

WRF模式中不同边界层及云微物理方案对两次黄海海雾个例数值模拟的影响

饶莉娟¹ 高山红² 张恺¹

(1 青岛市黄岛区气象局, 青岛 266400; 2 中国海洋大学, 青岛 266100)

摘要: 利用WRF模式及其循环三维变分同化系统, 以发生在2006年3月6—8日和2012年3月27—28日的两次大范围黄海海雾事件为研究对象, 针对不同的边界层方案和云微物理方案, 设计了4组海雾数值模拟对比试验。模拟结果显示: 对于2006年较为浓厚的海雾个例, 边界层方案采用YSU、云微物理方案采用Lin得到的模拟雾区与观测事实最为相符; YSU和Thompson方案、MYNN和Lin方案的组合模拟结果次之。边界层方案采用MYJ时, 无论采用何种云微物理方案, 模拟结果均较差。而对于2012年较为淡薄的海雾个例, 采用不同云微物理方案之间的差异较小, 采用不同的边界层方案得到的模拟雾区差异显著。采用MYNN边界层方案得到的模拟雾区与观测事实最为相符, 而YUS和MYJ方案均不能很好地模拟出此次海雾过程。

关键词: 黄海海雾, WRF模式, 数值模拟, 边界层方案, 云微物理方案

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.06.002

Impact of Boundary Layer and Cloud Microphysics Schemes in WRF Model on Numerical Simulation of Two Yellow Sea Fog Cases

Rao Lijuan¹, Gao Shanhong², Zhang Kai¹

(1 Huangdao District Meteorological Office in Qingdao, Qingdao 266400 2 Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: Four groups of numerical experiments covering two heavy sea fog events (March 6-8, 2006 and March 27-28, 2012) over the Yellow Sea were conducted by using WRF model and its 3DVAR system. The simulation results showed that the simulated fog areas were very similar to the observation for the dense sea fog case in 2006 if YSU was adopted as boundary layer scheme and Lin was chosen as cloud microphysical scheme. The simulated fog areas of YSU and Thompson scheme, MYNN and Lin scheme came second. When adopting MYJ as boundary layer scheme, the simulated fog areas were very poor compared with observation regardless of the cloud microphysical scheme. For the thin sea fog case in 2012, simulated sea fog area mostly depended on boundary layer scheme but little on cloud microphysical scheme. The best combination of boundary layer scheme was MYNN, while neither YUS nor MYJ can properly simulate the sea fog process.

Keywords: sea fog over the Yellow Sea, WRF model, numerical simulation, boundary layer scheme, microphysical scheme

0 引言

海雾是海洋上低层大气中的一种水汽凝结现象, 由于水滴或冰晶的大量聚积, 使能见度低于1 km^[1], 给海上交通运输、沿岸的生产与生活造成严重影响。黄海是我国近海发生海雾最为频繁的海区^[2]。近年来我国从多方面对海雾进行了研究: 海雾天气气候学研究^[3-7]、海雾遥感探测和观测分析^[8-11]、海雾微物理研究^[12-15]和海雾数值模拟研究^[16-18]等。其中, 海雾的数值模拟研究蓬勃发展, 已成为研究海雾的不可缺少的

主要方法^[19-20]。但边界层方案和云微物理方案直接影响海雾的数值模拟质量。

WRF (Weather Research and Forecasting) 模式有多个边界层方案和云微物理方案可供选择, 这些方案都有各自的特点、适用条件及优势。研究表明, 选取不同边界层方案和云微物理方案对降水、气温、风速、台风等模拟效果均存在显著差异^[21-25], 对雾的模拟也是如此。陈阳权等^[26]对乌鲁木齐机场一次冻雾天气过程进行数值模拟研究, 发现此次冻雾过程对边界层方案较为敏感; 黄政等^[27]对江苏省高速公路网2011—2013年发生的21场大雾过程进行研究, 表明云微物理方案选用WDM6, 边界层方案选用QNSE雾的

收稿日期: 2018年8月23日; 修回日期: 2019年5月31日

第一作者: 饶莉娟 (1987—), Email: raol201@163.com

资助信息: 青岛市气象局青年科研专项课题 (2016qdxqx15)

数值模拟效果最优；王佳等^[28]对2006年沪宁高速公路的一次持续性大雾的模拟中，发现对相对湿度等常规气象要素的模拟，各个参数化方案的模拟效果都较好，对直接表征能见度的液态水含量的模拟，云微物理过程采用Lin方案模拟效果最好；陆雪等^[29]利用2005—2011年11次春季黄海海雾个例开展WRF模式参数化方案敏感性研究，发现边界层与云微物理方案的最佳组合为YSU与Lin方案，最差为Mellor Yamada与WSM5方案；而Steenefeld等^[30]在对英国的一次强浓雾过程的研究中，则发现云微物理方案WDM6要优于WSM5和WSM6。

本文以发生在2006年3月6—8日和2012年3月27—28日的两次大范围黄海海雾事件为研究对象，

利用WRF模式及其循环三维变分同化系统（循环3DVAR）设计了一系列数值模拟对比试验，并对雾区模拟效果进行检验和分析。

1 海雾个例

1.1 观测雾区

以发生在2006年3月的一次浓厚海雾与发生在2012年3月一次较为淡薄的海雾为研究对象。高山红等^[31]利用MODIS可见光云图以及MTSAT-1R红外通道数据，得到2006年海雾/低层云个例的演变过程（图1）。此外还给出了黄海周边地面和海上船舶的水平能见度的观测事实。利用夜间双通道法及Wang等^[32]提出的方法反演得到了2012年海雾个例的演变信息（图2）。

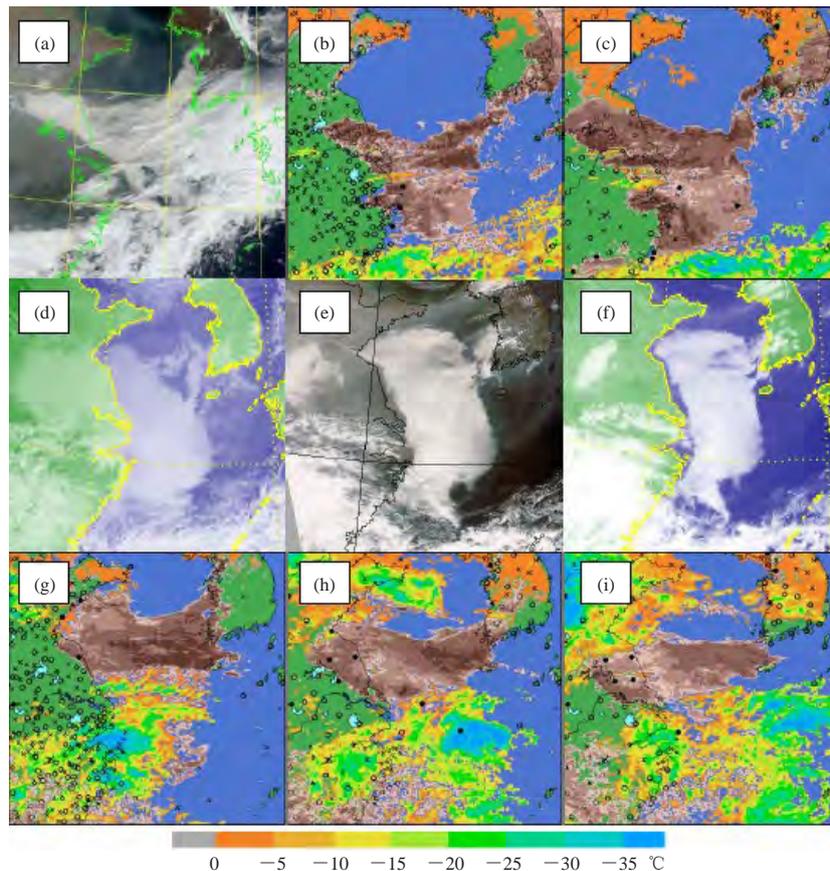


图1 2006年3月6—8日海雾演变的卫星观测事实^[31]

（图a和e为MODIS可见光云图，图d和f为MTSAT-1R可见光云图，图b-c与g-i为MTSAT-1R双通道数据反演图片（棕色表示海雾/低云，深绿色与深蓝色分别代表海陆分布，其他色彩表示红外1通道亮温分布）。图a~i对应的时间（当地时间）分别为：3月6日10: 22, 20: 00, 3月7日02: 00, 08: 00, 12: 25, 14: 00, 20: 00, 3月8日02: 00, 05: 00。图中符号•、▲、○和×分别代表0~1 km, 1~2 km, 2~10 km和10 km以上的地面水平能见度观测）

Fig. 1 Satellite observation from 6 to 8 March, 2006^[31]

(Figs. 1a and 1e, Figs. 1e and 1f are MODIS and MTSAT-1R visible images, respectively. Figs.1 b-1c and 1g-1i are MTSAT-1R dual-channel derived images (brown color represents sea fog/ stratus, dark green and dark - blue colors indicate land and ocean, respectively, and other colors represent bright temperature distribution of the channel-1) .

Figs. 1a-1i represent the following time: 1022, 2000 BT on 6 March, 0200, 0800, 1225, 1400 and 2000 BT on 7 March, 0200 and 0500 BT on 8 March, respectively. The symbols “•”, “▲”, “○”, and “×” represent the observed visibility with values 0-1 km, 1-2 km, 2-10 km and more than 10 km, respectively)

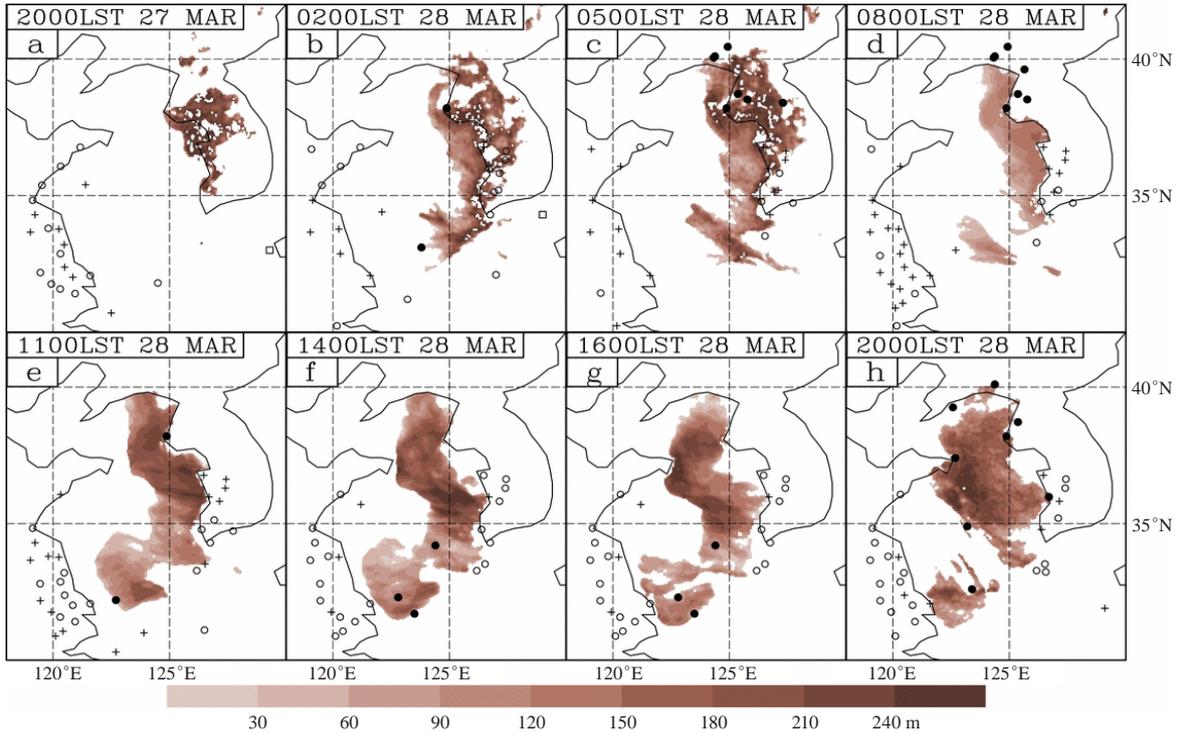


图2 2012年3月27—28日海雾演变的MTSAT反演观测事实
(填色为雾区与雾顶高度, 图中符号含义见图1)

Fig. 2 The sea fog detection algorithm using MTSAT data from 27 to 28 March 2012
(The fog area and fog top height, the meanings of the symbols in the figure are shown in Fig. 1)

1.2 天气形势与边界层特征

考察发生两次海雾个例的天气背景发现, 两次海雾的形成与发展均是受到高压系统的影响, 其天气型为北太平洋高压脊位^[1, 3], 海雾发生前至海雾生成及

维持阶段均有暖湿空气从台湾海峡附近向黄海海域输送, 并且形成逆温层结。

2006年个例沿图5中A-B线做海面至800 hPa温度风速剖面(图3), 从图中可以看到本次海雾发展过

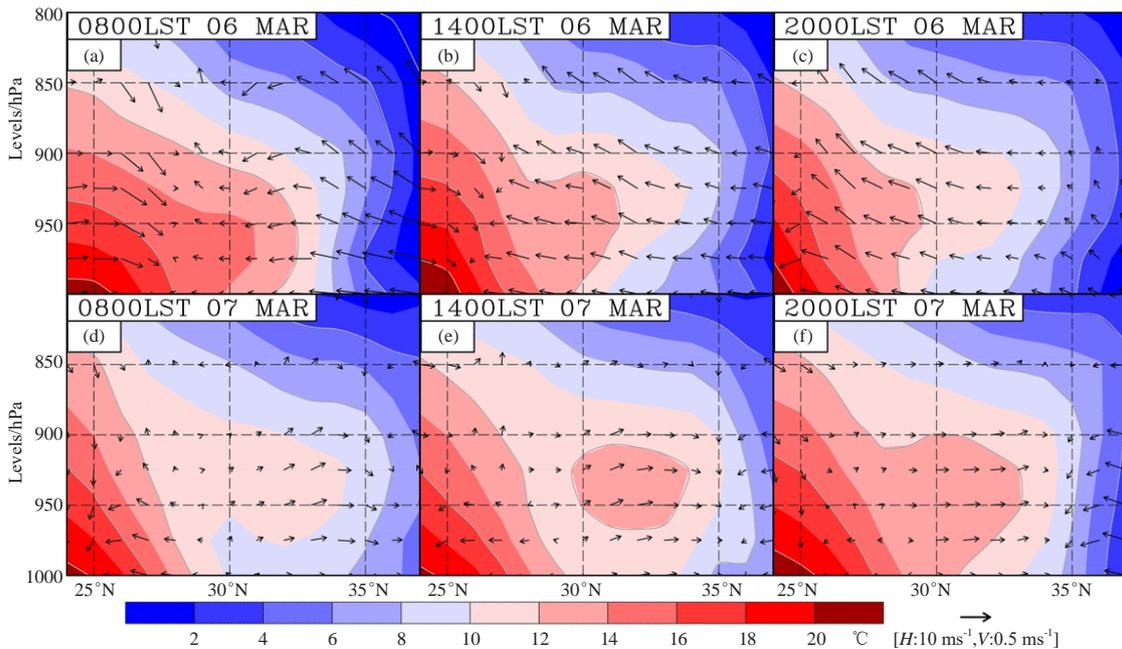


图3 沿图5中A-B线的海面至800 hPa温度与风速的垂直剖面图

Fig. 3 Vertical sections of temperature and winds along the A-B line of Fig. 5 from sea surface to 800 hPa

程中逆温始终存在，且发展较高。7日14 LST由于海上高压中心移出黄海，黄海上空为偏南风，使得逆温增强。由于逆温层较高，且水汽充沛，海雾发展较厚，从可见光云图中也可看出本次海雾较为浓厚。2012年个例沿图5中C-D线做海面至800 hPa温度风速剖面（图4），从图中可以看到2012年海雾个例发生前，27日白天黄海上空逆温即已存在。在南向气流的作用下，逆温向北推进并且加强。而在28日，黄海西北方向的高压入海，黄海受其前部影响，风向转为偏北风，其带来较干冷的空气使得暖湿空气南退。由于逆温层较低，海雾不能突破逆温层向上发展，本次海雾发展高度较低。从高分辨率的MODIS卫星云图上可看出本次海雾较为淡薄，尤其是南部海雾，其下垫面蓝色海水隐约可见。

作用下，逆温向北推进并且加强。而在28日，黄海西北方向的高压入海，黄海受其前部影响，风向转为偏北风，其带来较干冷的空气使得暖湿空气南退。由于逆温层较低，海雾不能突破逆温层向上发展，本次海雾发展高度较低。从高分辨率的MODIS卫星云图上可看出本次海雾较为淡薄，尤其是南部海雾，其下垫面蓝色海水隐约可见。

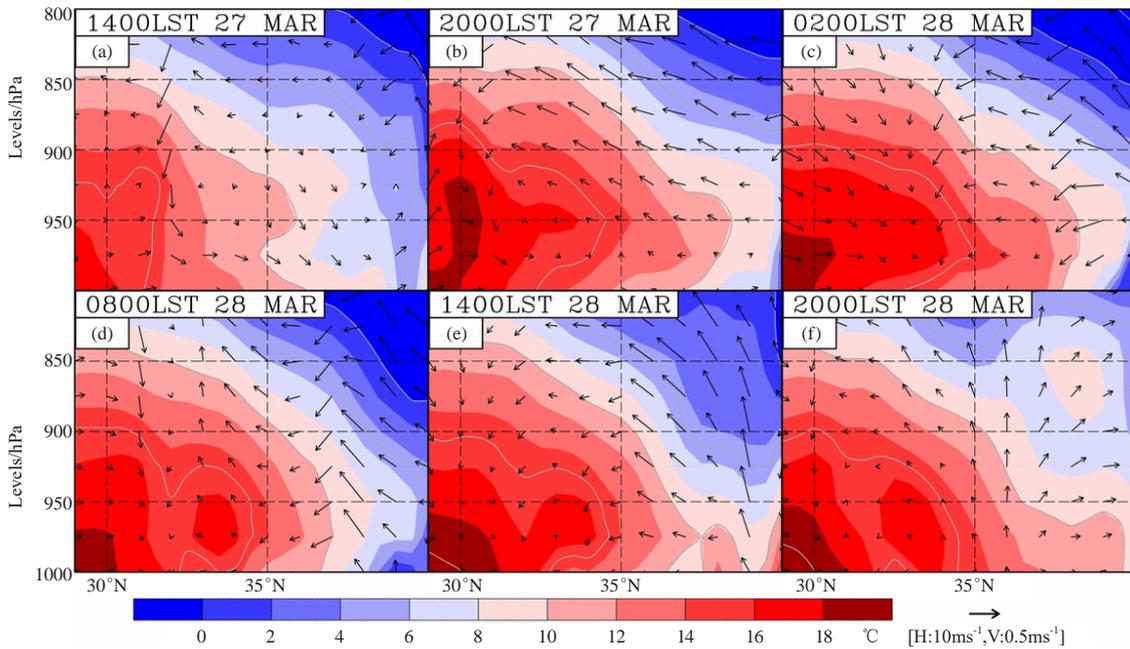


图4 沿图5 C-D线的面至800 hPa温度与风速的垂直剖面图

Fig. 4 Vertical sections of temperature and winds along the C-D line of Fig. 5 from sea surface to 800 hPa

2 WRF数值试验

2.1 WRF 模式设置

借助WRF模式模拟此次的海雾演变过程，模式设置的详细信息和模式各个物理选项的选取见表1，模拟的区域设置如图5所示，采用了双重双向嵌套，分辨率较高的内区（图5中的D2区域）覆盖了海雾演变的范围。

为模拟试验提供背景数据和边界条件的是FNL再分析数据（ $1^\circ \times 1^\circ$ ，6 h/次）和NEAR-GOOS（ $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ）日平均海温数据。主要依据内区的模拟输出结果对结果进行分析。

2.2 试验设计

为了得到最佳的模拟海雾的云微物理方案和边界层方案，利用WRF模式及其循环3DVAR同化模块，通过设置不同的云微物理方案和边界层方案，设计了4组数值模拟对比试验（表2）。两次个例同化时间窗均为12 h，模拟时段分别为北京时间2006年3月6日08时—8日08时和2012年3月27日20时—28日20时。所有

表1 WRF模式设置

Table 1 Specifications of the WRF model

区域与选项	具体设置
	两重嵌套, Lambert conformal投影 中心点 (32.5°N, 123°E)
区域与分辨率	大区: 格点数110×120 大区: 水平分辨率30 km 小区: 格点数151×151 小区: 水平分辨率10 km 垂直分辨率: 44 η层*
时间步长	120 s, 40 s
积云方案	Kain-Fritsch方案
辐射方案	长波辐射: RRTM方案 短波辐射: Dudhia方案
陆面过程	Noah陆面模式
背景误差	CV5

* $\eta = 1.0000, 0.9990, 0.9985, 0.9975, 0.9950, 0.9925, 0.9900, 0.9850, 0.9800, 0.9775, 0.9700, 0.9540, 0.9340, 0.9090, 0.8800, 0.8506, 0.8212, 0.7918, 0.7625, 0.7084, 0.6573, 0.6090, 0.5634, 0.5204, 0.4798, 0.4415, 0.4055, 0.3716, 0.3397, 0.3097, 0.2815, 0.2551, 0.2303, 0.2071, 0.1854, 0.1651, 0.1461, 0.1284, 0.1118, 0.0965, 0.0822, 0.0689, 0.0566, 0.0452, 0.0346, 0.0249, 0.0159, 0.0076, 0.0000$. 850 hPa以下各层对应的海拔高度分别大约为: 0, 32, 61, 110, 169, 228, 322, 469, 658, 890, 1184, 1417 m.

的数值试验均采用了相同的区域设置、初始场、物理选项（除了边界层方案和云微物理方案外）、背景场数据和海温数据。

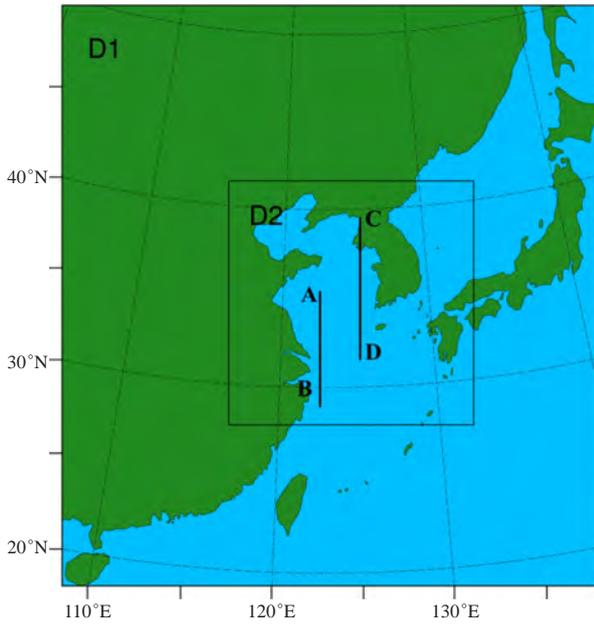


图5 WRF数值试验的模拟区域
Fig. 5 Domains of WRF numerical experiment

表2 试验设计
Table 2 Design of experiments

组别	边界层方案	云微物理方案
第一组	YSU	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson
第二组	MYNN 2.5 level TKE	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson
第三组	MYNN 3level TKE	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson
第四组	Mellor-Yamada-Janjic TKE	Exp_A: Lin et al. scheme Exp_B: WSM 5-class Exp_C: WDM 5-class Exp_D: Thompson

3 模拟结果分析：雾区的对比

图6为2006年个例第一组的4个数值模拟试验给出的海雾演变过程。图中彩色填充区域为数值试验模拟出的海雾或低层云顶高度水平分布，蓝色等值线为10 m高度云水含量 $>0.1 \text{ g/kg}$ 的区域，两者重合的区域即可认为是雾区，而其他部分则认为是低层云区。图中行排从上到下，依次对应每组试验中的Exp_A~Exp_D（分别为Lin方案、WSM5方案、WDM5方案及Thompson方案）；列排从左到右依次对应模拟的时间。将图6与海雾演变过程的卫星观测事实（图1）进行比较可以发现：Exp_A较好地呈现了海雾生成并向北逐渐发展的过程，模拟的海雾雾区与观测结果较为接近，但没有体现出3月8日海雾向南

退移并逐渐消散的过程；Exp_B与Exp_D的模拟结果较为接近，模拟的海雾雾区以及10 m高度的云水含量 $>0.1 \text{ g/kg}$ 的区域较Exp_A减小，但比Exp_C的模拟结果更接近实际观测；Exp_C的结果与观测事实相差较大，模拟的海雾雾区整体上偏小，3月7日午后本应该是海雾发展的旺盛期，但Exp_C模拟的海雾区域却缩小了很多。

2006年个例的第二组数值模拟试验结果如图7，可以明显地看出图中的4个模拟试验模拟的海雾雾区及10 m的云水含量 $>0.1 \text{ g/kg}$ 的区域较图6整体变小，与观测有一定差距，但基本上体现出了从3月6日海雾发生、发展，至7日海雾发展到旺盛期后，海雾在8日向南退移并逐渐消退的整个过程，Exp_C的模拟结果与观测事实相差仍然最大。从整体上看，4个试验模拟结果之间的差异有所减小。第三组试验的模拟结果与第2组的模拟结果十分相近，而第四组的4个模拟试验的结果与观测事实相差较大，模拟效果较差（图略）。

仅从雾区的模拟结果来看，2006年个例边界层方案采用YSU方案时，云微物理方案采用Lin方案得到的模拟结果较为理想，采用WSM5及Thompson方案的模拟结果次之。边界层方案采用MYNN 2.5 level TKE scheme（MYNN2.5）和MYNN 3rd level TKE scheme（MYNN3）时模拟结果较YSU稍差，而采用Mellor-Yamada-Janjic TKE scheme（MYJ）时的模拟结果最为不好，与观测事实不相符。

然而对于2012年个例，采用不同云微物理方案之间的差异较小，主要差异在于采用不同的边界层方案。这与陆雪等^[29]结论相符，即边界层方案对WRF模式雾区模拟结果起决定作用，而微物理方案影响较小。图8是2012年个例不同边界层方案的对比试验给出的模拟结果（云微物理方案均为Lin方案），图中行排从上到下，依次对应的边界层方案为MYNN2.5、YSU、MYJ（MYNN3的结果与MYNN2.5较为相似，故略去）。与观测事实相比，采用MYNN2.5方案模拟得到的海雾雾区的变化同卫星云图观测到的事实相符，特别是海雾向北且向南的推进过程、海雾发展成成熟后的形态以及整齐的西边界（与观测相比较为偏南）。而采用YSU与MYJ方案的模拟结果与观测却相距较远，只得朝鲜半岛沿岸的海雾，北部及南部的海雾都没有模拟出来。

通过对比模拟试验发现，边界层方案较云微物理方案对两次个例的模拟结果影响更大。而边界层方案中，YSU方案与MYNN方案在2006年个例与2012年个

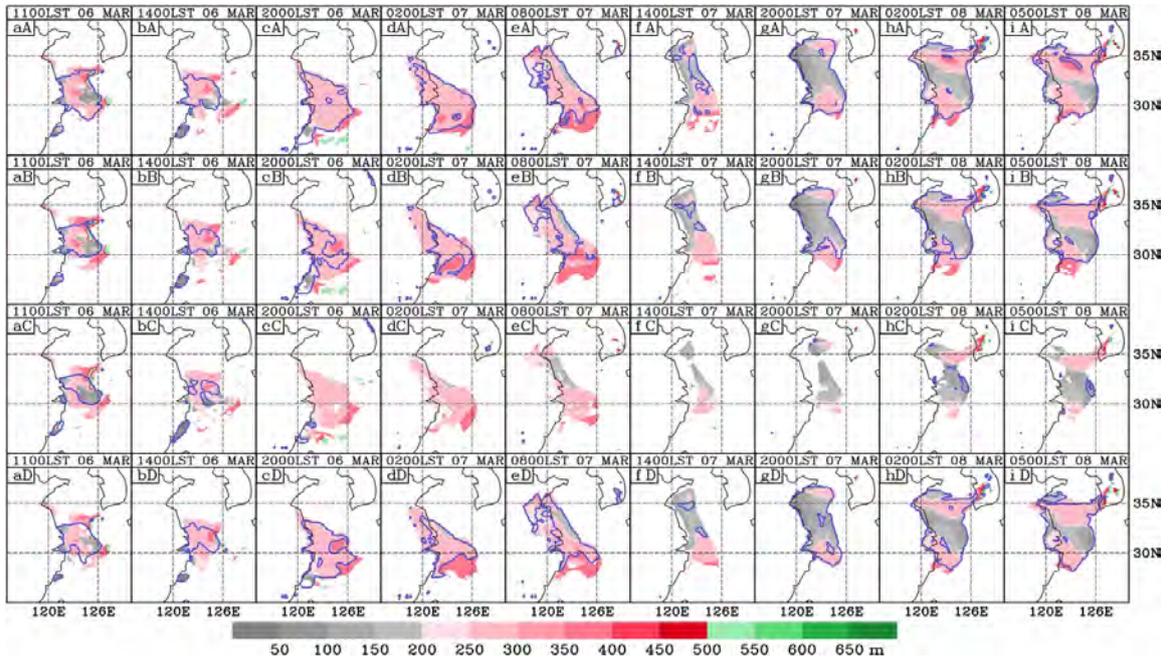


图6 2006年个例第一组模拟试验给出的海雾演变过程
(标示X代表试验Exp-X编号 (X=A,B,C,D), x为模拟时间顺序编号 (x=a, b, c, d, e, f))

Fig. 6 Evolution of the first group of simulated sea fog case 2006
(The markers "X" and "x" have the following meaning: X represents experiment Exp-X (X=A, B, C, D), and x represents simulated time serial number (x=a, b, c, d, e, f))

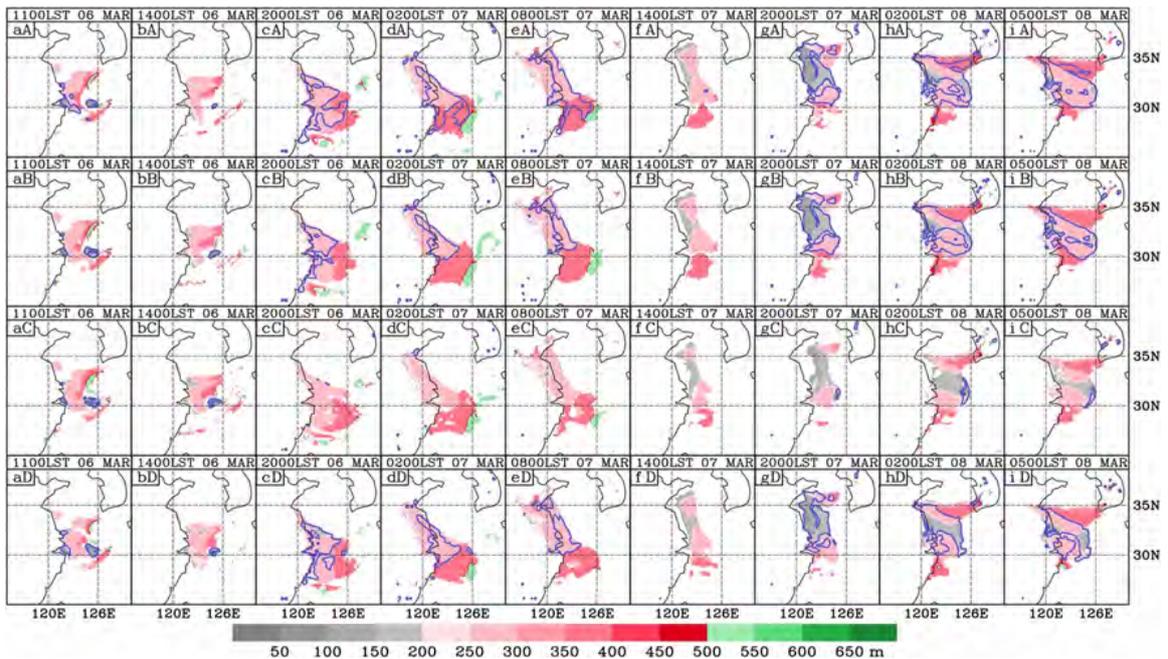


图7 2006年个例第2组模拟试验给出的海雾演变过程
Fig. 7 Evolution of the second group of simulated sea fog case 2006

例中的表现完全不同。对于2006个例来说YSU方案较MYNN方案好，而2012个例则是MYNN方案模拟更为准确，YSU方案的模拟结果却相差甚远。

不同的边界层方案对边界层刻画是不同的，正

是因为如此才导致不同的海雾模拟结果。YSU方案属于一阶K闭合方案，它是从MRF (Medium-Range Forecast) 方案改进而来的，改进的部分考虑了逆梯度输送在计算垂直扩散系数与边界层高度中的作用，考

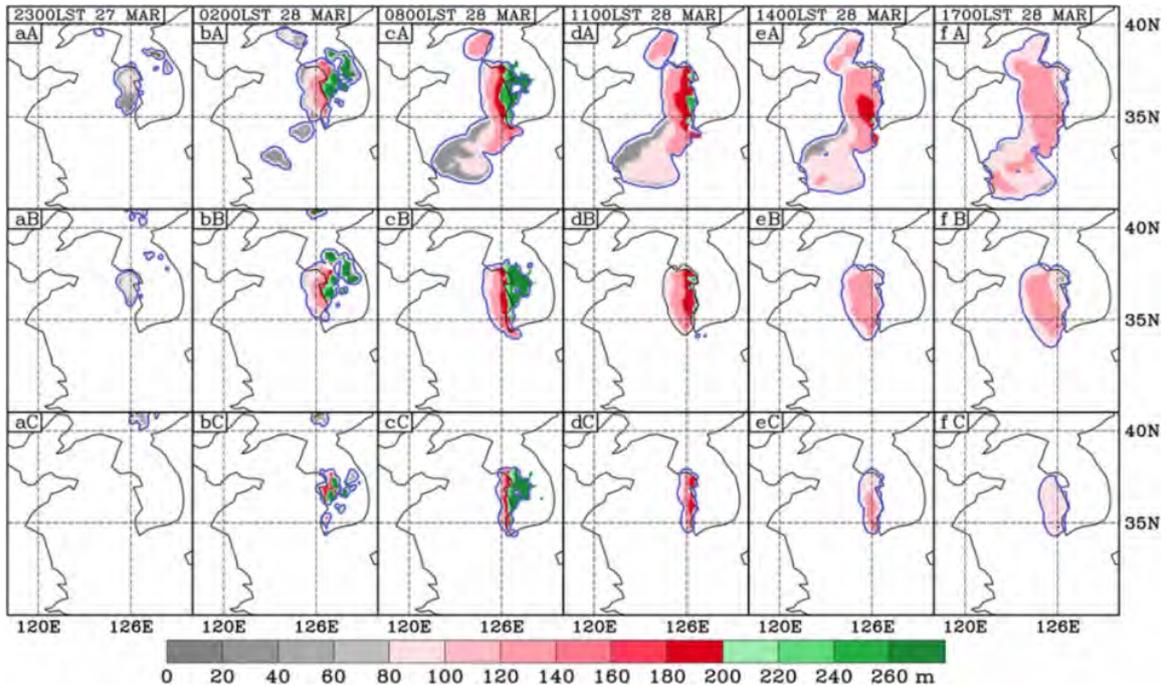


图8 2012年个例模拟试验给出的海雾演变过程
Fig. 8 Evolution of the sea fog case 2012 numerical experiments

考虑了Prandtl数对边界层高度的影响作用，削弱机械强迫引起的边界层混合，增强热量引起的自由对流下边界层混合^[33]。MYNN方案是基于M-Y方案改进而成，是一个预报湍流动能的参数化方案。MYNN方案是针对M-Y方案忽视浮力的作用、长度尺度表达式不明确、混合层高度过高以及湍流能量级过大的不足加以改进的^[34-35]。2006年个例较2012年个例更为浓厚，较为浓厚的海雾其湍流强度比淡薄海雾更强。猜想由于YSU方案刻画的湍流强度小于MYNN方案，对于湍流较强的浓海雾，MYNN方案刻画的湍流过强，使海雾脱离海面而消散，而YSU方案对此类海雾刻画的湍流强度适合其维持与发展。而对于湍流较弱的淡薄海雾，YSU方案刻画的湍流弱而不利于海雾生成，但是由于MYNN方案得到的湍流较YSU强，更适合此类海雾的发生发展，从而模拟得到了较好的结果。以上猜想需要在今后工作中进一步验证。

4 结论

本文选取同为在高压系统影响下形成与发展的两次海雾个例为研究对象，利用WRF模式，针对不同的边界层方案和云微物理方案，设计了4组海雾数值模拟对比试验。得到以下结论：

1) 对于2006年较为浓厚的海雾个例，边界层方案采用YSU、云微物理方案采用Lin得到的模拟雾区与观测事实最为相符；YSU和Thompson方案、MYNN和

Lin方案的组合模拟结果次之。边界层方案采用MYJ时，无论采用何种云微物理方案，模拟结果均较差。

2) 对于2012年较为淡薄的海雾个例，采用不同云微物理方案之间的差异较小，而采用不同的边界层方案得到的模拟雾区差异显著。采用MYNN边界层方案得到的模拟雾区与观测事实最为相符，而YUS和MYJ方案均不能很好的模拟出此次海雾过程。

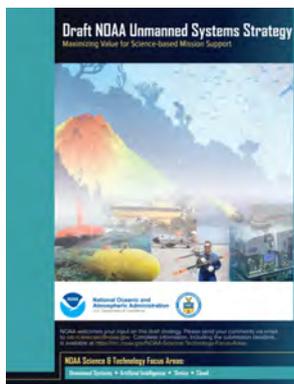
参考文献

- [1] 王彬华. 海雾. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [2] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2008, 38(3): 359-366.
- [3] 杨悦, 高山红. 黄海海雾天气特征与逆温层成因分析. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2015, 45(6): 19-30.
- [4] 周发琇, 王鑫, 鲍献文. 黄海春季海雾形成的气候特征. 海洋学报: 中文版, 2004, 26(3): 28-37.
- [5] 江敦双, 张苏平, 陆惟松. 青岛海雾的气候特征和预测研究. 海洋湖沼通报, 2008(3): 7-12.
- [6] 黄彬, 毛冬艳, 康志明, 等. 黄海海雾天气气候特征及其成因分析. 热带气象学报, 2011, 27(6): 920-929.
- [7] 王鑫, 黄菲, 周琇. 黄海沿海夏季海雾形成的气候特征. 海洋学报: 中文版, 2006, 28(1): 26-34.
- [8] 黄彬, 高山红, 宋煜, 等. 黄海平流海雾的观测分析. 海洋科学进展, 2009, 27(1): 16-23.
- [9] 黄健. 海雾的天气气候特征与边界层观测研究. 青岛: 中国海洋大学海洋环境学院, 2008.
- [10] 张苏平, 任兆鹏. 下垫面热力作用对黄海春季海雾的影响: 观测与数值试验. 气象学报, 2010, 68(4): 439-449.
- [11] Zhang S P, Xie S P, Liu Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: observations and mechanisms. Journal of Climate, 2009, 22(24): 6758-6772.
- [12] 闫之辉, 邓莲堂. WRF模式中的微物理过程及其预报对比试验. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(6): 1-6.

- [13] 胡瑞金. 海雾生成过程中平流、湍流、辐射效应研究. 海洋学报: 中文, 1998, 20(1): 25-32.
- [14] 孟宪贵, 张苏平. 夏季黄海表面冷水对大气边界层及海雾的影响. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(6): 20-27.
- [15] 任兆鹏, 张苏平. 黄海夏季海雾的边界层结构特征及其与春季海雾的对比. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2011, 41(5): 23-30.
- [16] 傅刚, 王菁茜, 张美根, 等. 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: 自然科学版, 2004, 34(5): 720-726.
- [17] Gao S H, Lin H, Shen B, et al. A heavy sea fog event over the Yellow Sea in March 2005: analysis and numerical modeling. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2007, 24(1): 65-81.
- [18] Fu G, Guo J, Xie S P, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea[J]. *Atmospheric Research*, 2006, 81(4): 293-303.
- [19] 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等. 中国海雾研究简要回顾. 气象科技进展, 2016, 6(2): 20-28.
- [20] 史得道, 吴振玲, 高山红, 等. 海雾预报研究综述. 气象科技进展, 2016, 6(2): 49-55.
- [21] 张宁. WRF模式云微物理参数化方案预报效果分析. 气象与环境科学, 2016, 39(3): 50-59.
- [22] 沈新勇, 马铮, 郭春燕, 等. 不同边界层参数化方案对一次梅雨锋暴雨过程湍流交换特征模拟的影响. 热带气象学报, 2017(6): 793-811.
- [23] 沈晓燕, 颜玉倩, 肖宏斌, 等. WRF模式不同参数化方案组合对青海气温、降水及风速模拟的影响. 干旱气象, 2018, 36(3): 423-430.
- [24] 江丽芳, 尹毅, 刘春霞. 边界层参数化方案对台风“莫拉菲”热力和动力结构特征影响的对比. 海洋预报, 2017, 34(4): 20-31.
- [25] 吴珊珊, 邹海波, 单九生. 不同积云和微物理方案对“麦德姆”台风登陆后路径的影响. 暴雨灾害, 2018(1): 41-47.
- [26] 陈阳权, 杜安妮, 窦新英, 等. WRF模式对乌鲁木齐机场一次冻雾天气的数值预报对比试验分析. 沙漠与绿洲气象, 2018(2): 63-70.
- [27] 黄政, 袁成松, 包云轩, 等. 基于不同参数化方案的高速公路大雾过程的数值模拟试验. 气象, 2016, 42(8): 944-953.
- [28] 王佳, 缪启龙, 严明良, 等. 采用不同参数化方案对沪宁高速公路浓雾过程的模拟试验. 气象与减灾研究, 2012, 35(1): 29-35.
- [29] 陆雪, 高山红, 饶莉娟, 等. 春季黄海海雾WRF参数化方案敏感性研究. 应用气象学报, 2014, 25(3): 312-320.
- [30] Steeneveld G J, Ronda R J, Holtslag A A M. The challenge of forecasting the onset and development of radiation fog using mesoscale atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, 2015, 154(2): 265-289.
- [31] 高山红, 齐伊玲, 张守宝, 等. 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: 自然科学版, 2010, 40(10): 1-9.
- [32] Wang Y, Gao S, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-Derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea. *Weather & Forecasting*, 2012, 29(2): 205-225.
- [33] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Monthly Weather Review*, 2006, 134: 2318-2341.
- [34] Nakanishi M. Improvement of the Mellor-Yamada turbulence closure model based on large-eddy simulation data. *Boundary-Layer Meteorol*, 2001, 99: 349-378.
- [35] Nakanishi M, Niino H. An improved Mellor Yamada level-3 model with condensation physics: its design and verification. *Boundary-Layer Meteorol*, 2004, 112: 1-31.

无人系统是NOAA实现优先任务的新机遇

■ 李婧华



无人系统(UxS)的快速发展,为执行NOAA优先任务创造了新的机会。NOAA最新发布的《无人系统(UxS)战略》草案中提出了未来的发展框架,以期形成需求驱动的、具有成本效益、安全、合规的无人系统。战略提出了5大目标:在企业层面协调和支持UxS运营;在NOAA任务中扩展UxS应用;加快UxS研究向业务转化;加强和扩大UxS伙伴关系;提高员工对UxS使用和操作的熟练度。

NOAA表示,战略将提高对UxS的理解、协调、认识和应用,推进NOAA的研究和业务应用科学任务,并希望



在每个任务领域能够取得革命性进展。通过实施该战略,NOAA希望实现其机构首要任务,即恢复在数值天气预报方面的全球领导地位,并可持续地扩大美国蓝色经济。

(作者单位:中国气象局气象干部培训学院)