

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.

# 春季黄海海雾 WRF 参数化方案敏感性研究

陆 雪<sup>1)2)</sup> 高山红<sup>1)2)</sup>\* 饶莉娟<sup>1)2)</sup> 王永明<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室,青岛 266100)

<sup>2)</sup>(山东省高校海洋大气相互作用与气候实验室,青岛 266100)

## 摘 要

利用 2005—2011 年 10 次春季黄海海雾个例开展 WRF 模式参数化方案敏感性研究。结果表明: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,它主要影响海雾浓度和高度。边界层与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;Mellor-Yamada 和 QNSE 方案模拟的近海面湍流过强,导致边界层过高,不利于海雾的发展与维持;而 MYNN 与 YSU 方案刻画的湍流强度与边界层高度合适,有利于海雾发展与维持。MYNN 方案虽与 YSU 方案相当,但在大多数海雾个例中,后者明显优于前者,而在有些个例中却刚好相反。因此对于某一具体海雾个例而言,所用边界层方案仍需它们在它们之中选择最优者。这些信息可为黄海海雾 WRF 模式边界层与微物理方案的选择与改进提供参考。

**关键词:** 黄海海雾; 微物理方案; 边界层方案; WRF 模式敏感性研究

## 引 言

海雾是发生在海上大气边界层内的一种海洋灾害天气,它造成的低大气能见度给海上交通运输、渔业生产、石油作业等带来了巨大威胁。我国近海海域是海雾多发区,而黄海是我国近海海雾发生最频繁的海域<sup>[1-4]</sup>。已有研究表明<sup>[1,4-5]</sup>,中尺度数值模拟已成为黄海海雾机制研究与客观预报的一种重要手段。

海雾是一种发生于海上大气边界层内的水汽凝结现象,黄海海雾以平流冷却雾为主<sup>[2]</sup>。研究表明:平流冷却雾可以看作海上暖湿气团与海面进行热量交换,而逐渐冷却成雾的一种非绝热成云的微物理过程,其中湍流冷却是首要动力机制<sup>[2-3]</sup>。因此,如何选择或改进描述湍流过程的边界层方案与刻画水汽相变过程的微物理方案,是黄海海雾数值研究的一个重要问题<sup>[5-6]</sup>。高山红等<sup>[5]</sup>指出,对于黄海海雾数值预报而言,初始场质量很重要。运用先进的数据手段同化各种观测数据,可以大幅提高初始场质

量,从而显著改善海雾预报效果<sup>[5-9]</sup>。而对于边界层方案与微物理方案,由于其复杂性与改进的困难性,在黄海海雾的数值研究中,研究者一般选择模式中最常用的边界层方案与微物理方案,很少特别关注并详细探讨它们是否适合于黄海海雾。目前,黄海海雾的数值模拟主要采用 WRF(Weather Research and Forecasting)模式,该模式具有同化方法先进、更新迅速、技术支持有力等诸多优点。因此,本文重点讨论黄海海雾 WRF 模式边界层与微物理方案的敏感性,尝试找到最适合黄海海雾数值试验的方案组合,为目前基于 WRF 模式的海雾模拟与海雾预报提供参考。

## 1 数据与方法

### 1.1 数 据

NCEP 提供的 FNL(Final Analysis Data of Global Forecast System)数据(水平分辨率为  $1^\circ \times 1^\circ$ ,时间分辨率为 6 h/次)为 WRF 模式数值试验提供初始时刻背景场与时变侧边界,NOAA 日平均数据(水平

2013-07-09 收到, 2014-03-03 收到再改稿。

资助项目: 国家自然科学基金项目(41276009), 气象公益性行业(气象)科研专项(GYHY201106006)

\* 通信作者, email: gaosh@ouc.edu.cn

分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ ) 提供海洋条件。用于同化和检验的数据包括常规探空(12 h/次)与地面、船舶与岛屿观测数据(3 h/次)以及 QSCAT(Quik SCAT)洋面风产品、AIRS(Atmospheric Infra-Red Sounder)大气温度廓线产品与 SSMI(Special Sensor Microwave)大气可降水量产品。

获取海雾观测事实的海雾雾区反演方法采用日本高知大学提供的 MTSAT(Multi-functional Transport Satellite)静止卫星可见光与多通道红外数据、NEAR-GOOS(North-East Asian Regional Global Ocean Observing System)日平均海温数据(水平分辨率为  $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ )。

试验结果天气形势场的检验采用韩国天气图、NCEP 提供的 CFSR(Climat Forecast System Re-analysis)再分析数据(水平分辨率为  $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ , 6 h/次)。所有资料时段与 10 次黄海海雾过程相对应。

## 1.2 方法

### 1.2.1 数据同化方法

基于 WRF 模式及其三维同化模块,高山红等<sup>[5]</sup>设计并发展了一个简易的循环三维变分数据同化工具。与单时次三维同化相比,利用该同化工具能大幅提高黄海海雾数值模拟初始场质量,从而明显改善海雾预报结果<sup>[5-6,8]</sup>。

### 1.2.2 海雾卫星观测与模拟雾区

基于 MTSAT 数据(1 h/次),利用双通道法<sup>[9]</sup>,采纳 Gao 等<sup>[10]</sup>提出的判据,反演夜间黄海海雾的雾区与雾顶高度;白天海雾信息反演采用 Wang 等<sup>[11]</sup>提出的方法。

目前黄海海雾数值模拟中<sup>[3,10]</sup>,通常直接利用模拟的云水混合比,采用水平大气能见度计算公式<sup>[12]</sup>计算海面大气水平能见度(简称能见度),将能见度不大于 1 km 的区域认为是海雾水平范围(简称雾区)。为了便于同海雾卫星观测事实相比较,本文采用了高山红等<sup>[5]</sup>提出的方法,即模仿卫星的鸟瞰方式,在模拟结果中自上而下寻找雾顶(判据是云水含量大于  $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),雾顶高度不高于 400 m 或海面能见度不大于 1 km 的区域诊断为预报雾区。

### 1.2.3 模拟雾区检验

对 WRF 模式模拟结果的检验主要针对雾区,模拟雾区结果优劣的评估采用了命中率(POD)、成功率(SR)、偏差率(Bias)与临界成功指数(CSI)4 种

评分指标<sup>[13-14]</sup>。

## 2 海雾敏感性试验

### 2.1 海雾个例与模式设置

黄海海雾常出现在 3—8 月。为了便于 WRF 模式海雾预报结果检验,同时也为了使研究结果具有说服力,预报试验选取了 2005—2011 年 10 次春季黄海海雾过程作为研究对象(表 1,时间为北京时间,下同)。

表 1 所选取的黄海 10 次海雾过程  
Table 1 10 sea fog cases of the Yellow Sea for the numerical forecasting

海雾过程	预报起始时间	预报持续时间/h
个例 1	2005-03-09T02:00	36
个例 2	2006-03-06T08:00	48
个例 3	2007-02-05T20:00	48
个例 4	2007-05-27T14:00	48
个例 5	2008-04-28T02:00	60
个例 6	2008-05-25T20:00	42
个例 7	2009-04-09T20:00	72
个例 8	2009-05-02T20:00	66
个例 9	2010-02-22T08:00	60
个例 10	2011-03-12T14:00	30

利用 WRF 模式(V3.2.1)进行海雾模拟试验,所有试验采用双重双向嵌套模拟区域(D1 和 D2)(图 1),D1 区域中心为  $33.5^\circ \text{N}$ ,  $125.5^\circ \text{E}$ ,D1 和 D2 区域分辨率分别为 30 km 和 10 km,格点数分别为  $108 \times 108$ ,  $127 \times 151$ ,垂直方向共 44 层。模式采用 Kain-Fritsch 积云方案<sup>[15]</sup>、RRTM 长短波辐射方

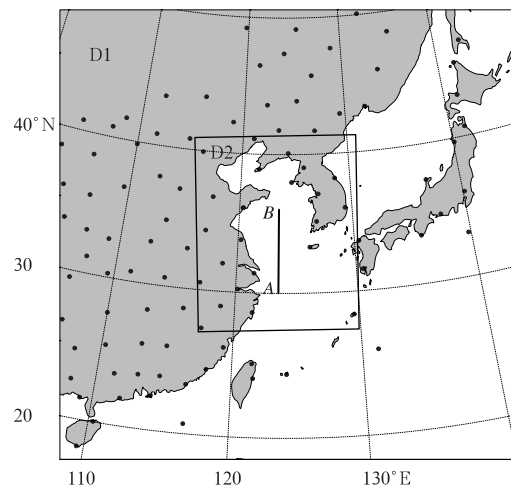


图 1 WRF 模式试验区域设置  
Fig. 1 Domains of WRF model numerical experiments

案<sup>[16]</sup>及NOAH陆面模式<sup>[17]</sup>。采用循环三维变分同化尽可能多的常规与非常规观测数据,为数值试验提供高质量初始场。

初始背景场与时变侧边界来自FNL数据,NOAA日平均海温提供海面强迫。为进一步改善三维变分同化效果,本文未采用WRF模式自身提供的背景误差协方差(CV3)<sup>[18]</sup>,而是针对每个海雾个例,使用FNL数据驱动WRF模式,进行以模拟时间为中心的约15d的每日2次的24h数值后报,采用NMC方法<sup>[19]</sup>统计后报结果,生成它们各自独立的背景误差协方差(CV5)<sup>[5,20]</sup>。

## 2.2 试验方案

WRF模式提供多种边界层方案与微物理方案。经过大量数值试验进行了初步筛选,最终确定5种边界层方案与4种微物理方案参与敏感性试验。边界层方案有Yonsei University(简称为YSU)方案<sup>[21]</sup>、Mellor-Yamada(简称为MY)方案<sup>[22]</sup>、QNSE方案<sup>[23]</sup>、MYNN方案(包含MYNN-2.5,MYNN-3,分别简称为MY2.5,MY3)<sup>[24]</sup>;微物理方案有Kessler方案<sup>[25]</sup>、Lin方案<sup>[17]</sup>、Thompson(简称为TP)方案<sup>[26]</sup>以及WSM-5方案<sup>[27]</sup>。

设计4组敏感性试验,每组包含5个试验,即每组选定1种微物理方案,分别搭配5种不同的边界层方案。即1次海雾过程要进行20次试验,10次海雾过程共进行200次试验。

## 3 数值试验的结果检验

### 3.1 海雾天气形势预报检验

海雾的发生与演变很大程度上取决于天气过程<sup>[2]</sup>,为了客观定量地给出对比结果,从每次海雾过程的20次试验中任选1次,针对图1中的D1区域,将试验结果与插值到模式格点上的CFSR数据进行全场相关性与均方根误差检验。

925 hPa和850 hPa位势高度与温度的12 h及24 h模拟场相关系数均达到0.05显著性水平(图略)。12 h和24 h模拟结果中850 hPa位势高度、温度的均方根误差分别为3~14 gpm和1~2 K;925 hPa温度均方根误差为1~3 K,位势高度均方根误差平均为30 gpm。WRF模式模拟结果与CF-SR数据相比,前者高、低压强度较后者偏强是导致位势高度均方根误差变化较大的原因,对比结果表明,WRF模式能够再现影响海雾发生与演变的天

气形势场。

### 3.2 海雾雾区预报检验

获取每次海雾过程模拟结果中3 h/次的雾区预报结果。针对图1中D2区域对雾区进行网格化,格距为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$ ,计算每个时次的4种评分指标结果表明,对于任一边界层方案而言,不同微物理方案结果之间的差异很小;而对于任一微物理方案,不同边界层方案结果存在较大差异,即WRF模式模拟结果相对于微物理方案而言,对于边界层方案更敏感。

统计结果显示,YSU,MY2.5,MY3方案的平均命中率结果相差很小,为0.53~0.55;而MY和QNSE方案的平均命中率明显偏低,分别为0.34和0.37;YSU和MYNN方案相对MY方案的改进率可达60%。各边界层方案的平均成功率为0.47~0.52,YSU方案表现最好。平均偏差结果说明,MY与QNSE方案的预报雾区比观测雾区偏小30%左右,MYNN方案偏大13%,YSU方案偏差接近于0。平均临界成功指数显示(表2),MY与QNSE方案最差,YSU与MY2.5,MY3方案相当,相对于MY方案的改进率为32%,YSU方案略优且较MY方案提高了40%。

表2 临界成功指数统计结果

边界层方案	微物理方案			
	Kessler	Lin	WSM5	TP
MY	0.286	0.256	0.230	0.229
QNSE	0.300	0.271	0.242	0.251
YSU	0.363	0.350	0.340	0.342
MY2.5	0.334	0.333	0.317	0.322
MY3	0.328	0.335	0.330	0.329

对比结果较优的YSU和MY2.5方案对10次海雾过程模拟结果可知,临界成功指数较接近,但偏差指数存在很大差异。总体而言,YSU优势更明显,但二者中的最优选择却明显存在海雾个例差异(图略)。

根据Roebber<sup>[13]</sup>提出的方法,可将4种评分直观形象地集中展示在一起(图略)。依据该方法可清楚再现各方案搭配的优劣,综合考虑4种评分,边界层方案与微物理方案的最佳组合为YSU与Lin方案,最差组合为MY与WSM5方案。

### 3.3 温度与水汽垂直分布12 h模拟误差

WRF模式循环三维同化阶段,不同边界层方案对大气边界层演变描述不同,构造出具有不同大

气层边界结构的初始场,导致不同的模拟结果。因此,在不同探空观测站点,分别统计了 1 km 以下采

用相同边界层方案的所有数值试验的 12 h 预报平均误差,包括偏差与均方根误差(图 2)。

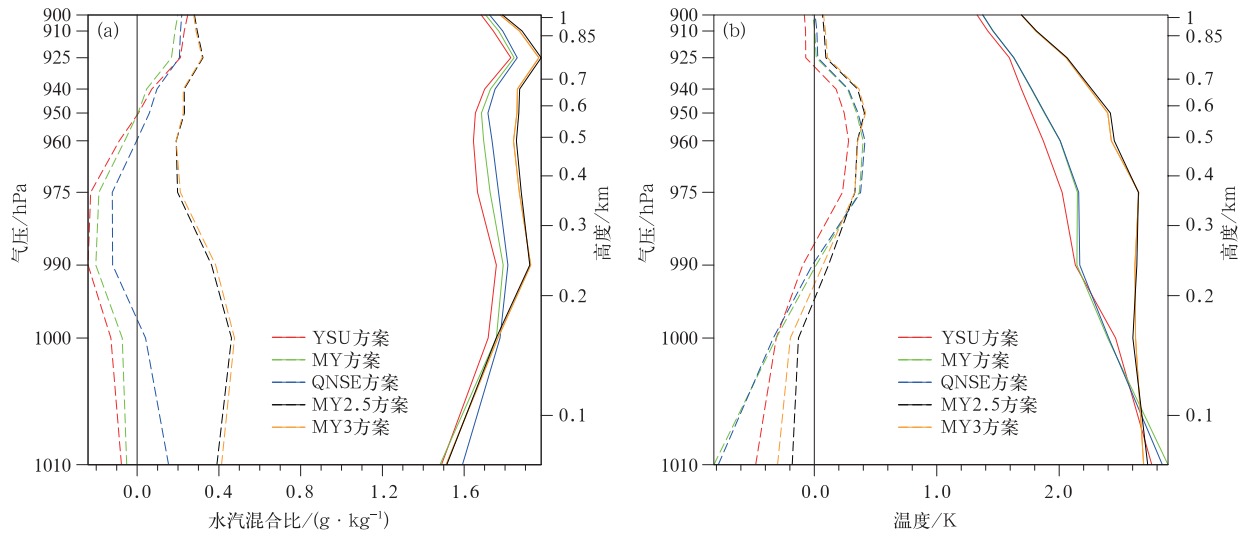


图 2 图 1 中 D2 区域所有站点水汽混合比(a)与温度(b)12 h 预报均方根误差(实线)与偏差(虚线)垂直廓线  
Fig. 2 12-hour root mean square error(solid) and bias(dashed) vertical profile of water vapor mixing ratio(a) and temperature(b) in D2 of Fig. 1

就均方根误差而言,在边界层底层,YSU 与 MYNN (MY2.5 与 MY3)方案无论水汽还是温度均模拟较好,均方根误差小;但随高度增加,YSU 方案明显优于 MYNN 方案,前者水汽混合比与温度模拟结果相对后者分别偏小  $0.25 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  与  $0.5 \text{ K}$  左右,MY 与 QNSE 方案模拟结果略大于 YSU 方案。从偏差来看,YSU 方案模拟的水汽比实际偏低约  $0.1 \sim 0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而 MYNN 方案则偏高约  $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,MY 与 QNSE 方案模拟结果略优于 YSU 方案;200 m 以下,MYNN 方案模拟温度偏差最小,约  $0.2 \sim 0.3 \text{ K}$ ,而 MY 与 QNSE 方案模拟结果偏差最大,可达到  $0.8 \text{ K}$ ;200 m 以上,YSU 方案模拟较好。

综合来看,YSU 方案最优,MYNN 方案次之,MY 与 QNSE 方案最差,与雾区预报检验结果一致,而 YSU 方案在边界层底层的温度模拟需要改进,MYNN 方案在整个边界层的水汽及中上部的温度模拟需要改进,而 MY 与 QNSE 方案尤其需要改进边界层底层的温度模拟。

## 4 参数化方案敏感性分析

### 4.1 微物理方案

对雾区预报的检验结果表明,固定一种边界层方案而选用不同的微物理方案所得到的模拟雾区几

乎一致。为了更清晰地了解模拟雾区内的海雾浓度垂直结构的差异,选取 YSU 边界层方案,在图 1 中沿 AB 的垂直剖面内,进行云水混合比差异(图略)分析。

分析表明,Lin 方案给出的云水混合比分布位于逆温层下,最大值约为  $0.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。从其他方案相对 Lin 方案的差异来看,它们的云水混合比空间分布一致。Kessler 方案与 Lin 方案的差异在近海面为正值,而 WSM5 与 TP 方案给出云水混合比均较 Lin 方案偏小。不同方案模拟结果之间存在差异,但由于海面雾区诊断的标准为云水混合比不小于  $0.016 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,因此这些云水混合比差异基本不会导致海面雾区的差异。此外,考察海雾区域内全部为云水,没有雪、冰粒子等水物质。

除 Kessler 方案,其他微物理方案参数均包含云滴数(cloud droplet number, CDN)。前面所有试验中的微物理方案,均采用了 WRF 模式的缺省设置,即云滴数给定且不对其进行预报,如 Lin 方案中为  $100 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ 。这里将海雾作为接海的云,那么雾中云滴数就是雾滴数,是表征海雾微物理特性的一个重要参数。为数不多的环黄海海雾观测表明,雾滴数存在明显的时空差异。文献[28-30]分别对青岛近海、浙江舟山海域与上海近海的海雾进行了观测,观测结果详见表 3。

表 3 环黄海海雾微物理特征观测<sup>[28-30]</sup>Table 3 Observed microphysical characteristics of sea fog around the Yellow Sea  
(from reference 28-30)

观测海域	雾滴数/( $10^6 \text{m}^{-3}$ )			云水混合比/( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
青岛近海	42.9	0.6	12.5	0.15	0.01	0.04
青岛近海	248.0	5.4	82.4	0.15	0.001	0.07
浙江舟山海域	122.0	7.6	37.1	2.08		0.29
上海近海	518.4	23.6	173.0	1.19	0.01	0.20

为进一步探究 WRF 模式海雾模拟结果对雾滴数的依赖性,以 Lin 方案为例,进行了两组雾滴数敏感性试验。在第 1 组试验中,只将雾滴数由原来的  $100 \times 10^6 \text{m}^{-3}$  分别改为  $10 \times 10^6 \text{m}^{-3}$ ,  $20 \times 10^6 \text{m}^{-3}$ ,  $50 \times 10^6 \text{m}^{-3}$ ,  $200 \times 10^6 \text{m}^{-3}$  和  $400 \times 10^6 \text{m}^{-3}$ , 同时预报过程中雾滴数为定值。第 2 组试验是在第 1 组试验的基础上,对雾滴数进行预报,雾滴数随时空变化。以图 1 中沿线 AB 垂直剖面内的云水混合比分布考察试验结果。

第 1 组试验的结果表明,尽管给定不同雾滴数数值,但不同试验预报的云水混合比之间几乎没有差异。由第 2 组试验结果可知,初始雾滴数越大,云水混合比越高。将试验结果与观测进行对比可以看出,当观测雾滴数较小时,其对应的云水混合比会有较大变化,试验预报结果与之存在较大的差异,总体偏高;当观测雾滴数大于  $100 \times 10^6 \text{m}^{-3}$  时,雾滴数与云水混合比的对应与试验预报结果接近。因此,试验中如何设定雾滴数初值可得到与观测接近的模拟结果,还需要利用海雾微物理特征观测数据,进行敏感性试验加以确定。此外,除了雾滴数,雾滴半径也是很重要的参数,本文中均采用 WRF 模式的默认设置。

#### 4.2 边界层方案

发生在海上大气边界层内的湍流过程对海雾的生成与演变至关重要,而湍流的刻画则取决于边界层方案。利用不同边界层方案的数值模拟结果,考察海雾、边界层高度与湍流强度三者联系。

某一格点处海面云水混合比不小于  $0.016 \text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  则海雾出现,模拟时段内其出现次数之和与总模拟时次的百分比定义为此格点的海雾频次。MY2.5 与 MY3 方案的模拟结果非常接近,因此图 3 中不同边界层方案对比仅给出后者。由图 3 可知,不同边界层方案模拟的黄海海域平均边界层高度区别很大。QNSE 方案较高,超过 250 m;MY 方案次之,在黄海北部可达 200 m 以上;YSU 和 MY3

方案较低,在 150 m 以下,与黄海海雾的通常厚度相当。此外,海雾频次分布与边界层高度分布成反比,即高边界层对应低海雾频次,低边界层对应高海雾频次,如 YSU 和 MY3 方案的海雾频次可高达 40% 以上,MY3 方案模拟结果局部甚至可达 50% 以上。而 MY 和 QNSE 方案最高仅为 30%。这说明过高的边界层不利于海雾的发生与维持,过高的边界层一般由过强的湍流混合造成,不利于水汽在近海面的聚集,且逆温层结往往会遭到破坏<sup>[4]</sup>。

为了揭示 MY, QNSE 方案所模拟的边界层过高的原因,以海雾过程个例 3 为例,采用 Lin 方案,讨论边界层高度与湍流强弱之间的联系。湍流强弱以湍流动能表示,由于 YSU 方案采用一阶 K 闭合,无湍流动能预报变量,以梯度理查孙数 ( $R_i$ ) 代替。图 4、图 5 分别给出了沿图 1 中 AB, 采用 YSU, QNSE 边界层方案的 24 h 与 36 h 湍流动能、边界层高度与云水混合比模拟结果的垂直剖面,反映了边界层、海雾、湍流三者之间的对应关系。

图 4 为 YSU 方案结果,可以看到湍流区 ( $R_i < 0.25$ ) 主要在近海面,这是海上水平风的垂直切变造成的;而云水混合比大值集中在雾顶,这归咎于雾顶的长波辐射。边界层高度与海雾雾区的时空变化保持一致,如图 4a 中海雾垂直范围、边界层高度与  $R_i$  分布都呈较为一致的阶梯状,边界层高度随湍流的发展而增高(图 4b)。MYNN 方案的结果与 YSU 方案类似(图略)。

QNSE 方案模拟结果如图 5 所示。与 YSU 方案结果一样,海雾垂直结构与边界层高度的分布也保持一致(图 5a),雾区内的湍流强度小于  $0.12 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ; 当边界层高度达到 600 m 时,海雾消散,边界层内的湍流强度超过  $0.14 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ ,近海面达到了  $0.2 \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$ (图 5b)。MY 方案模拟结果与 QNSE 方案类似,也表现为较强的湍流(图略)。已有黄海平流海雾形成机制的研究结果指出<sup>[2-4]</sup>,海上水平风垂直切变造成湍流混合,近冷海面大气内热量向下

输送与湿度向上扩散,导致海雾发生与发展,这一过程是海雾形成的主要动力学机制。因此,合适的湍流强度是海雾生成与维持的必要条件。在暖湿气团流经冷海面形成逆温的稳定层结条件下,合适强度的湍流一方面使热量向下输送,暖气团降温成雾,另一方面湍流造成边界层缓慢增厚,海雾向上发展,厚度增加。然而,当湍流过强时,边界层高度迅速增加。这会导致逆温层结遭到破坏,热量不再向下输送;由于垂直混合,水汽弥漫于厚度快速增高的边界层内,湿度降低导致海雾消散。由此可见,QNSE 方案和 MY 方案之所以模拟结果明显较差,是其边界

层方案中对湍流刻画过强所造成的。

不同边界层方案所给出的边界层高度与湍流强度存在很大差异,而这些差异是导致预报结果优劣的主要原因。湍流强度适当时,所对应边界层高度一般较低,约为 200 m,有利于近海面水汽聚集,海雾会发展,YSU 与 MYNN 方案所给出的湍流情形即为此类;而当湍流过强时,对应的边界层高度一般达到 450 m 以上,不利于水汽在近海面聚集,同时较强的湍流造成的上下混合也会破坏海雾赖以生存的逆温层,不利于海雾生成或造成海雾消散,QNSE 与 MY 方案的表现即为如此。

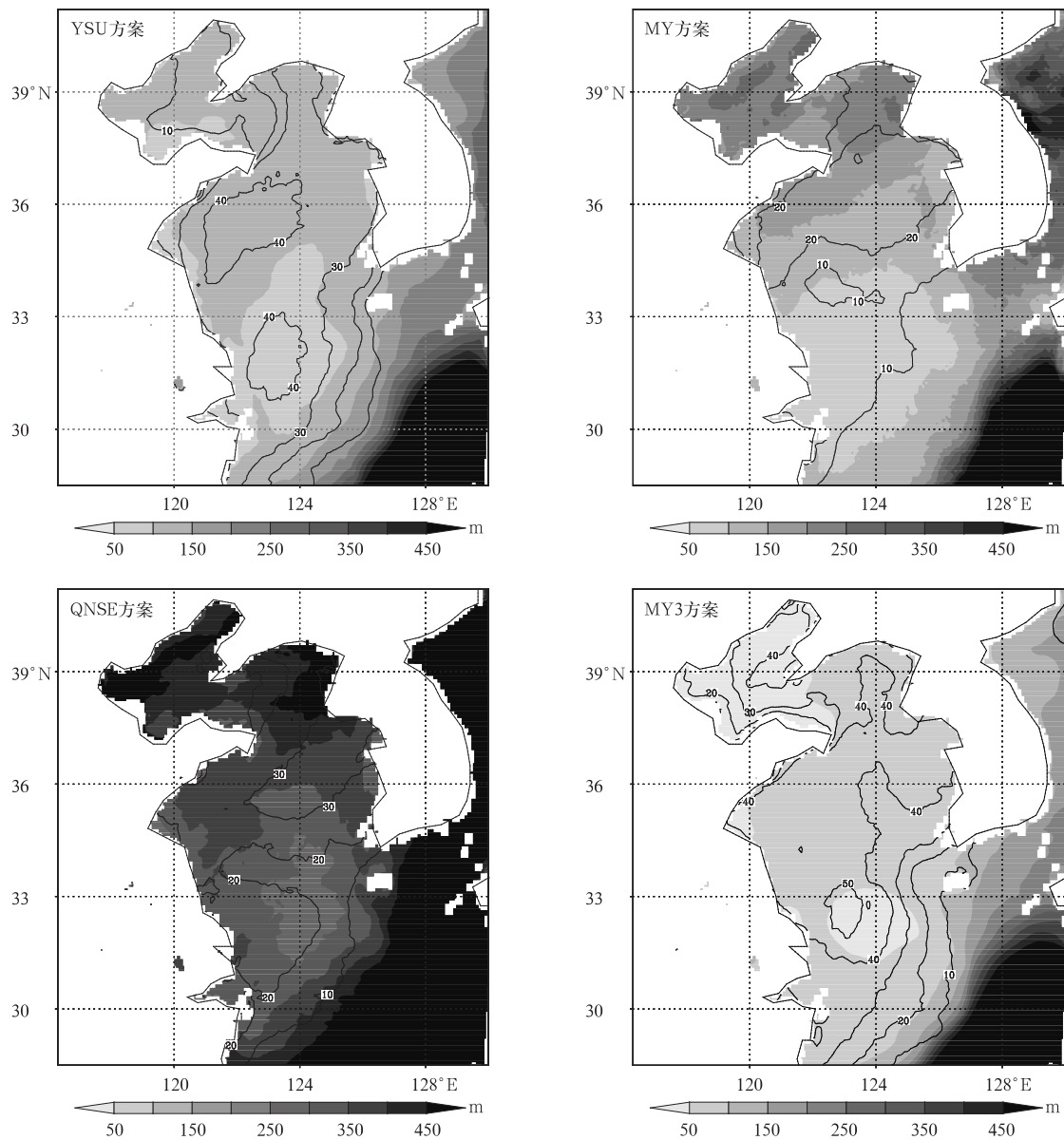


图 3 不同边界层方案试验的平均边界层高度(阴影)与海雾频次(等值线,单位:%)水平分布  
 Fig. 3 Horizontal distribution of planetary boundary layer heights(shaded) and fog frequencies(contour,unit:%) forecasted by the experiments with different planetary boundary layer schemes



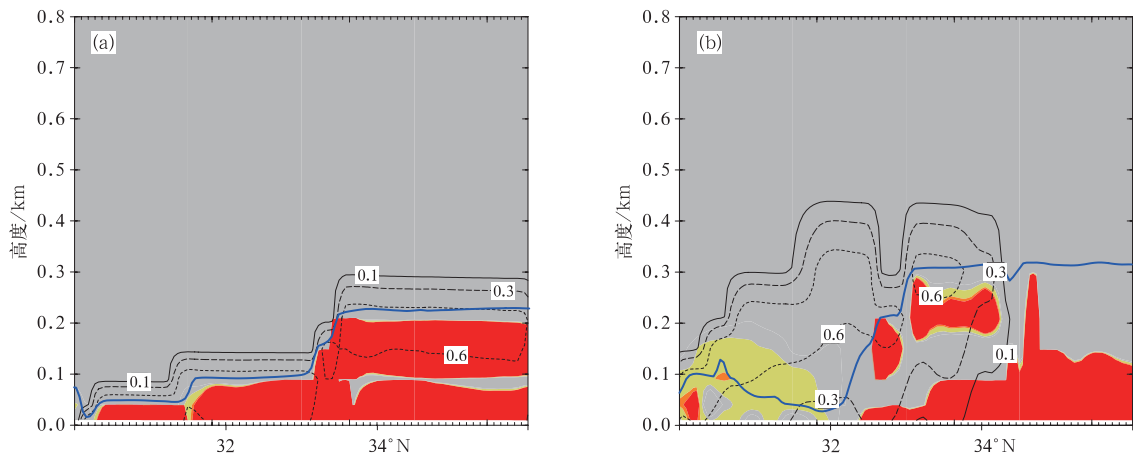


图 4 海雾过程个例 3 的 YSU 方案模拟结果沿图 1 中 AB 的云水混合比(a)与  $R_i$ (b)垂直剖面  
(填充色表示  $R_i$ , 红色表示  $0 < R_i \leq 0.25$ , 黄色表示  $0.25 < R_i \leq 1$ , 灰色表示  $R_i > 1$ ;  
等值线表示云水混合比, 单位:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; 蓝色粗实线表示边界层高度, 单位: km)

Fig. 4 Vertical sections of cloud mixing ratio(a) and  $R_i$ (b) along line AB in Fig. 1  
for the result from experiment with YSU scheme of example 3

(the shaded denotes  $R_i$ , red:  $0 < R_i \leq 0.25$ , yellow:  $0.25 < R_i \leq 1$ , gray:  $R_i > 1$ ; contour denotes cloud mixing ratios, unit:  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ; blue solid line denotes planetary boundary layer height, unit: km)

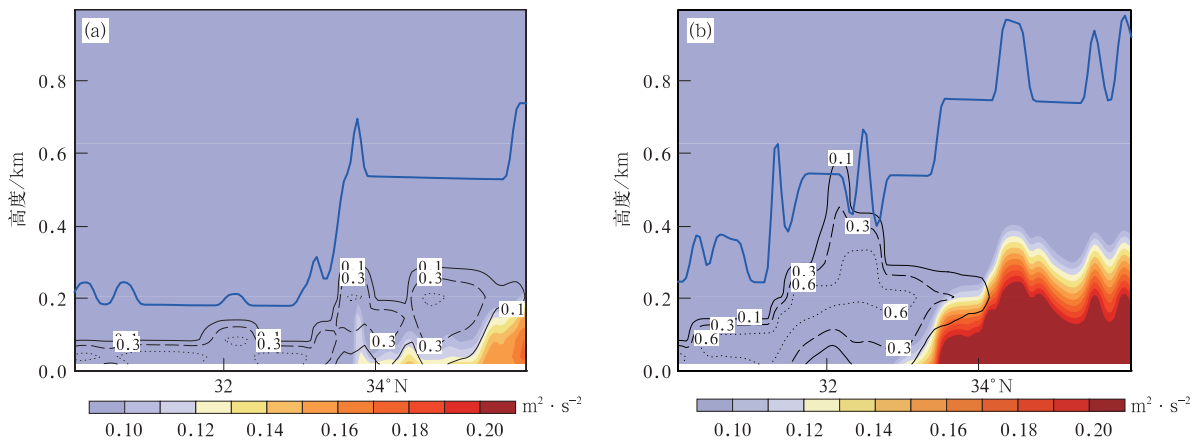


图 5 同图 4, 但为 QNSE 方案(填充色为 TKE 分布)

Fig. 5 The same as in Fig. 4, but it is for QNSE scheme(the shaded represents TKE distribution)

## 5 结论与讨论

本文基于 WRF 模式及其三维变化同化模块, 以 10 次典型的大范围春季黄海海雾为研究对象, 重点关注预报雾区, 开展了春季黄海海雾 WRF 模式边界层与微物理方案的敏感性研究, 得到如下主要结论:

1) WRF 模式黄海海雾模拟结果对边界层方案敏感, 对微物理方案敏感性相对较弱。统计结果表明, 最佳边界层与微物理方案组合为 YSU 与 Lin 方

案, 最差为 Mellor-Yamada 与 WSM5 方案。

2) 对于黄海海雾模拟结果而言, YSU 与 MYNN 方案为最佳边界层方案, 但不同个例模拟二者各具优势, 因此对于某一具体海雾个例而言, 所用边界层方案仍需在这两者之中选择最优。

3) Mellor-Yamada 与 QNSE 边界层方案模拟的近海面湍流过强导致边界层过高, 不利于海雾的发展与维持; 而 MYNN 与 YSU 方案刻画的湍流强度与边界层高度适合海雾发展与维持。

本研究结论对于夏季海雾以及黄海沿岸局地海雾是否适用, 需进一步研究。此外, 如果进一步详细

区分能见度 1 km 之内的海雾,微物理方案中的雾滴数与雾滴半径等等参数可能非常重要。所以,借鉴已有陆地雾观测<sup>[31-33]</sup>与东海、南海海雾观测预报<sup>[34-39]</sup>的经验,加强黄海海雾的微物理特征的观测分析,改进微物理方案是将来必须重视且亟待解决的一个重要的科学问题。

### 参考文献

- [1] 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.
- [2] 王彬华. 海雾. 北京: 海洋出版社, 1983: 170-176.
- [3] 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. *Adv Atmos Sci*, 2007, 24(1): 65-81.
- [4] Fu G, Zhang S P, Gao S H, et al. Understanding of Sea Fog over the China Seas. Beijing: China Meteorological Press, 2012: 45-70.
- [5] 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.
- [6] 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等. 利用循环 3DVAR 改进黄海海雾数值模拟初始场. II: RAMS 数值试验. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2010, 40(11): 1-10.
- [7] 刘宇迪, 任景鹏, 周鑫. 散射计风场的三维变分对海雾数值模拟的影响. 应用气象学报, 2011, 22(4): 472-481.
- [8] 李冉, 高山红, 王永明. 直接同化卫星辐射数据的黄海海雾数值试验研究. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2012, 42(3): 10-20.
- [9] Hunt G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infrared thermal window wavelengths. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1973, 99(420): 346-369.
- [10] Gao S H, Wu W, Zhu L L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huanghai Sea using MTSAT-1R IR data. *Acta Meteor Sinica*, 2009, 28(2): 23-35.
- [11] Wang Y M, Gao S H, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in now-forecasting sea fog over the Yellow Sea. *Wea Forecasting*, 2014, 29(2): 205-225.
- [12] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. *J Appl Meteor*, 1999, 38(4): 385-404.
- [13] Roebber P J. Visualizing multiple measures of forecast quality. *Wea Forecasting*, 2009, 24(2): 601-608.
- [14] Zhou B B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. *Wea Forecasting*, 2010, 25(1): 303-322.
- [15] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *J Atmos Sci*, 1990, 47(23): 2784-2802.
- [16] Mlawer E J, Taubman S J, Brown P D, et al. Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. *J Geophys Res*, 1997, 102(D14): 16663-16682.
- [17] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model. *J Climate Appl Meteor*, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [18] 王曼, 李华宏, 段旭, 等. WRF 模式三维变分中背景误差协方差估计. 应用气象学报, 2011, 22(4): 482-492.
- [19] Parrish D F, Derber J C. The National Meteorological Center's spectral statistical-interpolation analysis system. *Mon Wea Rev*, 1992, 120(8): 1747-1763.
- [20] 刘桂艳, 高山红, 王永明, 等. 台风外围下沉区大气波导成因的数值模拟. 应用气象学报, 2012, 23(1): 77-88.
- [21] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes. *Mon Wea Rev*, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [22] Janjic Z I. The Step-Mountain Eta coordinate model: Further developments of the convection, viscous sublayer, and turbulence closure schemes. *Mon Wea Rev*, 1994, 122(5): 927-945.
- [23] Sukoriansky S, Galperin B, Perov V. Application of a new spectral theory of stably stratified turbulence to the atmospheric boundary layer over sea ice. *Bound-Layer Meteor*, 2005, 117(2): 231-257.
- [24] Nakanishi M, Niino H. An improved Mellor-Yamada level-3 model: Its numerical stability and application to a regional prediction of advection fog. *Bound-Layer Meteor*, 2006, 119(2): 397-407.
- [25] Kessler E. On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulations. *Meteor Monogr*, 1969, 32(10): 82-84.
- [26] Thompson G, Field P R, Rasmussen R M, et al. Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part II: Implementation of a new snow parameterization. *Mon Wea Rev*, 2008, 136(12): 5095-5115.
- [27] Hong S Y, Dudhia J, Chen S H. A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation. *Mon Wea Rev*, 2004, 132(1): 103-120.
- [28] 杨连素. 青岛近海海雾微物理结构的初步观测. 海洋科学, 1985, 9(4): 49-50.
- [29] 徐静琦, 张正, 魏皓. 青岛海雾雾滴谱与含水量观测与分析. 海洋湖沼通报, 1994, 1993(2): 174-178.
- [30] 李子华, 仲良喜, 俞香仁. 西南地区 and 长江下游雾的时空分布和物理结构. 地理学报, 1992, 47(3): 242-251.
- [31] 张利民, 石春娥, 杨军, 等. 雾的数值模拟研究. 北京: 气象出版社, 2002: 1-11.
- [32] Niu Shengjie, Lu Chunsong, Yu Huaying, et al. Fog research in China: An overview. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(3): 639-662.
- [33] 李子华, 刘瑞阳, 杨军. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件. 大气科学, 2011, 35(1): 41-54.
- [34] 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, 2008.
- [35] 黄辉军, 黄健, 刘春霞. 茂名地区海雾的微物理结构特征. 海洋



- 学报, 2009, 31(2): 17-23.
- [36] Yue Y Y, Niu S J, Zhao L J, et al. Chemical composition of sea fog water along the South China Sea. *Pure Appl Geophys*, 2012, 169(2012): 2231-2249.
- [37] 黄健, 黄辉军, 黄敏辉, 等. 广东沿岸海雾决策树预报模型. 应用气象学报, 2011, 22(1): 107-114.
- [38] 张春桂, 蔡义勇, 张家春. MODIS 遥感数据在我国台湾海峡海雾监测中的应用. 应用气象学报, 2009, 20(1): 8-16.
- [39] 秦慰尊, 张家康. 宁波近海雾预报的研究. 应用气象学报, 1991, 2(3): 325-330.

## Sensitivity Study of WRF Parameterization Schemes for the Spring Sea Fog in the Yellow Sea

Lu Xue<sup>1)2)</sup> Gao Shanhong<sup>1)2)</sup> Rao Lijuan<sup>1)2)</sup> Wang Yongming<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (Key Laboratory of Physical Oceanography, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100)

<sup>2)</sup> (Key Laboratory of Ocean-Atmosphere Interaction and Climate in Universities of Shandong, Ocean University of China, Qingdao 266100)

### Abstract

Sea fog is a water vapor condensation phenomenon, which happens in marine atmospheric boundary layer (MABL). Low atmospheric visibility caused by sea fog brings huge threat to maritime transportation, fishery and oil-drilling operations. Therefore, it is becoming increasingly important and being paid more and more attention. In recent years, meso-scale atmospheric numerical modeling has become a dominant way for the mechanism study and numerical modeling of sea fog.

Previous studies on sea fog indicate that sea fog modeling is very sensitive to initial conditions, especially realistic representation of temperature and humidity profile in MABL. Besides initial conditions, turbulence process and cloud generating process are the other important aspects for sea fog modeling. In a meso-scale atmospheric numerical model, the turbulence process is described by planetary boundary layer (PBL) scheme, and the cloud generating process is determined by microphysics (MP) scheme. Due to the uncertainties of the modeling result and the complexities of turbulence and cloud microphysics processes, many options of PBL and MP schemes are available for choice focusing on different modeling purposes.

Based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model and cycling three-dimensional variational method, sensitivity study of WRF PBL and MP schemes for the Yellow Sea fog is conducted, focusing on 10 typical widely-spread sea fog cases. The result indicates that simulated sea fog area mostly depends on PBL scheme but little on MP scheme; density and depth of simulated sea fog are affected by MP scheme with cloud droplet number being predicted and how it is prescribed. The best combination of PBL and MP schemes is YSU and Lin, while the worst is Mellor-Yamada and WSM5. The Mellor-Yamada and QNSE scheme brings about much stronger turbulence simulation, resulting in much higher boundary layer, and therefore it's not favorable to the development and maintenance of sea fog, while turbulence intensity and boundary layer height produced by MYNN and YSU schemes benefit sea fog developing. MYNN scheme can match YSU scheme in general, however, the latter performs better in most cases while the former is better in certain ones. In depth investigation is needed to tell whether MYNN or YSU PBL scheme is better for a given sea fog case. These information can provide hints to choose and improve PBL and MP schemes of WRF for the Yellow Sea fog numerical prediction system in the near future.

**Key words:** the Yellow Sea fog; microphysics scheme; PBL scheme; WRF sensitivity study