

黄翊, 彭新东. 2017. 边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响 [J]. 大气科学, 41 (3): 533–543. Huang Yi, Peng Xindong. 2017. The impact of an improved planetary boundary layer parameterization scheme on the simulation of fog [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (3): 533–543, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16152.

边界层湍流参数化改进对雾的模拟影响

黄翊 彭新东

中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 为了提高边界层参数化在我国复杂下垫面上的描述能力, 改善边界层能量和物质输送计算和检验其数值模拟效果, 本文选取 WRF 三维模式, 采用基于我国不同下垫面上的边界层观测资料改进的新 MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) 参数化方案对 2009 年 3 月 17 日黄海海雾以及 2011 年 12 月 4 日华北地区两次大雾过程进行模拟检验, 探讨边界层参数化方案对雾和边界层结构模拟的影响。参照卫星云图和探空资料, 边界层内云水混合比垂直积分的水平分布的模拟能力明显提高, 反映了改进的 MYNN 方案能够更好地模拟出两次雾过程的发生、移动和雾区空间分布, 更精确的云水混合比和温度的垂直分布能更好地给出雾区的垂直结构和稳定层结, 同时可改善雾区低层位温以及比湿垂直分布的模拟。

关键词 MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) 方案 湍流通量 边界层参数化 稳定层结 雾

文章编号 1006-9895(2017)03-0533-11

中图分类号 P456.6

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1606.16152

The Impact of an Improved Planetary Boundary Layer Parameterization Scheme on the Simulation of Fog

HUANG Yi and PENG Xindong

State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract In order to improve the planetary boundary layer (PBL) parameterization over complex underlying surface for better calculation of vertical turbulent transport of energy and substances, and verify the effect in numerical simulation over China, an improved MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) PBL parameterization scheme is selected in the WRF model to simulate two heavy fog cases that happened in the Yellow Sea on March 17th, 2009 and in North China on December 4th, 2011, respectively. The new MYNN scheme is tuned based on the observational PBL data over different underlying surfaces. In this paper, we attempt to simulate the evolution of both the land and sea fog events, and explore the boundary layer structure and the impact of the modified MYNN scheme on these simulations. With reference to the FY-3 satellite imageries and sounding data, it is found that better simulation of the horizontal distribution of the vertically integrated cloud water can lead to better simulation of generation, movement and spatial distribution of the heavy fog over both the ocean and land areas. The vertical profiles of temperature and mixing ratio of cloud water illustrate more reasonable vertical structure of the fog and the stable stratification. In addition, the new scheme improves the low-level vertical distribution of potential temperature and the specific humidity in the fog area.

Keywords MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) scheme, Turbulent flux, PBL (Planetary Boundary Layer) parameterization, Stable stratification, Fog

收稿日期 2016-03-01; 网络预出版日期 2016-10-25

作者简介 黄翊, 女, 1990 年出生, 硕士, 主要从事数值天气预报方面的研究。E-mail: hyi9003@163.com

通讯作者 彭新东, E-mail: pengxd@cma.cn

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB417204, 国家自然科学基金项目 41175095、41575103

Funded by National Basic Research Program of China (Grant 2012CB417204), National Natural Science Foundation of China (Grants 41175095, 41575103)

1 引言

边界层是指地表以上 1~2 km 厚的低层大气, 人类的活动主要集中在边界层。由于太阳短波辐射主要由地表吸收, 使得地表成为地球大气的热源, 同时也是地球大气的水汽源。边界层作为地球大气的重要组成部分, 在地表与自由大气的热量和水汽的输送过程中起到至关重要的作用。边界层复杂的大气湍流运动一直是国内外研究的热点和难点, 而大气边界层的湍流物质和能量输送过程则是数值模式的重要组成部分, 也是数值预报和气候模拟的关键物理过程。

湍流是边界层大气的固有现象, Reynolds (1883, 1895) 通过实验发现湍流并提出了湍流过程中的物理量可由平均量和扰动量两个分量合成, 因而在引入 Navier-Stokes 方程后就出现了非线性的湍流应力项, 导致方程组不闭合。在定性分析的基础上, 为了定量描述近地层湍流运动, Monin and Obukhov (1954) 提出了相似理论, 指出了在水平均匀下垫面上的边界层中湍流通量与平均量之间的关系, Businger et al. (1971) 和 Dyer (1974) 将其用于估算地表通量, Mellor and Yamada (1974, 1982) 也在 Monin-Obukhov 相似理论基础上提出了一个边界层二阶闭合模式(简称为 MY 边界层参数化方案)。

MYNN (Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino) 边界层参数化方案是近年发展起来、使用较为广泛的二阶闭合方案, 是基于 Mellor and Yamada (1974) 提出的 MY 边界层参数化方案改进而来, Nakanishi (2001) 在 MY 边界层参数化方案的基础上提出了一个新的湍流长度尺度的诊断方程, 之后 Nakanishi and Niino (2004) 又考虑了水汽凝结的作用, 使得其对低层浅对流和水汽垂直通量模拟更加合理, 其后为了改善计算的稳定性, 又加入限定项, 并根据大涡模拟的数据修改闭合常数 (Nakanishi and Niino, 2006, 2009), 使该方案正式在 WRF (Weather Research and Forecasting) 模式中应用。Kitamura (2010) 在 MYNN 参数化方案中考虑了梯度理查森数 Ri 对计算稳定度函数的作用, 改进了稳定边界层的湍流参数化。MYNN 参数化方案在实际个例中的应用已有不少研究, Hariprasad et al. (2014) 利用 WRF 模式对 MYNN、YSU 等边界层参数化方案进行对比, 指出 MYNN 参数化方案对边界层的模拟效

果较好; Giannakopoulou and Nhili (2014) 也利用 MYNN 对海岸风进行模拟, 发现对风速模拟更好。

雾是出现在近地层的一种常见天气现象, 是由近地面稳定层结内的水汽凝结造成。由于能见度降低, 严重影响交通和生产生活。在数值模式中由于边界层物理过程的不确定性, 使得雾的模拟和预报效果相对较差, 采用不同边界层湍流参数化方案对雾形成和演变的模拟也受到了广泛关注, 在这方面已有不少学者进行了尝试。Bergot and Guedalia (1994) 利用一维模式模拟了几次辐射雾过程, 彭双姿等 (2012) 对我国华中地区一次大范围辐射雾过程进行模拟分析, Li et al. (2012) 将 MYNN 边界层参数化方案应用到一次黄海海雾过程的模拟, 并且分析了对海雾过程动能产生项的贡献, 陆雪等 (2014) 利用 MYNN 对海雾过程进行模拟, 并与 YSU 等参数化方案进行对比分析, 发现 MYNN 边界层参数化方案能维持雾区边界层的湍流强度, 对边界层高度的模拟较为合适。Huang and Peng (2017) 利用我国多种下垫面的通量观测资料, 对 MYNN 的参数化进行了修正, 发现采用新的稳定度指标和闭合常数可改善低层大气动量和热量通量的模拟。

本文选取了 2009 年 3 月 16~17 日黄海海雾事件和 2011 年 12 月 3~4 日华北地区大雾两个个例, 利用改进前后的 MYNN 边界层参数化方案分别对两次雾过程进行模拟, 讨论改进的 MYNN 边界层参数化方案对雾的模拟影响, 检验改进的 MYNN 方案的模拟效果和参数化合理性。

2 个例简介

2009 年 3 月 17 日, 黄海发生了一次大面积海雾事件。17 日 02:00 (协调世界时, 下同), 在风云卫星可见光云图 (图 1a) 上, 东海海面上有一云团生成, 此云团颜色较暗且边缘较为整齐, 且紧贴海岸线, 可以判断为海雾。在天气形势图上, 17 日 00:00 黄海和东海区域处于高压边缘气流控制, 地面和 925 hPa 天气图 (图略) 上长江入海口处站点温度分别为 12°C、15°C, 并形成了较强逆温层结, 有利于海雾的生成与维持, 最大的相对湿度达到 92%, 低层饱和, 确认有雾形成。雾区在低层西南暖湿气流的引导下缓慢向东北方向移动 (图 1b), 在傍晚进入黄海。程相坤等 (2013) 利用 GOES-9 静止气象卫星可见光以及探空等资料对此次过程

进行了模拟分析，得到影响此次海雾过程能见度分布的主要因子为云水混合比。

2011 年 12 月 3 日伴随华北地区低值系统云系

的东移，京津冀地区有大范围的雾发生，此次大雾出现在一次降水过程后，由于低层空气湿度增加而形成（邓长菊等，2014），在 02:00（图 2a）的 FY-3

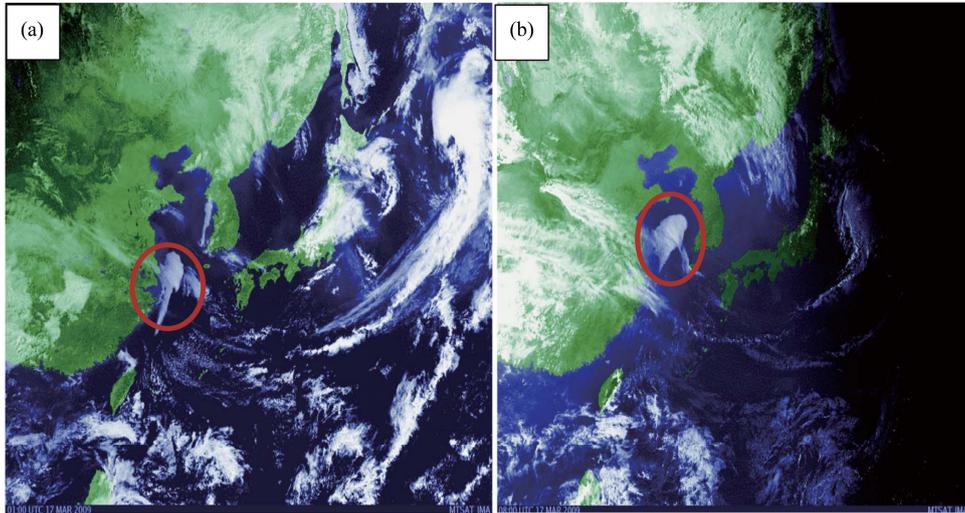


图 1 2009 年 3 月 17 日 (a) 02:00 (协调世界时, 下同)、(b) 08:00 黄海雾区 FY-3 卫星可见光云图
Fig. 1 Visible cloud images of FY-3 satellite of sea fogs in Yellow Sea at (a) 0200 UTC and (b) 0800 UTC 17 March 2009

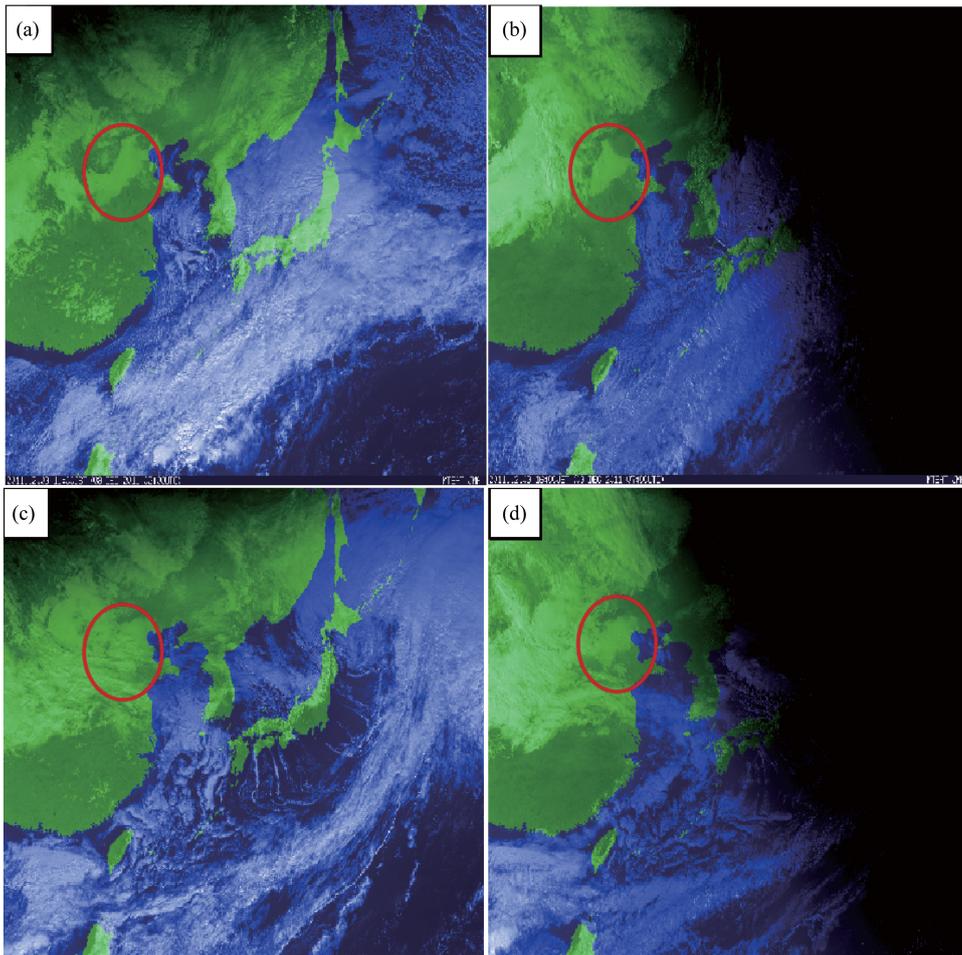


图 2 2011 年 12 月 (a, b) 3 日和 (c, d) 4 日华北雾区的 FY-3 卫星可见光云图分布: (a, c) 02:00; (b, d) 08:00
Fig. 2 Visible cloud images of FY-3 satellite of sea fogs in North China at (a, b) 3 December and (c, d) 4 December, 2011: (a, c) 0200 UTC; (b, d) 0800 UTC

卫星云图上呈现为一条西南东北向的带状雾分布，与周围相对较高的云系区分，雾区由于高度低而成灰暗色，边缘较为平滑。到下午 08:00 (图 2b)，雾区的范围有所减小。4 日上午 02:00 (图 2c) 和下午 08:00 (图 2d) 云图显示雾区北移，主要集中在北京、天津和周边地区，由于和高层云区重叠，区分困难，图中以椭圆标记。从地面图可知该区域一直处于高压南侧的东北气流的控制下，带来了来自渤海湾的水汽，给此次大雾过程提供了较好的水汽条件。

3 改进的 MYNN 边界层参数化方案

利用我国大理站铁塔梯度观测边界层湍流通量、稳定度参数值、湍流方差、协方差等值，对 MYNN 方案的稳定度和关键参数进行拟合，改进湍流长度尺度 L 的计算，并得到了一组新的闭合常数 (Huang and Peng, 2017):

$$L_s = \begin{cases} \kappa z \frac{0.25}{3.21\zeta + 0.25} & 0 \leq \zeta < 1 \\ 0.072\kappa z & \zeta \geq 1 \\ 0.35\kappa z(1 - 5.0\zeta)^{0.056} & \zeta < 0 \end{cases}, \quad (1)$$

$$L_T = 0.18 \frac{\int_0^\infty qz dz}{\int_0^\infty q dz}, \quad (2)$$

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

$$\frac{1}{L} = \frac{1}{L_s} + \frac{1}{L_T} + \frac{1}{L_B}, \quad (4)$$

其中，公式中大写字母代表集合平均量，小写字母表示湍流量； L_s 为地表长度尺度，仅在近地层附近起作用，近地层内随高度增加而增加， L_T 为与边界层厚度有关的长度尺度 (Mellor and Yamada, 1974)， L_B 为与浮力长度尺度 q/N 有关的长度尺度，仅在稳定边界中起作用； $\kappa=0.4$ 为冯卡曼常数， z 为气块距离地表高度， $\zeta = z/L_M$ 为高度无量纲函数，可以度量大气静力稳定度； $N \equiv [(g/\Theta_0)\partial\Theta_v/\partial z]^{1/2}$ 为 Brunt-Vaisala 频率，下标 0 表示基本态； $q_c \equiv [(g/\Theta_0)\langle w\theta_v \rangle L_T]^{1/3}$ ， $q^2/2 = (u^2 + v^2 + w^2)/2$ 为湍流动能 (TKE)， (u, v, w) 分别 (x, y, z) 三个方向的速度分量， Θ 为大气位温， θ 为 Θ 的扰动量， $\theta_v = \theta(1 +$

$0.6q_v - q_1)$ 为虚位温， q_v, q_1 分别为比湿和大气中液态水的含量， $\langle \rangle$ 表示总体均值。

在湍流通量的诊断方程中增加考虑三阶湍流通量 $\langle w^2\theta \rangle$ ，根据 Abdella and McFarlane (1997) 提出的参数化方案 $\langle w^2\theta \rangle = \eta(z/h)^{1/3} w_* \langle w\theta \rangle$ ， $z < 0.1 h$ ，限定在近地层内， $\eta = 0.9$ ， $w_* = (\beta g \langle w\theta_g \rangle h)^{1/3}$ 为对流速度尺度， $\langle w\theta_g \rangle$ 为运动学上的地表感热通量， h 为边界层厚度。从而使得 MYNN 参数化方案中增加了感热垂直通量三阶计算。根据上述参数化计算，可以确定 MYNN 模式中的关键闭合常数，用以计算无量纲量 (Nakanishi, 2001)。

对 MYNN 边界层参数化方案做以上订正之后利用我国五个观测站 (大理、塔中、武清、大气物理研究所和密云铁塔站) 的独立观测资料对新方案进行验证，发现改进方案计算的边界层湍流长度尺度以及湍流感热通量减小，与观测事实更加接近，并且消除了边界层顶的计算极值，使计算更加稳定。

4 数值模式和资料

本文采用 WRF 模式 (3.6.1 版本) 对上述两次区域性雾过程进行了模拟研究。WRF 模式是美国大气研究中心 (NCAR) 开发的区域非静力中尺度动力模式和资料同化系统，采用完全可压缩大气动力方程，水平方向采用投影 (Lambert 投影) 平面上的 Arakawa-C 网格，垂直方向采用地形追随坐标下的 Lorenz 网格，模式中包括全面的微物理、积云、边界层等物理过程的多种参数化方案，可方便选择使用，目前在业务预报和科学研究中得到广泛应用。

在本研究中我们选取 Betts-Miller-Janjic 积云对流参数化方案 (Janjic, 1994)、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)、MYNN 2.5 大气边界层参数化方案 (Nakanishi and Niino, 2009)，对我国东部 2009 年 3 月和 2011 年 12 月的两次雾过程进行了模拟。模式中心分别位于 (36°N, 124°E) 和 (29.9°N, 116.3°E)，都采用水平分辨率分别为 36、12 和 4 km 的三重嵌套模拟，模式层顶取在 100 hPa，垂直分层为 45 层，其中边界层内约有 10 层，这 10 层分别为 1.000、0.993、0.983、0.970、0.954、0.934、0.909、0.880、0.841 和 0.801。模式运行中，4 km 网格模式关闭了积云对流参数化方

案, 而其余两个粗网格模式则关闭了微物理过程计算, 积云对流参数化方案和微物理过程方案没有同时应用。模式初始场和边界条件由欧洲中期预报中心 (ECMWF) 的 ERA-interim 再分析资料提供, 该资料水平分辨率为 $0.75^{\circ} \times 0.75^{\circ}$, 垂直方向为 37 个垂直分层, 每日 4 个时次。海表温度由再分析资料的表面温度插值提供。模式分别在 2009 年 3 月 16 日 00:00 和 2011 年 12 月 2 日 12:00 开始模拟, 三层嵌套模式的积分时间步长分别为 60 s、20 s、6.667 s, 积分 72 h。由于缺少海面实际气象观测资料, 本文主要采用可见光卫星云图作为地面雾的观测资料进行定性对比分析, 北京南郊观象台和韩国济州岛的探空位温和比湿用于两次过程的要素场对比分析。

5 模拟结果

冬、春季是我国雾天的多发季节。本文对 2009 年 3 月中旬和 2011 年 12 月上旬我国东部两次雾天气过程进行了模拟, 考察边界层参数化方案对近地面雾的模拟影响。选取三重嵌套高分辨 WRF 三维模式的 4 km 模式模拟的低层云水混合比、感热通量、比湿等物理量进行分析, 并与风云卫星云图和探空资料对比, 以便分析 MYNN 方案对边界层稳定性和雾的模拟效果和特征。

5.1 雾的表现与模拟

云水混合比是指大气中悬浮的凝结水含量, 可用以表征云和雾的存在。当大雾天气出现时, 近地面层水汽凝结导致云水混合比增大, 能见度降低。一些研究利用云水混合比 (程相坤等, 2013; 曹祥村等, 2009) 对大雾的雾区分布进行了分析, 得到当大雾出现时, 近地层空气的云水混合比大值区一般分布在 300 m 以下, 陆地上的雾的大值区可以达到 0.2 g kg^{-1} 以上, 而对于黄海区海雾其云水混合比可达到 0.8 g kg^{-1} 以上, 因此可用模式低层云水混合比来描述雾的生消过程。在本研究中, 我们采用低层 300 m 以下模式面的模拟云水混合比垂直积分平均来表现雾的分布。

对于 2009 年 3 月 17 日东海—黄海海雾过程, 从卫星云图 (图 1) 可以看出 02:00 海雾主要位于上海以东的东海近岸洋面上, 在 850 hPa 西南气流的引导下向东北移动, 08:00 到达黄海海域。图 3 给出了改进的 MYNN 边界层参数化方案在 300 m 以下模式高度层垂直积分平均的云水混合比与原

始 MYNN 方案模拟结果的对比, 两种方案基本上成功模拟了东海海面雾的形成。相比而言, 改进 MYNN 边界层参数化方案模拟的低层云水混合比的大值区形状与雾团的位置、分布形状和区域都更加接近图 1 云图实况, 新旧方案由于稳定性参数和湍流通量参数化的不同, 使得模拟的近地层水汽含量产生差异, 新方案模拟大气低层凝结相对较少, 模拟雾区面积较大, 从而使得改进的 MYNN 方案模拟的雾区面积与卫星云图接近。应该指出, 两个试验在两个时次模拟的雾区位置都稍有偏南, 这与模式模拟的偏南风较弱, 雾区北上移动较慢相关, 这与程相坤等 (2013) 指出的此次海雾过程低层风速较大相符合。2011 年 12 月上旬的京津冀地区大雾过程模拟结果也在图 3 中给出, 与图 2 中 FY-3 卫星云图对比, 3 日 08:00 两个方案模拟云水混合比分布都非常小, 模式低层凝结较弱, 没有形成较强的边界层雾, 可能与模式低层环境水汽含量较低有关。但就两个方案对比可见, 改进的 MYNN 方案在河北西南部与山西接壤处有分散的云水混合比大值区域, 与实际雾区位置相符, 其最大值约 0.25 g kg^{-1} 。从时间发展看 (图略), 模式低层的雾区从 08:00 零散形成后, 在冀西南的晋冀交界处逐渐扩大, 连片形成较强的雾区。4 日 02:00, 京津冀地区有明显的雾区形成, 呈西南东北带状走向, 主体位置与云图相符, 然而两个方案总体上对于这次大雾的模拟都偏弱。从改进 MYNN 和原始边界层参数化方案对该雾区的模拟对比来看, 改进方案能够较好地模拟出天津北京交界处的雾区, 反映了该区域雾的生成, 强度相对有所加强。从两个方案在两个个例模拟中的表现看, 改进的 MYNN 参数化方案对模式低层水汽分布和雾区形成有更好的描述能力, 反映了水汽和热量湍流输送参数化方案的改进对改善边界层物质分布和垂直水汽、热量输送的重要作用。

为了分析模拟雾区的厚度和垂直结构, 图 4 中给出了两次雾过程的云水混合比和温度沿图 3d 大值中心和图 3h 京津交界处的阴影区域 (分别为 124°E 和 117°E) 的经向—垂直剖面分布。从图 4a 可见, 采用原 MYNN 方案在 2009 年 3 月 9 日 08:00 于 33°N 在 300 m 以下高度模拟出云水凝结, 且浓度较大, 但雾区狭窄, 形成于地面逆温层中。改进的 MYNN 参数化方案 (图 4b) 于 08:00 在 $31^{\circ} \sim 35^{\circ}\text{N}$ 的 300 m 以下模拟出了较宽的雾区, 凝结云水浓度

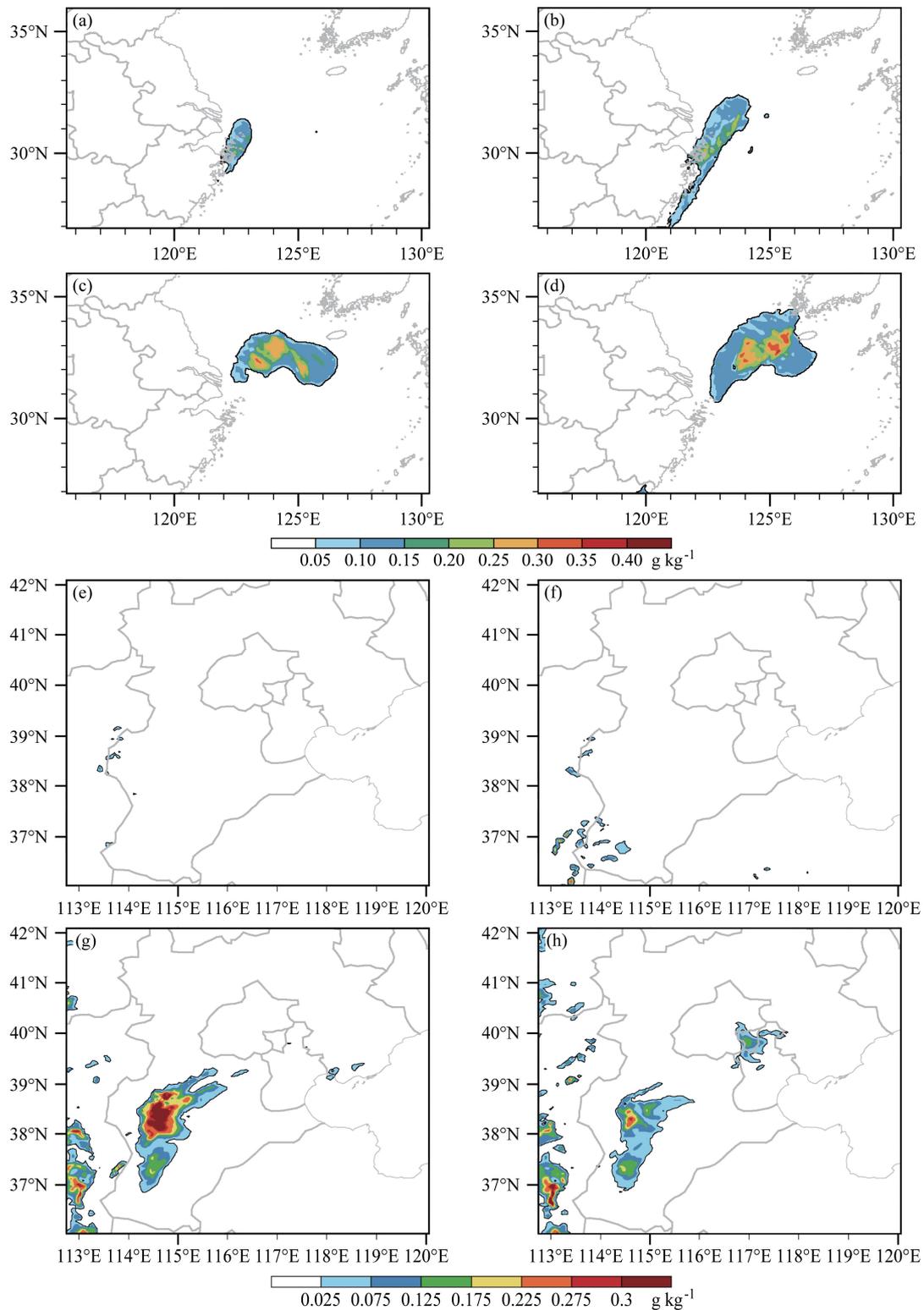


图3 2009年3月17日(a, b) 02:00与(c, d) 08:00黄海区域、2011年12月(e, f) 3日08:00和(g, h) 4日02:00京津冀地区低层(300 m以下)云水混合比(g kg^{-1})积分平均模拟分布结果:原MYNN方案模拟结果(左列);改进的MYNN模拟结果(右列)

Fig. 3 Horizontal distributions of simulated vertically integrated cloud water mixing ratios (g kg^{-1}) below 300 m with original MYNN scheme (left column) and improved MYNN scheme (right column) in the Yellow Sea at (a, b) 0200 UTC and (c, d) 0800 UTC 17 March 2009, and in the Beijing-Tianjin-Hebei region at (e, f) 0800 UTC 3 December and (g, h) 0200 UTC 4 December 2011

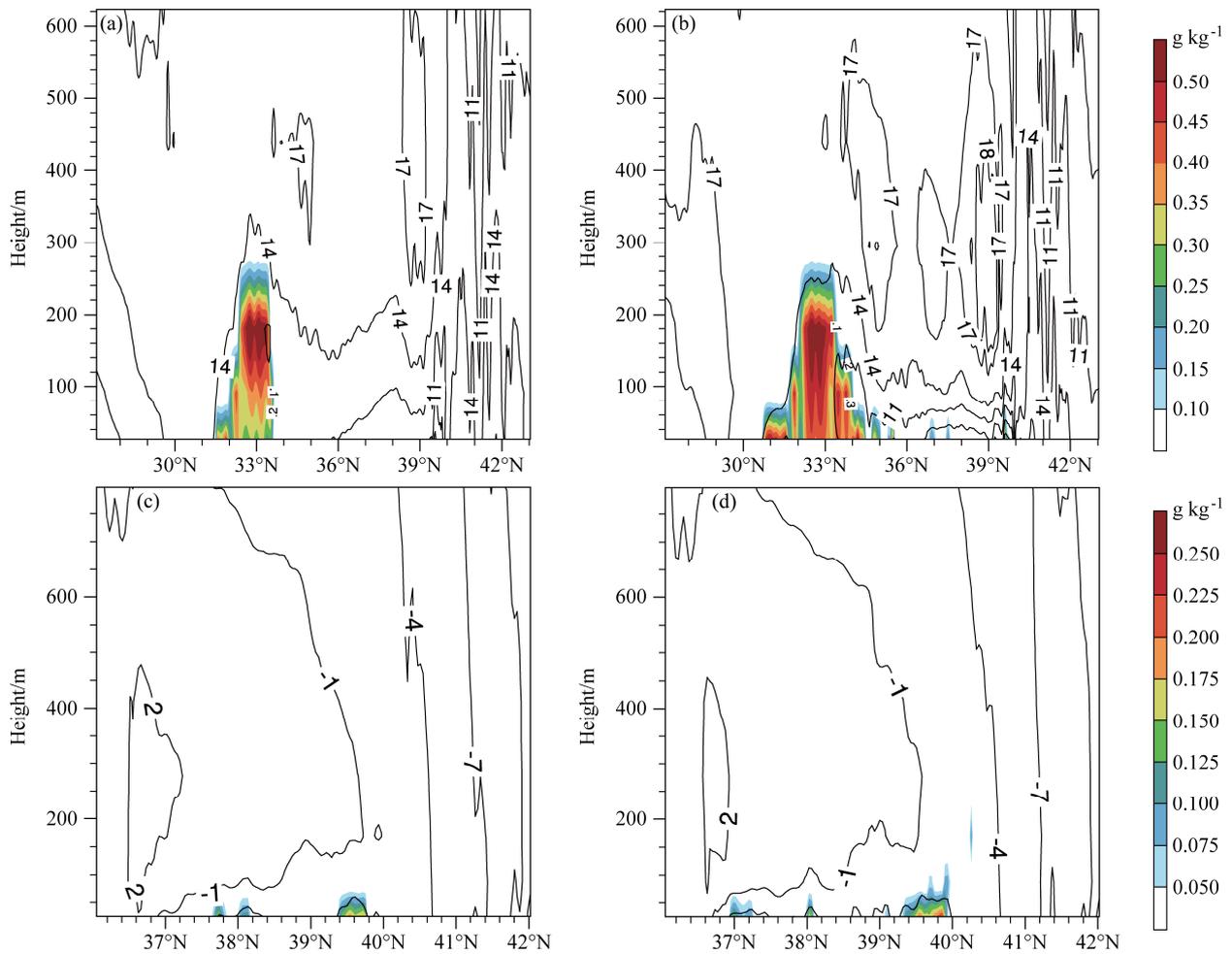


图4 (a、b) 2009年3月17日08:00和(c、d)2011年12月4日02:00个例中原始(左列)和改进(右列)MYNN方案模拟的云水混合比(阴影; g kg^{-1})与温度(等值线; $^{\circ}\text{C}$)分别沿(a、b) 124°E 和(c、d) 117°E 的垂直剖面

Fig. 4 Vertical cross sections of cloud water mixing ratios (shaded; g kg^{-1}) and temperature (contours; $^{\circ}\text{C}$) simulated by original MYNN scheme (left column) and improved MYNN scheme (right column) at (a, b) 0800 UTC 17 March 2009 along 124°E and (c, d) 0200 UTC 4 December 2011 along 117°E

在 33°N 达到 0.5 g kg^{-1} 的大值, 高度位于 200 m 附近, 随高度增加, 其值迅速减小, 而且 100 m 以下的云水混合比值明显比原方案大。该模拟雾区位于近地层逆温层中, 并限定在 200 m 以下, 逆温层阻止了热量和动量的上下交换, 使得近地面维持较高湿度的特征, 具有典型的雾特征。由于改进的边界层方案和原方案在热量、水汽和动量的湍流垂直输送参数化上存在差异, 导致近地层温度分布有了较大的改变(图 4a、b), 改进 MYNN 方案模拟的 $30^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$ 逆温层更低更强, 有利于低层水汽聚集, 模拟雾区亦向北扩展, 与观测(图 1)的雾区分布更接近。在图 4c 和 d 中也给出了 2011 年 12 月 4 日 02:00 的模拟云水混合比和温度垂直剖面, 改进的 MYNN 在 $39.2^{\circ}\sim 40^{\circ}\text{N}$ 附近模拟出了以云水混合比表现的

雾区存在, 并伴随有逆温稳定区, 雾顶高度达到 100 m , 而在原 MYNN 试验中, 逆温层和云水凝结的纬向跨度明显较小, 其垂直发展高度不到 100 m 。因此, 从云水混合比和温度的垂直剖面不仅确认了模拟雾区与逆温层的对应存在, 还进一步说明了两个过程模拟云水混合比高值区为近地面雾区, 且改进的边界层方案具有更好的模拟能力。

5.2 边界层感热通量的影响

边界层的感热通量表征近地层和边界层热量交换情况, 是影响边界层大气稳定性和结构的重要物理量。当近地表大气的温度较其上部边界层温度高时, 则会发生热量向上传输, 此时的感热通量为正, 而当低层空气温度比其上部温度低时, 即出现逆温情况下, 则会出现热量由上往下的输送, 感热通量为负,

在大雾出现的稳定层结下,感热一般向下输送。

在图 5 中给出了 90 m 高度模式层的负湍流感热通量分布,描述了稳定的大气层结。感热通量随海气温差、风速的大小而变,当海雾出现时气海温差为正,大气向海洋输送热量,感热通量为负。从图 5 中原 MYNN 方案与改进方案的模拟结果对比可以发现,原方案计算的感热通量较强,这与 Huang and Peng (2017) 在各个不同下垫面上的观测验证结果一致, Huang and Peng (2017) 基于我国不同下垫面的观测资料改进了原 MYNN 方案中湍流长

度尺度[公式 (1) 到 (3)],并且在湍流热通量的预报方程中考虑了三阶湍流通量项 $\partial \langle w^2 \theta \rangle / \partial z$ 的作用,因此湍流感热通量计算更为细致,并使得与热量有关的湍流稳定度函数减小。通过这些改进合理地解决了原方案在我国复杂下垫面对边界层湍流动量和热量通量高估的问题,尤其是在对湍流感热通量的模拟中,原方案模拟结果与观测值对比发现原方案明显地高估了湍流感热通量,而改进后的方案模拟的结果与观测值更加吻合。从此次海雾过程的模拟结果来看,新方案模拟的边界层湍流

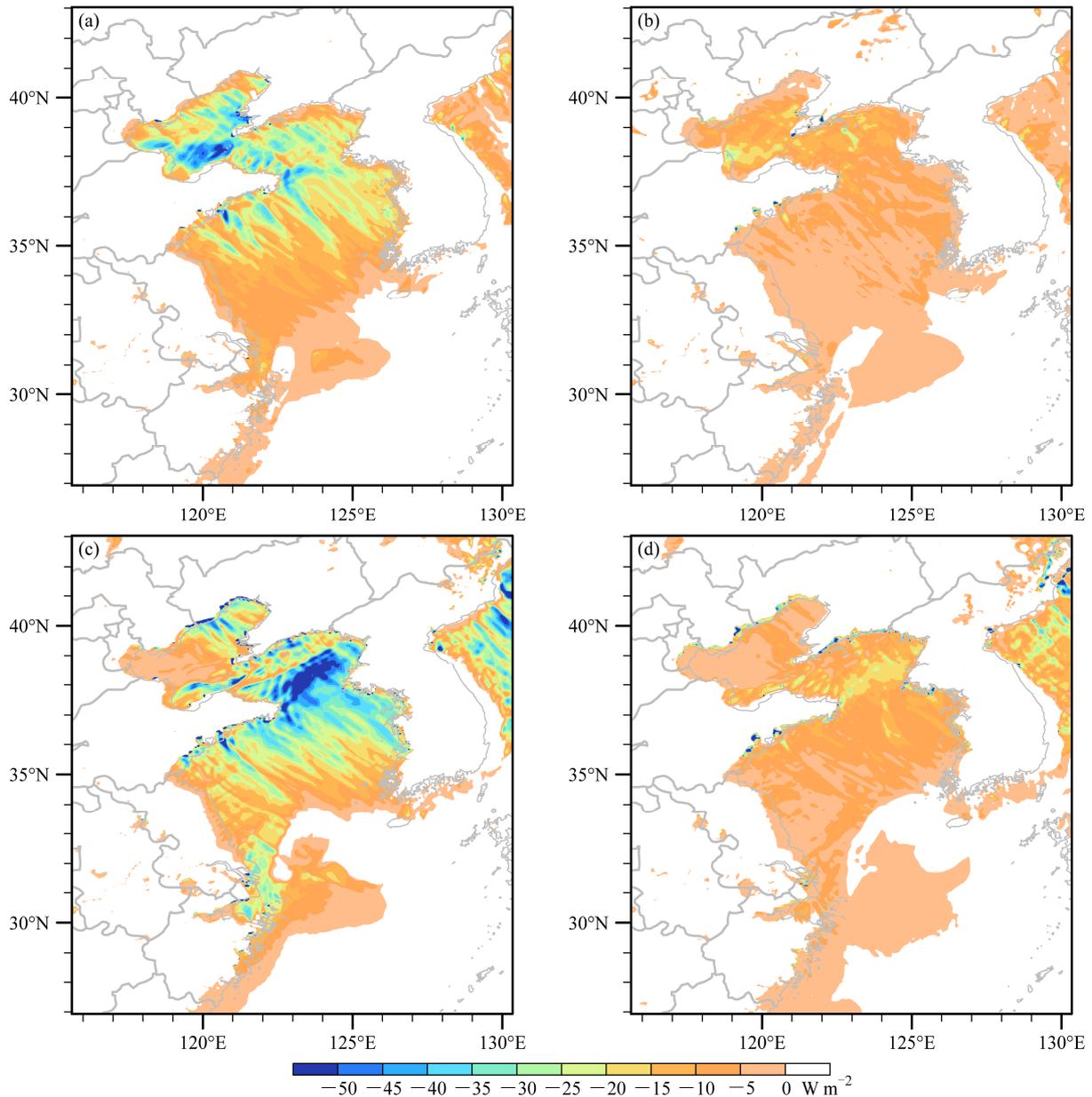


图 5 2009 年 3 月 17 日 (a、b) 02:00 与 (c、d) 08:00 原 MYNN 边界层参数化方案 (左列) 及改进方案 (右列) 模拟的低层 (90 m) 湍流感热通量的分布

Fig. 5 Horizontal distributions of simulated turbulent sensible heat fluxes at 90-m height with original MYNN scheme (left column) and improved MYNN scheme (right column) at (a, b) 0200 UTC and (c, d) 0800 UTC 17 March 2009

感热通量值与 Huang and Peng (2017) 改进的结果一致, 相对于原方案变小, 但通量中心位置没有变化。黄健等 (2010) 指出海雾中热力湍流向冷海面输送热量, 对雾层起到增温和降湿的作用。弱的感热通量使得雾的增温效果减小, 更有利于海雾的维持。在海雾的形成阶段, 湍流热通量为稳定的负值, 在海雾的发展和维持阶段湍流负的感热通量明显较小。同时, 较弱的感热通量使得改进 MYNN 模拟的低层温度相对较低, 新方案模拟的该区域的气海温差比原方案小, 两方案模拟雾区的气海温差基本都维持在 3.5°C 以下, 这与 Cho et al. (2000) 指出的海雾发生的气海温差的值要在 ($1\sim 3^{\circ}\text{C}$) 的判断符合, 合适的低层气温更有利于边界层大范围水汽凝结。从可见光云图 (图 1) 中海雾的分布来

看, 17日 02:00 海雾主要分布在上海以东, 原 MYNN 方案模拟的湍流负感热通量较强, 但弱负值区分布在上海以东海面, 与模拟的海雾出现位置一致, 而改进的 MYNN 方案则在上海以东海面和黄海大片海面模拟了弱的负值分布区, 与卫星云图中的观测海雾符合, 模拟海雾面积也较原方案有扩大, 并向北扩展。可见对本次过程, 这种弱的负感热通量对近地层稳定层结和雾的形成具有重要的作用。

5.3 相对湿度和位温

Cotton and Anthes (1993) 指出, 雾的液态水范围为 $0.05\sim 0.2\text{ g kg}^{-1}$, 此时近地面空气中的水汽达到饱和, 温度层结呈现出逆温层, 形成雾。图 6 中分别给出了 2009 年 3 月 17 日 12:00 在韩国济州岛 (33.28°N , 126.16°E) 与 2011 年 12 月 4 日 00:00

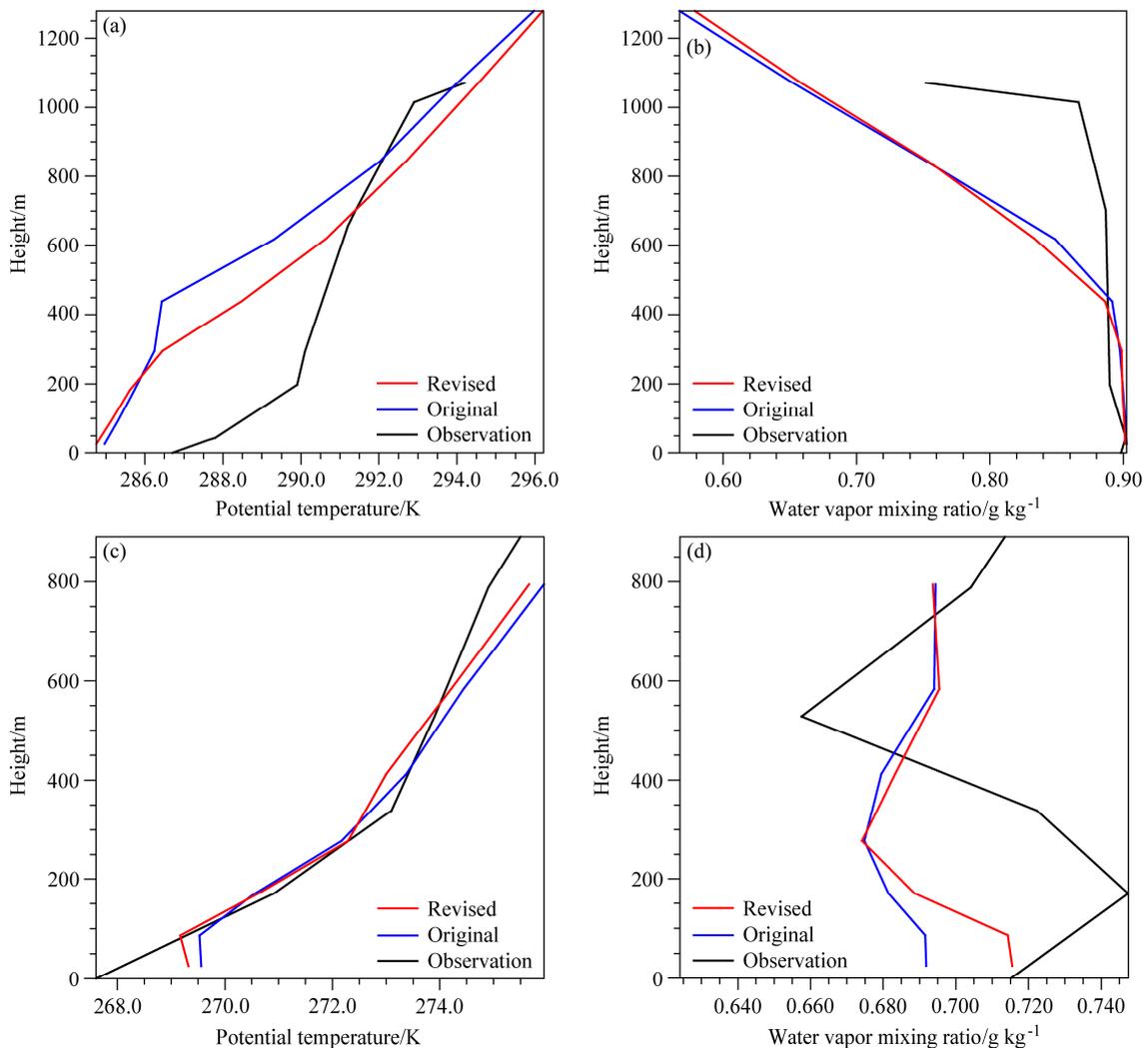


图 6 (a、b) 2009 年 3 月 17 日 12:00 济州岛站点、(c、d) 2011 年 12 月 4 日 00:00 北京站点 (a、c) 位温和 (b、d) 比湿的垂直廓线, 蓝色线为原 MYNN, 红线为改进的 MYNN, 黑线代表观测值

Fig. 6 Vertical profiles of (a, c) potential temperature and (b, d) water vapor mixing ratios simulated with original MYNN scheme (blue) and improved MYNN scheme (red) and from observational data (black) at (a, b) 1200 UTC 17 March 2009 at Jeju Island station and (c, d) 0000 UTC 4 December 2011 at Beijing station

在北京 (39.9°N, 116.3°E) 两个站点的位温廓线和比湿比廓线。由于雾是在较为稳定的层结中产生, 两地对应的大雾过程都存在明显的逆温层分布, 即位温随高度呈增长的趋势, 新方案模拟的济州岛站的近地层位温 (图 6a) 在 250~800 m 与观测值符合较好, 而原 MYNN 模拟的结果偏小, 改进的 MYNN 方案在北京 (图 6c) 模拟的近地层 (100 m 以下) 位温与观测值更加接近。从两个方案模拟的位温垂直分布来看, 近地层都存在一个垂直均匀的位温层, 显然是近地层湍流垂直混合的结果, 而原 MYNN 方案给出的位温都比改进方案模拟值大, 这与原方案计算的感热通量过大 (Huang and Peng, 2017) 的判断一致。对于济州岛的液态水含量的垂直分布 (图 6b), 模拟的比湿在 1200 m 以下都达到 0.6 g kg^{-1} 以上, 且随高度递减, 为海雾的发展提供了较为良好的水汽条件, 而且在 500 m 以下部分的水汽含量更是与观测值接近, 且随高度均匀分布, 形成一个较强的近地面大气湿层。由于 2011 年 12 月 4 日 00:00 的大雾过程发生在华北地区的陆面上 (图 6), 因此水汽含量相对海雾较小, 比湿也基本稳定在 $0.65 \sim 0.75 \text{ g kg}^{-1}$ 之间, 其垂直分布呈现随高度先增大再减小再增大的形态, 改进的 MYNN 方案模拟的低层水汽含量与观测值更加接近, 尤其在 450 m 以下最为明显。从两个个例模拟结果来看, 温度和水汽的垂直分布满足大雾形成的条件, 在 950 hPa 以下有逆温层且比湿大于 0.05 g kg^{-1} 。边界层温湿特性很大程度上依赖于地表属性和边界层湍流的输送情况, Huang and Peng (2017) 指出新 MYNN 参数化方案中湍流长度尺度以及稳定函数的改进同样会影响边界层诊断量的垂直分布, 新方案的模拟结果与观测值更加接近, 尤其是在对比大理和塔中站近地层 2 m 温度和湿度的日变化的结果中改进效果更是明显。因此基于不同性质的下垫面, 温度、湿度垂直结构的改进保证了新方案对这两次大雾过程温湿结构的合理描述。

6 结果与讨论

本文利用改进的 MYNN 边界层参数化方案对 2009 年 3 月 17 日黄海海雾和 2011 年 12 月 4 日华北大雾两次个例进行模拟, 将改进后的模式与原模式模拟的结果以及观测资料进行对比分析, 并讨论了改进边界层方案对雾模拟的影响。对两次大雾过程的云水混合比进行模拟并与卫星云图中显示的

雾区对比发现, 新方案模拟的云水混合比较原方案模拟的结果有明显改进, 新 MYNN 方案模拟出了观测雾区范围, 模拟云水混合比和温度垂直分布更为合理。从温度的垂直分布来看, 雾区对应较好的稳定层结, 新 MYNN 有能力更好地模拟大雾的发生发展过程。

在 2009 年 3 月 17 日黄海海雾区域, 通过对 MYNN 参数化方案的修订, 减小了近地层感热通量, 更好地模拟了近地层稳定层结的形成, 模拟的感热通量负值区与海雾区的分布更加接近。修订的 MYNN 方案对近地层温、湿场影响较大, 模拟位温及水汽混合比的垂直廓线得到改善, 能更好地表达水汽和温度的垂直分布, 为雾的形成提供了更好的条件。

通过对这两次大雾过程的模拟结果分析发现, 利用我国观测资料改进的 MYNN 边界层参数化方案相对于原模式对大雾模拟有更好的效果。但由于受到初始场和边界条件等影响, 大尺度环境场对雾的形成也有非常重要的作用, 模拟结果受到环境温湿条件的限制, 而对于我国复杂下垫面下上的天气现象和天气过程也需要更多的模拟研究才能全面认识。

致谢 感谢中国海洋大学海洋与大气学院的区域大气与海洋短期实时预报系统 (<http://222.195.136.24/forecast.html> [2016-03-30]) 提供的风云卫星云图, 网站 (<http://weather.uwyo.edu/upperair/seasia.html> [2016-03-30]) 提供的北京和济州岛的探空资料。作者感谢两位审稿人的宝贵意见。

参考文献 (References)

- Abdella K, McFarlane N. 1997. A new second-order turbulence closure scheme for the planetary boundary layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 54 (14): 1850–1867, doi:10.1175/1520-0469(1997)054<1850:ANSOTC>2.0.CO;2.
- Bergot T, Guedalia D. 1994. Numerical forecasting of radiation fog. Part I: Numerical model and sensitivity tests [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122 (6): 1218–1230, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<1218:NFORFP>2.0.CO;2.
- Businger J A, Wyngaard J C, Izumi Y, et al. 1971. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer [J]. *J. Atmos. Sci.*, 28(2): 181–189, doi:10.1175/1520-0469(1971)028<0181:FPRITA>2.0.CO;2.
- 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 [J]. *海洋学报*, 31 (4): 39–50. Cao Xiangcun, Shao Limin, Yi Haiqi, et al. 2009. Observational analysis and numerical simulation of an advection-radiation sea fog event in winter [J]. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 31 (4): 39–50, doi:10.3321/j.issn:0253-4193.2009.04.005.
- 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 [J]. *气象与环境学报*, 29 (6): 15–23. Cheng Xiangkun, Cheng Hang, Xu Jie, et al. 2013. Forming reason of a sea fog event and its numerical simulation over the Yellow Sea [J]. *J. Meteor. Environ. (in Chinese)*, 29

- (6): 15–23, doi:10.3969/j.issn.1673-503X.2013.06.003.
- Cho Y K, Kim M O, Kim B C. 2000. Sea fog around the Korean Peninsula [J]. *J. Appl. Meteor.*, 39 (12): 2473–2479, doi:10.1175/1520-0450(2000)039<2473:SFATKP>2.0.CO;2.
- Cotton W, Anthes R. 1993. 风暴和云动力学 [M]. 北京: 气象出版社, 331–342. Cotton W, Anthes R. 1993. *Storm and Cloud Dynamics* (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 331–342
- 邓长菊, 尹晓惠, 甘璐. 2014. 北京雾与霾天气大气液态水含量和相对湿度层结特征分析 [J]. *气候与环境研究*, 19 (2): 193–199. Deng Changju, Yin Xiaohui, Gan Lu. 2014. Stratification characteristic analysis of atmospheric liquid water content and relative humidity during fog and haze weather in Beijing [J]. *Climatic Environ. Res.* (in Chinese), 19 (2): 193–199, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13078.
- Dyer A J. 1974. A review of flux-profile relationships [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 7 (3): 363–372, doi:10.1007/BF00240838.
- Giannakopoulou E M, Nhili R. 2014. WRF model methodology for offshore wind energy applications [J]. *Adv. Meteor.*, 2014, 2014: 319819, doi:10.1155/2014/319819.
- 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 [J]. *Atmos. Res.*, 145–146: 27–44, doi:10.1016/j.atmosres.2014.03.023.
- 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 [J]. *大气科学*, 34 (4): 715–725. Huang Jian, Wang Bin, Zhou Faxiu, et al. 2010. Turbulent heat exchange in a warm sea fog event on the coast of South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 34 (4): 715–725, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2010.04.05.
- Huang Y, Peng X. 2017. Improvement of the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino planetary boundary-layer scheme based on observational data in China [J]. *Bound-Layer Meteor.*, 162:171–188, doi: 10.1007/s10546-016-0187-0.
- 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, D13103, doi:10.1029/2008JD009944.
- Janjic, Zavisla I, 1994. The step-mountain eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 122, 927–945, DOI:10.1175/1520-0493(1994)122<0927:TSMECM>2.0.CO;2
- Kitamura Y. 2010. Modifications to the Mellor-Yamada-Nakanishi-Niino (MYNN) model for the stable stratification case [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88 (5): 857–864, doi:10.2151/jmsj.2010-506.
- 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 [J]. *Wea. Forecasting*, 27 (6): 1538–1553, doi:10.1175/WAF-D-11-00152.1.
- 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 2014. 春季黄海海雾 WRF 参数化方案敏感性研究 [J]. *应用气象学报*, 25 (3): 312–320. Lu Xue, Gao Shanhong, Rao Lijuan, et al. 2014. Sensitivity study of WRF parameterization schemes for the spring sea fog in the Yellow Sea [J]. *J. Appl. Meteor. Sci.* (in Chinese), 25 (3): 312–320, doi:10.3969/j.issn.1001-7313.2014.03.008.
- Mellor G L, Yamada T. 1974. A hierarchy of turbulence closure models for planetary boundary layers [J]. *J. Atmos. Sci.*, 31 (7): 1791–1806, doi:10.1175/1520-0469(1974)031<1791:AHOTCM>2.0.CO;2.
- 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.
- Monin A S, Obukhov A M. 1954. Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere [J]. *Tr. Akad. Nauk. SSSR Geophys. Inst.*, 64: 1963–1987.
- Nakanishi M. 2001. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data [J]. *Bound.-Layer Meteor.*, 99 (3): 349–378, doi:10.1023/A:1018915827400.
- 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.
- 彭双姿, 刘从省, 屈右铭, 等. 2012. 一次大范围辐射雾天气过程的观测和数值模拟分析 [J]. *气象*, 38 (6): 679–687. Peng Shuangzi, Liu Congsheng, Qu Youming, et al. 2012. Observations and numerical simulation of a wide range of radiation fog [J]. *Meteor. Mon.* (in Chinese), 38 (6): 679–687, doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2012.6.005.
- Reynolds O. 1883. An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels [J]. *Proc. Roy. Soc. London*, 35: 84–99.
- Reynolds O. 1895. On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion [J]. *Proc. Roy. Soc. A Math. Phys. Eng. Sci.*, 186: 123–164, doi:10.1098/rsta.1895.0004, doi:10.1098/rsta.1895.0004.
- 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 [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 136, 5095–5115, DOI: 10.1175/2008MWR2387.1