯度垂直廓线

Fig. 3 Vertical profiles of domain-averaged potential temperature gradient after 4 h integration simulated by PBL schemes and LES. The black solid lines indicate results from LES

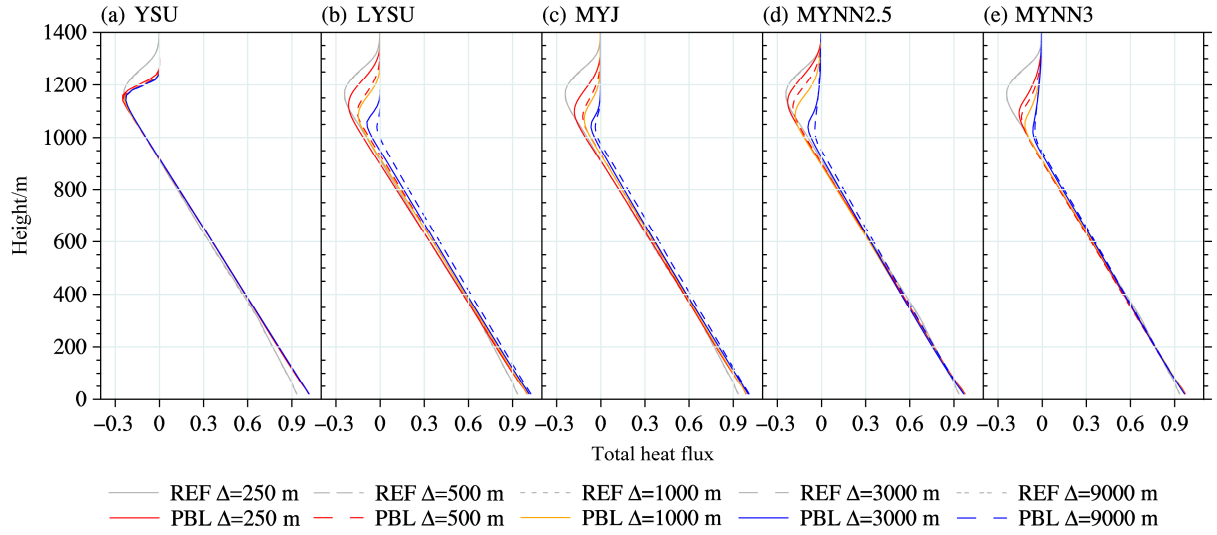


图 4 模式积分 4 小时后 PBL 方案（彩色）与参考湍流场（灰色）总热通量垂直廓线

Fig. 4 Vertical profiles of total heat fluxes simulated by PBL schemes (colored lines) and from REF (grey lines) after 4 h integration

层结；其余方案分辨率较粗时（$\Delta>3000$ m），混合层内位温梯度均为负，即弱不稳定层结，进入“灰色区域”后（$\Delta<3000$ m），分布与 LES 相近。

位温廓线的差异是由各 PBL 方案对热通量输送的不同表征所造成的。局地方案由于缺少对较大尺度涡动引起的非局地湍流输送的表征，因此必须通过维持负的位温梯度，以保证一定的次网格通量输送。LYSU 试验在次公里（$\Delta\leqslant1000$ m）网格距下的位温与位温梯度廓线与 TKE 方案的形状较为接近，这是由于在“灰色区域”，部分湍流输送，尤其是尺度较大的非局地输送，可被模式动力过程解析，弥补了局地梯度输送的不足。基于 TKE 的 PBL 方案（MYJ、MYNN2.5、MYNN3）随分辨率的提高，位温廓线逐渐接近 LES。而 YSU 方案通过非局地项 [公式（6）的②③项] 表征了较大涡动对通量的输送，使得热量充分混合，混合层内的位温梯度在“灰色区域”内大于 0，呈弱稳定层结。

3.2 总通量

当模式水平网格距小于边界层内最大含能湍涡尺度时（$\Delta<l_e$），总热通量$\langle w'\theta'\rangle_{\rm PBL}^{\rm total}$为 PBL 方案计算的次网格热通量与模式动力过程解析的网格尺度热通量之和：

$$\langle w'\theta'\rangle_{\rm PBL}^{\rm total}=\langle w'\theta'\rangle^{\rm R(\Delta)}+\langle w'\theta'\rangle^{\rm S(\Delta)}. \quad (14)$$

图 4 为各 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，PBL 方案中 YSU 的廓线几乎不随水平分辨率变化。其余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。

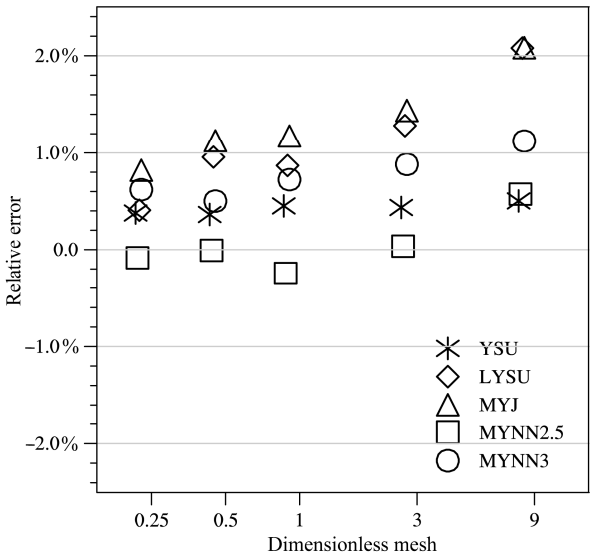


图 5 模式积分 4 小时后 PBL 方案的总热通量相对误差随均一化水平网格距的变化

Fig. 5 Relative errors of the total heat fluxes simulated by PBL schemes as a function of $\Delta x/z_i$ after 4 h integration

定义边界层高度 z_i 为总热通量达到最小值的高度，以 z_i 对纵坐标做归一化处理，计算 $0.15\,z_i\sim0.85\,z_i$ 之间 PBL 方案总热通量$\langle w'\theta'\rangle_{\rm PBL}^{\rm total}$相对 LES$\langle w'\theta'\rangle_{\rm LES}^{\rm total}$的误差 R：

$$R=\frac{\langle w'\theta'\rangle_{\rm PBL}^{\rm total}-\langle w'\theta'\rangle_{\rm LES}^{\rm total}}{\langle w'\theta'\rangle_{\rm LES}^{\rm total}}\times100\%. \quad (15)$$

如图 5 所示，所有 PBL 方案的相对误差均较小

（小于 3%）。其中 MYNN2.5 方案最接近 LES 结果，YSU 方案次之。$\Delta = 9000$ m 时，所有方案的误差最大，进入“灰色区域”后，误差明显减小。

上文分析了各 PBL 方案在“灰色区域”内总通量的变化，下面分别计算 0.15 z_i～0.85 z_i 之间（混合层内）网格（$\langle w'\theta'\rangle^{R(\Delta)}$）和次网格（$\langle w'\theta'\rangle^{S(\Delta)}$）热通量与总通量的比值，如图 6 所示，点虚线为各 PBL 方案的结果，实线为 REF 结果。可以看到，对于网格与次网格通量的分配，各 PBL 方案差异明显，且对水平网格距敏感。具体表现为，所有 PBL 方案模拟的次网格通量比例（蓝色点线）均随水平网格距增大而增加，网格通量比例随水平网格距增大而减少。MYNN3 方案的网格与次网格通量比例随分辨率的变化与 REF 最为接近。YSU 方案的 $\langle w'\theta'\rangle^{S(\Delta)}$ 比重在“灰色区域”内偏大，当分辨率 $\Delta > 1000$ m，$\langle w'\theta'\rangle^{S(\Delta)}$ 的比例接近 100%，几乎全部的 $\langle w'\theta'\rangle^{R(\Delta)}$ 都被抑制。剩余方案则表现为次网格通量比例较 REF 偏低，网格通量比例偏高。

从图 6 REF 的分布可知，$\Delta = 500$ m 附近，次网格与网格热通量之比约为 1:1，可认为该水平网格距为典型的“灰色区域”尺度。以该尺度为例，观察近地层（0.1 z_i）位温扰动及垂直速度的水平截面，如图 7 所示。从 REF 的水平分布来看，位温扰动及垂直速度分布介于带状（horizontal rolls）与细胞状（cells）之间。边界层中对流结构取决于浮力作用与机械作用的相对强度 ζ，当机械作用占主导时

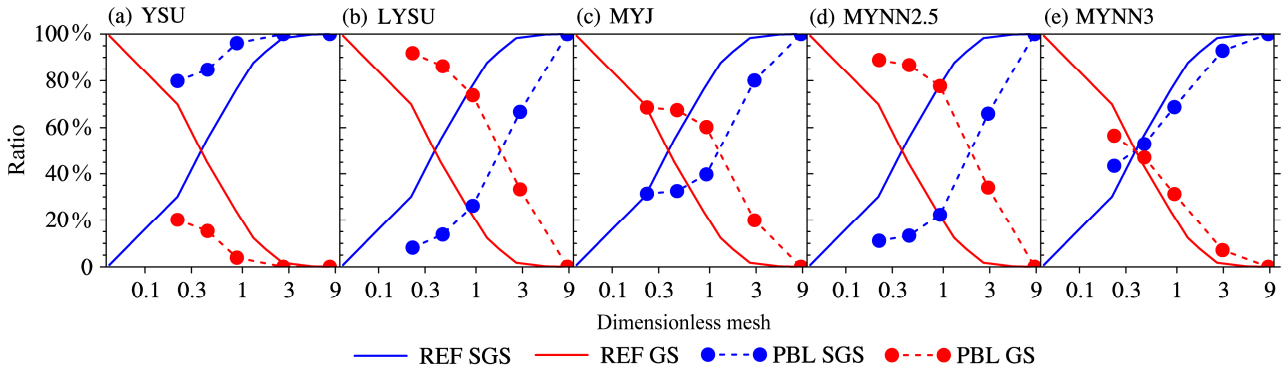


图 6 模式积分 4 小时后 PBL 方案（红、蓝点线）与 REF（红、蓝实线）在混合层内网格（红色）与次网格（蓝色）热通量的比例随均一化水平网格距的变化

Fig. 6 Ratios of the resolved-scale heat fluxes (REF: red solid lines; PBL: red dotted lines) and sub-grid heat fluxes (REF: blue solid lines; PBL: blue dotted lines) to the total against the dimensionless mesh in the mixing layer after 4 h integration

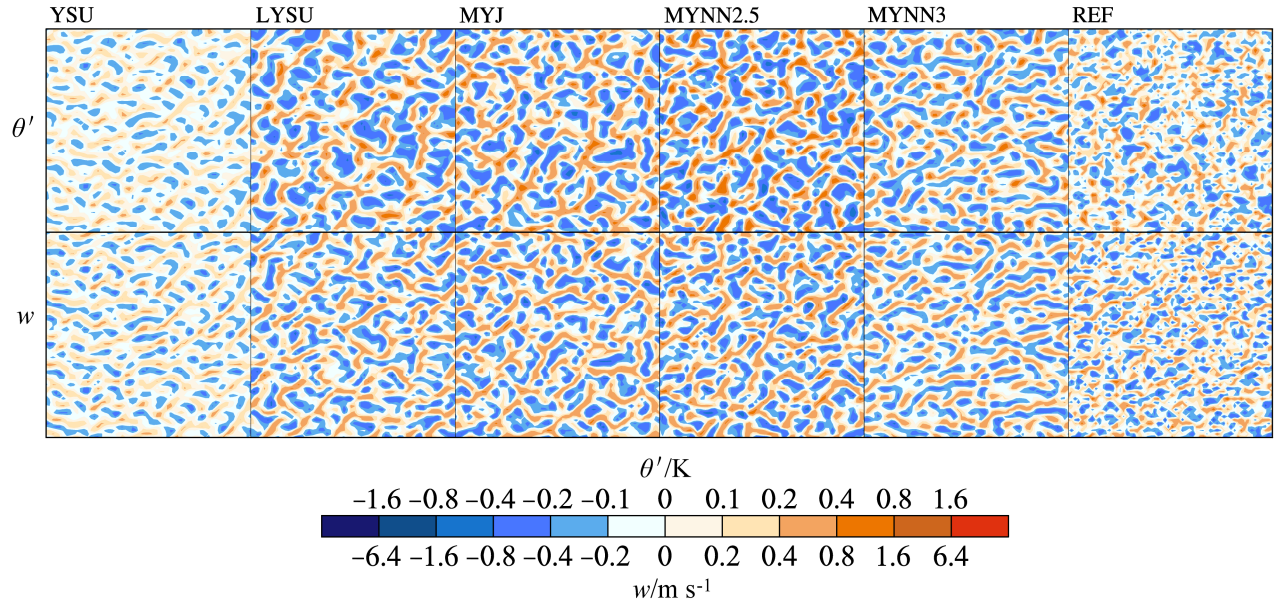


图 7 模式积分 4 小时后 PBL 方案及 REF 在 $\Delta = 500$ m 时 $z = 0.1z_i$ 处位温扰动（上）及垂直速度（下）的水平分布

Fig. 7 Horizontal distributions of perturbation of potential temperature (θ', top panel) and vertical velocity (w, bottom panel) at $z = 0.1z_i$ with grid interval of $\Delta = 500$ m after 4 h integration simulated by PBL schemes and REF

（$-25<\zeta<0$）以带状结构为主，当浮力作用主导时（ζ 远小于−25）以细胞状结构为主（Deardorff, 1972; Lemone, 1973）。LES 中 ζ 为−28.55（表 2），接近−25，因此带状结构不明显。

对比 PBL 方案可知，五组试验的 ζ 均在−25～0 之间（表 2），对流结构以带状为主，其中 YSU 方案与 MYNN3 方案的 ζ 较大，分别为−18.27 与−18.57，带状对流结构更为明显。YSU 方案模拟的对流最弱，MYNN3 方案次之，其余三组试验较强，这与它们模拟的网格湍流强弱是相一致的（图 6）。

由此可见，虽然传统的 PBL 方案在“灰色区域”内能够较为准确地模拟出整个区域的平均位温及总通量，但在细致的结构上，无论垂直分布还是水平分布，仍存在一些问题。在“灰色区域”内，局地与非局地方案，高阶与低阶方案的不同，都会导致次网格与网格通量的不同表现。

3.3 次网格通量

图 8 为各 PBL 方案的次网格通量在不同分辨率下的垂直廓线。可以看到 PBL 方案模拟的次网格热通量均随分辨率变化，而变化特征各不相同。对比 REF 廓线可知，$\Delta=500$～3000 m 时 PBL 方案中仅 YSU 方案模拟出了夹卷层内较明显的负次网格通量，其余方案对该负通量都有显著低估。

在混合层内，PBL 方案的次网格热通量均随水平网格距减小而降低，而变化速率各不相同。YSU 方案随分辨率的变化幅度最小，在 $\Delta=250$～1000 m 间 YSU 方案高估了次网格通量，而当分辨率较粗时（$\Delta\geqslant3000$ m）与 REF 较为一致；MYNN3 方案在 $\Delta\geqslant3000$ m 下模拟的次网格通量与 REF 十分接近，至 $\Delta=1000$ m 时次网格通量明显下降；MYNN2.5 方案的次网格通量在 $\Delta=3000$～9000 m 之间有较明显的变化，该变化特征也可从 3.2 节的次网格与网格通量比例图上看出（图 6）。与 REF 相比，每个 PBL 方案都有各自表现最好的分辨率，如 YSU 方案在 $\Delta=9000$ m 和 MYNN3 方案在 $\Delta=500$ m 时。

为了进一步揭示 PBL 方案对分辨率变化的敏感性及其原因，分别考察非局地方案（YSU，MYNN3）中局地项（图 9a、c）和非局地项（图 9b、d）对水平分辨率的敏感性。YSU 方案的非局地项包括负梯度和夹卷层输送 [公式（6）的②项和③项]，而这些量几乎不随水平网格距变化（图 9b），因此 YSU 方案的非局地通量对水平网格距不敏感。虽然局地项对水平网格距较为敏感（图 9a），但其所占比例较小，因此总的次网格通量并未表现出较强的分辨率依赖性（图 8a）。对比 LYSU 试验，去除非局地项后次网格通量表现出对水平网格距较强的依赖性（图 8b）。

MYNN3 方案较 MYNN2.5 方案增加了 $\langle\theta'^2\rangle$ 等高阶量的预报方程，在计算热通量时，增加了负梯度输送项 [公式（13）②项]，因此混合较 MYNN2.5 方案更加充分。与 YSU 方案不同的是，负梯度输送项对水平网格距较为敏感（图 9d），梯度部分输送的次网格通量 [公式（13）①项] 同样随分辨率的增加而减小（图 9c）。因此，MYNN3 方案在“灰色区域”内并没有过强的次网格输送，且对次网格通量的表征具有较好的分辨率依赖性。

从上述分析可知，YSU 方案在“灰色区域”内过强的非局地次网格通量导致其对总次网格通量的高估。Shin and Hong（2013, 2015）通过对 LES 试验结果的诊断分析，定量描述了非局地项与局地项随分辨率变化的特征，并指出次网格通量对分辨率的依赖性主要由非局地项决定，因此在高分辨模式中对非局地项的作用及其随分辨率变化特征的准确描述至关重要。

3.4 网格尺度通量

当模式分辨率逐渐提高，水平网格距逐渐减小，进入“灰色区域”时，部分含能湍涡的尺度超过水平网格距（$\Delta<l_e$），模式动力过程可部分解析湍流运动，无需再对其参数化。从 LES 以及 REF 的可分辨湍流动能（$\langle\mathrm{TKE}\rangle^{R(\Delta)}$）随时间演变的曲线上（图 10e）可以看出，随着水平网格距增大，可分辨湍流动能减小，$\Delta\geqslant3000$m 后，网格距尺度大于最大的含能涡尺度 l_e（通常以大气边界层的高度 z_i 代表最大含能涡的尺度），可分辨湍流动能接近于 0。而在 $\Delta=50$～1000 m，经过 $t=t_0$（约 1 小时后），可分辨湍流动能逐渐稳定，之后随地面不断加热而缓慢增加。Shin and Dudhia（2016）认为这表明经过 $t=t_0$ 后湍流运动进入了准平衡状态。

考察 PBL 方案的模拟结果发现，四种方案达到准平衡状态的时间均不相同，水平网格距越大，可分辨湍流动能的激发时间越晚，到达平衡的时间也越晚。从图 10a 可知，YSU 方案模拟出的可分辨湍流动能在所有时次均偏低，$\Delta\geqslant3000$ m 后，可分辨湍流动能几乎为 0。MYJ 方案次之，$\Delta=3000$ m 时已接近 0。而 MYNN2.5 方案和 MYNN3 方案的可

分辨湍流动能较为显著。

以上现象可用 Rayleigh-Benard 对流机制解释。Ching et al.（2014）指出，当水平网格距变小时，模式自身动力过程更易激发“次级环流”（Convectively Induced Secondary Circulations by Model，以下简称 M-CISC）。次级环流源自近地面超绝热层热量的积累，当边界层混合不够充分时，近地面累积了过多的热量，当雷利（Rayleigh）数 $Ra = g\alpha\beta d^4 / k\nu$（其中，$\alpha$ 为热膨胀系数，β 为垂直温度梯度，d 为流体厚度，k 为热传导系数，ν 为动力粘性系数）达到临界值 Ra_c 时，M-CISC 产生，Ra_c 的大小与水平分辨率，即可分辨的最小波长有

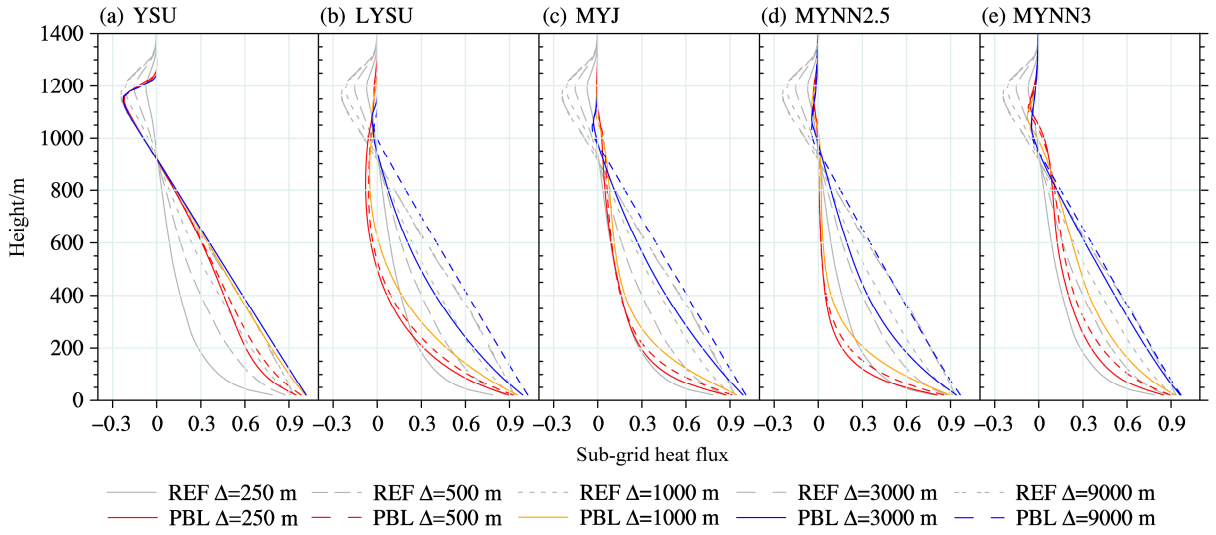


图 8 模式积分 4 小时后 PBL 方案（彩色）与 REF（灰色）次网格热通量垂直廓线

Fig. 8 Vertical profiles of sub-grid heat fluxes simulated by PBL schemes (colored lines) and from REF (grey lines) after 4 h integration

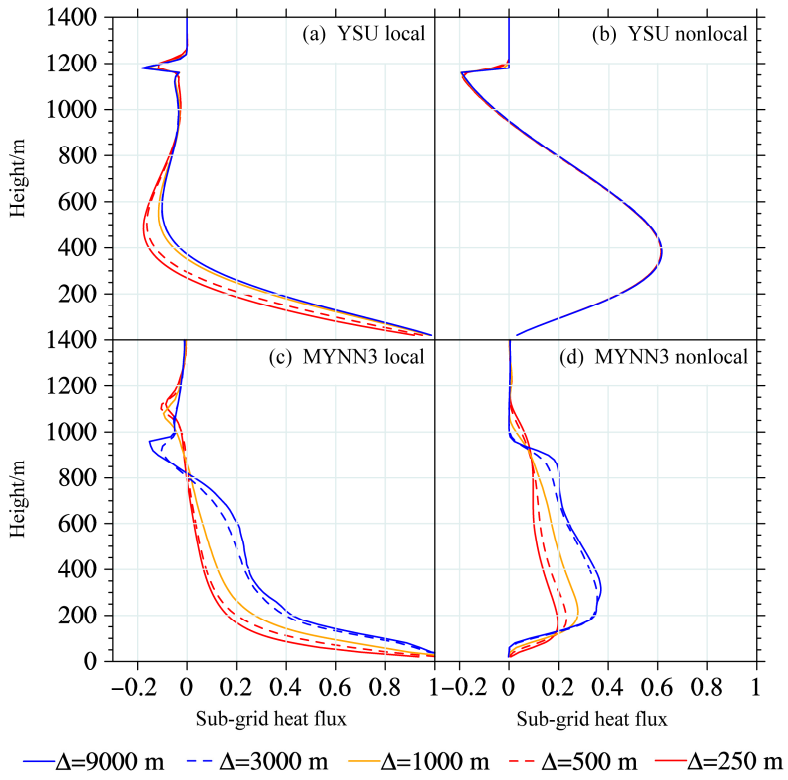


图 9 YSU（上）和 MYNN3（下）方案的（a、c）局地次网格和（b、d）非局地次网格热通量垂直廓线

Fig. 9 Vertical profiles of (a, c) local and (b, d) nonlocal sub-grid heat fluxes simulated by YSU (top panel) and MYNN3 (bottom panel) schemes

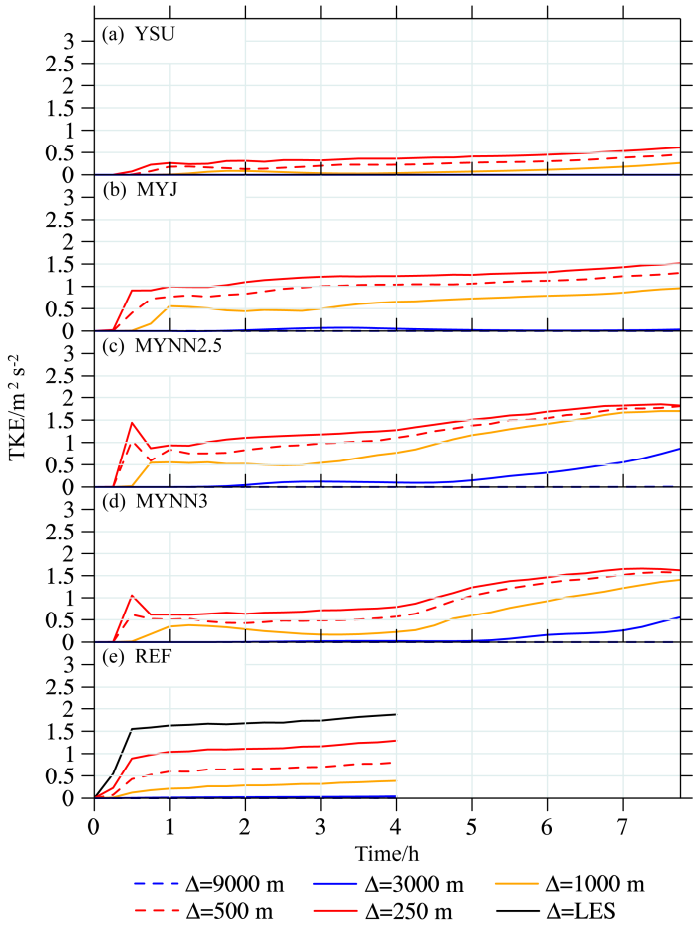


图 10 z=500 m 处可分辨湍流动能的时间序列。PBL 方案积分 8 小时，LES 积分 4 小时

Fig. 10 Time series of resolved-scale turbulent kinetic energy (TKE) at z=500 m. PBL schemes are integrated for 8 hours. LES simulation covers a period of four hours

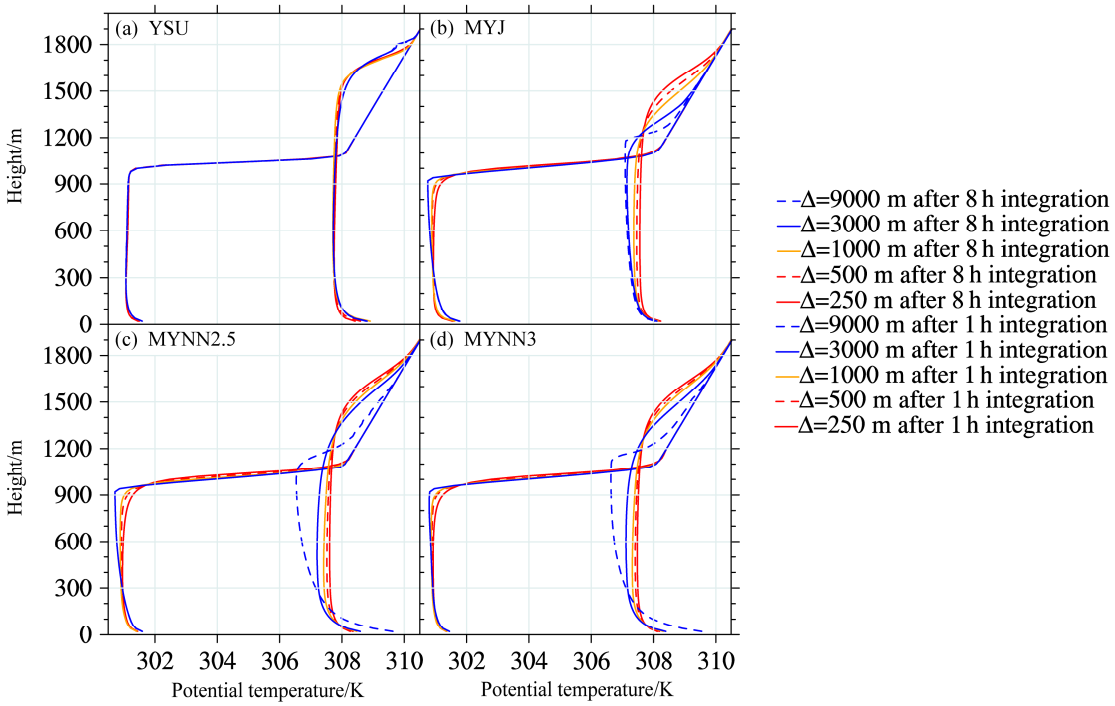


图 11 PBL 方案积分 1 小时与 8 小时后的区域平均位温垂直廓线

Fig. 11 Vertical profiles of domain-averaged potential temperature after 1 h and 8 h integrations simulated by PBL schemes

关。M-CISC 的出现提高了热量的输送和混合效率，中和了混合层内原本弱不稳定的静力层结，使得 Ra 数降低至临界值以下。Zhou et al.（2014）也利用 Rayleigh-Benard 热力稳定度解释了边界层内动力激发对流的过程。

从上述机制出发，考察 M-CISC 激发前后边界层内结构的差异，分别对比四种方案在积分 1 小时后和积分 8 小时后两个时次的平均位温垂直廓线与垂直速度 w 的水平分布特征。从图 11 的位温廓线结构来看，相比积分 1 小时后，经过 7 小时积分后整层位温大幅提升，混合层与夹卷层均增厚。积分 1 小时后，MYNN2.5 方案与 MYNN3 方案的 $\Delta=3000$ m 与 $\Delta=9000$ m 廓线在混合层上半层均表现为弱不稳定层结。至积分 8 小时后，由于 M-CISC 发展旺盛，$\Delta=3000$ m 在混合层上半层转为稳定层结，$\Delta=9000$ m 因缺乏 M-CISC 对湍流输送的补充，位温廓线仍呈不稳定层结。

从近地面层（$0.1z_i$）垂直速度的水平分布来看（图 12），至积分 8 小时后，$\Delta=250$～3000 m 试验的对流强度明显强于积分 1 小时后，尤其是 MYNN2.5 方案与 MYNN3 方案的 $\Delta=3000$ m 试验，网格上的对流发展旺盛。此外，对流结构的尺度变大。而 $\Delta=9000$ m 试验的对流强度没有变化，因为在该分辨率下的 Ra_c 在积分 8 小时后仍未达到。

另外，随着时间增加，若满足了 M-CISC 的触发条件，可分辨热通量增加，而次网格热通量所占比例受到相应抑制。从可分辨热通量与次网格热通量分配（图略）来看，$\Delta=3000$ m 下时各 PBL 方案 $\langle w'\theta'\rangle^{\mathrm{R}(\Delta)}$ 均在 7 小时后明显增大。相应地，“灰色区域”下次网格通量比例减小，表明其受到了过强的可分辨湍流输送的抑制。从 3.2 节分析可知，网格尺度通量输送与次网格通量互为补充，例如，当 PBL 方案高估了次网格通量时，网格尺度通量得到低估，从而保持总通量的一致（图 4），反之亦然。因此，由于不合理的 M-CISC 产生了过强的可分辨热通量，抑制了次网格通量，从而影响 PBL 方案对次网格通量的表征。

相较 TKE 方案，YSU 方案中激发的 M-CISC 强度较弱（图 11），在较小的网格距尺度下（$\Delta\leqslant1000$ m）才开始出现较显著的可分辨湍流动能（图 10）。这可能是由于该方案包含了非局地输送，次网格混合足够充分，近地面热通量难以积累，无法达到 Ra_c，从而无法触发 M-CISC，较其他方案不易激发旺盛的对流。为考察不同强度的次网格混合对可分辨湍流动能的抑制效果，利用 YSU 方案设计敏感性试验如表 3 所示。

表 3 YSU 敏感性试验设计

Table 3 List of parameters used in YSU sensitivity experiments

试验名	边界层参数化方案	Δ / m	负梯度项倍数	夹卷项倍数	运行时间
CRTL 试验	YSU	1000	1	1	8
2CT (Counter-gradient Term) 试验	YSU	1000	2	0	8
1CT 试验	YSU	1000	1	0	8
0CT 试验	YSU	1000	0	0	8

如表 3 所示，设计了 3 组敏感性试验，将 YSU 方案中非局地项中的夹卷项（公式（6）③项）关闭，令输送近地面热量及动量的负梯度项（公式（6）②项）（Counter-gradient Term, 简称 CT）为控制试验的 0 倍、1 倍与 2 倍（0CT、1CT、2CT 试验）。结果如图 13 所示，控制试验 CTRL 与 1CT 的差别只来自于夹卷层造成的非局地输送，因此可分辨湍流动能曲线较为接近。非局地输送为 0（0CT）时，可分辨湍流动能在第一个小时增至约 0.4 $\mathrm{m^2\ s^{-2}}$，之后缓慢上升。当负梯度项倍数增加，非局地混合增强，可分辨湍流动能减小。在 2CT 试验中，混合过于强盛，可分辨湍流动能降至 0，在 8 小时内被完全抑制。可见，过强的非局地次网格通量，不但抑制了局地次网格通量（3.3 节），而且抑制了网格通量的产生。

由上文可知，进入“灰色区域”，随着水平网格距的减小，Ra_c 降低，更易激发 M-CISC。水平网格距决定了 Ra_c 的大小，初始时刻次网格湍流输送的强度决定了近地面层滞留热量的多少，由此可确定 Rayleigh-Benard 对流激发的条件和时间。可见，可分辨湍流输送的强度与时间演变一方面与水平网格距有关，另一方面与不同的参数化方案选取有关。增大网格距与近地面热量的输送效率，都可抑制 M-CISC 的产生。然而次级环流与中小尺度天气密切相关，随着业务预报模式分辨率越来越高，需要准确表达“灰色区域”内可分辨湍流的特征。

对比四种 PBL 方案在次网格湍流与网格湍流的表现可知，不同的参数化方法，首先直接影响了次网格通量的模拟效果。所有方案模拟的混合层内次网格热通量相对总通量的比例都随分辨率提高而减小，与 REF 的变化趋势一致，只是减小的幅度和速率各有不同。同时，PBL 方案还决定了边界层

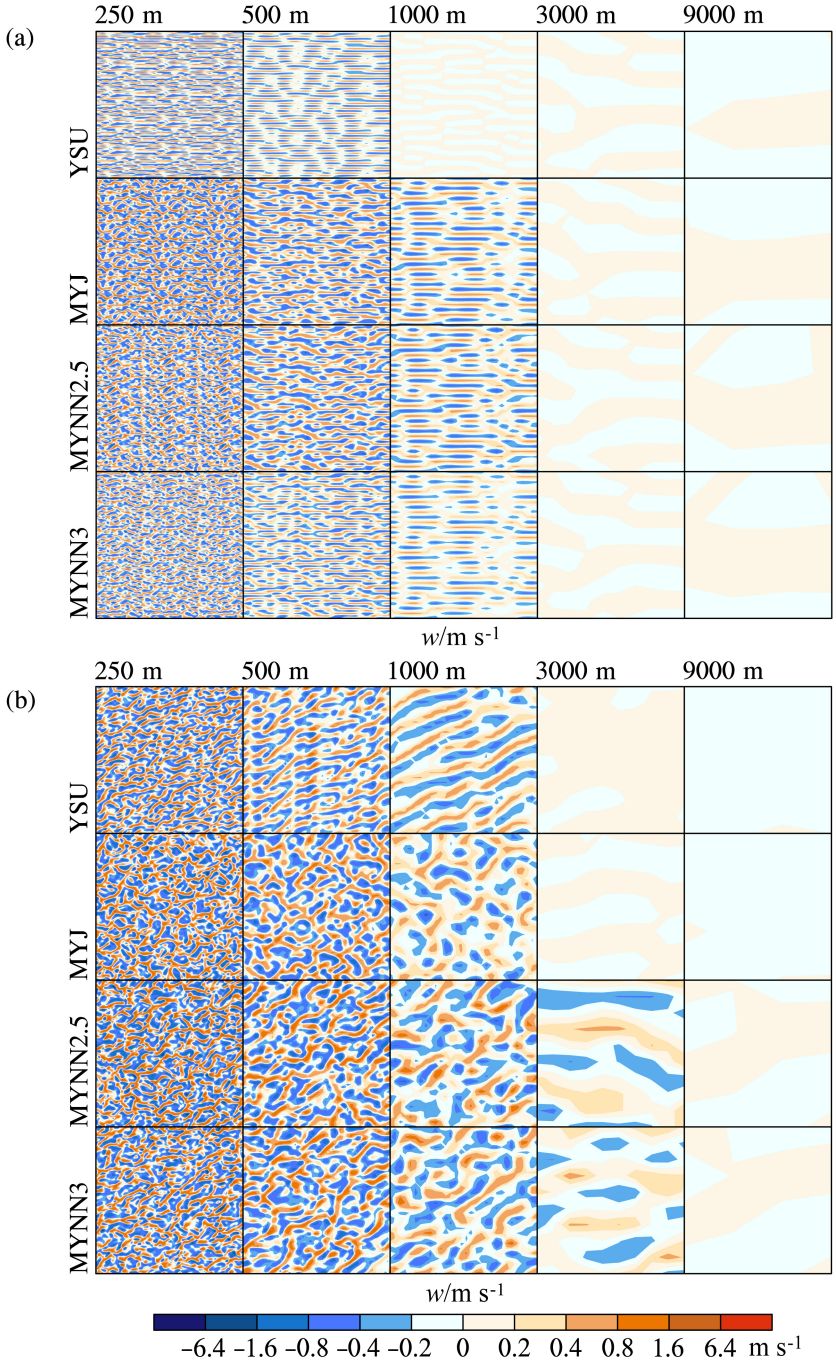


图 12 PBL 方案积分（a）1 小时与（b）8 小时后在 $z=0.1z_i$ 处的垂直速度（w）水平分布

Fig. 12 Horizontal distributions of vertical velocity (w) at $z=0.1z_i$ from simulations of YSU, MYJ, MYNN2.5, and MYNN3 schemes after (a) 1 h and (b) 8 h integrations simulated by PBL schemes

发展初期的湍流输送与混合强度。由图 6 可知，局地方案在“灰色区域”内低估了次网格湍流输送，不充足的输送导致近地面滞留了过多的热量，从而提供了动力触发对流的条件。这种由动力过程触发的对流，不仅会掩盖真实对流，如因下垫面不同导致的次级环流（Ching et al., 2014），还会抑制次网格湍流输送。并且动力触发对流的条件随分辨率提高而降低，其触发时间随分辨率提高而提前，增加了数值模式准确表征边界层湍流过程的难度。

3.5 PBL 方案适用性评估

由前文可知，PBL 方案在“灰色区域”尺度下的适用性是与具体尺度有关的。由图 2 可知，在“灰

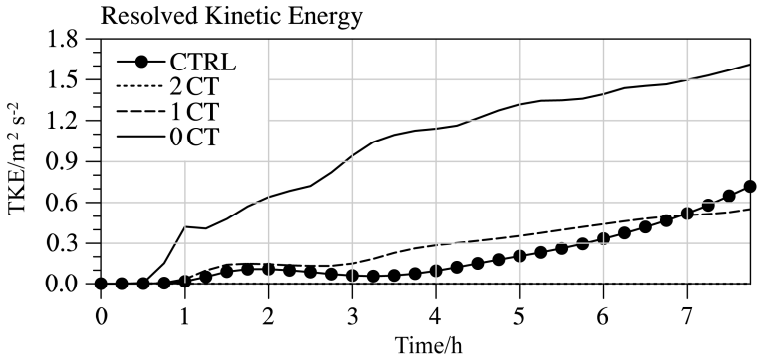


图 13 YSU 敏感性试验中 z=100 m 处可分辨湍流动能的时间序列

Fig. 13 Time series of resolved-scale turbulent kinetic energy at z=100 m from YSU sensitivity experiments

色区域”内，YSU 的位温廓线始终与 LES 吻合较好，其余方案随着网格距的减小也逐渐接近 LES 廓线；图 6 与图 8 则表明，混合层内，对于每种方案，均存在一个网格距，在该网格距下次网格及网格热通量分配与 LES 最为接近。因 $\Delta = 500$ m 时次网格与网格热通量之比约为 1:1（见图 6），为典型的“灰色区域”尺度，本节首先以 $\Delta = 500$ m 为例，比较该分辨率下各 PBL 方案的适用性。由图 10 可知，模式积分 4 小时时，$\Delta = 500$ m 下各组试验受 M-CISCs 影响不显著，且达到了 LES 的准平衡态，因此下文选取模式积分 4 小时的资料进行比较。

图 14 为各 PBL 方案在 $\Delta = 500$ m 时平均位温的垂直廓线。从图中可知，在混合层中，YSU 与 LES 最为吻合，MYNN2.5 与 LYSU 次之，表现为整层偏冷约 0.2 K，MYJ 与 MYNN3 模拟的混合层位温廓线较 LES 相差最大，约为 0.4 K。

图 15a 为 $\Delta = 500$ m 时各 PBL 方案总热通量的垂直廓线。在混合层内 5 种 PBL 方案与 REF 吻合均较好，但夹卷层内差异较大。结合表 2 可知，五种 PBL 方案模拟出的边界层高度 z_i（总热通量达到最小值的高度）均低于 REF。YSU 最为接近，之后为 MYNN2.5、LYSU、MYJ 及 MYNN3。从夹卷率 R_E 来看，YSU 与 REF 吻合较好，其余方案均偏弱，MYJ 最弱。

分析次网格热通量廓线（图 15b）可知，在 700 m 高度以下，MYNN3 与 REF 廓线最为接近，YSU 次网格通量偏高，其余三种方案偏低。在夹卷层内，仅 YSU 模拟出了夹卷层内较明显的次网格负通量，MYNN3 次之，其余三种方案均显著低估了该部分次网格负通量。对比网格热通量廓线（图 15c），MYNN3 在 700 m 高度以下与 REF 廓线最为接近，YSU 方案偏弱，其余三种方案偏高。

由上述分析可知，从位温与总通量廓线来看，$\Delta = 500$ m 时 YSU 的模拟最为接近 LES，但对次网格及网格通量的分配欠佳；在混合层中下层 MYNN3 对次网格和网格通量的表征较好，混合层中上层至夹卷层各 PBL 方案均不理想。即这些方案中不存在一种最佳方案，能够既准确表征边界层的热力结构，又给出最接近 REF 的湍流统计特征。

类似地，当分辨率改变时，如提高至 $\Delta = 250$ m，此时 MYNN2.5 对位温结构的模拟更为准确，而在次网格与网格热通量表征上欠佳；MYJ 在混合层内湍流统计特征最为接近 LES，而其他方面则不够准确。在“灰色区域”尺度下，本文所考察的 PBL 方案中不存在一个表征热力结构与湍流统计特征均最佳的方案。这是因为传统 PBL 方案是针对分辨率较粗的中尺度模式而设计的，当初并未考虑分辨率更精细的“灰色区域”尺度下的适用性问题。

近年来一些工作开始尝试改善传统 PBL 方案在“灰色区域”下的表现。Shin and Hong（2015）基于 LES 理想实验确定了具有分辨率依赖性的函数，分别对 YSU 局地和非局地项进行了尺度依赖性的调整； Ito et al.（2015）通过在特征长度表达式中增加了具有尺度依赖性的函数，对 Mellor-Yamada 3 阶模型做了改进。可见，引入尺度依赖性函数，是现阶段改进传统 PBL 方案的主要方法。然而目前尺度依赖性函数的建立是基于 LES 模拟的干对流边界层个例，对于情况更为复杂的真实大气，这些函数是否适用，还有待进一步研究。

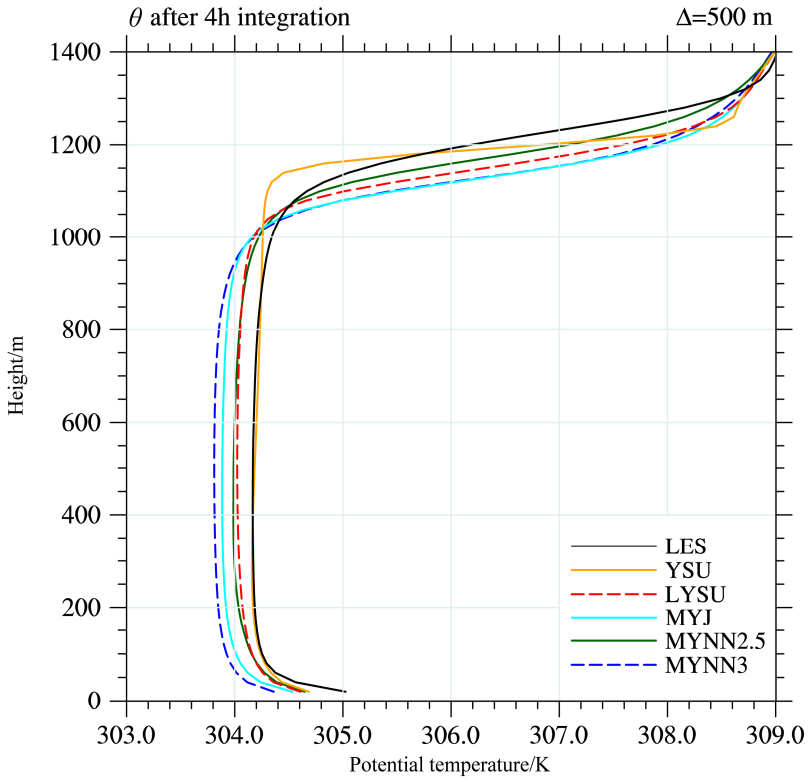


图 14 模式积分 4 小时后 Δ = 500 m 的 PBL 方案及 LES 的平均位温垂直廓线

Fig. 14 Vertical profiles of domain-averaged potential temperature simulated by PBL schemes and LES (black solid line) at Δ = 500 m after 4 h integration

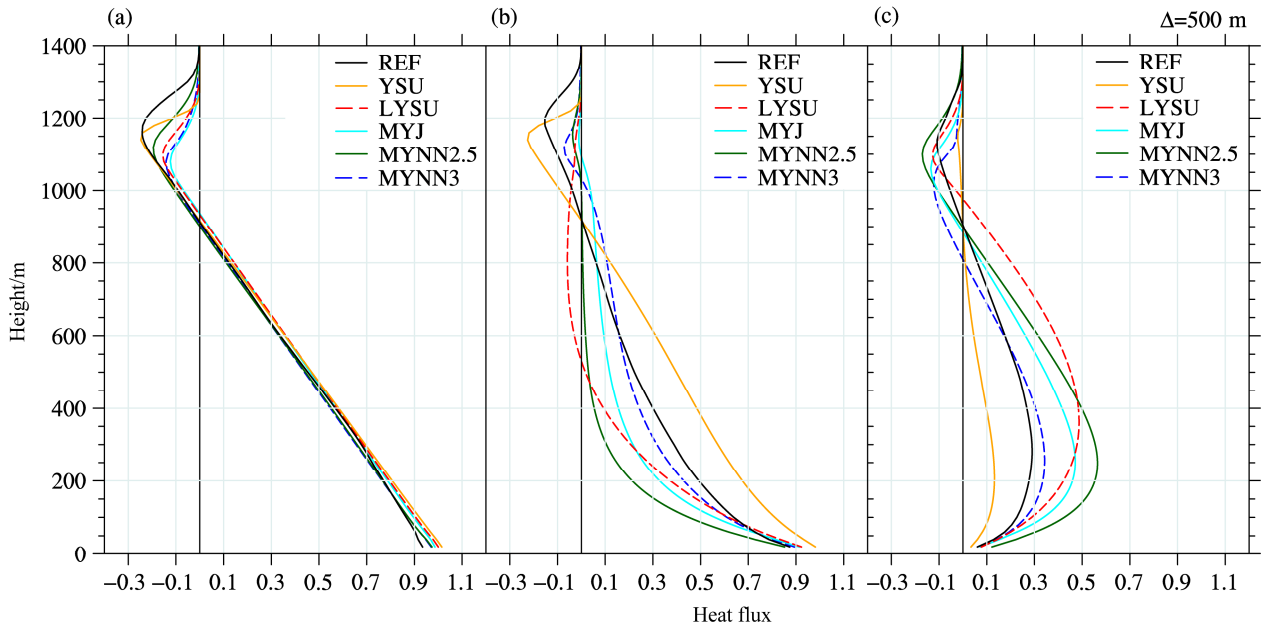


图 15 模式积分 4 小时后 Δ = 500 m 的 PBL 方案与 REF（a）总热通量、（b）次网格、（c）网格热通量垂直廓线

Fig. 15 Vertical profiles of (a) total, (b) sub-grid, and (c) resolved-scale heat fluxes simulated by PBL schemes and from REF at Δ = 500 m after 4 h integration

4 总结与讨论

本研究利用 WRF LES 版本对理想的干对流边界层进行高分辨率模拟，基于 LES 结果构造水平分辨率从 250 m 至 9000 m 的参考湍流场，以此作为“真值”，比较了四种业务常用的 PBL 方案在“灰色区域”下的表现。结果表明：

混合层内总热通量对所使用的参数化方案和

水平分辨率均不敏感。不同参数化方案中次网格与网格通量的比例表现出对水平网格距不同的依赖性。网格尺度通量输送与次网格通量互为补充，PBL 方案高估了次网格通量时，网格尺度通量被低估，从而保持总通量的一致，反之亦然。

局地 PBL 方案（LYSU、MYJ、MYNN2.5）在混合层内的平均位温随网格距减小而增大，次网格通量随网格距减小而减小。较参考湍流场，局地方案对次网格通量有所低估，表现为热量向上输送不足，混合不充分。

对两种非局地 PBL 方案随分辨率变化的敏感性及其原因的分析表明：YSU 方案的非局地项几乎不随水平网格距变化而变化，因此该方案对次网格通量的表征并未表现出较强的分辨率依赖性；MYNN3 方案的非局地次网格通量（负梯度输送项）随分辨率的增加而减小，对次网格通量的表征具有较好的分辨率依赖性。

YSU 方案过强的非局地次网格输送使混合层内温度层结呈弱稳定，抑制了可分辨湍流输送，不易于激发次级环流。

PBL 方案在“灰色区域”尺度下的适用性与具体分辨率有关。以 $\Delta = 500$ m 为例，四种 PBL 方案中不存在一种最佳方案，能对边界层的热力结构和湍流统计特征均有准确的描述。

本研究讨论的 PBL 方案均针对分辨率较粗的中尺度数值预报模式和大气环流模式而设计，在较粗的分辨率下，可认为大气边界层内所有的湍流运动均为次网格尺度，需对所有的湍流进行参数化，因此不存在湍流参数化“灰色区域”的问题。当模式分辨率逐渐提高时，模式动力过程可分辨部分湍流运动，从而导致了“灰色区域”问题的产生。另外，随着数值天气预报模式的分辨率越来越高，能否准确预报次级环流也是评判模式性能的重要指标之一，此时水平均一性假设不再成立，水平方向的湍流混合过程不应忽略，只考虑了垂直混合的一维 PBL 方案将不再适用。为解决在“灰色区域”下湍流参数化的问题，可从两个方面入手。一方面可在 PBL 方案中引入具有分辨率依赖性的函数来改善次网格通量与网格通量的比例；另一方面需在 PBL 方案中考虑三维混合的作用。

本研究针对干对流边界层，初步分析了一维 PBL 方案在“灰色区域”尺度下的表现，没有考虑水汽在混合过程中的作用。湿过程中，水汽相变可引发一系列复杂物理过程，参与并影响湍流混合，从而增加边界层模拟的复杂性。因此，高分辨率数值预报模式中 PBL 方案与其他物理过程的相互作用值得进一步深入研究。

参考文献（References）

Baldauf M, Seifert A, Förstner J, et al. 2011. Operational convective-scale numerical weather prediction with the COSMO model: Description and sensitivities [J]. Mon. Wea. Rev., 139 (12): 3887–3905, doi:10.1175/MWR-D-10-05013.1.

Benjamin S G, Weygandt S S, Brown J M, et al. 2016. A North American hourly assimilation and model forecast cycle: The rapid refresh [J]. Mon. Wea. Rev., 144 (4): 1669–1694, doi:10.1175/MWR-D-15-0242.1.

Charles M E, Colle B A. 2009. Verification of extratropical cyclones within the NCEP operational models. Part I: Analysis errors and short-term NAM and GFS forecasts [J]. Wea. Forecasting, 24 (5): 1173–1190, doi:10.1175/2009WAF2222169.1.

陈葆德, 王晓峰, 李泓, 等. 2013. 快速更新同化预报的关键技术综述 [J]. 气象科技进展, 3 (2): 29–35. Chen Baode, Wang Xiaofeng, Li Hong, et al. 2013. An overview of the key techniques in rapid refresh assimilation and forecast [J]. Advances in Meteorological Science and Technology (in Chinese), 3 (2): 29–35, doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2013.02.003.

陈敏, 范水勇, 郑祚芳, 等. 2011. 基于 BJ-RUC 系统的临近探空及其对强对流发生潜势预报的指示性能初探 [J]. 气象学报, 69 (1): 181–194. Chen Min, Fan Shuiyong, Zheng Zuofang, et al. 2011. The performance of the proximity sounding based on the BJ-RUC system and its preliminary implementation in the convective potential forecast [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (1): 181–194, doi:10.11676/qxxb2011. 016.

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]. J. Adv. Model. Earth Syst., 2 (1): 3, doi:10.3894/JAMES.2010.2.3.

Ching J, Rotunno R, LeMone M, et al. 2014. Convectively induced secondary circulations in fine-grid mesoscale numerical weather prediction models [J]. Mon. Wea. Rev., 142 (9): 3284–3302, doi:10.1175/MWR-D-13-00318.1.

Cohen A E, Cavallo S M, Coniglio M C, et al. 2015. A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern U.S. cold season severe weather environments [J]. Wea. Forecasting, 30 (3): 591–612, doi:10.1175/WAF-D-14-00105.1.

Davies T, Cullen M J P, Malcolm A J, et al. 2005. A new dynamical core for the Met Office’s global and regional modelling of the atmosphere [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (608): 1759–1782, doi:10.1256/qj.04.101.

Deardorff J W. 1972. Numerical investigation of neutral and unstable planetary boundary layers [J]. J. Atmos. Sci., 29 (1): 91–115, doi:10.1175/1520-0469(1972)029<0091:NIONAU>2.0.CO;2.

Deardorff J W. 1980. Stratocumulus-capped mixed layers derived from a three-dimensional model [J]. Bound.-Layer Meteor., 18 (4): 495–527, doi:10.1007/BF00119502.

邓国, 周玉淑, 李建通. 2005. 台风数值模拟中边界层方案的敏感性试验 I. 对台风结构的影响 [J]. 大气科学, 29 (3): 417–428. Deng Guo, Zhou Yushu, Li Jiantong. 2005. The experiments of the boundary layer schemes on simulated typhoon. Part I. The effect on the structure of typhoon [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 29 (3): 417–428, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2005.03.09.

Dorrestijn J, Crommelin D T, Siebesma A P, et al. 2013. Stochastic parameterization of shallow cumulus convection estimated from high-resolution model data [J]. Theor. Comput. Fluid Dyn., 27 (1–2): 133–148, doi:10.1007/s00162-012-0281-y.

Dudhia J. 2014. A history of mesoscale model development [J]. Asia-Pac. J. Atmos. Sci., 50 (1): 121–131, doi:10.1007/s13143-014-0031-8.

高笃鸣, 李跃清, 蒋兴文, 等. 2016. WRF 模式多种边界层参数化方案对四川盆地不同量级降水影响的数值试验 [J]. 大气科学, 40 (2): 371–389. Gao Duming, Li Yueqing, Jiang Xingwen, et al. 2016. Influence of planetary boundary layer parameterization schemes on the prediction of rainfall with different magnitudes in the Sichuan Basin using the WRF model [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 40 (2): 371–389, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1503.14323.

Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. 2006. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes [J]. Mon. Wea. Rev., 134 (9): 2318–2341, doi:10.1175/MWR3199.1.

Hong S Y, Dudhia J. 2012. Next-generation numerical weather prediction: Bridging parameterization, explicit clouds, and large eddies [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (1): ES6–ES9, doi:10.1175/2011BAMS3224.1.

Honnert R, Masson V, Couvreux F. 2011. A diagnostic for evaluating the representation of turbulence in atmospheric models at the kilometric scale [J]. J. Atmos. Sci., 68 (12): 3112–3131, doi:10.1175/JAS-D-11-061.1.

Hu Xiaoming, Nielsen-Gammon J W, Zhang Fuqing. 2010. Evaluation of three planetary boundary layer schemes in the WRF model [J]. J. Appl. Meteor. Climatol., 49 (9): 1831–1844, doi:10.1175/2010JAMC2432.1.

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 [J]. 地球物理学报, 57 (5): 1399–1414. Huang Wenyan, Shen Xinyong, Wang Weiguo, et al. 2014. Comparison of the thermal and dynamic structural characteristics in boundary layer with different boundary layer parameterizations [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 57 (5): 1399–1414, doi:10.6038/cjg20140505.

Ito J, Niino H, Nakanishi M, et al. 2015. An extension of the Mellor-Yamada model to the terra incognita zone for dry convective mixed layers in the free convection regime [J]. Bound.-Layer Meteor., 157 (1): 23–43, doi:10.1007/s10546-015-0045-5.

Janjić Z I. 2001. Nonsingular implementation of the Mellor Yamada level 2.5 scheme in the NCEP meso model [R]. NCEP Office Note #437, 61pp.

LeMone M A. 1973. The structure and dynamics of horizontal roll vortices in the planetary boundary layer [J]. J. Atmos. Sci., 30 (6): 1077–1091, doi:10.1175/1520-0469(1973)030<1077:TSADOH>2.0.CO;2.

刘辉志, 冯健武, 王雷, 等. 2013. 大气边界层物理研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 467–476. Liu Huizhi, Feng Jianwu, Wang Lei, et al. 2013. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (2): 467–476, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12315.

Mellor G L, Yamada T. 1982. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems [J]. Rev. Geophys., 20 (4): 851–875, doi:10.1029/RG020i004p00851.

Moeng C H, Sullivan P P. 1994. A comparison of shear- and buoyancy-driven planetary boundary layer flows [J]. J. Atmos. Sci., 51 (7): 999–1022, doi:10.1175/1520-0469(1994)051<0999:ACOSAB>2.0.CO;2.

Moeng C H, Dudhia J, Klemp J, et al. 2007. Examining two-way grid nesting for large eddy simulation of the PBL using the WRF model [J]. Mon. Wea. Rev., 135 (6): 2295–2311, doi:10.1175/MWR3406.1.

Muñoz-Esparza D, Sauer J A, Linn R R, et al. 2016. Limitations of one-dimensional mesoscale PBL parameterizations in reproducing mountain-wave flows [J]. J. Atmos. Sci., 73 (7): 2603–2614, doi:10.1175/JAS-D-15-0304.1.

Nakanishi M, Niino H. 2004. An improved Mellor-Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification [J]. Bound.-Layer Meteor., 112 (1): 1–31, doi:10.1023/B:BOUN.0000020164.04146.98.

Nakanishi M, Niino H. 2006. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog [J]. Bound.-Layer Meteor., 119 (2): 397–407, doi:10.1007/s10546-005-9030-8.

Nakanishi M, Niino H. 2009. Development of an improved turbulence closure model for the atmospheric boundary layer [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 87 (5): 895–912, doi:10.2151/jmsj.87.895.

邱贵强, 李华, 张宇, 等. 2013. 高寒草原地区边界层参数化方案的适用性评估 [J]. 高原气象, 32 (1): 46–55. Qiu Guiqiang, Li Hua, Zhang Yu, et al. 2013. Applicability research of planetary boundary layer parameterization scheme in WRF model over the Alpine Grassland Area [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (1): 46–55, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00006.

Saito K, Fujita T, Yamada Y, et al. 2006. The operational JMA nonhydrostatic mesoscale model [J]. Mon. Wea. Rev., 134 (4): 1266–1298, doi:10.1175/MWR3120.1.

Seity Y, Brousseau P, Malardel S, et al. 2011. The AROME-France convective-scale operational model [J]. Mon. Wea. Rev., 139 (3): 976–991, doi:10.1175/2010MWR3425.1.

Shin H H, Hong S Y. 2013. Analysis of resolved and parameterized vertical transports in convective boundary layers at gray-zone resolutions [J]. J. Atmos. Sci., 70 (10): 3248–3261, doi:10.1175/JAS-D-12-0290.1.

Shin H H, Hong S Y. 2015. Representation of the subgrid-scale turbulent transport in convective boundary layers at gray-zone resolutions [J]. Mon. Wea. Rev., 143 (1): 250–271, doi:10.1175/MWR-D-14-00116.1.

Shin H H, Dudhia J. 2016. Evaluation of PBL parameterizations in WRF at subkilometer grid spacings: Turbulence statistics in the dry convective boundary layer [J]. Mon. Wea. Rev., 144 (3): 1161–1177, doi:10.1175/MWR-D-15-0208.1.

Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. 2008. A description of the advanced research WRF version 3 [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113pp, doi:10.5065/D68S4MVH.

Smagorinsky J. 1963. General circulation experiments with the primitive equations I. The basic experiment [J]. Mon. Wea. Rev., 91 (3): 99–164, doi:10.1175/1520-0493(1963)091<0099:GCEWTP>2.3.CO;2.

Sun W Y, Chang C Z. 1986. Diffusion model for a convective layer. Part I: Numerical simulation of convective boundary layer [J]. J. Climate Appl.

Meteor., 25 (10): 1445–1453, doi:10.1175/1520-0450(1986)025<1445:DMFACL>2.0.CO;2.

王子谦, 段安民, 吴国雄. 2014. 边界层参数化方案及海气耦合对 WRF 模拟东亚夏季风的影响 [J]. 中国科学: 地球科学, 44 (3): 548–562. Wang Z Q, Duan A M, Wu G X. 2014. Impacts of boundary layer parameterization schemes and air–sea coupling on WRF simulation of the East Asian summer monsoon [J]. Science China: Earth Sciences, 57 (7): 1480–1493, doi:10.1007/s11430-013-4801-4.

Wyngaard J C. 2004. Toward numerical modeling in the “terra incognita” [J]. J. Atmos. Sci., 61 (14): 1816–1826, doi:10.1175/1520-0469(2004)061<1816:TNMITT>2.0.CO;2.

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 [J]. 大气科学, 37 (1): 149–159. Xu Huiyan, Zhu Ye, Liu Rui, et al. 2013. Simulation experiments with different planetary boundary layer schemes in the lower reaches of the Yangtze River [J]. Chinese J. Atmos. Sci. (in Chinese), 37 (1): 149–159, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2012.12021.

张小培, 银燕. 2013. 复杂地形地区 WRF 模式四种边界层参数化方案的评估 [J]. 大气科学学报, 36 (1): 68–76. Zhang Xiaopei, Yin Yan. 2013. Evaluation of the four PBL schemes in WRF model over complex topographic areas [J]. Trans. Atmos. Sci. (in Chinese), 36 (1): 68–76, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2013.01.008.

Zhou Bowen, Simon J S, Chow F K. 2014. The convective boundary layer in the terra incognita [J]. J. Atmos. Sci., 71 (7): 2545–2563, doi:10.1175/JAS-D-13-0356.1.

周强, 李国平. 2013. 边界层参数化方案对高原低涡东移模拟的影响 [J]. 高原气象, 32 (2): 334–344. Zhou Qiang, Li Guoping. 2013. Impact of the different boundary layer parameterization schemes on numerical simulation of plateau vortex moving eastward [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (2): 334–344, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00033.