

渤海海雾数值预报系统建立及应用

史得道¹, 吴振玲², 高山红³, 杨悦³

(1. 天津海洋中心气象台, 天津 300074; 2. 天津市气象台, 天津 300074; 3. 中国海洋大学, 山东 青岛 266100)

摘要: 利用 WRF 中尺度数值模式, 基于循环三维变分数据同化方案, 选择合适的参数化方案, 建立了渤海海雾数值预报系统并进行业务应用, 为渤海海雾预报提供具有参考价值的海雾客观预报产品。经过对 2016—2017 年 20 次渤海海雾过程统计检验, 发现海雾数值预报系统对海雾过程预报准确率达到 60%, 预报效果较好。

关键词: 海雾; 数值预报; WRF; 循环 3DVAR 同化

中图分类号: P732.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2021)05-0060-07

1 引言

海雾是受海洋影响发生在海上或沿海地区低层大气中大量水滴或冰晶使大气水平能见度小于 1 km 的天气现象^[1]。海雾是中国近海多发的灾害性天气之一, 会对海上船舶通航造成很大影响^[2-3], 每年因海雾造成的船舶碰撞、触礁和搁浅等事故时有发生。据舟山海事局统计, 海上发生的船舶碰撞和触礁等海难事故有 70% 左右由海雾引起^[4], 例如 1989 年 6 月 6 日某部“575 船”在福建东山海域雾中航行时与浙海“103 船”碰撞, 致使“103 船”沉没, 9 名船员失踪, 1 名溺亡^[5]。海雾的生成、持续和消散受水文条件和气象条件共同影响, 成因复杂, 预报难度较大。目前气象部门预报业务中大雾的预报方法主要有天气学方法和统计预报方法^[6]。天气学方法对预报员的主观经验依赖性高, 但准确率较低^[7]; 统计预报方法缺乏对海雾过程物理规律的描述, 多依赖于历史统计资料的质量和数量^[8]。随着计算机技术的进步以及对海雾发生和发展规律的深入认识, 数值模式逐渐成为海雾模拟和预报的重要方法^[7]。

现阶段海雾数值模式多用于科研^[9-11], 真正实现业务应用的还很少^[12]。渤海是海雾多发海域, 也是海上航运和石油开采最繁忙的海域之一, 海雾预报

的准确率关系到社会经济活动的开展和航运安全^[13], 因此迫切需要改进渤海海雾的预报技术方法和手段。本文利用气象研究与预报 (Weather Research and Forecasting, WRF) 模式的中尺度数值预报模式, 基于循环三维变分 (Three Dimensional VARIation, 3DVAR) 数据同化方案, 选择合适的参数化方案, 建立渤海海雾数值预报系统, 为环渤海区域海雾预报提供重要支撑。

2 海雾数值预报系统

2.1 预报区域设置

天津市气象台基于 WRF 3.7.1 版本模式的海雾数值预报系统于 2015 年 12 月搭建完成。该系统开展 35°N 以北的黄渤海海域海雾数值预报, 每天 08 时 (北京时, 下同) 和 20 时各预报 1 次, 每次预报模式运行时间约 3 h。模式采用预报区域双重嵌套, 小区为 35°N 以北的黄渤海海域, 大区为数值预报背景场区域, 经纬度范围大致为 25°~50°N、100°~140°E, 为小区提供初始场和开边界条件。两个区域都采用兰伯特投影 (Lambert Conformal) 方式, 区域中心点为 39.9°N、121.0°E。大区格点数 120×108, 水平分

收稿日期: 2020-04-27; 修回日期: 2020-07-11。

基金项目: 天津市科技计划项目 (18ZXQSF00130); 中国气象局预报员专项 (CMAYBY2018-006)。

作者简介: 史得道 (1985-), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事海洋气象预报技术研究。E-mail: sdd0928@163.com

分辨率 30 km, 小区格点数 100×94 , 水平分辨率 10 km, 两区垂直分层都为 44 层。

2.2 参数化方案

在 WRF 模式参数化方案选择上, 一方面结合前人研究结果选用公认预报效果最好的参数化方案, 比如积云方案选用 Kain-Fritsch 方案, 长短波辐射方案选用 RRTMG 方案等; 另一方面选取典型海雾个例进行数值模拟试验, 设计不同边界层方案和微物理方案组合, 检验不同组合方案具体预报效果, 并参考陆雪等^[14]研究成果, 确定边界层方案与微物理方案的最佳组合为 YSU 和 Lin 方案(见表 1)。

表 1 WRF 模式参数化方案设置

参数化方案	选定
边界层方案	YSU ^[15]
微物理方案	Lin ^[16]
积云方案	Kain-Fritsch ^[17]
长、短波辐射方案	RRTMG ^[18]
陆面过程	NOAH ^[19]
水平分辨率	大区水 30 km, 小区 10 km
垂直分辨率	44 层 ^[20]

2.3 背景场和同化数据

海雾预报系统用的初始场数据与侧边界条件由美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)的全球预报系统(Global Forecast System, GFS)数据($0.25^\circ \times 0.25^\circ$, 3 h/次)提供, 海温数据来源于 NCEP 日平均海温数据集($0.083^\circ \times 0.083^\circ$)。系统同化的常规和非常规观测数据包括: 3 h/次的地面观测资料和船舶气象

资料^[20]、12 h/次的探空观测资料^[20]、一天 2 次的 ASCAT(Advanced SCATterometer)散射计海面风资料^[20]。地面、船舶和探空数据来自于世界气象组织全球通信系统(Global Telecommunication System, GTS)的观测数据, 可在全球范围内共享。ASCAT 数据来源于欧洲航天局 MetOP-A 卫星上搭载的新一代微波散射计^[21], 是数值模式中重要的初始场同化资料^[22-23], 空间分辨率 12.5 km, 在我国近海有较好的可信度^[21, 24-26]。这些资料通过互联网方式下载到本地服务器, 插值到 WRF 数值模式水平网格点上进行同化。

2.4 循环 3DVAR 数据同化方案

WRF 数值预报模式的同化方案多采用单时次 3DVAR 同化方式, 同化窗较短, 只能利用到很少的非常规观测数据^[27]。为了同化更多的非常规观测数据, 我们选择高山红等^[27-28]设计的循环 3DVAR 同化方案(见图 1)来增加同化时段, 以便同化更多观测资料从而提高预报效果。本系统设计同化 5 次, 3 h 1 次, 每次同化该时刻前后各 1.5 h 内观测资料。运行流程如下:

(1) 首先下载模式运行所需背景场数据和同化观测数据。

(2) 运行 WRF 模式前置模块(WRF Preprocessing System, WPS)程序, 对系统所用 GFS 背景场数据和海温数据进行预处理, 插值到 WRF 模式水平格点场中, 并从地形与植被数据库中获取陆面模式所需的信息。

(3) 运行 WRF 模式主模块的 real.exe 程序, 将 WPS 模块运行结果插值到模式垂直 44 层上, 得到单纯由 GFS 格点背景场数据形成的初始条件与时变边界条件。

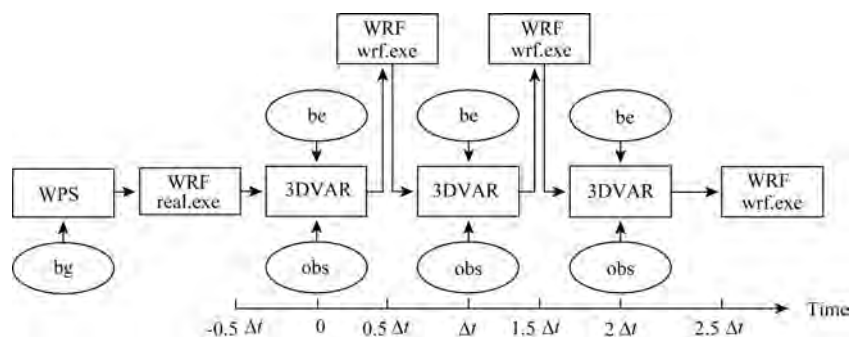


图 1 循环 3DVAR 同化方案^[27]

(4)运用3DVAR数据同化手段,消化各种观测数据,将观测数据插值到real.exe形成的数据场中。对real.exe程序形成的初始条件进行优化,得到质量较高的初始场。

(5)运行WRF模式主模块的wrf.exe程序,驱动WRF模式积分到下一个同化时刻进行下一次3DVAR同化。同化结果为WRF模式提供初始场,如此重复循环。

(6)最后一次3DVAR同化完毕后,再次运行wrf.exe程序向前积分,得到各种预报数据。

相较以前的海雾数值模拟和预报,本系统采用的循环3DVAR数据同化方案有其独特的优势,主要体现在以下几个方面:

(1)不同于以往的单次三维变分同化^[29]模块,循环3DVAR同化方案可以通过增加同化次数来延长同化数据时段从而同化更多的观测资料。本项目设计5次循环同化能同化15 h内的观测资料,从而更好地优化模式初始场。

(2)循环3DVAR同化方案扩展的同化时段恰好可供模式进行动力调整,从而有效地消除模式“spin-up”现象^[27]。

(3)同化的观测资料更多更广,包括3 h/次的地

面气象资料和船舶资料、12 h/次的探空资料以及ASCAT卫星反演风场资料,对提高初始场质量有很大帮助。

(4)WRF模式边界层方案采用YSU方案,微物理方案采用Lin方案,该组合在雾区模拟以及边界层温湿信息垂直分布方面与实况更加接近^[14]。

2.5 产品研发

海雾数值预报系统主要开发了高空产品、地面产品、站点产品、剖面产品和云雾产品5大类数值预报产品,可以通过天津市气象局内网查看。每类产品中包含多种相关产品(见图2),高空物理量有:位势高度场、风场、温度场、流场与混合比、垂直速度和涡度;地面物理量有:海平面气压、地面10 m风场、2 m温度、相对湿度、水平能见度和降水;站点产品有塘沽、渤海A平台、渤中28平台、绥中36平台、长岛和成山头的探空图以及温度、露点温度、气压、相对湿度和降水的时间序列;云雾产品包括雾区总览、雾顶高度、云幕高度和云顶温度等。剖面产品包括经向和纬向剖面产品;产品形式主要分4种:平面图、站点序列图、剖面图和邮票图,方便预报员查看。

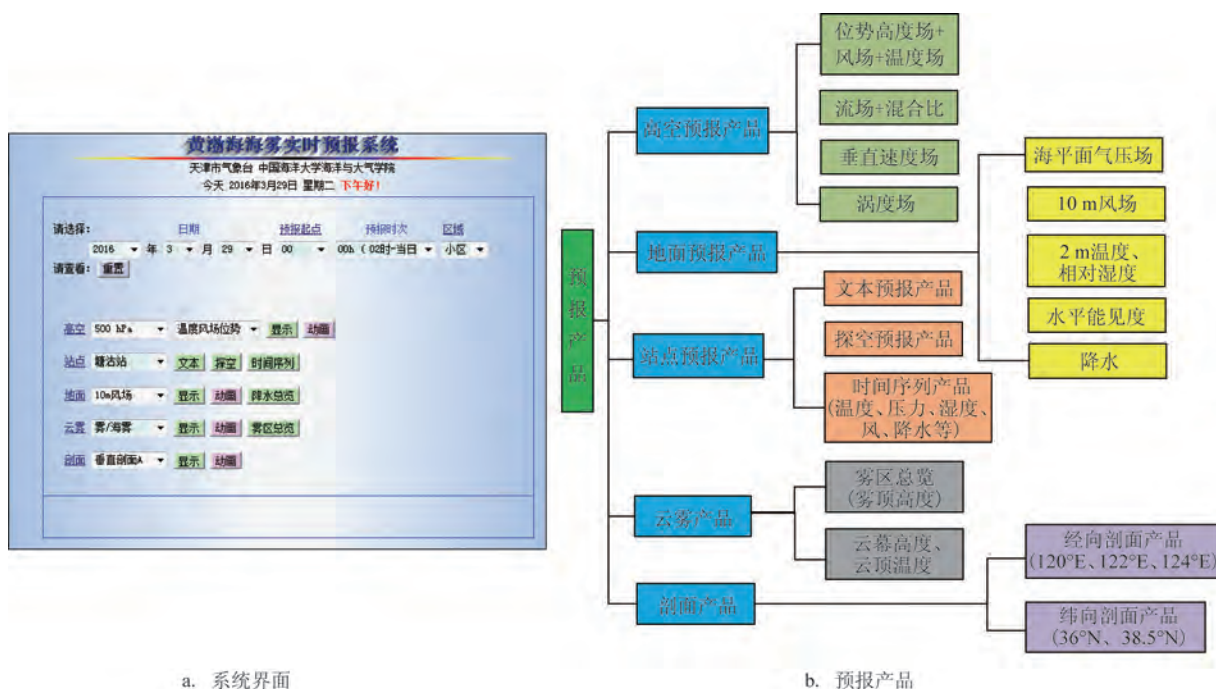


图2 渤海海雾数值预报系统

3 海雾预报预警业务系统

3.1 系统功能

渤海海雾预报预警业务系统是基于渤海海雾

数值预报系统建立的,可供预报员进行海雾实况监测和预报预警产品制作。系统功能框架主要包括海雾实时监测、数值预报产品显示、主观预报订正与显示、预报检验评估和历史个例库等几个模块(见图3),同时也建立了包含海雾历史个例、海雾实时监测数据和海雾数值预报数据的综合数据库。

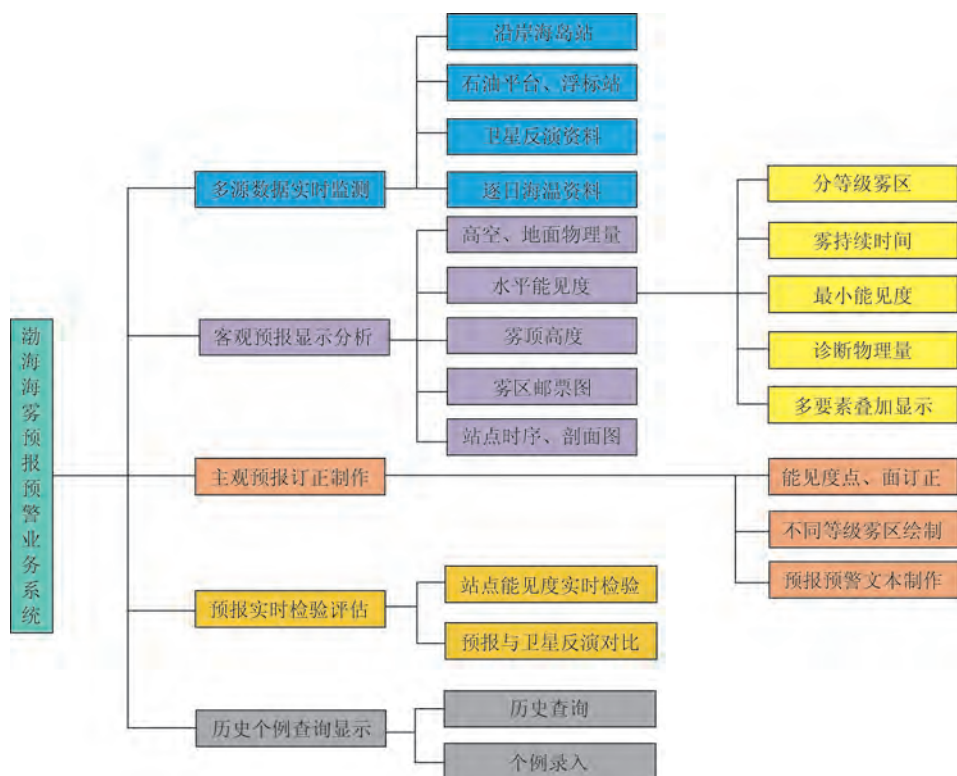


图3 渤海海雾预报预警业务系统

本系统采用B/S结构和C/S结构相结合的方式。综合显示部分采用B/S结构,以查询浏览为目的的和以产品制作为核心的用户,可以通过Web方式在任何客户端上访问,实现方便快速的产品浏览和制作。数据综合采集部分采用C/S结构,开发的窗体应用程序可以从ftp站点、共享文件夹和网络资源上,实现轮询方式的资料数据检查、自动下载、分析和归并,将各种来源的数据统一为同种格式入库保存,作为综合显示部分的数据源。

3.2 数据采集处理

海雾预报与观测数据的来源多种多样,数据格式繁多。本系统采用多数据源模式,将多种数据格

式、空间分辨率格式和时间分辨率格式的数据重新规格化为统一的时空分辨率数据格式后进行显示。数据采集处理综合平台涉及并处理5大类数据:

(1)实况资料数据,包括地面填图资料、自动站资料、卫星资料和海温再分析数据等,以Oracle数据库形式存储。

(2)数值预报格点数据,包含高空、地面和站点预报资料,还包括合成产品数据(风、湿度、能见度、雾顶高度、雾区和降水等要素在不同时间段合成后的格点预报数据),以NC(NetCDF)文件格式存储。

(3)能见度订正数据,对能见度客观预报产品进行人工订正后录入订正数据库,在绘制海雾落区

时进行调用,以NC文件存储。

(4)主观预报产品数据,包括人工绘制不同等级(轻雾、雾、浓雾和强浓雾)的海雾落区图和海雾预报预警文本文件等,以图形和文本形式存储。

(5)历史个例数据,提供近10 a渤海海雾个例库,可设置按时间、海区、雾等级、影响系统和持续时间等进行查询,并能实时添加新个例。

4 海雾数值预报系统应用

4.1 海雾过程统计检验

为评估海雾数值预报系统的预报能力,我们统计了2016—2017年的海雾过程,以此对海雾数值预报结果进行检验。2016年1—4月渤海有4次海雾过程,其中有两次被数值预报模式成功预报,1次过程漏报是由于海雾只发生在局部海域,另外1次由于系统故障没有预报。2016年10月—2017年4月有19次海雾过程,海雾范围有的覆盖整个渤海,有的在渤海某个区域。将实测结果与海雾数值预报系统的预报结果进行对比分析,我们发现7次过程漏报,10次过程准确预报,但从海雾出现范围和起止时间上看,部分个例存在预报范围偏大且持续时间偏长的情况;另有两次过程因服务器调整没有预报资料。综合两次检验结果,在23次海雾过程中,12次预报有雾,8次漏报,3次过程没有预报资料。有预报资料的20次过程中预报有雾的准确率达到60%。

4.2 海雾个例检验分析

(1)2016年3月3—5日海雾过程

2016年3月3—5日,黄渤海出现一次比较明显的海雾过程^[30]。3月3日凌晨02时左右,海雾出现在黄海北部海域,慢慢向南向西扩展,3日白天海雾主要分布在黄海和渤海海峡,夜间海雾慢慢扩展到渤海中西部。4日白天和夜间黄渤海海雾处于维持阶段,主要位于渤海湾、渤海中部、辽东湾、渤海海峡北部以及黄海北部和中部海域。随着冷空气来临,5日08时前后海上西北风逐渐加大,渤海、渤海海峡和黄海海雾从西向东逐渐消散。

此次海雾发生时黄渤海位于高压南部低压南部,盛行南到东南风,渤海观测站点最小能见度为

0。渤海西部平台能见度从3日20时的15 km迅速下降到4日08时的200 m,5日08时能见度增大到1.2 km,5日14时雾完全消散,能见度回升到15 km。成山头位于山东半岛东部沿海,海雾出现时间比渤海西部平台早,3月2日20时能见度为6 km,3日05时能见度下降到0,为强浓雾。此后强浓雾一直持续到5日早上,5日08时能见度略有好转,增大到2.1 km,14时又下降到700 m,20时增大到4.6 km,之后雾消散,能见度逐渐好转。

从2016年3月3—5日海雾数值预报产品来看,此次海雾过程预报比较成功。2月28日20时提前3 d预报出3月3日02时左右黄海海域有雾,与实际雾生成时间非常接近。3月2日20时预报结果显示,3日白天海雾主要出现在黄海北部和中部海域,夜间海雾从辽东湾逐渐向南扩展到渤海中西部和南部,黄海海雾也向西扩展至渤海海峡,两片雾区连在一起,4日白天到前半夜黄渤海海雾维持,预报结果与实际情况比较接近。5日凌晨开始,受冷空气影响海雾从西向东逐渐消散,比实际雾消散时间略有提前。3日20时预报结果显示5日05时左右渤海西部雾消散,08时渤海中部雾消散,11时渤海海峡雾消散,14时黄海海雾也逐渐消散,与实际情况更加接近。可见预报时效越临近,预报效果越好。另外,此次海雾预报范围覆盖到渤海、渤海海峡、黄海北部和中部,与实际卫星反演海雾范围也比较一致。

(2)2017年4月5—7日海雾过程

2017年4月5—7日,渤海出现了一次明显海雾过程。4月5日下午渤海中部海域首先出现能见度小于1 km的雾,后向南扩展到莱州湾,向西向北扩展到渤海湾和辽东湾,至6日08时前后整个渤海海域基本被海雾覆盖。6日上午海雾维持,午后能见度逐渐好转,部分海域仍有轻雾天气。7日上午渤海中南部海域又出现小于1 km的雾,7日夜间辽东湾海域也出现海雾。

海雾数值预报系统从4月2日08时提前72 h开始预报此次过程,5日05时前后渤海西部出现海雾,然后范围慢慢扩大,到5日14时扩展到整个渤海海域,直到5日夜间海雾一直维持。4月4日08时预报5日02时渤海西部开始出现海雾,范围逐渐扩大,到5日17时扩展到整个渤海海域,然后一直持续到4

月7日。实际上4月6日下午到夜间属于海雾空报,但总体来说此次过程也成功被预报。

5 结论与展望

本文利用WRF 3.7.1中尺度数值模式,基于循环3DVAR数据同化方案,选择合适的参数化方案,建立了渤海海雾数值预报系统并进行业务应用,系统输出产品包括高空和地面物理量产品、站点时间序列产品、海雾雾区和雾顶高度产品及雾区剖面图产品等。客观预报这些产品对环渤海区域海雾预报预警具有参考意义。

经过对2016—2017年20次渤海海雾过程的统计检验,发现海雾数值预报系统对海雾过程预报准确率达到60%。挑选2016年1次海雾过程进行详细分析,海雾数值预报系统能提前3 d对海雾进行准确预报。预报时效越临近,预报效果越好,预报海雾范围、起止时间和持续时间等与实际情况比较接近。

但是在实际预报业务中,也发现海雾数值预报系统在客观预报上存在一些问题,比如对局地发生的和持续时间短的海雾预报能力较差,对大范围海雾预报有时存在持续时间偏长和预报范围偏大的问题。后期需要针对这些问题进行改进,一方面提高同化观测数据的数量和质量,改进模式初始场;另一方面开展海雾外场观测试验,加强海雾发生发展机理研究,为数值模式参数化方案的改进提供参考。

参考文献:

- [1] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [2] 梁寒, 聂安祺, 吴曼丽, 等. 渤海海峡至黄海北部低压顶部型海雾特征分析[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(12): 158-163, 182.
- [3] 汪靖, 郭玲, 吴振玲, 等. 渤海湾一次罕见持续性海雾过程的成因分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(4): 112-118, 147.
- [4] 傅刚, 李鹏远, 张苏平, 等. 中国海雾研究简要回顾[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 20-28.
- [5] 李磊, 张永宁. 影响我国沿海的海雾及一起碰撞事故的分析[J]. 航海技术, 2001(1): 17-18.
- [6] 崔寒, 庄毅斌, 曹茜, 等. 人工神经网络与逐步回归法对大雾预报对比[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(S2): 404-407.
- [7] 史得道, 吴振玲, 高山红, 等. 海雾预报研究综述[J]. 气象科技进展, 2016, 6(2): 49-55.
- [8] 冯蕾, 田华. 国内外雾预报技术研究进展[J]. 南京信息工程大学学报: 自然科学版, 2014, 6(1): 74-81.
- [9] 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[J]. 气象学报, 2010, 68(4): 439-449.
- [10] 傅刚, 徐杰, 张树钦. 数值模拟和卫星反演大气能见度对比分析[J]. 中国海洋大学学报, 2011, 41(4): 1-10.
- [11] 高山红, 王永明, 傅刚. 一次黄海海雾的集合预报试验[J]. 中国海洋大学学报, 2014, 44(12): 1-11.
- [12] 黄彬, 陈涛, 陈炯, 等. 黄渤海海雾数值预报系统及检验方法研究[J]. 气象科技, 2009, 37(3): 271-275.
- [13] 郑怡, 李冉, 史得道, 等. 渤海中西部近海与沿岸海雾的特征分析[J]. 海洋预报, 2016, 33(6): 74-80.
- [14] 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[J]. 应用气象学报, 2014, 25(3): 312-320.
- [15] Hong S Y, Noh Y, Dudhia J. A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes[J]. Monthly Weather Review, 2006, 134(9): 2318-2341.
- [16] Lin Y L, Farley R D, Orville H D. Bulk parameterization of the snow field in a cloud model[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 1983, 22(6): 1065-1092.
- [17] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1990, 47(23): 2784-2802.
- [18] Iacono M J, Delamere J S, Mlawer E J, et al. Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: calculations with the AER radiative transfer models[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2008, 113(D13): D13103.
- [19] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: model implementation and sensitivity[J]. Monthly Weather Review, 2001, 129(4): 569-585.
- [20] 杨悦, 高山红. 黄海海雾WRF数值模拟中垂直分辨率的敏感性研究[J]. 气象学报, 2016, 74(6): 974-988.
- [21] 张增海, 曹越男, 刘涛, 等. ASCAT散射计风场在我国近海的初步检验与应用[J]. 气象, 2014, 40(4): 473-481.
- [22] Hersbach H. Assimilation of scatterometer data as equivalent-neutral wind[M]. ECMWF, 2010.
- [23] Bi L, Jung J A, Morgan M C, et al. Assessment of assimilating ASCAT surface wind retrievals in the NCEP Global Data Assimilation System[J]. Monthly Weather Review, 2011, 139(11): 3405-3421.
- [24] 谢小萍, 魏建苏, 黄亮. ASCAT近岸风场产品与近岸浮标观测风场对比[J]. 应用气象学报, 2014, 25(4): 445-453.
- [25] 杨晓君, 张增海. ASCAT洋面风资料在中国北方海域的真实性检验[J]. 海洋预报, 2014, 31(5): 8-12.
- [26] 高留喜, 朱蓉, 常蕊. QuikSCAT和ASCAT卫星反演风场在中国南海北部的适用性研究[J]. 气象, 2014, 40(10): 1240-1247.
- [27] 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[J]. 中国海洋大学学报, 2010,

- 40(10): 1-9.
- [28] 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等. 利用循环3DVAR改进黄前海雾数值模拟初始场II: RAMS数值试验[J]. 中国海洋大学学报, 2010, 40(11): 1-10.
- [29] 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[J]. 应用气象学报, 2011, 22(4): 472-481.
- [30] 史得道, 黄彬, 吴振玲. 2016年春季一次黄渤海明显海雾过程的大气海洋特征分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(5): 85-92.

Establishment and application of a sea fog numerical forecasting system for the Bohai Sea

SHI De-dao¹, WU Zhen-ling², GAO Shan-hong³, YANG Yue³

(1. Tianjin Central Observatory for Oceanic Meteorology, Tianjin 300074 China; 2. Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074 China;
3. Ocean University of China, Qingdao 266100 China)

Abstract: A sea fog numerical forecasting system is established for the Bohai Sea based on the WRF model and cycling 3DVAR assimilation scheme, which provides objective forecasting products for the sea fog in the Bohai Sea. Statistical validation is conducted for the twenty sea fog events from 2016 to 2017 and the results show that 60% of the sea fog events are successfully predicted by the numerical forecasting system.

Key words: sea fog; numerical forecasting; WRF; cycling 3DVAR assimilation