

海雾预报研究综述

史得道¹ 吴振玲¹ 高山红² 罗凯¹

(1 天津市气象台, 天津 300074; 2 中国海洋大学, 青岛 266100)

摘要: 从统计预报和数值模拟预报两方面回顾了过去几十年国内在海雾预报技术上的主要研究进展。统计预报方法是中国沿海气象台站预报海雾的除天气学方法外的主要工具, 一定程度上能提高海雾预报准确率, 但无法摆脱自身经验统计的缺陷。随着计算机技术的飞速发展, 海雾数值模拟和预报应用越来越广泛, 并将成为海雾预报主流方法。海雾数值预报模式的发展经历了从一维到三维、从单一大气模式到海气耦合模式的过程。而研发先进的数据同化技术, 同化更好的卫星资料弥补海上观测缺少的不足, 选择最合适的边界层与微物理参数化方案, 进行高分辨率三维数值模式集合预报, 将使海雾预报准确率明显提高。

关键词: 海雾, 统计预报, 数值预报, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.005

A Summary of Research on Sea Fog Forecasting

Shi Dedao¹, Wu Zhenling¹, Gao Shanhong², Luo Kai¹

(1 Tianjin Meteorological Observatory, Tianjin 300074 2 Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: A review of the research progress over the past few decades is presented here on the sea fog forecasting technique based upon statistical and numerical prediction. The statistical method is a major tool except the synoptic method on the sea fog forecast at coastal meteorological observatories in China. It improves the forecasts of sea fog but have defects of the empirical statistics. With the rapidly development of computer technology, the numerical simulation and prediction on sea fog events are applied widely and will become the main method. Nowadays, the sea fog numerical prediction models are developed from the one-dimensional to three-dimensional and from the single atmospheric model to coupled air-sea model. The advanced assimilation technique, which assimilates the satellite data to overcome the lack of marine observations, together with the ensemble prediction in the three-dimensional numerical prediction model, which uses a higher resolution, selects the most suitable boundary layer and physical parameterization schemes, will greatly improve the sea fog forecasts.

Keywords: sea fog, statistical forecast, numerical prediction, ensemble prediction

0 引言

海雾 (sea fog) 是由于受海洋的影响, 发生在海上或沿海地区上空低层大气中凝结的水滴或冰晶, 使大气水平能见度小于1km的一种天气现象^[1]。海雾发生时, 海面水平能见度比较低, 对海上渔业、航运、平台作业及沿岸航空和公路交通等造成很大影响, 是中国近海需要高度关注的灾害性天气之一。

我国从20世纪40年代起开始对海雾进行研究, 60—70年代发展较快, 但主要限于观测与统计分析方面^[1]。20世纪80年代出版了专著《海雾》^[1]一书, 系统

地总结了80年代以前的海雾研究。该书在1985年被翻译成为英文*Sea Fog*, 是20世纪国际海雾研究的经典之作, 至今仍作为海雾研究的主要参考书之一。现今在国内外气象部门业务运行中, 对海雾的预报方法主要有天气学方法、统计方法和数值预报方法。天气学方法主要运用天气学基本原理和天气学分析方法, 考虑天气系统与海雾发生之间的联系, 对预报员的主观经验依赖性高, 预报准确率和可靠性较低; 统计预报方法通过历史资料的统计分析建立海雾与预报因子之间的统计模型对海雾进行预报。但统计预报方法缺乏对海雾过程物理规律的描述, 多依赖于历史观测资料或数值预报资料的质量和数量^[2]。随着计算机技术的进步以及对海雾宏观、微观结构和发生、发展规律的深入认识, 数值模式逐渐成为海雾预报的重要方法。本文主要从统计和数值模式两方面介绍最近几十年海雾预报技术方面取得的成果, 并展望海雾预报未来发展趋势, 为今后

收稿日期: 2015年11月18日; 修回日期: 2015年12月17日
 第一作者: 史得道 (1985—), Email: sdd0928@163.com
 通信作者: 吴振玲 (1963—), Email: bigwiselyyn@yahoo.com
 资助信息: 天津市科技兴海项目 (KJXH2014-20); 天津市科技计划项目 (15ZCZDSF00210)

海雾预报工作提供一定的参考和启示。

1 海雾统计预报

1.1 线性回归方法

统计预报前期主要采用线性回归方法进行数据拟合,之后随着计算机技术的发展又建立了一些新统计方法,比如人工神经网络法、决策树模型法和模糊逻辑法等^[2]。20世纪90年代以来,在海雾统计预报方面开展了一系列的研究工作。王厚广等^[3]以朝连岛为代表站,经过点聚分析选取5个预报因子,然后采用二级判别分析方法建立了海雾预报方程,对未来24h内是否有雾进行预报。在1970和1972年50次海雾预报中,报对41次,报错9次,准确率为82%。该方法选取的预报因子都为相邻站点之间的气温差、气压差等,没有考虑到海洋条件的影响,且只能进行单站预报,推广效果较差。于润玲等^[4]利用MOS (Model Output Statistics)方法^[5]对黄海和东海海雾进行预报,利用黄海和东海沿岸和海岛气象站的观测资料、美国国家环境预报中心(NCEP)海温和气温资料,选取风向、风速、相对湿度、气海温差4个预报因子应用多元回归方法建立海雾等级预报方程。在实际业务中,应用大气环流模式和上海台风研究所运行的WRF^[6]模式预报输出因子,根据回归方程结果和不同等级雾的判据对黄海、东海进行海雾预报。对2007年2—4月72h内预报结果进行检验,多个站预报成功率在50%以上(图1)。该方法的建立考虑到了海洋条件对海雾形成的影响,且利用数值模式输出的海洋和气象要素进行预报,能为海上大范围的海雾预报提供较好的参考依据。但该方法没有对海雾生成类型的不同进行区分,没有建立预报因子和能见度之间的线性关系,只根据拟合得到不同等级雾的判据进行预报,主观性

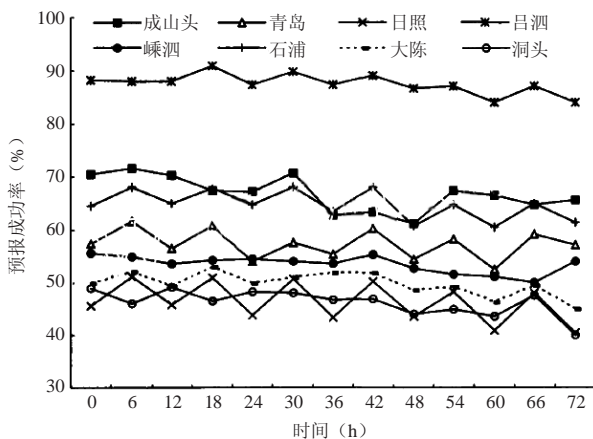


图1 2007年2—4月代表站72h内预报成功率^[4]

Fig.1 Forecast success rate of representative stations within 72 hours from February to April 2007

较强。杨棋等^[7]利用上海小洋山自动站观测资料以及浮标资料和NCEP再分析海温资料,以风向、风速、气温、海温、气海温差和相对湿度等作为预报因子,建立不同类型海雾的相似样本库,采用完全预报方法进行指数归一化及多元线性回归拟合,建立能见度预报方程。按此方法利用数值预报因子值对满足条件的751个历史样本进行后报,结果174个样本准确后有雾,355个样本准确后有雾,准确率70%。此方法能根据不同海洋、气象要素条件下预报因子的不同分类拟合建立适用不同类型海雾的预报方程,能更好反映不同条件下海雾的生成机制,且直接建立预报因子和能见度之间的线性关系,避免了传统上对预报量首先设定阈值进行判断的人为性,更具客观性,且能随着海雾样本的增加及时调整预报方程,有利于预报准确率进一步提高^[7]。

1.2 决策树模型预报方法

20世纪90年代开始,一些非线性的统计建模方法也逐渐用于开发建立雾的预报模型。梅珏^[8]利用人工神经网络建立了冬季辐射雾的预报方法,刘科峰等^[9]引入模糊推理仿真建模方法对青岛海雾发生进行客观预测。但这些方法存在建模过程复杂、预报变量的权重意义模糊、预报流程逻辑结构不清等缺点^[10]。黄健等^[10]利用汕头、珠海、湛江地面观测站的历史观测资料以及同期NCEP再分析资料,采用分类与回归树方法对海雾及其生成前24h的海洋气象条件进行分类分析,建立广东沿岸海雾决策树预报模型。以实测海雾事件作为分类分析的目标变量,以提前24h的海洋和气象要素作为预报变量。根据分类与回归树方法的剪枝原理,以误分率为指标对3个站的决策树进行剪枝处理,得到整体误分率最小、节点数最少的最佳决策树。然后采用交叉检验法对3个站决策树的分类/预测准确性进行检验,24h后有雾的验证成功率(验证有雾样本数/有雾总样本数×100%)分别为83.7%、73.7%和82.4%。根据此方法建立的海雾判别流程更为简洁、实用。比如珠海海雾判别流程(图2),突出了水汽条件和海面冷却作用的重要性,逻辑关系清晰,可在业务预报中应用。

1.3 参数化方法

胡波等^[11]根据Gultepe等^[12]提出的暖雾能见度参数化估算方案建立了沿海大雾预报方法。该方案将能见度作为液态水含量和云滴粒子数密度两者的函数,公式为:

$$Vis = \frac{1.002}{(LWC \times N_d)^{0.6473}}, \quad (1)$$

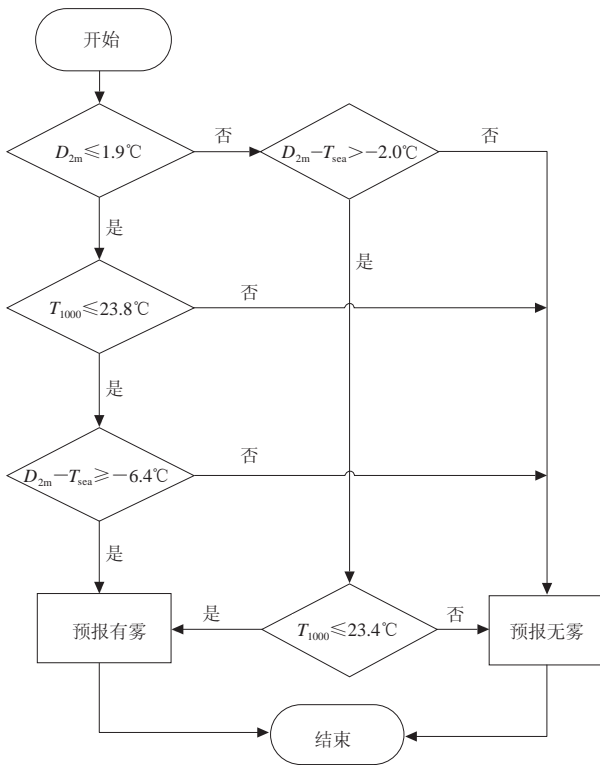


图2 决策树模型方法建立的珠海海雾判别流程图^[10]
Fig.2 The procedure of sea fog forecasting for Zhuhai created by decision tree models

式中, Vis 为能见度, LWC 为液态水含量, N_d 为云滴粒子数密度。液态水含量可以直接利用WRF模式输出的物理量进行计算, 而云滴粒子数密度采用历史经验统计方法解决, 首先利用钟元等^[13]提出的相似预报方法确定相似历史个例, 其次根据能见度公式反推算得到云滴粒子数密度, 公式为:

$$N_d = e^{T_{mp}} \quad (2)$$

$$T_{mp} = \frac{1}{0.6437} \ln\left(\frac{1.002}{Vis_{obs}}\right) - \ln(LWC_{obs}) \quad (3)$$

式中, Vis_{obs} 为相似个例的能见度, LWC_{obs} 为相似个例的液态水含量, 然后利用式(1)得到能见度预报。与应用较广的Stoelinga-Warner方法^[14]进行比较, 304站次能见度在5km以下雾的预报准确率由61%提高到73%。该方法同时考虑了 LWC 和 N_d 参数, 在微物理解释方面更加符合雾的实际发生规律, 有较好的业务应用价值。

统计预报方法相对于传统天气学方法, 一定程度上确实能提高海雾预报准确率, 并在一些沿海台站得到广泛应用, 然而这些方法无法摆脱统计本身的缺陷。对海雾生消的复杂微物理过程、热力、动力过程缺乏细致准确描述, 预报因子的选取以及预报量和预

报因子之间的经验统计关系的不确定性^[2]都是制约预报结果的重要因素。

2 海雾数值模拟与预报

海雾可分为平流冷却雾、蒸发雾和辐射雾等, 不同类型海雾的生成机制也不同。海雾的生消过程是动力学、热力学及微物理过程共同作用的结果, 这种复杂性注定了仅用经验统计方法进行海雾预报是远远不够的, 从20世纪中后期开始, 国内外利用数值模式对海雾进行模拟和预报的研究越来越多, 并且经历了从一维到三维, 从只考虑主要物理过程的简单模式发展到包含了复杂动力、热力以及多种物理过程的区域大气模式, 再到叠加海洋条件的海气耦合模式。

2.1 低维模式应用对海雾研究的作用

20世纪60年代, 以Estoque^[15]的大气边界层模式建立为标志, 海雾的数值模拟研究工作开始起步。Fisher等^[16]使用1-D模式对一次陆地雾过程进行了模拟, 首次证明了用数值方法研究海雾的可能性。此模式考虑了湍流作用和平流作用, 但不考虑辐射作用。Oliver等^[17]对海雾进行了一维模拟, 发现了辐射作用在海雾的形成和发生发展过程中的重要性。之后Findlater等^[18]利用一维辐射传输模式对苏格兰东北海岸的海雾进行了数值模拟, 探讨了辐射冷却在海雾形成、发展过程中的作用。Koracin等^[19]借助一维高阶湍流闭合模式和大量观测资料研究了1999年4月发生在加州沿岸的一个海雾个例的形成机制, 发现云顶辐射冷却和下沉增温是海雾形成的主要原因, 海气界面正的感热和潜热通量也起了一定的作用。20世纪80年代以后, 我国学者开始利用二维数值模式开展海雾数值模拟研究, 胡瑞金等^[20]设计了一个二维数值模式, 研究海温场、气温场、湿度场和风场等海洋气象条件对海雾生成和发展的影响; 之后又利用相对湿度时变方程, 结合二维数值模式研究了海雾生成过程中平流、湍流和辐射的效应^[21], 指出长波辐射冷却是有利于海雾生成的主要因子, 湍流冷却主要发生在平流初始阶段, 且限于低层。可见, 利用一、二维模式对海雾进行数值模拟, 主要用于对海雾发生、发展影响机制的研究, 如辐射作用、平流、湍流以及海洋下垫面的影响等。这些都为以后利用三维高分辨率数值模拟进行更精细化的海雾数值模拟和预报打下了坚实的基础。

2.2 三维模式研究进展

海雾的生消受多种物理过程相互作用影响, 各个因素产生的影响比重也各有不同, 一维、二维模式缺乏完善的边界层、辐射及微物理参数化方案等, 对海雾模拟的精细程度比较有限, 因此, 三维高分辨率数

值模式开始应用到海雾模拟研究中。Stoelinga等^[14]利用MM5数值模式^[22]模拟的结果，建立了计算能见度的经验公式，对于开展海雾的数值模拟研究与预报工作起到很好的推动作用。傅刚等^[23]使用改进的大气边界层模式对我国黄海海雾进行三维数值模拟研究，考虑了地形效应、植被影响、长波辐射、地表能量收支和液态水的重力沉降等因素，较好地模拟出了黄海海域实际的海雾生消过程，分析了海雾生长、发展和消亡过程中液态水含量和其他物理量的三维时空分布变化特征。傅刚等^[24]和王帅等^[25]分别利用RAMS模式^[26]成功模拟了黄渤海海雾过程，计算了大气水平能见度分布，结果表明云水混合比是影响大气水平能见度分布的主要原因，模拟的水平能见度分布与卫星云图观测结果吻合良好。Koracin等^[27]用MM5模拟并探讨了美国加利福尼亚沿岸海雾的形成、发展和消散机制。相比于MM5和RAMS，WRF模式由于其先进的系统构架与同化模块，越来越成为海雾数值模拟的主要模式，并应用到实际业务预报中。黄彬等^[28]利用WRF数值模式，优选模式微物理过程和边界层方案，开发了海雾诊断程序应用到WRF模式中，建立了黄渤海海雾数值预报系统且实现业务运行。由于模式边界层对大雾反应敏感，预报系统对大雾预报准确率较高，对24h预报结果，沿海站点能见度检验准确率80%。

2.3 海气耦合数值试验

在海雾生消过程中，海洋的作用至关重要，因此海雾数值模拟研究中，海温（SST）是不可忽视的关键物理量。WRF模式在处理SST上有两种方案^[29]：其一是在整个模拟过程中，SST始终为初始场中的SST；其二是SST每6h更新一次，更新数据来源于给定SST。前一种方案不能描述SST随时间演变过程，第二种方案虽然能更新SST，但前提是SST已知，这无法满足业务预报的需求^[29]。张苏平等^[30]利用中尺度WRF模式模拟研究表明海雾面积对SST变化比较敏感，湿度较小（比湿小于 $0.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ）的薄海雾区，SST增加，近海面气层稳定度减弱，海雾面积缩小；SST下降，稳定度增强，海雾面积增大。孟宪贵等^[31]也通过WRF数值模拟，发现低SST的海水冷却效应可以使海雾发生频率增加15%以上。为更好描述SST随时间演变而减少海雾预报的误差，赵定池等^[29]采用WRF与区域海洋模式POM^[32]构造的中尺度海气耦合模式对一次大范围黄海海雾过程进行模拟预报。初始场SST都来源于NCEP再分析资料，耦合之前整个模拟过程中SST保持不变，耦合之后整个模拟过程中POM模式每2h为WRF模式更新SST，结果发现耦合模式一定

程度上能模拟出黄海表面温度的变化，模拟的雾区与卫星观测比耦合前更趋一致。这一积极结果源于耦合模式对SST的模拟比WRF模式模拟的SST更为精细化。

2.4 数据同化对海雾预报的改善

有学者^[33]指出，海雾数值模拟质量受3个问题直接影响，分别是边界层湍流方案、云微物理方案与初始场。在大气中尺度数值模式不断完善与成熟，选定边界层与微物理方案情况下，利用先进同化方案同化更多更好的观测资料来改善初始场便显得尤为重要。刘宇迪等^[34]利用WRF三维变分系统同化QuikSCAT海面风场资料，以同化前后的数据作为初始场分别进行模拟预报，表明同化后初始场的改进能改善低层要素场，对海雾预报有明显正效应。高山红等^[33]设计了循环三维变分（3DVAR）同化模块改进WRF模式初始场对黄海海雾进行数值模拟，从而增加了低层大气温度层结的稳定性，改变了大气边界层下层风场结构，导致海雾模拟结果显著改善，表明初始场质量对海雾数值模拟的重要性。文中设计的循环3DVAR同化方案的基本思路（图3）是利用前一次3DVAR结果为WRF模式提供初始场，然后模式积分到下一同化时刻接着进行后一次3DVAR，如此重复，通过多次3DVAR可以同化一个时间段内所有观测数据。李冉等^[35]在循环3DVAR同化方案基础上利用WRF模式进行了卫星辐射数据的直接同化试验，能较好地再现影响海雾的天气系统，模拟雾区与实际观测较为吻合，初始温度场和湿度场比不同化任何数据试验有明显改善。Wang等^[36]进一步改进了此循环3DVAR同化流程，同化了MTSAT卫星反演雾区中提取的水汽信息（图4），改

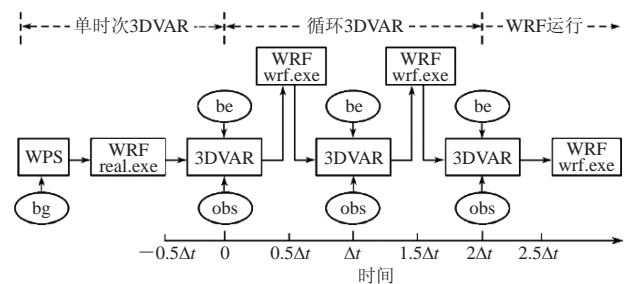


图3 循环3DVAR流程^[33]

（WPS（WRF Preprocessing System）与real.exe形成首次3DVAR所需初始场，wrf.exe驱动WRF向前积分，bg、obs和be分别代表背景场、观测场和背景场误差协方差； 0 、 Δt 和 $2\Delta t$ 为同化时刻）

Fig.3 Flowchart of cycling 3DVAR

（WPS(WRF Preprocessing System) and real.exe together generate initial conditions for the first 3DVAR, wrf.exe forces WRF to integrate forward. The symbols of 'bg', 'obs', 'be' represent background fields, observations, background error covariance respectively, 0 , Δt , $2\Delta t$ are assimilation times.)

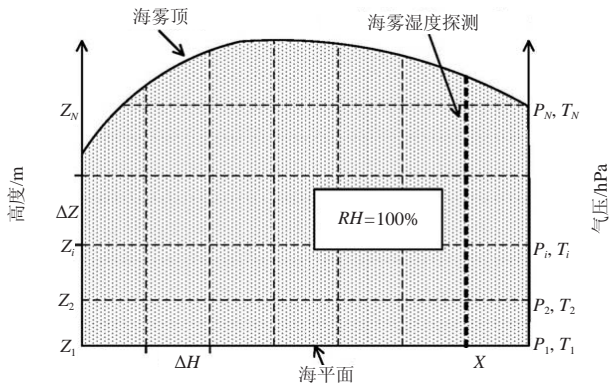


图4 卫星反演雾区中水汽信息的“探空化”处理^[36]

(将雾区在水平方向和垂直方向划分为多个网格点, 间隔分别为 ΔH 、 ΔZ , 对于其中一个格点 X , 上空雾区内湿度垂直廓线可以看做只包含湿度和海拔信息的常规探空曲线, 这样整个雾区就由许多不包含气压和温度信息的湿度探空曲线组成)

Fig.4 Schematic diagram for analyzing and digitizing sea fog humidity soundings

(The sea fog space is allocated to grid points with the horizontal and vertical grid intervals marked as ΔH 、 ΔZ , for a given grid point X , the vertical humidity profile inside the sea fog can be regarded as a routine sounding profile that only contains humidity and elevation information, thus the whole sea fog space consists of a large number of sea fog humidity soundings without pressure and temperature information.)

善了初始场中海上大气边界层水汽通常偏干的状况, 更加真实地再现了边界层的湿度廓线。数值试验模拟结果显示(图5), 只同化观测资料时, 模拟的边界层1km以下比探空观测更干, 100m以下混合比偏少 $1.5\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。同时同化观测资料和卫星提取水汽信息时, 170m以下海雾出现的层次混合比显著提升, 与实际更加接近, 改进了预报效果, 使海雾临近预报的雾区评分命中率(POD)提高了大约20%。

3 集合预报在海雾模拟中的应用趋势

目前我国沿海气象台站的海雾预报仍主要采用统计预报方法, 但伴随计算机能力的不断提高和数值模式的不断完善, 利用三维高分辨率数值模式进行海雾预报已经是未来主要发展方向。已有研究^[37-38]指出海雾数值预报应该考虑采用集合预报的途径。海雾是发生在海上大气边界层内的一种水汽凝结成云的微物理现象, 海雾预报不仅要考虑初始场误差, 还应该关注与成雾过程密切相关的云微物理方案、边界层方案与SST误差等^[38]。海雾数值模拟的初始场误差可以通过先进的数据同化手段和更加丰富的观测资料加以降低^[33-36]。然而, 这些结果皆是在事先确定好最优微物理方案、边界层方案以及SST的情形下得到的。陆

雪等^[39]对10次春季黄海海雾事件进行WRF数值模拟研究, 通过24h预报雾区与卫星反演雾区进行评分检验, 发现雾区预报对边界层方案的敏感度大于微物理方案, 且最优边界层方案依具体海雾过程而异。若采用集合预报, 初始场集合体中可以包含不同的初始场误差, 在预报过程中不同的集合成员可以采用不同的微物理与边界层方案以及扰动的SST场^[38]。国外一些国家从20世纪90年代就开始发展集合预报, 1992年美国国家环境预报中心就建立了全球集合预报系统^[40], 2001年又发展了一个基于区域模式的短期集合预报系统(Short-Range Ensemble Forecast system)^[41], 在此基础上Zhou等^[42]利用两个区域模式10个成员对中国东部地区的雾进行集合预报, 预报结果有了明显改进, 12~36h 40%概率预报的公正预兆得分比确定性预报提高了0.27。这是国际上在雾集合预报方面最早的工作, 也是第一篇有关雾集合预报的文献。巴黎国际机场也建立了本地集合预报系统对雾进行预报^[43], 美国空军气象中心建立了中尺度集合预报系统对加利福尼亚州海岸和山地中的雾进行预报^[44]。高山红等^[38]利用“集合3DVAR”同化技术, 针对一次黄海海雾进行了集合预报试验(图6), 试验中集合预报初始场集合体生成采用蒙特卡罗随机扰动法对模式主要预报变量进行扰动, SST扰动借助EnKF随机扰动工具得到, 最后得到黄海海雾雾区概率预报(图7)。预报评分显示集合预报50%概率雾区预报的命中率优于确定性预报36.6%, 公正预兆得分优于确定性预报28.5%, 源于集合预报所预报的温度、湿度和 wind 等大气边界层状态要优于确定性预报, 并且加入SST扰动也产生正影响。这表明集合预报相比于确定性预报有其不可替代的优越性。

对于海雾的数值预报而言, 首要的工作是做好数据同化工作, 提高数值模式的初始场质量; 其次是选用合适的边界层参数化方案与云微物理方案, 尽可能精确刻画海雾形成的动力与微物理过程; 然后考虑集合预报思路, 降低上述过程中始终存在、不可避免的不确定性。此外, 还得加强海雾的外场观测, 加深对海雾发生机制的认识, 帮助改进数值模式中边界层与微物理参数化方案。

4 小结

1) 统计预报方法是在选择最优影响因子基础上完成的, 计算方法易于掌握, 占用的计算资源和计算时间也相对很少, 因此统计预报方法仍是目前沿海气象台站预报海雾的主要方法之一。但是影响因子的筛选容易受主观经验的影响。

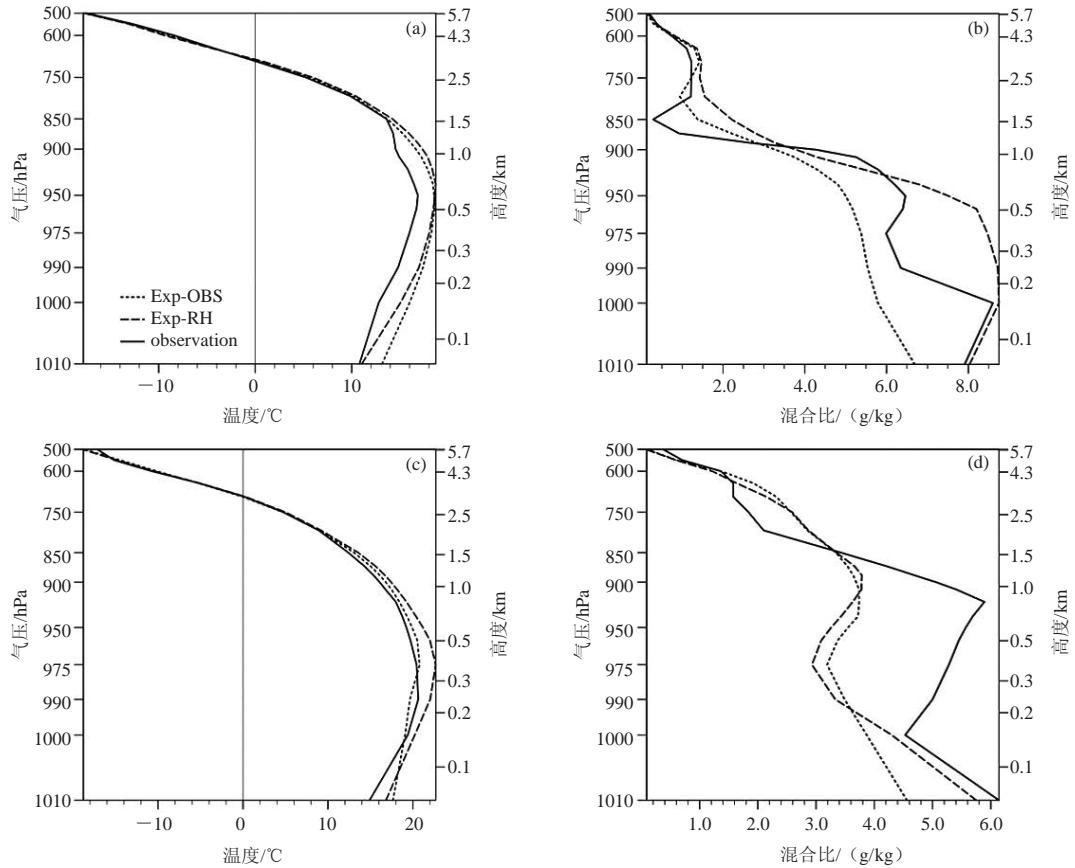


图5 只同化观测资料 (点虚线)、同时同化观测资料和卫星反演水汽信息 (短虚线) 模拟的青岛站 (a, b) 和成山头站 (c, d) 的温度 (a, c)、混合比 (b, d) 垂直廓线与无线电探空仪探测曲线 (实线) 对比图^[36]

Fig.5 Comparison of forecast vertical profiles of temperature(a, c) and mixing ratios(b, d) in two experiments(one assimilating observation data only(dotted lines),the other one assimilating both observation and sea fog humidity sounding data(dashed lines)) with radiosonde observations(solid lines) at Qingdao(a, b) and Chengshantou(c, d) stations

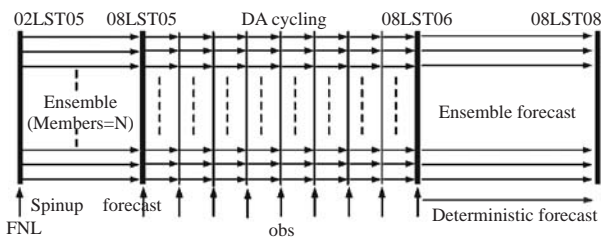


图6 包含N个成员的集合预报试验设计流程^[38]

(集合预报运行分为3部分: 初始集合体生成阶段 (5日 02 LST~5日08 LST); 数据同化阶段 (5日08 LST~6日08 LST); 预报阶段 (6日08 LST~8日08 LST)。初始场扰动相对于同化起点提前了6h, 目的是让集合体各成员在进入同化之前进行动力调整)

Fig.6 Flowchart of the ensemble numerical forecast experiments including N members

(Procedure of ensemble forecast contains three steps:generation of the initial ensemble members,data assimilation cycling,ensemble forecast.The turbulence of initial conditions occurs six hours ahead of data assimilation in order to let ensemble members carry on dynamical adjustment)

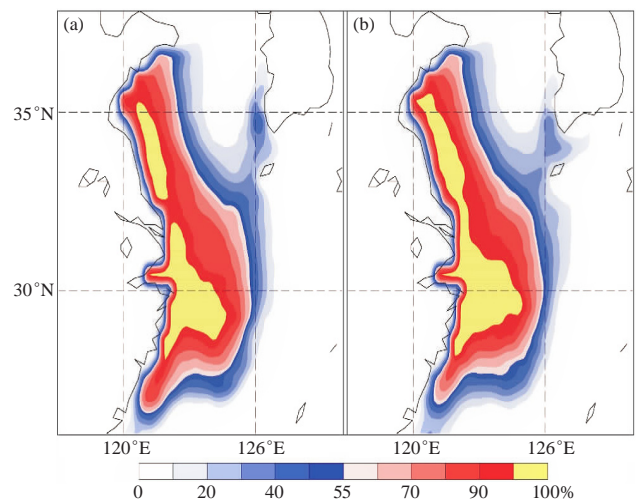


图7 黄海雾区加入SST扰动 (a) 和没有加入SST扰动 (b) 的集合预报试验得到的不同预报概率分布^[38]

Fig.7 Two ensemble forecast experiments(with SST turbulence(a) and without SST turbulence(b)) give forecast Yellow Sea fog area with different probabilities

2) 海雾数值预报的发展不仅推动了海雾生消机理的深入研究, 而且推动了海雾客观预报技术的发展, 它更趋于客观描述海雾发生发展及消亡过程中动力、热力等物理及微物理的变化过程。国内外气象学家已经开始应用三维数值模式开展海雾预报, 通过初始场数据同化、卫星资料应用及海气耦合等技术, 不断提高海雾数值模拟的准确性。

3) 目前, 集合预报技术在海雾数值模拟预报中的应用研究逐渐增多, 相关模拟试验表明, 由于集合预报描述的大气边界层状态更趋于精细和真实, 海雾出现时间、发生范围的预报准确率明显提高。

参考文献

- [1] 王彬华. 海雾. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [2] 冯蕾, 田华. 国内外雾预报技术研究进展. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2014, 6(1): 74-81.
- [3] 王厚广, 曲维政. 青岛地区的海雾预报. 海洋预报, 1997, 14(3): 52-57.
- [4] 于润玲, 王亚男, 李永平. 黄海和东海海雾短期客观预报业务系统. 大气科学研究与应用, 2007, 2: 28-37.
- [5] Glahn H R, Lowry D A. The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting. Journal of Applied Meteorology, 1972, 11: 1203-1211.
- [6] Scamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. A description of the advanced research WRF version 3. Boulder, Colorado, USA: NCAR/TN-475+STR, 2008: 125.
- [7] 杨棋, 欧建军, 李永平. 洋山海域海雾客观预报方法研究. 热带海洋学报, 2013, 32(5): 59-64.
- [8] 梅珏. 人工神经网络在辐射雾预报中的应用. 应用气象学报, 1999, 10(4): 511-512.
- [9] 刘科峰, 张韧, 江海英, 等. 模糊逻辑仿真建模及其在青岛海雾分析中的应用. 海洋湖沼通报, 2004(4): 17-25.
- [10] 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.
- [11] 胡波, 杜惠良, 郝世峰, 等. 一种统计技术结合动力释用的沿海海雾预报方法. 海洋预报, 2014, 31(5): 82-86.
- [12] Gultepe I, Miller M D, Boybeyi Z. A new visibility parameterization for warm-fog applications in numerical weather prediction models. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2006, 45(11): 1469-1480.
- [13] 钟元, 潘劲松, 朱红, 等. 一种台风过程雨量的相似预报方法. 热带气象学报, 2009, 25(6): 681-691.
- [14] Stoelinga M T, Warner T T. Nonhydrostatic, mesobeta-scale model simulations of cloud ceiling and visibility for an east coast winter precipitation event. Journal of the Atmospheric Sciences, 1999, 38(4): 385-404.
- [15] Estoque M A. The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. Journal of the Atmospheric Sciences, 1962, 19(3): 244-250.
- [16] Fisher E L, Caplan P. An experiment in numerical prediction of fog and stratus. Journal of the Atmospheric Sciences, 1963, 20(5): 425-437.
- [17] Oliver D, Lewellen W, Williamson G. The interaction between turbulent and radiative transport in the development of fog and low-level stratus. Journal of the Atmospheric Sciences, 1978, 35: 301-316.
- [18] Findlater J, Roach W, McHugh B. The haar of north-east Scotland. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1989, 115: 581-608.
- [19] Koracin D, Lewis J, Thompson W, Dorman C, et al. Transition of stratus into fog along the California coast: Observations and modeling. Journal of the Atmospheric Sciences, 2001, 58: 1714-1731.
- [20] 胡瑞金, 周发绣. 海雾过程中海洋气象条件影响数值研究. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(3): 282-290.
- [21] 胡瑞金, 董克慧, 周发绣. 海雾生成过程中平流、湍流和辐射效应的数值试验. 海洋科学进展, 2006, 24(2): 156-165.
- [22] Grell G A, Dudhia J, Stauffer D R. A description of the fifth-generation Penn State/NCAR mesoscale model(MM5). Boulder, Colorado, USA: NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, 1994: 117.
- [23] 傅刚, 张涛, 周发绣. 一次黄海海雾的三维数值模拟研究. 青岛海洋大学学报, 2002, 32(6): 859-867.
- [24] 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. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 720-726.
- [25] 王帅, 傅刚, 陈德林, 等. 2009年春季一次黄海海雾的观测分析及数值模拟. 大气科学学报, 2012, 35(3): 282-294.
- [26] Pielke R A, Cotton W R, Walko R L, et al. A comprehensive meteorological modeling system-RAMS. Meteorological Atmospheric Physics, 1992, 49: 69-91.
- [27] Koracin D, Businger J A, Dorman C E, et al. Formation, evolution and dissipation of coastal sea fog. Boundary Layer Meteorol, 2005, 117: 447-478.
- [28] 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. 气象科技, 2009, 37(3): 271-275.
- [29] 赵定池, 李毅, 潘晓滨, 等. WRF-POM耦合模式对一次海雾过程的模拟试验. 海洋预报, 2014, 31(1): 77-85.
- [30] 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.
- [31] 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, 2012, 42(6): 16-23.
- [32] Mellor G L. Users Guide for a Three-Dimensional Primitive Equation, Numerical Ocean Model. Princeton University, 1992, 34.
- [33] 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: WRF数值试验. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2010, 40(10): 1-9.
- [34] 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.
- [35] 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: 10-20.
- [36] Wang Y M, Gao S H, Fu G, et al. Assimilation MTSAT-derived humidity in now-forecasting sea fog over the Yellow Sea. Weather and Forecasting, 2014, 29(2): 205-225.
- [37] 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: 65-81.
- [38] 高山红, 王永明, 傅刚. 一次黄海海雾的集合预报试验. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(12): 001-011.
- [39] 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: 312-320.
- [40] Tracton M S, Kalnay E. Operational ensemble prediction at the National Meteorological Center: practical aspects. Weather and Forecasting, 1993, 8: 378-398.
- [41] Du J, DiMego G, Tracton M S, et al. NCEP short-range ensemble forecasting (SREF) system: multi-IC, multi-model and multi-physics approach. Research Activities in Atmospheric and Oceanic Modelling (edited by J Cote), Report 33, CAS/JSC Working Group Numerical Experimentation(WGNE), WMO/TD-No, 2003, 1161, 5. 09-5. 10.
- [42] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Weather and Forecasting, 2010, 25: 303-322.
- [43] Roquelaure, S, Bergot T. A local ensemble prediction system (L-EPS) for fog and low clouds: construction, Bayesian model averaging calibration and validation. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47: 3072-3088.
- [44] Ryerson W R, Hacker J P. The potential for mesoscale visibility prediction with a multimodel ensemble. Weather and Forecasting, 2014, 29: 543-562.