文章编号:1674-7070(2014)01-0074-08



冯蕾[1]　田华[1]

# 国内外雾预报技术研究进展

**摘要**

大雾是引起低能见度的主要天气现象.提高雾的预报技术水平是确保交通安全的重要措施.从统计和数值预报两个方面,回顾了过去几十年来国内外在雾预报技术上的主要研究进展,并总结了各种方法的特点及存在的缺陷.在某些情形下,新统计方法的应用提高了雾的预报准确率,但仍然无法摆脱统计方法本身的缺陷.相比较而言,数值模式在大雾预报方面具有更广泛的应用和更大的潜力.在目前的计算机水平下,使用高分辨率的一维雾模式与中尺度天气模式相结合的方法,在一定程度上可以提高雾的预报准确率,该方法在大雾易发区的机场及高速公路沿线具有重要的应用价值.随着计算机能力的不断提高,包含大雾形成和演变的各种复杂过程、具有先进资料同化过程的高分辨率三维雾模式,以及集合数值预报系统将是未来的发展方向.

**关键词**

雾;统计预报;数值预报;多模式耦合;高分辨率模式;集合预报

**中图分类号** P456.7;P456.8

**文献标志码** A

**收稿日期** 2012-12-17

**资助项目** 国家自然科学基金(41205045);公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306043,GYHY201306058)

**作者简介**

冯蕾,女,博士,工程师,主要从事交通气象研究.fenglei21cn@163.com

1　中国气象局公共气象服务中心,北京,100081

## 0　引言

能见度是影响道路交通安全的重要因素.随着国民经济的快速发展和现代交通工具的日益普及,高速公路、高速铁路、机场、航道等对能见度的依赖日益突出,低能见度引起的恶性交通事故、飞机延误、撞船事件等更加频繁和严重.其中,受到广泛关注的是与雾有关的大气能见度的影响.张丽娜等[1]的研究表明,200 m 以下的低能见度基本上是在湿度为 100% 的情况下发生的,即大雾影响的结果,200~1 000 m 的低能见度其间有一半是雾,而 1~4 km 的能见度不到三分之一是雾,主要是由灰霾、沙尘暴等天气现象造成.

提高雾的预报水平是确保交通安全的重要措施,然而,在各种天气状况的预报中,雾的预报难度依旧很大,雾的准确预报仍属于世界性难题.Zhou 等[2]针对雾分别进行单模式和多模式的集合预报与验证,发现其预报水平远低于用同一模式系统开展暴雨的预报水平,因此,雾的预报还存在很大的提升空间.在业务应用中,雾的预报更是面临着更多困境,基本不可能提前几天预报,一般都是临近时才能进行预报与预警.

近 20 年来,欧美等发达国家率先启动雾的大型预报专题研究项目,并用于业务实践.如欧洲最大的科研计划——欧共体框架计划下属的欧洲科学和技术研究领域合作计划(COST 计划)在 1994—1999 年启动了“临近预报技术研究”(COST-78 项目),其中第二专题即为“雾和低云”,主要进行外场观测、一维模式的预报业务化和雾的统计预报方法研究.作为 COST-78 项目的延续和深入,欧盟 14 个成员国和加拿大于 2001 年再次专门针对雾的预报问题启动“雾、能见度和低云短期预报方法研究”(COST-722 项目),项目从资料、数值预报、统计预报、现有预报系统业务试用和性能评估、专业服务技术等多个方面开展了大规模合作研究[3].我国也针对一些浓雾易发地区展开能见度预报技术研究,如在观测和研究的基础上,采用数值模式释用方法、结构预测、天气学和动态统计方法,建立起南岭山地高速公路雾区能见度预测预报系统;围绕华北浓雾的可预报性以及相关的资料同化和适应性观测问题展开研究,并建立适用于华北浓雾区的数值预报模式.

本文主要从统计和数值模式两方面,重点回顾了国内外最近几十年在雾的预报技术方面取得的科研成果以及业务预报现状,并对

存在的问题进行适当的评述,从而为未来的大雾预报工作提供一定的参考和启示.

## 1 统计预报

运用统计或经验的方法预报雾和低层云的发生可以追溯到现代计算机技术、以先进的统计学为基础的计算及相关软件普及以前.最初,统计预报指的是传统的数据拟合方法,能见度预报中主要用线性回归和逻辑回归等方法.随着现代计算机技术的发展,一些新的统计方法逐渐应用于能见度预报中,其中包含了更多的处理不确定性的程序.

人工神经网络是一种能够通过多种情形(数据集)建立自变量(预报因子)与因变量(预报量)之间关系的经验统计方法.预报量与预报因子之间关系的信息放置在一个有交互节点的网络里.目前,人工神经网络方法已广泛应用于大气科学中[4-5],其在能见度和大雾预报中的应用表明,神经网络方法具有较高的大雾预报能力[6-10].Marzban 等[11]比较了人工神经网络方法与线性和逻辑回归方法的优劣,发现前者可以产生更好的大雾和能见度预报效果.

模糊逻辑是一种处理系统中定性、不精确的模糊变量的方法.过去几年里,该方法较多地用于解决各种环境问题,但在天气预报中的应用有限.Sujitjorn 等[12]和 Murtha[13]的研究证实了用模糊逻辑法研究雾发生的适宜性.Petty 等[14]建立了一个分析预报云顶及能见度的模糊逻辑系统.Hansen[15]分析了这一预报系统在预报云顶和能见度中的应用,并得出模糊逻辑系统优于持续性预报的结论.

决策树是通过图示罗列解题的有关步骤以及各步骤发生条件与结果的一种方法.决策树在许多领域相当流行,并作为强大的预测工具.与神经网络相比,决策树代表了可理解规则的集合.虽然决策树在天气预报中具有潜在的吸引力,然而应用的实例很少.Colquhoun[16]列举了几个在气象中应用的例子,文中所讨论问题的复杂性使得“规则”的决定相当复杂.也许由于这个原因,决策树在云顶和能见度的预报中应用非常有限,但 Wantuch[17]进行了一个成功的尝试.

综上所述,与传统统计方法相比,新统计方法的应用提高了雾的预报准确率,然而,这些新方法无法摆脱统计本身的缺陷,即缺乏对雾过程的物理规律的描述,且依赖于历史观测资料的质量和数量.另外,预报量与预报因子之间的经验统计关系未来可能发生改变.

利用统计模式预报雾的另一挑战是预报因子的选取.预报因子原则上要与预报量高度相关.实际处理中,有许多潜在的预报因子可以选择,远超过任何特定模式中适宜的预报因子.向前逐步筛选算法常常被用来挑选最好的预报因子.Robasky 等[18]最近总结了选择预报因子可能采取的客观步骤,包括寻找可能预报因子集的协同性,通过实施反复归零过程剔除最不重要的预报因子以确定最佳预报模型等.

## 2 数值预报

雾的形成和消散是各种微物理过程、热力及动力过程复杂相互作用的结果,仅用统计的资料分析方法研究雾是不够的.过去几十年有不少研究致力于数值预报,包括一维局地模式对小区域雾的预报,以及中尺度天气模式对大范围雾的预报.

### 2.1 一维模式

从计算成本来看,一维雾模式运行起来相对便宜,因此应用较为广泛.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,其他如水平平流或大尺度沉降等动力过程不考虑.国外围绕一维雾模式的建立和完善开展了大量的研究工作[19-28].国内针对雾模式的研究起步较晚.周斌斌[29]在 Brown 等[22]雾模式的基础上作了改进,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,主要分析了辐射雾的形成过程.尹球等[30]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.

为了检验不同模式对雾的预报能力,Bergot 等[31]用 6 个一维雾模式对一个典型的辐射雾个例和一个所谓近似雾(near-fog)个例进行模拟试验和比较研究,结果表明,大部分一维模式都能再现雾的生消过程,但结果比较分散.COST-722 计划中,许多不同的一维数值模式结果与观测的对比均表明,大多数一维雾模式并不能合理地预测大雾事件.

导致一维雾模式的不确定性有很多原因,重要的有:

1) 水平均一性假设不成立[32].一维模式中忽略热力学变量的水平梯度导致雾时间演变模拟的很大误差.一些研究者试图通过引进加入描述水平平流

过程的额外强迫项的诊断方程来消除这种误差[33],然而,由于一维模式中水平梯度没有充分考虑,这种处理方法可能有问题.

2) 模式中云不能正确地表达[32].辐射雾以夜间大气边界层底层辐射冷却为主要特征,而辐射冷却对云覆盖有很强的依赖性,并随云量的减少而增加.尽管永久性、完全云覆盖在辐射传输计算中有精确的计算,但是不完全云覆盖的情况不能有效处理.

3) 非均匀地表的水汽和热量通量不能充分处理[32].地表水汽和热量通量对于辐射雾的演变具有非常重要的作用,这些通量很依赖于地表植被、土壤类型、土壤湿度、土壤温度等特性.显然,在一维模式中,土壤特性是均匀的.模式中土壤和植被类型的不合理描述导致了雾结构的模拟误差.

4) 大气湍流没有很好地处理,特别是强稳定条件下[32].尽管数值模式已有很长的发展历史,但目前的模式还未能很好地模拟湍流过程.强大气稳定条件下更是如此,如辐射雾发生之前大气边界层底层逆温的演变.

### 2.2 三维模式

由于各种物理过程的复杂相互作用,需要精确的三维数值模式的发展.我国一些研究者发展了适用于不同地区的三维雾模式[34-36],这些模式在许多雾的模拟中已经取得了广泛的应用,并得到了许多重要的结论.然而,他们只是为研究雾而设计,没有考虑大尺度环境因素对雾的生成和消散的影响.

国外较早开始尝试采用三维中尺度天气预报模式对雾进行数值模拟研究[37-40].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,其中MM5模式使用频率最高,被应用于广东省南岭山区、广州、珠江三角洲、长江中下游、北京及周边、陕西西安等地区,并取得了许多成果[41-46].另外一些中尺度模式也逐渐应用于雾的研究中,如RAMS[47-49]和WRF模式[50].

COST-722计划实施了几种三维模式的比较,主要研究了雾的三维结构,并与观测进行了对比.结果表明,三维雾的模拟面临以下问题:

1) 模式分辨率,特别是大气低层的垂直分辨率必须足够高,要小于几米,以能够精确地处理近地面大气边界层物理过程的时间演变[32].比如,辐射雾模拟的必要条件是需要雾形成之前,地面以上10 m高度逆温层的演变,而中尺度天气模式通常分辨率不高.通过适当修改现有的天气预报模式可以获得确定的三维雾模式[51],但是修改分辨率后对模式的物理参数化方案有很大影响,如湍流、地表水汽和热量通量,这些参数反过来又会影响雾的演变.

2) 必须充分考虑土壤和植被的水平不均匀性[32].雾的不连续结构主要是由地表的不均匀性驱动的.因此,处理好模拟区域内土壤水分和植被的地理分布对于雾的合理模拟非常重要.

3) 雾的模拟对初始条件相当敏感[3,32].通常,模式要经过一定的初始化时间才能得到可靠的结果.COST-722中模式比较研究表明,有时雾的形成很依赖于模式初始化时间,比如,以00 UTC初始场驱动的雾模式与12 UTC初始场驱动的雾模式结果可能完全不同.

4) 模式结果的验证较困难[32].模式结果通常是网格点的,有一定的空间尺度,而观测的结果只是一个点.

### 2.3 一维模式与三维模式的耦合

最近越来越多的研究使用高分辨率的一维雾模式与三维中尺度天气预报模式的耦合技术来进行大雾预报(如图1和图2所示).这种方法在一定程度上集合了一维模式和三维模式的优点,同时克服了2种模式的缺陷.三维天气预报模式可以为局地一维雾模式提供大尺度的环流背景场,同时又可以发挥一维雾模式的高分辨率优势[31,53].Gultepe等[32]指出,在计算机水平有限的情况下提高雾的预报水平,需综合使用中尺度气象模式和一维雾模式,并结合多通道的遥感资料加以分析验证.

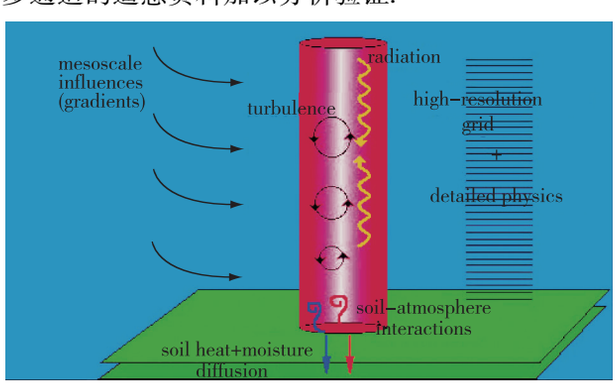



图1 一维雾模式的物理框架[52]

Fig. 1 Physical configuration of one dimensional fog model[52]

国外较早进行多模式耦合技术的尝试.Bergot等[53]应用三维数值预报模式(ALADIN)为一个一维雾模式(COBEL)提供初始条件,并同化实测资料以改进初始条件,对法国巴黎某国际大机场进行了5

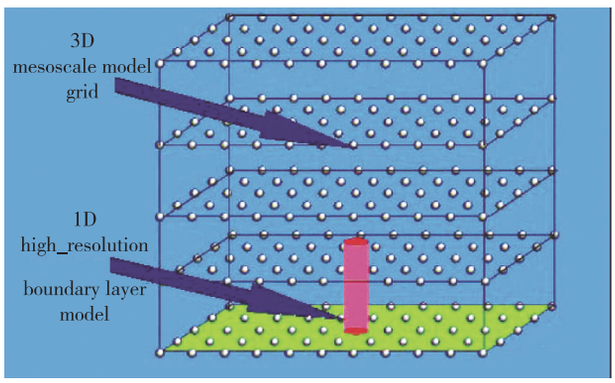



图 2 一维雾模式与三维中尺度天气模式的耦合示意[53]

Fig. 2 Coupling of one dimensional fog model and three dimensional weather forecasting model[53]

个月的预报试验,取得了较好的预报效果.Van Der Velde 等[54]基于中尺度气象模式和一维雾模式的试验结果认为,提高模式的垂直分辨率对改进雾的预报效果非常重要.Stolaki 等[55]将一维雾模式 COBEL-ISBA 与三维天气预报模式 WRF-ARW 进行嵌套,研究了希腊 Thessaloniki 机场 2008 年 1 月 20 日的大雾事件,结果相当成功,耦合后的 WRF-COBEL 系统比单独 WRF 模式能够更真实地再现雾的发生与消散.

由于我国探空点分布比较稀疏,而且探空时间固定在北京时间 08 时和 20 时,使得一维雾模式不能进行广泛的业务应用.使用中尺度模式提供初、边界条件驱动高分辨率的一维雾模式进行雾的预报不失为一种有效的选择.Shi 等[56]用 MM5 模式结果为一维雾模式(PAFOG)提供初、边值条件,对南京雾和南京信息工程大学校园的雾进行了逐日模拟,结果表明,MM5-PAFOG 耦合系统对辐射雾个例中雾的消散时间的预报优于单独 MM5 模式,同时,耦合系统的命中率也较高.

### 2.4 集合数值预报

由于初始条件及模式物理过程本身的不确定性,单个模式结果总存在不确定性.一种定量化模式预报不确定性的动力学方法就是集合预报.由于模式预报本身的不确定性和大雾预报对初始条件和物理方案的高度敏感性,很有必要将雾预报纳入集合预报的框架中.与单一模式预报相比,集合预报方法可以为最终用户提供更多的社会价值,特别是像雾这样低概率的重要事件.确切地说,与集合平均结果最接近的数值预报最有用.

最近,Muller 等[57]建立了一个观测数据同化系统,将 2 个一维模式与若干个三维模式耦合进行雾的集合概率预报.Roquelaure 等[58]运用一维局地模式集合对法国巴黎 Charles de Gaulle 国际机场进行大雾预报,展示出了令人振奋的结果.滕华超[3]利用中尺度模式 WRF 为一维辐射雾模式 PAFOG 提供扰动场,构建了一个有 30 个成员的辐射雾集合预报方案,对 2007 年 12 月 13 日至 14 日发生在江苏、安徽区域内的一次浓雾过程进行集合预报试验,结果表明,该方案在地面能见度及雾层垂直结构的预报好于由实际探空作为初始场的单一预报结果.

美国国家环境预报中心(NCEP)发展了一套基于多变量的诊断雾预报方法,并将该算法应用于基于多模式的全球中尺度短期集合预报系统(MEPS),结果表明,无论是确定性还是概率性预报,集合预报的结果都优于单一控制试验的预报结果[2].2008 年北京奥运会期间,由世界气象组织牵头实施的“WMO 2008 Beijing Olympic 研究与示范项目(WMO-B08RDP)”中,通过该集合预报系统对华北及周边地区的雾过程进行了短期预报试验.该试验是将成熟的集合预报技术应用于目前业务数值预报模式,以预测和系统评估雾这一重要但困难而复杂的低概率事件的第一次尝试[2].

## 3 业务预报现状

由于大雾预报的复杂性和有限的计算机能力,目前大雾的业务预报能力进展仍然很缓慢,雾还不是数值预报中心直接的模式指导产品.业务上常用的方法主要有天气学释用法和数值模式产品释用法.

天气学释用法是根据前期天气形势或利用数值模式提供的形势场预报结果,运用天气学基本原理和天气学分析方法,考虑天气系统与大雾发生之间的联系,根据预报员的经验对大雾进行预报.我国大多数气象台站对大雾的预报目前还主要采用天气学释用法,比较依赖于预报员的主观经验,预报的准确率和可靠性较低.

数值预报产品的统计释用方法在业务中应用也比较广泛.传统统计方法中,建立诊断关系仅用可以得到的观测数据.随着数值预报模式的发展,逐渐在能见度的预报中引入模式输出产品.Klein 等[59]提出完美响应方法(perfect prog method).这种方法中,统计模型的建立是使用历史资料,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(假定预报是完美的,因此得名).Glahn 等[60]提出了模式产品

输出法(model output statistics).这种预报系统的建立,预报因子来自数值预报产品、观测值以及气候数据.这种方法的优点在于,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,模式产品输出法可看作是通过对模式输出结果和观测值进行处理以最优化统计预报系统的过程.

结合统计的数值模式产品释用方法的缺陷在于,需要长期的、稳定的历史数据用于建模,然而数值预报中心的模式时常更新或升级.由数值模式输出变量进行雾诊断非常依赖于当地预报员的经验,因此,雾的业务预报仍然是一个富有挑战性的难题.

## 4 结语

本文重点回顾了过去几十年来,国内外研究者在雾预报技术领域(包括统计预报和数值预报)所进行的探索.研究者尝试使用更先进的统计学方法进行大雾预报,如人工神经网络等,并取得了一些进步.不过,随着计算机技术的进步,以及对雾的宏观、微观结构和发生、发展规律的深入理解,数值模式逐渐成为大雾预报的重要工具和主流方法[61].

在数值模式中,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.尽管已经开展了大量的研究工作,对不同时间和空间尺度上雾过程的不完全理解仍是制约雾准确预报的重要因素[32].比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.在早期的数值模式中,湍流交换系数常常采用常量处理,或仅仅是高度的函数.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.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广泛观测,需要加强关于湍流作用、大气与复杂下垫面相互作用(特别是夜间边界层稳定层结下)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[3,55-56].COBEL 模式中,6 km 高度处 1 ℃的升温将抑制雾的发展,而 1 ℃的降温足以导致白天浓雾的形成;0.5~1 g·kg$^{-1}$的增湿将导致雾比实际开始时间早很多,并模拟出低层云的形成[55].PAFOG 模式结果对 MM5 模式中云量的输入相当敏感[56].从这个方面讲,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.资料同化技术的新研究和新数据源(如卫星监测)的应用可以提供更好的初始条件,从而使得雾的预报更准确.而对于大雾这种局地性较强的天气现象,资料同化的研究还非常少.少数研究者尝试在典型大雾预报中同化高空探空资料以及民用航空飞行器气象探测资料,取得了一些初步的成果[62-63].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大雾预报中一项迫切任务.

在现有的计算机水平下,一维雾模式与三维中尺度模式的耦合在雾的定量预报中已经展示出一定的优势[55-56].在浓雾易发生的机场以及高速公路沿线,运用该方法可以提高雾的预报准确率.然而,尽管一维雾模式具有详细的雾物理过程,其与中尺度模式的结合在一定程度上提高了雾的预报能力,但它具有动力方面的明显不足,即使与中尺度模式结合,也很难完全克服存在的问题.因此,这只是一个过渡性方法,是计算机能力还不能满足的情况下出现的.从雾的数值预报方面来看,包含大雾形成和演变的各种复杂过程、具有先进资料同化过程的高分辨率三维雾模式,以及集合数值预报系统将是未来的发展方向[2,32,61].

## 参考文献

References

[1] 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[J].大气科学,2008,32(6):1229-1240
ZHANG Lina,ZHANG Chaolin,WANG Bizheng,et al.Evolution characteristics of atmospheric visibility in the Beijing expressway and the corresponding physical analysis[J].Chinese Journal of Atmospheric Sciences,2008,32(6):1229-1240

[2] Zhou B B,Du J.Fog prediction from a multi-model mesoscale ensemble prediction system[J].Weather and Forecasting,2010,25(1):303-322

[3] 滕华超.浓雾过程中尺度数值模拟及能见度集合预报个例研究[D].南京:南京信息工程大学大气物理学院,2011
TENG Huachao.Mesoscale numerical study of dense fog event and visibility ensemble forecasting:Case study[D].Nanjing: School of Atmospheric Physics, Nanjing University of Information Science & Technology,2011

[4] Hsieh W W,Tang B.Applying neural network models to prediction and data analysis in meteorology and oceanography[J].Bulletin of the American Meteorological Society,1998,79(9):1855-1870

[5] Michaelides S C,Tymvios F S,Kalogirou S.Artificial neural networks for meteorological variables pertained to energy and renewable energy applications[M]// Kalogirou S.Artificial Intelligence in Energy and Renew-

able Energy Systems. New York: Nova Science Publishers,Inc,2006

[6] Pasini A,Pelino V,Potesta S.A neural network model for visibility nowcasting from surface observations: Results and sensitivity to physical input variables[J].Journal of Geophysical Research,2001,106(D14):14951-14959

[7] Costa S B, Carvalho F O, Amorim R F C, et al. Fog forecast for the international airport of Maceio', Brazil using artificial neural network[C]//Proceedings of the 8th International Conference on Southern Hemisphere Meteorology Oceanography, Foz do Iguacu, Brazil, 2006, INPE:1741-1750

[8] Bremnes J B, Michaelides S C. Probabilistic visibility forecasting using neural networks[J].Pure and Applied Geophysics,2007,164(6/7):1365-1381

[9] 马学款,蔡芗宁,杨贵名,等.重庆市雾的天气特征分析及预报方法研究[C]//北京市气象台,北京气象学会.能见度预报方法及经验:能见度预报经验交流研讨会暨青年科技工作者论坛论文集.北京:气象出版社,2010
MA Xuekuan, CAI Xiangning, YANG Guiming, et al. Study on fog synoptic characteristics and fog forecast method in Chongqing [C] // Beijing Meteorological Station, Beijing Meteorological Society. Visibility Forecast Method and Experience. Beijing: China Meteorological Press,2010

[10] 包红军,陈辉,田华,等.京珠高速公路低能见度(雾)神经网络预测模型[C]//第28届中国气象学会年会,2011
BAO Hongjun, CHEN Hui, TIAN Hua, et al. Neural network prediction model for low visibility (fog) on Jingzhu expressway[C]//The 28th Conference of Chinese Meteorological Society,2011

[11] Marzban C, Leyton S, Colman B. Ceiling and visibility forecasting via neural nets[J].Weather and Forecasting, 2007,22(3):466-479

[12] Sujitjorn S,Sookjaras P,Wainikorn W.An expert system to forecast visibility in Don-Muang Air Force Base[C]// 1994 IEEE Inter Conf on Systems,Man and Cybernetics: Humans,Information and Technology,1994,3:2528-2531

[13] Murtha J.Applications of fuzzy logic in operational meteorology[C]//Scientific Services and Professional Development Newsletter, Canadian Forces Weather Service, 1995:42-54

[14] Petty K,Carmichael B,Wiener,G,et al.A fuzzy logic system for the analysis and prediction of cloud ceiling and visibility[C]//Preprints Ninth Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology, Orlando, Fl, Am Meteor Soc,2000:331-333

[15] Hansen B K.Analog forecasting of ceiling and visibility using fuzzy sets[C]//2nd Conference on Artificial Intelligence,American Meteorological Society,2000:1-7

[16] Colquhoun J R. A decision tree method for forecasting thunderstorms and tornadoes [J]. Weather and Forecasting,1987,2:337-345

[17] Wantuch F. Visibility and fog forecasting based on decision tree method[J].Idojaras,2001,105:29-38

[18] Robasky F M, Wilson F W. Statistical forecasting of ceiling for New York city airspace based on routine surface observations[C]//12th Conference on Aviation, Range,and Aerospace Meteorology,Atlanta,GA,Am Meteor Soc Atlanta,GA,2006

[19] Fisher,Caplan.An experiment in numerical predication of fog and stratus[J].Atmos Sci,1963:425-437

[20] Zdunkowski W, Nielsen B. A preliminary prediction analysis of radiation fog [J]. Pure and Applied Geophysics,1969,75(1):278-299

[21] Zdunkowski W G,Barr A E.A radiative-conductive model for the prediction of radiation fog[J]. Boundary-Layer Meteorology,1972,3(2):152-177

[22] Brown R,Roach W.The physics of radiation fog Ⅱ:A numerical study[J].Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society,1976,102(432):335-354

[23] Turton J,Brown R.A comparison of a numerical model of radiation fog with detailed observations [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1987, 113 (475):37-54

[24] Musson-Genon L.Numerical simulation of a fog event with a one dimensional boundary layer model [J]. Monthly Weather Review,1987,115(2):592-607

[25] Duynkerke P.Radiation fog:A comparison of model simulation with detailed observations [J]. Monthly Weather Review,1991,119(2):324-341

[26] Brown R.A numerical study of radiation fog with an explicit formulation of the microphysics [J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106 (450):781-802

[27] Bott A,Sievers U.A radiation fog model with a detailed treatment of the interaction between radiative transfer and fog microphysics[J]. Journal of Atmosphefic Sciences, 1990,47:2153-2166

[28] Bott A. On the influence of the physico-chemical properties of aerosols on the life cycle of radiation fogs [J].Boundary-Layer Meteorology,1991,56(1):1-31

[29] 周斌斌.辐射雾的数值模拟[J].气象学报,1987,45(1):21-29
ZHOU Binbin. The numerical modeling of radiation fog [J].Acta Meterologica Sinica,1987,45(1):21-29

[30] 尹球,许绍祖.辐射雾生消的数值研究(Ⅰ):数值模式[J].气象学报,1993,51(3):351-360
YIN Qiu,XU Shaozu.A numerical study on the formation and dissipation of radiation fog (Ⅰ): The numerical model of radiation fog[J]. Acta Meterologica Sinica, 1993,51(3):351-360

[31] Bergot T,Terradella,E,Cuxart J,et al.Intercomparison of single-column numerical models for the prediction of radiation fog[J].Journal of Applied Meteorology and Climatology,2007,46:504-521

[32] Gultepe I, Coauthors. Fog research: A review of past achievements and future perspectives [J]. Pure and Applied Geophysics,2007,164:1121-1159

[33] Teixeira J, Miranda P M A. Fog prediction at Lisbon airport using a one-dimensional boundary layer model [J].Meteorological Applications,2001,8:497-505

[34] SHI Chun'e, SUN Xuejun, YANG Jun, et al. 3D model study on fog over complex Terrain-Part I: Numerical

study[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1996, 10(4): 493-506
[35] LI Zihua,SHI Chun'e,LU Taoshi.3D model study on fog over complex Terrain-Part II: Numerical experiment[J]. Acta Meteorologica Sinica,1997,11(1):88-94
[36] 傅刚,张涛,周发.一次黄海海雾的三维数值模拟研究[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2002,32(6):859-867
FU Gang,ZHANG Tao,ZHOU Fa.Three-dimensional numerical simulation of real sea fog event over the Yellow Sea[J].Periodical of Ocean University of China,2002,32(6):859-867
[37] Ballard S,Golding B,Smith R.Mesoscale model experimental forecasts of the Haar of northeast Scotland[J]. Monthly Weather Review,1991,191:2107-2123
[38] Golding B W.A study of the influence of terrain on fog development[J]. Monthly Weather Review, 1993, 121: 2529-2541
[39] Nakanishi M.Large-eddy simulation of radiation fog[J]. Boundary-Layer Meteorology,2000,94:461-493
[40] Pagowski M,Gultepe I,King P.Analysis and modeling of an extremely dense fog event in southern Ontario[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2004, 43:3-16
[41] 樊琦,王安宇,范绍佳,等.珠江三角洲地区一次辐射雾的数值模拟研究[J].气象科学,24(1):1-8
FAN Qi, WANG Anyu, FAN Shaojia, et al. Numerical simulation study of a radiation fog in Pearl River Delta regions[J].Scientia Meteorologica Sinica,2004,24(1):1-8
[42] 石红艳,王洪芳,齐琳琳,等.长江中下游地区一次辐射雾的数值模拟[J].解放军理工大学学报:自然科学版,2005,6(4):404-408
SHI Hongyan, WANG Hongfang, QI Linlin, et al. Numerical simulation of radiation fog event in Yangtze River[J].Journal of PLA University of Science and Technology:Natural Science,2005,6(4):404-408
[43] 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[J].气候与环境研究,2006,11(2):175-184
DONG Jianxi,LEI Hengchi,HU Zhaoxia,et al.Numerical simulation and diagnosis of a dense fog in Beijing and its penumbra[J]. Climatic and Environmental Research, 2006,11(2):175-184
[44] 史月琴,邓雪娇,胡志晋,等.一次山地浓雾的三维数值研究[J].热带气象学报,2006,22(4):351-359
SHI Yueqin, DENG Xuejiao, HU Zhijin, et al. Three-dimensional numerical study on dense fog over mountain area[J].Journal of Tropical Meteorology,2006,22(4):351-359
[45] Gao S,Lin H,Shen B,et al.A heavy sea fog event over yellow sea in March 2005:Analysis and Numerical Modeling[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2007, 24(1):65-81
[46] 胡朝霞.降水性层状云系与雾的观测和数值模拟研究[D].北京:中国科学院大气物理研究所,2007
HU Zhaoxia.Observational analysis and numerical simulation of precipitation stratiform cloud and fog[D]. Beijing: Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences,2007
[47] 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[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2004,34(5):720-726
FU Gang,WANG Jingqian,ZHANG Meigen,et al.An observational and numerical study of a sea fog event over the Yellow Sea on 11 April,2004[J].Periodical of Ocean University of China,2004,34(5):720-726
[48] 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,2006,81:293-303
[49] Fu G,Guo J T,Pendergrass A,et al.An analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Seas[J].Journal of Ocean University of China, 2008,7(1):27-34
[50] 王佳.沪宁高速公路浓雾的数值模拟研究[D].南京:南京信息工程大学大气科学学院,2010
WANG Jia.Numerical simulation of fog in Shanghai-Nanjing expressway[D].Nanjing:School of Atmospheric Sciences,Nanjing University of Information Science & Technology,2010
[51] Müller M D.Numerical simulation of fog and radiation in complex terrain:Results from COST-722[D].University of Basel,2006
[52] Zwack,Tardif.The COBEL model and processing numerical model output for weather forecasting[C]//National Scale C & V Science Meeting,NCAR,2001
[53] Bergot T, Carrera D, Noilhan J, et al. Improved site-specific numerical prediction of fog and low clouds: A feasibility study[J].Weather and Forecasting,2005,20: 627-646
[54] Van Der Velde I R,Steeneveld G J,Wichers Schreur B G J,et al.Modeling and forecasting the onset and duration of severe radiation fog under frost conditions[J].Monthly Weather Review,2010,138(11):4237-4253
[55] Stolaki S,Pytharoulis I,Karacostas T.A study of fog characteristics using a coupled WRF-COBEL model over thessaloniki airport,Greece[J].Pure and Applied Geophysics,2012,169(5/6):961-981
[56] Shi C E,Wang L,Zhang H,et al.Fog simulations based on multi-model system:A feasibility study[J].Pure and Applied Geophysics,2012,169(5/6):941-960
[57] Muller M D,Schmutz C,Parlow E.A one-dimensional ensemble forecast and assimilation system for fog prediction[J]. Pure and Applied Geophysics, 2007, 164(6/7): 1241-1264
[58] Roquelaure S, Bergot T. A local ensemble prediction system for fog and low clouds: Construction, Bayesian model averaging calibration,and validation[J].Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2008, 47(12): 3072-3088
[59] Klein W H,Lewis B M,Enger I.Objective prediction of five-day mean temperatures during winter[J].Journal of Atmospheric Sciences,1959,16(6):672-682
[60] Glahn H R,Lowry D A.The use of model output statistics (MOS) in objective weather forecasting[J].Journal of Applied Meteorology,1972,11(8):1203-1211

[61] Niu S J,Lu C S,Yu H Y,et al.Fog research in China:An overview[J].Adv Atmos Sci,2010,27(3):639-662,doi:10.1007/s00376-009-8174-8
[62] 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[J].气象学报,2007,65(5):792-803
LIANG Aimin,ZHANG Qinghong,LIU Kaiyu,et al.3D variation data assimilation experiments on a dense fog event over north China[J].Acta Meterologica Sinica,2007,65(5):792-803
[63] 管琴.山西省高速公路大雾数值预报研究[D].南京:南京信息工程大学大气物理学院,2012
GUAN Qin.The numerical prediction system of the fog in Shanxi province[D].Nanjing:School of Atmospheric Physics,Nanjing University of Information Science & Technology,2012

# Progress in fog prediction

FENG Lei[1] TIAN Hua[1]
1 Public Meteorological Service Centre,China Meteorological Administration,Beijing 100081

**Abstract** Fog is the main cause of low visibility.Therefore,improving the accuracy of fog prediction is an important measure to increase transportation security.The main progress in fog prediction in recent decades is reviewed from statistical model and numerical simulation,and the advantages and disadvantages for each method are summarized.Under some conditions,the application of new statistical methods could improve the accuracy of fog forecasting.However,the statistical methods could not get rid of the inherent deficiencies of statistics.Comparatively,numerical modeling shows more extensive applications and more potential in fog prediction.Under the current computer condition,coupling of high-resolution one-dimensional fog model with three-dimensional mesoscale weather forecasting model shows better forecasting capacity,compared with the mesoscale model alone.The coupled method is much feasible for fog prediction in airport and along expressway,which are prone to heavy fog and the observations are already available.With the ever-increasing computing power,the high-resolution three dimensional models covering wide aspect of fog processes,as well as multi-model ensemble prediction system will be the future direction in accurate fog prediction.

**Key words** fog prediction; statistical technology; numerical prediction; multi-model coupling; high-resolution model; ensemble prediction