

中国雾的业务预报和应用

章国材

(中国气象局, 北京 100081)

摘要: 回顾了我国雾业务预报发展的三个阶段(经验预报、主客观相结合的雾预报和精细雾监测预报)的情况及进展, 并指出雾预报的发展方向是建立包含先进资料同化系统的高分辨率区域模式系统, 在近期仍然需要发展数值预报产品解释应用技术, 预报员的经验在提高对大雾这种灾害性天气的预报准确率方面仍然有用武之地。

关键词: 中国, 雾, 预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.004

The Progress of Fog Forecast Operation in China

Zhang Guocai

(China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Abstract: This paper recalls the situation and progress of fog forecasting operation in China. Three stages are experienced: the experiential forecast stage, the subjective forecast combined with the objective prediction stage, and the fine fog monitoring and forecasting stage. It points out that the developmental direction of fog forecast is to establish a regional mode in high resolution system containing advanced data assimilation. At present, it still needs to be developed the explained application method to the numerical prediction products. The experiences of forecasters still play an important role on improving the forecasts of some disastrously heavy fog events.

keywords: China, fog, forecast

0 引言

浓雾是一种发生在近地面层的灾害性天气现象, 严重的视程障碍威胁着城市道路系统、高速公路、航空港和海港航道等的安全。随着我国国民经济的快速发展, 现代化交通工具在我国日益普及, 高速公路、机场、航道对能见度的依赖日趋突出。世界航空史上曾发生过飞机在大雾中滑行相撞而造成严重后果的事故。雾对公路交通的影响是个很复杂的问题, 因为车辆制动后滑行的距离与车速、车重及路面等许多因素有关, 在一条公路行驶的车辆种类繁多, 只要有一辆车出事故, 就可能造成全路交通中断。有雾时如能见度低于200m, 高速公路应实行限速管制; 能见度低于50m, 则司机分辨不清车距而易发生汽车追尾事故, 高速公路应当关闭。近年来高速公路的恶性交通事故时有发生, 严重的甚至造成数十甚至百余辆汽车追尾相撞, 人员伤亡的惨剧。因此, 对浓雾等低能见度天气的监测预报已经成为当前气象预报的重要课题。

我国雾的业务预报大约经历了经验预报、主客观

相结合的雾预报以及精细化雾监测预报三个阶段。本文重点回顾了中国雾业务预报的历程和取得的进展, 对未来雾预报也做了一些展望。

1 经验预报

在没有数值天气预报的时代, 预报员主要根据天气学原理, 依靠天气图及辅助图表的分析和预报经验做雾的预报。由于观测资料的限制, 这个阶段预报员只能开展辐射雾、锋面雾和平流雾的预报, 不可能开展由局地环境引起的雾(蒸发雾、上坡雾等)的预报。

辐射雾主要是因为夜间地面辐射冷却, 当近地表的气温降低到露点或露点以下达到饱和, 水汽凝结而形成雾。预报员根据辐射雾的形成原理, 寻找有利于辐射降温的天气形势, 例如高压楔、高压带、高压中心、高压后部等高压系统, 弱气压场, 低压系统等, 分析地面水汽、风、变温、变压、稳定度等气象条件; 在冬半年, 当地面湿度较大和微风时, 天空晴朗, 夜晚由于辐射降温, 通常预报第二天早晨会出现雾。

平流雾是暖湿空气移到较冷的陆地或水面时, 因下部空气冷却而达到饱和, 水汽凝结而形成的。因此, 预报员通常关注有利于平流雾形成的三种天气形势: 入海变性高压的西部、太平洋高压西部以及气旋

收稿日期: 2015年1月14日, 修回日期: 2015年4月20日

作者: 章国材(1945—), Email: zhanggc@cma.gov.cn

和低槽的东部。在这三种地面形势下，着重分析近地面层的温湿和乱流条件，比较本站和上游站的天气要素，依靠经验做出雾的预报。

锋面雾则根据预报区未来24h为锋前或锋后（暖锋前后发生概率更大），当预报地面风速较小，湿度较大，近地层接近饱和并伴有逆温层时，则预报有雾。

最常见的海雾是由于暖空气平流到冷海面上形成的，因此，关注海面温度和暖空气向海面的输送是海雾预报的着眼点。

在这个阶段，无论是天气形势预报还是气象要素预报都是依靠预报员的经验外推得到的，因此这个阶段一般只能做24h内雾的定性预报，雾的预报准确率较低，在预报中很难区分轻雾和浓雾，更无法预报不同能见度的雾。且只有国家基本气象站有雾的24h人工观测，一般气象站只在白天进行雾的人工观测，因此，这个阶段雾预报的空间分辨率也很低。

2 主客观相结合的雾预报

20世纪80—90年代，由于我国高速公路和机场的快速发展，对提高雾预报准确率提出了迫切的需求，全国各级气象台站大大加强了雾预报的统计研究工作。在许多省20世纪90年代出版的天气预报手册中都可以看到大雾预报的方法，其基本思路是：根据历史大雾观测记录，统计分析大雾生成的气候概况和天气形势，研究大雾发生的气象条件，计算分析大雾形成前各种物理量场的分布，提出各种预报大雾的方法。与此同时，由于经费的限制，这个阶段尚没有能力大规模建设高速公路气象监测系统，因此不能开展精细的雾预报。

2.1 雾生成条件的研究和客观预报方法的建立

浓雾的形成涉及到四个基本因素：水汽、降温、风和凝结核。在这个阶段，预报员仍然不考虑凝结核问题，而是先验地认为凝结核的条件总是被满足的。很多人研究了雾生成的气象条件^[1-3]。第一，对于水汽条件，很显然浓雾只有在相对湿度大的条件下才能形成，前期根据气象站雾和相对湿度观测资料的统计分析，认为地面相对湿度至少 $\geq 80\%$ 才有可能形成雾^[2]；后来根据外场试验精细的观测数据分析进一步得出结论，出现雾时极端最小相对湿度是 91% ^[4-5]。第二，只有当气温降低到露点或露点以下，空气达到饱和和凝结条件时才能形成雾，因此降温预报是预报员需要考虑的第二个因素。第三，风速对雾的形成也有一定影响。如果没有风，就不会使上、下层空气发生交换，冷却效应只发生在贴近地面的气层中，只能生成一层薄薄的浅雾。如风太大，上下层空气交换很快，

流动也大，气温不易降低很多，则难以达到水汽过饱和状态。统计表明：辐射雾和平流雾的地面风速分别以 $1\sim 3$ 和 $3\sim 6\text{m/s}$ 为宜。第四，925与1000hPa这一较薄气层稳定或弱不稳定有利于雾的形成， $\Delta\theta_{se}$ 值在 $-2\sim 6^\circ\text{C}$ 为宜。由此，各级气象台站发展了雾预报的指标法^[1-2]，例如，张德山等^[3]通过分析影响首都机场高速公路能见度的6种典型地面天气形势场，确定将大气稳定度、低层水汽含量和低空大气中悬浮颗粒物3个基本气象要素作为预报因子，得出各月的日能见度预报指标，制作首都高速公路（不分区段）能见度等级（5个等级： $\geq 10\text{km}$ 、 $4\sim 9\text{km}$ 、 $2\sim 4\text{km}$ 、 $1\sim 2\text{km}$ 、 $< 1\text{km}$ ）24h预报，凡首都高速公路出现与预报相同等级的能见度则评定为准确，2000—2001年预报准确率为70%左右。

海洋平流冷却雾是由于暖湿气流输送到冷水面上，低层空气温度下降至露点而成雾，因此，适宜成雾的海面条件主要包括一定的海表面水温(T_w)，适宜的海气温差($T_w - T_a$)。王彬华^[6]给出了平流冷却雾成雾的海气温差范围为 $-3^\circ\text{C} \leq (T_w - T_a) \leq -0.5^\circ\text{C}$ ，而最高海水温界限为 $T_w \leq 25^\circ\text{C}$ 。以后许多作者根据新的资料统计了当地海雾发生的海洋-大气界面热力学条件，这些统计结果一般都没有突破文献^[6]的范围，但要比文献^[6]更具体。适宜的风向和风速将暖湿气流向冷水面输送是海雾产生的重要条件，海雾出现时的具体风向、风速，因不同海区和地形而有差异。

随着20世纪80年代初我国数值天气预报业务的建立，特别是数值天气形势预报质量超过预报员的经验外推预报之后，雾预报进入基于数值天气分析预报的新阶段。无论是客观预报方法还是主观预报，可以用于雾预报的产品不仅有实况观测资料，而且还有上述雾生成气象条件的数值预报产品，除此之外，还有更丰富的与雾生成有关的其他物理量产品，例如垂直速度、散度、涡度、混合层高度、稳定度参数及垂直交换系数等产品。因此，各种数值预报产品解释应用的方法应运而生：1) 完全预报(perfect prediction, PP)方法^[7-8]，这种统计模型是使用历史资料建模，而实际预报时，预报因子的值仅来自数值预报模式输出产品，这种方法的准确率不仅取决于用历史资料建立的统计模型的准确性，还取决于数值模式气象要素预报的准确度。2) 模式输出统计(model output statistics, MOS)法^[9-13]，这种预报方法的预报因子来自数值预报产品、气象观测数据以及气候数据。建模和预报都使用数值预报产品，在建模时已考虑了数值预报的误差和不确定性。因此，模式输出统计法可

看作是用观测值不断纠正模式输出结果误差的过程。

3) 基于支持向量机 (support vector machine, SVM) 方法^[14-15]是一种以统计学习理论为基础的非线性小样本学习方法, SVM的最终决策函数只由少数的支持向量所确定, 计算的复杂性取决于支持向量的数目, 而不是样本空间的维数, 非常适于处理非线性物理问题。

4) 神经网络方法^[16-19]是指由大量类似于生物神经细胞的处理单元 (神经元) 相互连接而成的, 具有一定智能功能的网络。根据神经元在网络中的连接方式、学习方式和信息传递方向的不同而衍生出不同的网络类型。气象上经常采用的网络类型是应用最为广泛的基于误差反向传播 (error back propagation, BP) 学习算法的人工神经网络。例如, 王雷等^[17]选取1980—1992年芜湖机场气象台地面观测资料, 包括风向、风速、能见度、天气现象、温度、露点温度、相对湿度、水汽压、本站气压和海平面气压共10项。还采用了芜湖邻近的南京、安庆、上海和杭州站同时段的地面气象资料。利用BP人工神经网络方法制作芜湖机场雾的预报, 用1991—1992年的资料进行芜湖机场雾的试报, 雾日报对次数为55, 漏报次数为4, 空报次数109, 命中率为33.5%, 空报率为66.59%, 漏报率为6.8%, 临界成功指数为32.7%。需要指出的是, 无论是MOS、SVM还是神经网络方法等统计方法, 当数值预报模式升级时, 都需要使用新的数值预报产品重新建模; 而且对不同的气候区都需要建立不同的统计模型, 工作量大, 这是统计预报的一大缺点。

2.2 雾数值模式的研发

这个阶段我国也研发了一维雾模式。一维雾模式最基本的假设是热力学变量在水平方向上具有均一性, 因此, 雾的演变主要由大气辐射场、湍流混合以及地表的水汽和热量通量驱动, 不考虑水平平流或大尺度沉降等动力过程。周斌斌^[20]在Brown等的雾模式的基础上做了改进, 考虑了风温廓线随时间的变化, 湍流交换系数由风温廓线计算, 分析了辐射雾的形成过程。尹球等^[21-22]对辐射过程、微物理过程和大气湍流交换过程进行了适当的参数化处理, 建立了一个一维辐射雾数值模式, 并用于雾整个生消过程的模拟。

李子华^[23]系统回顾了我国二维和三维雾模式的研发历程, 指出: 20世纪80年代末和90年代初, 中国开始研究二维辐射雾模式, 模式包括大气长波辐射冷却、地表能量收支、液态水重力沉降等影响雾的形成和发展的主要因子, 并采用了一个高度变换坐标系, 有效而简便地将长江两岸的复杂地形引入模式。接着在对重庆雾综合观测试验之后, 又发展了复杂地形二维非定常雾模式, 以实测资料为初始场, 研究了一次

重庆雾的形成和发展过程, 对江河、城市热岛、重庆地形, 以及长波辐射冷却等对雾的影响分别做了模拟试验, 得到一些符合观测事实的结论。其中城市热岛对雾的影响有二重性: 一方面热岛环流可以增强市中心与长江之间的气流辐合上升, 把水汽从低层带入高层, 有利于雾的垂直发展; 另一方面, 城市的高温又不利于雾的形成, 这一重要结论可以解释重庆雾为什么随着城市发展而逐渐减少, 有雾时雾顶很高, 雾层很厚等问题。由于重庆雾分布不均匀, 具有明显的三维结构特征, 且地形复杂而又不对称, 二维模式具有明显的不足。由此发展了复杂地形上雾的三维数值模式。用这个模式模拟重庆的山地、河流和城市热岛而引起的局地环流, 模拟冬季一次雾的生消过程、空间分布特征与实况接近。后来利用这个模式对西双版纳地区的辐射雾研究也获得成功。但是这些雾数值模式都没有应用于雾的业务预报。

3 精细雾的监测和预报

21世纪, 我国高速公路气象监测系统的建设大大促进了雾的精细监测和预报业务的发展。表现在以下几个方面。

3.1 雾形成条件的精细分析

雾形成条件的精细分析是雾精细监测预报的基础。高速公路精细的能见度观测系统为雾形成条件的精细分析提供了基础资料。根据南京交通气象研究所^[4]的统计, 出现雾时, 极端最小相对湿度是91%, 也就是说相对湿度至少要达到90%以上, 才能使雾稳定存在。浓雾形成前最大相对湿度为93%~98%的几率达94.6%。他们还分析了局地“团雾”的生成条件: 1) 1.5h降温幅度可达1℃, 且随能见度波动而波动; 2) 风速在0.8m/s以上, 甚至达到2.0~2.4m/s, 两者都比成片雾大。

冯民学等^[5]经众多浓雾形成的物理过程的历史样本分析研究后, 得出沪宁高速公路有利于近地层成雾的条件为:

1) 具有维持晴空、微风的低层均压场和高层高压脊 (有暖平流) 的大尺度天气形势。

2) 具有稳定的大气层结, 贴近地面和低空存在逆温层。逆温层的平均强度: $\Delta T/\Delta H = (1.5 \sim 2.5)^\circ\text{C}/100\text{gpm}$ 。逆温层愈厚愈强则雾愈浓。

3) 具有良好的晴空长波辐射条件。辐射降温率在02—04时 (1.0~1.8) °C/h最有利于雾的形成。且近地层空气净辐射处于负值时间愈长愈有利于辐射雾的形成。

4) 风的脉动作用。经研究分析, 风的脉动有利于雾滴的增长而使能见度降低。因为能见度 $V = \frac{4.98}{\sum n_i r_i^2}$

(式中, n_i 为第 i 组的雾滴数, r_i 为第 i 组的雾滴半径), 能见度距离与雾滴的数量和雾滴的半径的平方成反比。在风的作用下, 因碰并形成雾滴半径的变异, 而使大雾滴迅速形成和增多, 造成能见度急剧下降。从近两年的浓雾监测中也证实了 2min 平均风速在 0.4~1.8m/s 时最有利于雾的形成。

张利娜等^[24]通过对首都国际机场高速公路 21 个月中能能见度最低月资料的分析表明, 大气能见度与湿度间呈明显的幂指数分布关系, 其与气温呈 U 型相关。但在月平均能见度最大月, 能见度则与湿度呈指数关系。200m 以下的低能见度基本上是湿度在 100% 的情况下发生的, 即都是大雾天气影响的直接结果, 但对 200m 以上的低能见度则不同, 200~1000m 能见度只有一半是因为雾, 而 1~4km 的能见度中不到 1/3 是因为雾, 其他主要是由灰霾、沙尘暴等天气现象造成。从物理上来看, 大气能见度与湿度的关系, 主要通过水汽分子的瑞利散射和雾的米氏散射两个方面来表现; 风速则是由于压力阻力卷起大气气溶胶来影响大气能见度的。

吴兑等^[25]分析南岭山区浓雾发生同时段内的周边区域的探空观测资料, 发现形成浓雾的大气结构的主要或关键性特征有: 1) 近地面至 925hPa (约 900m) 高度, 大气层结呈中性状态, 而 925hPa 以上高度层结为稳定状态; 2) 从地面至 400 或 300hPa, 大气相对湿度较大, 接近准饱和状态; 3) 风速的垂直分布为: ① 700hPa 以下为偏西北或偏北风, 其上为西南风; ② 700hPa 以下为偏西南或偏南或偏东南风, 500hPa 以上为偏西南风, 而 700 和 500hPa 上为偏西北风。低层的风速一般都在 16m/s 以下。若大气运动的结构同时满足以上 3 点特征, 则南岭山区一定有浓雾。在此基础上, 建立了南岭山地雾的结构预测方法。将能见度 (V) 分为 5 个等级 ($V \geq 1000\text{m}$, $500\text{m} \leq V < 1000\text{m}$, $200\text{m} \leq V < 500\text{m}$, $50\text{m} \leq V < 200\text{m}$, $V < 50\text{m}$), 规定预测能见度等级与实测等级一致, 得 100 分; 预测的能见度等级与实测等级相差一级, 得 50 分; 预测能见度等级与实测等级相差两级或以上, 得 0 分。则 2003 年 12 月、2004 年 1—3 月和 2004 年 11 月南岭山区能见度预报准确率为 81.1%。

这些研究成果不仅丰富了雾客观预报的气象因子, 也成为雾业务预报的重要指导。

针对气溶胶对雾的形成与发展的作用也进行了一些研究。施晓晖等^[26]指出: 北京及周边地区冬季雾日数和气溶胶光学厚度则呈正相关, 并具有“同位相”的年际变化趋势。石春娥等^[27]在三维雾模式中, 对增加气溶胶粒子与不考虑气溶胶两种情况下雾的形成与

发展过程进行了研究, 结果表明: 气溶胶粒子的存在, 由于其温度效应的存在, 使地面雾形成时间推迟, 低层雾含水量普遍减小; 适量的气溶胶粒子有利于重庆雾向高处发展, 当气溶胶粒子成倍增加后, 对雾的形成与发展有阻碍作用。但是, 在雾预报中如何考虑气溶胶浓度的影响, 还没有得到可以应用的成果。

3.2 雾精细化监测和临近预报

3.2.1 雾的监测

进入 21 世纪, 雾的监测业务大大加强。一是国家气象站全部安装了自动化能见度观测设备, 实现了每分钟能见度的自动观测, 观测精度达到米级。二是高速公路安装了大量能见度的观测设备。沪宁高速公路、京津唐高速公路、沈大高速公路、成渝高速公路和京珠高速公路粤境北段都安装了比较密集的能见度观测设备^[4, 28-29]。南京交通气象研究所^[4]根据沪宁高速公路多年雾的观测研究, 提出了高速公路雾监测的布点方案: 1) 在浓雾多发的山地、水汽和冷空气容易积聚的低谷、易发团雾的河网地区, 监测站的密度要大一些, 间距 3~5km 为宜。2) 在季节性浓雾多发地区, 监测站间距以 10km 左右为宜。3) 在低能见度浓雾偶发地区, 监测站间距可增大到 20~50km。三是建立了卫星反演雾的业务。国家气象站能见度观测是“点”观测, 高速公路能见度观测也仅是“线”观测, 实现能见度“面”观测的手段只有气象卫星, 用气象卫星反演和监测雾已有很多研究成果^[30-33], 国家卫星气象中心在研究成果的基础上, 既用静止气象卫星 (风云二号、MTSET), 也用极轨气象卫星 (风云三号、NOAA 极轨卫星) 反演雾, 通过中国气象局广播系统 (CMACAST) 分发雾卫星监测产品, 各级台站都能实时接收到这些产品。

海洋雾的监测主要依靠气象卫星。由于雾的高度接近或贴近地面, 所以它们的温度和周围环境场的温度十分接近, 在红外卫星云图中很难被识别, 而在可见光云图上由于其反照率与周围环境场存在较大的差别, 雾区较容易辨认, 但是无法识别云下的海雾。20 世纪 90 年代以来, 通过卫星观测定量反演雾形态以及水平能见度的工作逐步开展, Minnis 等^[34]提出了使用光学厚度定量反演雾顶高度的经验方法。Heidinger 等^[35]对此方法进行了修正。Bendix^[36]和 Bendix 等^[37]使用可见光反照率资料建立了反演光学厚度的方法。朱小祥等^[38]采用 F1-D 多通道综合判别海雾, 能够确定图像上每个像素点上是否有雾, 监测产品的空间分辨率可达 $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ 。但是, 当上空有云层覆盖时, 无法识别云层覆盖下的近海面的雾。

3.2.2 雾的临近预报

以往对浓雾的形成,尤其是低能见度浓雾的形成,由于缺少观测资料,很难做到“定时”。只能在有利于形成雾的天气背景下,从经验和成雾要素指标分析,预报“凌晨”或“下半夜起”有无浓雾(仅指能见度小于1000m),不可能预报浓雾的起始时间和变化。有了每分钟的能见度观测资料,我们对浓雾形成的突发性以及波动性有了新的认识。冯民学等^[5]根据高速公路气象监测站的连续自动监测资料指出:水平能见度的变化并不是一个渐变的过程,监测到的能见度从1000m以上降至100 m以下,一般为25~30min,但有时只有5~10min。能见度的演变也不一定是稳定下降或稳定上升,而可能是反复在1~2km和100~200m波动,这种波动时段少则40min~1h,最长一次达165min。可以根据环境温、湿度条件和雾的波动特征做出雾的临近预报。但是,以上雾的变化特征与局地环境关系很大,需要逐地进行分析。

李永平等^[39]将气象卫星云图雾监测和中尺度数值预报产品相结合制作大雾临近预报,其基本思路是:应用云雾光谱特征和结构特征进行雾区的动态检测和提取,利用地面自动气象站资料,分析雾区变化与多气象要素的关系,然后利用经修正的中尺度数值天气预报模式输出的气象要素产品,对卫星遥感雾区进行0~2h预报,对2009和2010年1—4月的多雾季节的大雾过程应用统计结果表明,该方法对大雾临近预报具有一定的效果。

3.3 雾短期预报

目前雾短期预报有统计预报、数值预报和预报员在此基础上的业务预报三种。

3.3.1 统计预报

数值预报产品的统计释用方法在雾预报业务中得到广泛应用。王在文等^[14]发展了基于SVM的雾精细化预报方法。在MM5 V3模式3km预报范围内,选取预报站点(北京市五元桥)周围4个网格点上975, 925, 850, 500和200hPa的 u , v , T , H , RH , CLW (云水)以及 $PSEA$, $RT(RC+RNC)$ 共128个数值天气预报因子,以及预报当天预报初始时刻的10m风向和风速、24h累计降水、本站气压、3h变压和总云量共6个实况因子,经归一化处理后的因子值形成符合SVM方法所需要的固定样本集(2006年春季182个理想样本),对3~48h各预报时次(3, 6, 9, 12, ..., 48h)进行建模,用2007年春季五元桥能见度观测资料进行预报检验,40%的大气能见度等级预报与观测一致,90%以上预报的等级偏差在一级之内(含等级

相同),在未来3~48h各种预报时效,大气能见度等级预报效果稳定。

3.3.2 数值预报

我国在2000年以后开始较多地使用中尺度模式进行雾的模拟研究^[40-43],取得了许多成果,认为好的中尺度数值模式(例如WRF)可以较好模拟雾的生成条件,但也存在不少问题,并揭示出模式物理过程和初始资料对雾预报的敏感性。但是,目前业务数值预报模式的直接输出产品中都没有雾的产品,提供业务使用的雾客观预报产品都是数值天气预报解释应用产品。虽然中国气象科学研究所的CUACE模式、北京市气象局的BREMPS模式、广东省气象局的CMAQ模式和上海市气象局的大气化学模式都在业务运行,并根据气象能见度距离与消光系数反比关系(Koschmieder能见度公式)和模式预报的气溶胶的质量浓度,预报能见度,但是并非真正的雾预报。

我国对海雾的数值模拟开展较晚^[44-50],主要使用区域模式(如MM5、RAMS、COAMPS、WRF和GRAPES等)对雾的三维结构以及雾对能见度的影响进行了一系列研究,并对其机制进行了探讨。但是,对各种物理因素,如平流、辐射、湍流和SST等如何相互作用,如何影响海雾的水平和垂直发展,以及海雾和陆地辐射雾相比有什么异同,不同海雾之间的异同,仍然缺乏深入和全面的认识。

国家气象中心基于PSU/NCAR的WRF模式2.2版本,优选模式微物理过程和边界层方案,采用Stoelinga能见度计算方程^[51],建立了黄渤海海雾数值预报系统^[52]。选取2007年3—6月的海上大雾(能见度小于1km)进行数值预报回算试验,利用沿海站点能见度的大雾观测资料进行点对点检验(数值预报的格点能见度预报用双线性内插法内插到沿海站点上),正确率达到80%,说明此海雾数值预报系统对海上大雾有较好的预报能力。

3.3.3 业务预报

预报员的雾预报思路主要采取从大(天气背景场)到小(所在地域范围),从远到近的跟踪判断预报法。短期雾预报既有落区预报也有单点(例如机场)预报,雾的临近预报业务主要在机场、高速公路和大城市开展。

目前国家气象中心每日08和20时提供2次24h全国雾的落区预报。省和省以下业务单位在上级指导产品的基础上,制作辖区内短期雾的预报产品。雾短期预报流程:预报员分析实时能见度观测资料、成雾的天气形势和数值预报解释应用产品→分析数值预报产品

中有关雾生成的气象要素误差并订正之→做出雾的落区预报。

雾临近预报只在省级及以下业务单位开展。雾临近预报流程：分析跟踪每小时卫星云图→根据自动监测系统的能见度、温湿度和风向风速的演变规律→做出浓雾变化的临近预报。

3.4 高速公路雾监测预警服务系统

21世纪,我国已经在多条高速公路上建立了雾监测预警系统^[4, 28-29],而且已经成为雾业务预报的重要组成部分,为高速公路的管理、减少交通事故发挥了重要作用。高速公路雾监测预警服务系统主要由环境气象自动监测系统、通信传输系统、雾预报系统、运营决策管理支持系统和信息发布系统等组成。

高速公路自动环境气象监测系统按3.2节指出的布局原则建设能见度、温度、湿度和风等观测设备,实现每分钟雾的监测。各类环境气象要素监测资料利用公网的GPRS(通用分组无线业务)及时传送到监控中心。根据3.1节获得的知识,利用现代化气象装备(气象卫星云图、气象雷达、各类气象地面及探空观测站、高速公路沿线布设的环境气象监测站)和气象信息综合分析处理系统(MICAPS),建立高速公路低能见度监测预警、预报模型。在沪宁高速公路的雾季,每年10月一次年4月,监测预报人员实行24h值班,如判断午夜后有小于500m的大雾,即在22时发布第一次预警。以后提前1h预测能见度小于200m出现的大致时间,当能见度小于200m时,判断未来能见度变化趋势(维持、加浓、减弱、消散),做出浓雾变化的临近预报,特别是提前预测能见度大于200m的浓雾消散时段,以便及时恢复公路的正常运行,发挥最大的社会效益。高速公路运营管理决策支持系统包括高速公路沿线布设的环境气象监测站的实时监测信息、全省和全国的各类气象信息、高速公路低能见度预报系统制作的预警和预报产品、高速公路路况信息以及交通运营管理规则等。本系统是实现智能交通管理的一个重要子系统,目的是为高速公路提供气象保障信息,并结合公路运营规则,供指挥调度人员制定运营决策提供依据,实现高速公路的科学安全运行。

4 展望

进入21世纪,雾的监测和预报虽然取得了较大进展,但是对雾的时间、空间和量级精细化预报能力和准确率仍然不足,与保障交通安全和提高效益的需求存在明显差距。

由于雾发生、发展过程的复杂性,对不同时间和

空间尺度上雾过程的不完全理解,仍存在不少认识上的必然王国,是制约雾准确预报的重要因素。尽管一维雾模式具有详细的雾物理过程,其与中尺度数值模式的耦合在一定程度上提高了雾的预报能力,在雾的定量预报中已经展示出一定的优势^[53-54]。然而,一维雾模式动力方面明显不足,它需要非常准确的初始和边界条件。在实际应用中常与三维中尺度模式配合,由中尺度模式提供这些条件。三维雾模式也只是为研究雾而设计的,没有考虑大尺度环境因素对雾的生成和消散的影响,因此只有研究价值。目前通常还是用常规的三维中尺度模式来进行雾的模拟和预报。常用的中尺度模式有目前流行的WRF模式和我国自主研发的GRAPES-meso模式。目前中尺度业务模式的地面温、湿度都存在偏差(Bias),在很多情况下雾不能从中尺度模式中产生。这时怎样预报雾,对不完美的中尺度业务模式来说是一种挑战。Zhou等^[55]用“Rule-based”的方法在模式后处理器中进行雾的再诊断是一种尝试。该方法尽管不能预报雾的强度,但对雾是否发生的预报比通常用的中尺度模式(如WRF)有明显的提高。

在中尺度数值模式中,有关雾的微物理过程、湍流过程、辐射过程、边界层结构等的合理描述,对雾的预报至关重要。例如,湍流和辐射过程对雾的形成、发展和消亡具有非常重要的影响,但这些过程具有很大的不确定性,由于模式物理参数化过程的不确定性,模拟有时会得到与观测完全相反的结果^[53]。因此,要更好地进行物理参数化,发展精细化的数值预报系统,需要不同条件下大雾的细致观测,需要加强关于湍流作用、大气与复杂下垫面相互作用的基础研究。

初始条件的准确性在很大程度上会影响模式的预报效果^[54, 56],提高模式初始条件的质量对于准确预报雾的形成和演变具有重要的意义。资料同化技术的研究和新数据源的应用可以提供更好的初始条件,从而使雾的预报更准确。但是,关于雾的资料同化研究还非常少。Wang等^[57],应用三维资料同化方法利用从多功能传输卫星(MTSAT)的红外和可见云图反演得到的相对湿度分布对WRF模式的初始场进行订正,表明可以改善黄海海雾的临近预报。随着观测资料的不断丰富,采用先进的资料同化技术获得精确的模式初值将是雾预报中一项迫切任务。

由于雾的数值预报对初值和物理过程都很敏感,因此,发展多初值和多物理过程的雾的集合预报系统很有必要^[55, 58]。Zhou等^[55]的研究表明集合预报技术的应用对雾的可预报性确实有明显的提高。

即使未来建立了包含先进资料同化系统的高分辨率区域模式,但是数值预报误差仍然存在,因此仍然需要发展数值预报产品解释应用技术和集合预报系统。与此同时,预报员的经验在提高大雾这种灾害性天气的预报准确率方面仍然有用武之地。

参考文献

- [1] 吴洪,柳崇健,邵洁,等.北京地区大雾形成的分析和预报.应用气象学报,2000,11(1):123-127.
- [2] 毛冬艳,杨贵名.华北平原雾发生的气象条件.气象,2006,32(1):78-83.
- [3] 张德山,魏建明,陈廷良,等.首都机场高速公路能见度预报方法.气象科技,2002(6):358-361.
- [4] 田小毅,吴建军,严明良,等.高速公路低能见度浓雾监测预报中的几点新进展.气象科学,2009,29(3):414-420.
- [5] 冯民学,顾松山,卞光辉.高速公路浓雾监测预警系统.中国公路学报,2004,17(3):92-97.
- [6] 王彬华.海雾.北京:海洋出版社,1983.
- [7] 赵玉广,李江波,康锡言.用PP方法做河北省雾的分县预报.气象,2004,30(6):43-47.
- [8] 孔璐,刘承光.气象数据管理与共享技术研究//第七届长三角科技论坛能源分论坛——长三角气象科技论坛论文集,2010:405-408.
- [9] 郭秀英,糜若夫.华南沿海春季海雾与天气型关系的统计分析及其预报.广东气象,1991,13(1):25-27.
- [10] 胡基福,郭可彩,鄢利农.应用模式输出统计作海雾出现判别预报.青岛海洋大学学报,1996(4):53-59.
- [11] 李法然,周之栩,陈卫锋,等.湖州市大雾天气的成因分析及预报研究.应用气象学报,2005,16(6):794-803.
- [12] 黄辉军,黄健,刘春霞,等.用GRAPES模式输出变量因子作广东沿海海雾预报.热带气象学报,2010,26(1):31-39.
- [13] 贺皓,姜创业,徐旭然.利用MM5模式输出产品制作雾的客观预报.气象,2002,28(9):41-43.
- [14] 王在文,张朝林,苏晨,等.基于非线性支持向量机的大气能见度等级预报方法研究//能见度预报经验交流研讨会暨青年科技工作者论坛.2009.
- [15] 贺皓,罗慧.基于支持向量机模式识别的大雾预报方法.气象科技,2009,37(2):149-151.
- [16] 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.
- [17] 王雷,黄培强.利用人工神经网络预报芜湖的雾.气象科学,2001,21(2):200-205.
- [18] 袁志康,张韧,周树道,等.基于神经网络算法的某机场雾的模式识别预报.解放军理工大学学报(自然科学版),2002,3(4):82-86.
- [19] 王彦磊,曹炳伟,黄兵,等.基于神经网络的单站雾预报试验.应用气象学报,2010,21(1):110-114.
- [20] 周斌斌.辐射雾的数值模拟.气象学报,1987,45(1):21-29.
- [21] 尹球,许绍祖.辐射雾生消的数值研究(I):数值模式.气象学报,1993,51(3):351-360.
- [22] 尹球,许绍祖.辐射雾生消的数值研究(II):生消机制.气象学报,1994,52(1):60-67.
- [23] 李子华.中国近40年来雾的研究.气象学报,2001,39(5):616-624.
- [24] 张利娜,张朝林,王必正,等.北京高速公路大气能见度演变特征及其物理分析.大气科学,2008,32(6):1229-1240.
- [25] 吴兑,邓雪娇,游积平,等.南岭山地高速公路雾区能见度预报系统.热带气象学报,2006,22(5):417-422.
- [26] 施晓晖,徐祥德.北京及周边气溶胶区域影响与大雾相关特征的研究进展.地球物理学报,2012,55(10):3230-3239.
- [27] 石春娥,姚克亚,马力.气溶胶粒子对城市雾影响的模拟研究.气候与环境研究,2001,6(4):485-492.
- [28] 张金满,赵娜,马翠平等.基于GIS技术的智能化交通气象服务系统的开发研制.山东气象,2014,34(1):68-73.
- [29] 黎颖智,邓英姿,刘世学,等.广西高速公路雾预报系统设计与实现.气象研究与应用,2013,34(3):43-46.
- [30] 李亚春,孙涵,徐萌.卫星遥感在大雾生消动态监测中的应用.灾害学,2001,16(1):45-49.
- [31] 张顺谦,杨秀蓉.基于神经网络和分形纹理的夜间浓雾遥感监测技术.应用气象学报,2005,16(6):804-810.
- [32] 樊建勇,黄玲,祝必琴,等.NOAA/AVHRR遥感数据在夜间雾监测中的应用.江西农业大学学报,2011,33(1):189-193.
- [33] 周小珂,严卫,白衡,等.基于DMSP/OLS数据的夜间低云大雾监测技术研究.遥感信息,2012,27(6):86-90.
- [34] Minnis P, Heck P W, Young D F, et al. Stratocumulus cloud properties derived from simultaneous satellite and island-based instrumentation during FIRE. J Appl Meteor, 1992, 31(4): 317-339.
- [35] Heidinger A K, Stephens G L. Molecular line absorption in a scattering atmosphere. Part II: Application to remote sensing in the O2 A band. J Atmos Sci, 2000, 57(10):1615-1634.
- [36] Bendix J. A case study on the determination of fog optical depth and liquid water path using AVHRR data and relations to fog liquid water content and horizontal visibility. Int J Remote Sens, 1995, 16(3): 515-530.
- [37] Bendix J, Thies B, Cermak J, et al. Ground fog detection from space based on MODIS daytime data—a feasibility study. Wea Forecasting, 2005, 20(6): 989-1005.
- [38] 朱小祥,吴晓京,李三妹.海雾判别条件.中国气象局海洋气象预报警项目技术报告.北京:国家卫星气象中心,2007.
- [39] 李永平,刘晓波,葛伟强,等.一种基于卫星遥感和数值预报产品的雾预报方法.应用气象学报,2012,23(3):340-347.
- [40] 董剑希,雷恒池,胡朝霞,等.北京及其周边地区一次大雾的数值模拟及诊断分析.气候与环境研究,2006,11(2):175-184.
- [41] 梁爱民,张庆红,刘开宇,等.华北地区一次大雾过程的三维变分同化试验.气象学报,2007,65(5):792-804.
- [42] 梁爱民,张庆红,刘开宇,等.华北地区一次大雾过程的三维变分同化试验.气象学报,2007,65(5):792-804.
- [43] 刘汉卫,潘晓滨,臧增亮,等.华东地区一次辐射雾的数值模拟分析.干旱气象,2011,29(2):174-181.
- [44] 傅刚,张涛,周文琇.一次黄淮海雾的三维数值模拟研究.青岛海洋大学学报(自然科学版),2002,32(6):859-867.
- [45] 傅刚,王菁茜,张美根,等.一次黄淮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.
- [46] 胡瑞金,董克慧,周发琇.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.
- [47] Fu G, Guo J, Xie S P, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea. Atmospheric Research, 2006, 81(4): 293-303.
- [48] Fu G, Guo J, Angeline P, et al. An Analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Sea. J Ocean Univ Chin, 2008,7(1):27-34.
- [49] Gao S, 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.
- [50] Gao S, Wei W U, Zhu L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huanghai Sea using MTSAT-1R IRdata. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 28(2):23-35.
- [51] 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.
- [52] 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.
- [53] Gulpepe I. Fog and boundary layer clouds: introduction. Pure Appl Geophys, 2007, 164(6/7):1115-1116.
- [54] Stolaki S, Pytharoulis I, Karacostas T. A study of fog characteristics using a coupled WRF-COBELOver Thessaloniki Airport, Greece. Pure Appl Geophys, 2012(5): 961-981.
- [55] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Wea Forecasting, 2010, 25(1): 303-322.
- [56] Shi C E, Wang L, Zhang H, et al. Fog simulations based on multi-model system: a feasibility study. Pure Appl Geophys, 2012,169(5/6): 941-960.
- [57] Wang Y, Gao S, Fu G, et al. Assimilating MTSAT-derived humidity in now-forecasting sea fog over the Yellow Sea. Wea Forecasting, 2014, 29(2): 205-225.
- [58] Niu S J, Lu C S, Yu H Y, et al. Fog research in China: an overview. Adv Atmos Sci, 2010, 27(3): 639-662.