

中国海雾研究简要回顾

傅刚 李鹏远 张苏平 高山红
(中国海洋大学海洋与大气学院, 青岛 266100)

摘要: 海雾是指对海上船舶航行、捕捞、港口作业以及沿海地区的公路运输和电力输送等社会生活的方方面面产生重要影响的天气现象。有研究指出, 由于雾所造成的社会经济和人力资源的损失甚至与台风和龙卷风造成的损失相当。因此对近30a来我国海雾研究领域的重要进展进行了回顾, 并对海雾的微物理学特征、海雾与层云的关系、北太平洋与大西洋上海雾发生频率的气候学特征、海雾的数值模拟、海雾的数据同化和集合预报等重要问题进行了讨论。

关键词: 海雾, 中国沿海, 微物理学特征, 气候学特征, 数值模拟, 集合预报

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.002

A Brief Overview of the Sea Fog Study in China

Fu Gang, Li Pengyuan, Zhang Suping, Gao Shanhong

(College of Oceanic and Atmospheric Sciences, Ocean University of China, Qingdao 266100)

Abstract: Sea fog is one kind of severe weather phenomenon that exerts important influence on many aspects of social life, such as marine transportation, fishing, port operations, as well as the high-way transportation and the electric power transportation in coastal areas. Previous researches indicated that the financial and human losses related to fogs and low visibility became comparable to the losses resulted from other weather events, e.g., tornadoes or even hurricanes, in some situations. In this paper, some important progresses were reviewed on the sea fog study in China in recent 30 years. Also the authors paid much attention to discuss the following important issues on sea fog researches, i.e., the microphysics of sea fog, the relationship between sea fog and stratus, the sea fog occurrence frequency over the Northern Pacific and Northern Atlantic, the numerical simulation of sea fog, the data assimilation and ensemble forecasting of sea fog. This paper may provide useful information for those who want to know the latest progress of sea fog study in China.

Keywords: sea fog, China seas, microphysical characteristics of sea fog, climatology of sea fog, numerical modeling, ensemble prediction of sea fog

0 引言

海雾是受海洋的影响发生在海上或沿海地区低层大气中的凝结现象, 是悬浮于大气边界层大量水滴或冰晶使大气水平能见度小于1km的天气现象^[1]。

大量的研究表明, 我国黄渤海区域是世界上几个重要的海雾多发区之一^[1-10]。与海雾相伴随的大气低能见度会对海上航行的船舶安全带来很大危害。例如, 据舟山海事局统计, 近200次海上发生的船舶碰撞、触礁等海难事故中, 有70%左右主要是由海雾引起的。

海雾有不同的类型, 如平流雾、混合雾、辐射雾、地形雾等^[1]。中国海洋大学海洋气象系王彬华是国际上海雾研究的先驱者之一, 他从20世纪40年代开

始从事海雾资料的搜集和整理工作。在随后几十年的科研和教学工作中, 他把“海雾”作为海洋气象学课程的内容, 在1966年编纂成讲义。1983年出版了世界上第一部关于海雾研究的专著——《海雾》。该专著对海雾的生成及其分类、世界海雾的分布及变化、海雾发生时的水文气象条件、海雾的物理性质、海雾的预报方法等进行了全面系统的论述。此后该书于1985年由海洋出版社和Springer-Verlag出版集团联合在海外出版发行了英文版^[11]。

我国对海雾比较系统的研究可以追溯至20世纪60—70年代, 原山东海洋学院于1965—1966年和1971—1973年先后在黄海进行了海雾的专项调查, 取得了第一手海雾观测资料。1991—1995年, 中国科学院海洋研究所和原青岛海洋大学共同完成了“八五”国家科技攻关项目《黄东海海雾数值预报方法的研究》。该项目是继《海雾》专著出版以后, 我国首次对海雾进行比较系统全面的研究, 包括海雾过程中大

收稿日期: 2015年9月1日; 修回日期: 2015年10月20日

第一作者: 傅刚(1963—), Email: fugang@ouc.edu.cn

资助信息: 国家自然科学基金(41275049, 41305086, 41175006, 41576108, 41276009)

气和海洋环境背景场、海雾发生时海洋上大气边界层特征、海雾数值预报方法研究和海雾MOS (Model Output Statistics) 预报方法试验等内容。“十五”期间, 由于卫星遥感技术的快速发展, 以发展海雾遥感监测技术为目标的国家863项目“模块化全天候、灾害性海雾遥感监测技术”进行了以海雾光谱特性和纹理特征综合分析识别云雾的技术研究, 标志着我国海雾遥感监测研究新起点。

利用中国知网和其他手段的不完全统计表明, 2001—2015年6月共有49篇与雾研究有关的博士和硕士学位论文, 涉及的机构主要有: 中国气象科学研究院、南京大学、兰州大学、南京信息工程大学、大连海事大学、西安电子科技大学、中国海洋大学, 表明越来越多的年轻学者, 特别是研究生群体逐渐成为我国海雾研究的主力军。

在雾的研究方面, 一些高校的学者们做出了重要贡献。李子华等^[12]基于20世纪80年代末开始的在国内实施的几个大的雾研究计划的研究成果, 详细论述了重庆、西双版纳、南京等地的雾的物理化学特征和生消物理过程。牛生杰^[13]基于对长江三角洲地区雾、广东湛江海雾和南方过冷雾的研究, 介绍了有关中国雾物理化学过程宏观、微观特征的研究成果。Fu等^[8]对渤海、黄海和东海的海雾进行了系统研究, 分析了海雾发生和消散时的天气形势、探空资料、大气边界层结构、卫星图像特征、数值模拟与试验、海雾的季节变化特征、层云与海雾的关系等。

本文主要对近30a来我国海雾研究领域的一些进展进行简要综述, 并对以下问题重点进行讨论: 1) 海雾的微物理学特征研究; 2) 海雾与层云关系的研究; 3) 北太平洋和大西洋上海雾发生频率的气候学特征; 4) 海雾的数值模拟研究; 5) 海雾的数据同化和集合预报研究; 6) 未来海雾研究展望。张苏平等^[14]已从海雾的气候统计、海雾产生的水文气象条件、海雾天气型、大气边界层条件以及海雾年际变化的角度进行了综述。牛生杰等^[15]也对雾的宏微观结构与湍流、辐射、气溶胶相互作用, 以及雾水的化学组分开展了深入研究。因此, 本文不再赘述这两方面的相关内容。

1 中国沿海海雾的微物理特性的观测与分析

由于受观测与雾滴采样手段等的制约, 中国沿海海雾微物理结构的精细观测研究并不多见, 但这些观测资料对于海雾数值预报模式中关于雾的微物理过程的参数化研究是必不可少的。解决这类问题的办法有两种: 一种是在模式中借鉴别的海域已有的观测资料, 另一种是进行现场观测。在为数不多的关于中国

沿海海雾的观测研究文章中, 只找到有限几篇, 下面简要介绍在青岛^[16]、华南沿海^[17]和福建^[18]海雾过程的观测分析结果。

1.1 青岛海雾雾滴谱与含水量的观测与分析

1993年6月下旬至7月初是青岛的海雾多发时期, 徐静琦等利用北京大学原地球物理系大气物理教研室研发的“三用滴谱仪”在青岛市区东部近岸小麦岛(120°25'33"E, 36°3'11"N)上进行了海雾含水量及雾滴谱的观测^[16], 所用仪器的主要工作原理详见赵柏林等的工作^[19]。

小麦岛是位于青岛市东部的一个小岛, 观测是在小麦岛的邮电公寓的楼顶平台上进行的, 该平台距离海岸大约20m, 离海平面高度约15m。本次观测共获得可利用的雾滴谱资料9个, 雾水样品18个。从计算结果与观测值的对比可见, 在海雾的含水量大于0.002g/m³的情况下, 两者吻合程度较好。对于很稀薄的雾, 由于含水量测量不准, 大气能见度数值也较大, 目测误差较大, 所以两者吻合程度较差。另外观测到的海雾的含水量在0.002~0.2g/m³, 在这区间之外需要更多的观测数据来确定。

1.2 华南沿海海雾的微物理特性的观测与分析

2007年3—5月, 中国气象局广州热带海洋气象研究所在广东茂名博贺进行了为期3个月的海雾观测试验, 并且捕捉到2007年3月24—25日华南沿海发生的一次海雾过程。广东茂名博贺位于华南沿海的粤西地区, 是南海发生海雾的主要地区之一。2007年3月24日06时左右观测点的大气能见度下降, 海雾开始发生, 中午消散后傍晚又生成, 并持续到25日11时前后。海雾发生期间, 自动气象站、大气能见度仪、系留探空系统和“三用滴谱仪”等设备对大气能见度、大气边界层结构和雾滴谱等有关特征参量进行了观测。其中, 海雾滴谱分布特征和由雾滴谱数据推算含水量的计算依据的是王鹏飞等的方法^[20]。

此次海雾过程是由于大气低层西南低涡逐渐发展南下, 同时海上副热带高压加强西伸, 二者共同作用下偏南风加强, 使暖湿气流不断地输入到华南沿海地区形成的。来自海上的暖湿空气平流到沿岸水温较低的海面上形成的平流冷却雾。850hPa天气图显示粤西沿海地区位于大陆冷高压、副热带高压与西南低涡、东亚大槽组成的鞍型场中, 而鞍型场控制下的大气往往呈现稳定或中性层结^[1]。

粤西海雾的大气边界层垂直结构特征在冷平流海雾(海表面气温低于海表面水温)和暖平流海雾(海表面气温高于海表面水温)也有所不同, Huang等^[21]

分别针对这两类海雾的大气边界层特征进行了比较系统的分析，认为大气边界层结构的不同与背景环流、雾顶长波辐射和海气界面热量、动量通量有关。

1.3 福建海雾的观测和分析

Li等^[18]利用福建省北部距离海岸14km的崙山岛风塔上(26°57'N, 120°21'E)分别安装在海平面以上390、410、430和450m高度上四个超声风速仪的观测资料，对2011年3月21日02—11时的一次海雾事件进行了仔细分析。研究发现，大气湍流对雾的形成和消散起着至关重要的作用，然而这种湍流的研究通常仅限于超声风速仪低于地面100m以下的观测，较高层雾的湍流特性知之甚少。在该研究中，作者使用了高于海平面约400m的风塔上超声风速仪观测的四个高度层上的数据，并利用这些数据刻画了一次浓雾雾顶上的大气湍流特性，在海雾演变过程中湍流特性的巨大差异被记录下来。结果表明，在雾发生的初期，动能、动量通量以及湍流显热通量迅速增加，之后，在雾的上层可以观测到强的湍流，只要湍流强度不超过临界值，它对于提高冷却速度并保持雾是至关重要的。在雾的生成期间，由湍流所产生的垂直动量通量和感热通量会减弱风速并降低空气温度；在雾的消散阶段，感热通量的垂直分布会发生逆转，在上层会产生向下的动量通量；在雾发生期间，湍流涡的空间和时间尺度比雾发生前和发生后都大。相比低层的雾(390和410m)湍流能量在上层(海平面430和450m)最大，湍流能量的峰值沿平均风方向。研究结果表明，湍流状态在雾层内是复杂的，湍流会使得雾层顶部的动量和感热通量通过减少或增加平均风速，以及提高或降低空气温度的层结来影响雾。

1.4 各地雾的微物理结构特征比较

表1给出了浙江舟山、青岛小麦岛海雾以及云南勐养、重庆等地辐射雾的微物理结构特征对比结果。

表1 各地雾的微物理参量比较

Table 1 Comparison of the micro-physical parameters between different fog cases

观测地点	观测时间	平均数密度/ (个/cm ³)	算术平均直径/ μm	含水量/ (g/m ³)
广东博贺	2007年3月24—25日	56.3	5.20	0.041
青岛小麦岛	1993年6月29—30日	33.8	4.56	0.005
青岛小麦岛	1993年7月2日	143.2	4.45	0.080
浙江舟山	1985年4—5月	37.1	22.10	0.370
云南勐养	1997年11月2—29日	222.0	8.10	0.110
重庆	1989年1月至1990年1月	606.0	3.20	0.070

2 海雾与层云关系的研究

海雾可以看作是底部接海的云，因此海雾与层云

关系的研究受到了学者们的重视。利用观测资料和数值模式，Li等^[22]研究了2011年6月3日发生在黄海和东海的一个海雾与层云转化的事件，研究关注背景环流和“海洋锋”(即海表面温度锋)对层云转化为雾的影响，与高压天气系统相伴随的南风把水汽传送到黄海，为海雾/层云形成创造了有利条件，与高压天气系统相伴随的下沉气流在层云顶部形成一个逆温层，“海洋锋”在大气边界层内驱动一个次级环流，在“海洋锋”低温一侧的次级环流下沉分支会促使层云进一步降低高度到达海面。冷海面的冷却效应抵消了与下沉气流相伴随的非绝热增温。伴随着“海洋锋”逐渐变得平滑，次级环流会逐渐变弱并且海雾面积也迅速收缩。他们提出了一个黄海和东海的层云转化为海雾的概念模型。分析表明，在全球变暖的大背景下，伴随“海洋锋”逐渐平滑和次级环流下沉分支的逐渐变弱，海雾发生频率可能会逐渐变少。

张苏平等利用多种观测数据和数值模拟结果对2011年3月12—13日的一次黄海海雾过程进行分析^[23]。观测数据分析表明：此次过程与东海层云之间存在密切的联系。地面高低压位置为水汽从层云区向北输送提供了有利的环流条件；黄海上空天气尺度下沉运动，加强了海洋大气边界层(MABL)层结的稳定性，MABL顶自南向北高度降低，有利于水汽在向北输送过程中不断向海面聚集；下沉导致的干层以及逆温层对海雾的发生发展起重要作用。模式结果进一步表明，天气尺度下沉运动与MABL内的下沉在29°~30°N同位相叠加，使得该海区上空的下沉运动明显增强，大气边界层高度迅速下降。下沉可能会导致气块温度升高，云滴蒸发，来自层云区的水汽随流场向北向下输送逐渐接近冷海面凝结成雾，近海面水汽的平流输送使海雾进一步向北发展。

3 北太平洋和大西洋上海雾发生频率的气候学特征

北太平洋和大西洋上海雾发生频率的气候学特征受到海雾研究者的关注。宋亚娟利用ICOADS(International Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set)观测资料，对北太平洋以及东亚海域海雾的发生频率进行了分析，并对海雾发生时的多种气象要素特征进行了研究^[24]。在不同格距(北太平洋上格距为2°×2°，东亚海域为1°×1°)的网格上计算了网格内大气能见度低于1000m时的“海雾发生相对频率”，进而对研究海域内的海雾频率时空分布特征进行详尽的描述。利用1909—2008年共100a的资料对北太平洋上海雾发生频率的分析表明，海雾主要发生在中高纬

度海域,从北海道至千岛群岛并延伸到阿留申岛以南海面的带状海域是海雾的频发地带,海雾发生最高频率在40%以上,其次为中国近海和日本海海域。在低纬度海洋上海雾发生频率几乎为零。4—8月是北太平洋上海雾发生频率较高的季节,海雾发生频率大值区随季节变化而移动。中国的渤海、黄海、东海和南海均受到海雾影响,但海雾主要发生在黄海以及东海和渤海的部分海域。4—7月是海雾频发的季节,雾季中海雾频率逐渐增大,6月时黄海西北部即山东半岛以南海域海雾最大频率达到20%。进入8月后,整个海面上海雾发生频率突然降低到5%以下。从时空变化上来看,从南至北雾区有逐渐延迟的特点。

作者还对北太平洋和中国近海海域的若干条重要航线上的海雾发生频率的时空变化进行了分析,为海上航运提供安全保障信息。另外还使用1982—2008年的ICOADS资料,对海雾发生时的风向、风速、气温和露点温度差、气海温差等气象要素进行了分析。发现当海上大气能见度小于1000m时,千岛群岛以东海域和我国近海风向主要以南风为主,其次为东南风和西南风。大洋上风速在3~6级,黄海上风速略小,多数在3~5级。不论在哪个海域,海雾发生时气温接近于露点温度,甚至有部分低于露点温度,表明空气中湿度较大,水汽含量多。海气温差是影响海雾发生的重要物理因素。通过对27a上万次的海雾报告分析,给出了海雾过程中不同海域上气海温差的范围分布。研究表明,北太平洋千岛群岛以东海域上气海温差多在-1~3℃,中国近海海面上适合海雾发生发展的气海温差介于-1~2℃。

Zhang等^[25]的研究发现,7月北海道以东的中纬度西北太平洋海区(40°—50°N, 140°E—170°W)海雾频发的主要原因是西北太平洋副热带高压西侧偏南风将暖湿气流向北输运,越过黑潮延伸体迅速冷却的结果。当副热带高压位置偏东,大量暖湿气流向中纬度西北太平洋输送,同时该海区有高压脊加强导致边界层稳定性增强的年份,海雾偏多;反之,当副热带高压位置偏西偏南,中纬度西北太平洋低压槽加强的年份,海雾发生频率较少。在全球变暖的条件下,该海区海雾频率有下降的趋势。

王冠岚利用同样的资料和方法,分别对北太平洋和北美东海岸海雾发生频率的时空分布特征进行研究^[26],并对在海雾发生过程中起重要作用的各海洋与气象要素特征进行统计分析。作者也利用1909—2008年这100a的ICOADS资料分析了北大西洋海雾发生频率的分布特征,发现海雾主要发生在中高纬度海区,海雾发生频率西部高东部低。海雾频发区位于纽约

长岛至纽芬兰岛附近及以东海域,海雾发生最大频率超过30%。冰岛以东挪威海海域也常有海雾发生,低纬度海域几乎无海雾。北大西洋海雾主要发生在4—8月,7月为海雾鼎盛期。北美东海岸受海雾影响范围主要在纽约以北至拉布拉多海海域,雾区呈现折线形,海雾发生频率具有两个大值中心,分别位于新斯科舍省以南海域和纽芬兰岛以东海域,圣劳伦斯湾为海雾发生频率低值区。雾季为4—8月,其中6—7月为海雾频发期。还对北大西洋及北美东海岸5条重要航线(纽约—伦敦、迈阿密—伦敦、直布罗陀—纽约、迈阿密—波士顿、迈阿密—哈利法克斯)的海雾发生频率进行时空分析,对跨北大西洋两岸的航线进行不同路径对比分析,根据海雾发生频率高低选择合理路径,减小海雾影响。同时使用1982—2008年的ICOADS资料,对长岛至纽芬兰岛附近及以东海域和纽芬兰岛至大不列颠群岛附近海域两个区域海雾发生时的风向、风速、气温和露点温度差、海表面温度以及海气温差等海洋、气象要素的特征进行统计分析。海雾发生时,长岛至纽芬兰岛及以东海域主要风向为偏南风,风速为8m/s左右,风力以3~6级为主。海表面温度为5~15℃时为最适宜海雾的生成;当海表面温度大于25℃时,无海雾发生,空气温度与海表面温度差多在-1~3℃,气温高于海温的频率在55%~70%,表明海雾以平流冷却雾为主。冰岛至大不列颠群岛海域,海雾发生时的主要风向为偏南、偏东风,风速为7m/s,风力以3~5级为主。海表面温度为5~15℃时,最适宜海雾的生成;海表面温度大于20℃时,海雾不易发生,空气温度与海表面温度差以-1~2℃为主。

4 海雾的数值模拟研究

雾是发生在大气边界层内动力和热力过程十分复杂的一种天气现象,依赖常规观测资料研究雾的发生发展机制十分困难。随着计算机数值模拟技术的迅速发展,数值模式成为研究雾越来越重要的有力工具。伴随中尺度大气模式的发展,雾的数值模拟研究也经历了一维、二维到三维高分辨率区域模式研究的过程。

4.1 一维模拟

Fisher等^[27]首次利用一维数值模式对陆地辐射雾进行了模拟,虽然模式没有考虑辐射、液态水的蒸发等物理过程,但其证明了使用数值模拟方法对雾进行研究是可行的。Musson-Genon使用大气边界层一维模式模拟了1977年8月荷兰北部地区Cabawu一次辐射雾过程^[28],模式的物理过程考虑了长短波辐射以及次网格尺度的凝结过程。结果表明,湍流对雾形成与输送

起着重要的作用。Duykerke^[29]建立了一个一维模式研究辐射雾，对植被参数作了特别处理，该参数对气温，尤其是对地温有很大影响。该模式清楚地描述了湍流交换、长波辐射冷却以及在雾发展过程中的重力液滴所带来的影响。

20世纪80年代中期开始，我国学者逐渐使用一维模式对陆地辐射雾开展研究。周斌斌利用一维模式对辐射雾的形成和发展过程进行了数值模拟研究^[30]，模拟结果表明：辐射雾形成后会改变环境风、温度场，反之，风、温度场的改变又影响了辐射雾的发展；辐射雾的发展是在湍流场和辐射场的相互作用下引起的，湍流作用是决定辐射雾形成、发展的重要因子，它一方面阻碍了辐射雾的形成，另一方面它又能促进已形成的雾的发展。彭虎等使用包含详细微物理过程的一维辐射雾模式对发生在重庆的雾进行了模拟研究^[31]，模拟的温度场在低层与观测一致，模拟的雾与观测到的雾的发展趋势相符合。尹球等建立了包括辐射散射参数化方案并较完善地考虑碰并过程微物理方案的一维模式^[32-33]，利用数值模拟结果对陆地辐射雾的生消机制给出了清晰的物理图像。

4.2 二维模拟

由于一维模式存在较大的局限性，如果考虑平流和下垫面等因素的作用，就需要借助于二维模式进行研究。张利民等对重庆地区雾使用二维非定常模式进行了研究^[34]，考虑了长波辐射、地表热收支、雾水沉降和湍流的综合作用，这种模式突出了地形分布、水陆分布、城市热岛等因素在陆地雾形成时的作用以及对雾水平分布的影响。胡瑞金等建立了二维海雾数值模式^[35]，指出黄海、东海海雾生成的机制主要是长波辐射冷却，湍流混合主要发生在海雾的初始阶段，且限于低层。

胡瑞金等使用相对湿度方程和理想的二维数值模式研究了在海雾生成过程中平流、湍流和辐射的效应^[36]。结果表明，海雾生成的主要推动力是长波辐射冷却，湍流冷却在低层主要发生在平流的初始阶段。随着时间的推移，湍流对低层大气很快变为加热作用，不利于海雾的生成。湍流和辐射效应在低层大气中符号相反（仅在海雾生成的初始阶段符号相同）、量级相同，在高层大气中湍流和辐射效应符号相同，但辐射效应占优势。湍流效应和辐射效应是影响海雾生成的主要因素，平流直接作用似乎不大。这种研究方法同时突出了平流、湍流和辐射在海雾形成中的作用，较前人的研究有所进步。但对实际海雾的模拟必须依靠三维数值模式进行。

4.3 三维模拟

与研究其他的天气系统面临同样的问题，即模式的初始场对雾的模拟结果有重要影响。雾是发生在大气边界层内的现象，模式中的大气边界层方案对雾的模拟也是影响雾模拟结果的重要因素。目前比较成熟的几个中尺度数值模式，如MM5、RAMS、WRF和COAMPS等都具有较完善的大气边界层及辐射方案，逐渐成为各国学者研究雾/海雾的重要工具。中国学者开展海雾三维数值模拟研究工作大体可以分为两个阶段：初期的单纯数值模拟工作和后期的数值模拟与数值试验工作。

4.3.1 初期的数值模拟工作

初期的海雾三维数值模拟研究工作以“模拟的相”为主要目的。傅刚等较早地开展了海雾的三维数值模拟研究^[2]，他们利用一个考虑了地形效应、植被影响、长波辐射、地表能量收支、液态水的重力沉降等影响雾的形成和发展主要因子的三维海雾模式，模拟了1995年6月1日发生在黄海的一次实际海雾过程，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。结果表明模式的模拟结果在相当程度上反映了平流冷却雾的形成过程，且该模式能较好地模拟出黄海海域实际的海雾生消过程，对海雾的三维结构有一定的模拟能力。

每年春夏是黄海海域海雾频繁发生的季节，2004年4月11日早上，一次浓密的海雾事件出现在山东半岛周围，这片雾区的空间尺度为几百千米，持续了20多个小时，在一些地方大气水平能见度小于20m，引起了一系列的交通事故，在一条高速公路的沿海路段导致12人受伤。Fu等利用各种观测数据，包括GOES-9卫星图像资料、NCEP客观再分析FNL资料、探空资料以及RAMS-4.4区域大气模式来研究这次海雾个案^[37]；利用GOES-9和NOAA-14可见光卫星云图对海雾的发生范围、演变过程等进行了描述，并对海雾发生前的大气背景场和气海温差场进行了分析；利用青岛和韩国济州岛2个站的探空资料对海雾发生时低层大气的稳定度进行了分析；设计了4km×4km分辨率的RAMS数值模拟。该模式的初始场由FNL资料提供，并用该数据对模拟结果进行验证。从2004年4月10日18时（UTC）开始的积分30h的数值模拟抓住了此次海雾事件的主要特征，模拟的低大气水平能见度区域与从卫星云图所显示的海雾区域吻合得非常合理，平流冷却过程似乎对此次海雾的形成起重要作用。

4.3.2 数值模拟与数值试验工作

在三维海雾模拟能抓住海雾事件的主要特征的基

基础上,研究者开始考虑利用数值模式开展海雾的数值模拟与数值试验工作。樊琦等使用MM5模式对2002年8月21日珠江三角洲地区的辐射雾进行了模拟^[38],结果表明,地面长波辐射冷却是辐射雾形成的主要机制,而太阳短波辐射则是辐射雾消散的主要原因,如果关闭长波辐射,辐射雾就不能形成。如果关闭太阳短波辐射,辐射雾的消散就要推迟。增加模式的垂直分辨率对模拟雾的垂直结构有明显的改善。模式中的下垫面改变为比较真实的城市类型后,雾的消散时间变得与观测比较一致。

王菁茜对2005年3月27日黄渤海海上的一次海雾事件进行了数值模拟研究^[39]。利用GOES-9, MODIS, NOAA和FY-1D可见光卫星云图对海雾发生的范围、形态及变化进行了观测;利用NCEP提供的FNL资料,对海雾发生时的天气形势、气海温差和水汽的南北输送进行了分析;之后,利用RAMS数值模式对此次海雾事件进行了数值模拟,并计算了水平能见度。结果表明:大气能见度水平分布与卫星云图所显示的雾区分部吻合较好,但模拟得到的雾区较大,海雾的出现时间较实际观测出现时间延迟4h左右。大连站模拟大气能见度的变化与地面观测能见度值的变化趋势相一致,模拟大气能见度值显著偏小。此外根据模式结果分析了海表面温度与露点温度的关系,并由此设计了海温(SST)敏感试验。分别对海温进行升高2°C、升高2.5°C、降低3°C,以及将其替换为2m高度上的气温的试验。试验表明:适当升高海温有利于雾的发展,海雾的面积相对较大,垂直高度也较高。当海温升高2.5°C时无海雾生成,过度升高SST破坏了气海温差条件,使下垫面不能起到有效的冷却作用。较低的海温对海雾发展有抑制作用,不利于海雾的垂直发展,海雾消散时间也相对滞后。当用2m高度上的气温代替SST时没有海雾生成,表明海表面温度与低层大气之间存在一定的温度差是海雾生成的必要条件。

Gao等^[40]对2005年3月9日发生在黄海的一次海雾事件进行了研究。该研究利用NOAA-16和GOES-9卫星云图、地面观测资料、海岛和沿海地区探空资料、日本气象局格点观测资料来分析这一海雾事件。结果表明,该海雾可以被归类为平流冷却雾,海雾区域和运动主要特点可以用MM5模式合理地再现。该研究的主要发现是,海雾在相对持久的暖湿的偏南风 and 冷海表面上易于形成,由风切变引起的湍流混合是海洋上大气边界层降温 and 增湿的主要机制。此外敏感性试验

研究表明,数值模拟可以为黄海海雾的预报提供一个有前途的方法。但由于数值模拟结果对模式输入极为敏感,数据同化显得十分重要^[50-51]。

Zhang等对黄海春季海雾和夏季海雾进行了比较系统气候态和个例的对比分析^[41],进一步发现海洋大气边界层稳定性、海气界面的稳定性和海雾厚度的不同与春季和夏季背景环流差异导致雾顶长波辐射强度不同有关。

5 海雾的数据同化和集合预报研究

从全球视野来看,海雾的发生有非常显著的区域性,如加拿大东岸的纽芬兰海域、堪察加半岛以南的海域、美国西岸的加利福尼亚海域、英国苏格兰东北岸海域以及我国黄海等皆是海雾的多发区^[1,42]。国内外海雾的研究也主要集中于这些海域。已有的国内海雾研究大致可以分为3类:海雾微物理特征的研究、海雾时空分布特征的研究,以及海雾形成机制的研究。根据这些研究成果,我们可以这样定义,中国近海海雾是在东亚季风气候背景支配下,由高低压天气系统控制且受海洋影响,发生在海上大气边界层底部的一种水汽凝结导致大气水平能见度低于1km的大气现象。在凝结过程中,近海面的湍流混合、雾顶的长波辐射对海雾的演变起着重要的作用。

20世纪70—80年代,为了获取有关海雾形成的海上大气边界层的详细信息,美国与英国实施了一系列的海雾外场观测计划。其中比较著名的有CALSPAN, CEWCOM与Project Haar^[43-45]。这些外场观测计划拓宽了人们对海雾的认识视野。与此同时,利用这些外场观测数据,开展起了海雾形成机制的数值模拟研究^[45-48]。它们不仅丰富发展了早期的海雾形成机制猜测,还发现了其他新机制,并且第一次尝试了海雾的数值预报^[49]。

有三个主要问题将直接影响海雾的数值模拟质量:大气边界层湍流方案、云微物理方案、初始场。已有的数值模拟研究工作表明:对于前面两者,在模式提供的众多选项中挑选合适的方案,一些较典型的黄海海雾过程可以很成功地模拟再现,如Gao等^[40]采用了MM5模式的研究个例。但当我们再次使用与文献[40]相同的模式分辨率与物理方案运行MM5模拟其他典型黄海海雾个例时,却得不到较理想的结果。究其原因,这很可能是由模拟初始场的质量问题所致。因此,改进海雾数值模拟初始场质量(即海雾的数据同化)应该高度重视,是必须先行的研究任务之一。

① CALSPAN: Cornell航空实验室与海军研究生院合作进行的美国加利福尼亚海岸外场试验; CEWCOM: 美国西海岸海洋与气象学合作试验; Project Harr: 海雾研究计划(Harr是苏格兰东北部海雾的当地叫法)。

只有高质量的初始场才能保证对控制海雾形成的天气系统与大气边界层状态演变过程的准确刻画,才能更好地进行海雾的演变机制研究。

为了充分发挥常规观测探空、地面观测数据的作用,高山红等基于WRF模式及其先进的3DVAR同化模块,设计并构建了循环3DVAR同化方案^[50]。此方案的目的是扩展海雾模拟之前的数据同化窗,让更多的观测数据被同化,从而改进初始场质量。以2006年3月6—8日的一次黄海大范围海雾过程为研究对象,他们利用该同化方案(3h循环一次3DVAR,同化窗为12h)进行了一系列WRF数值模拟对比试验。模拟结果显示,该同化方案能有效改进黄海海雾数值模拟初始场质量,主要体现在增加低层大气温度层结构的稳定性与改变大气边界层下层的风场结构,从而显著改善海雾的模拟结果。针对RAMS模式数据同化能力较弱的缺点,高山红等^[51]提出利用WRF循环3DVAR形成的初始场驱动RAMS模式的思路。RAMS数值模拟的结果表明,WRF循环3DVAR提供的初始场明显优于RAMS模式自身等嫡面客观分析方法生成的初始场,它在动力与物理上非常协调且对模拟结果的改善相当显著。这说明WRF循环3DVAR可以为RAMS模式改进其初始场提供一条切实可行的途径。

随着观测技术的发展,雷达、飞机与卫星探测数据已经成为常规数据严重匮乏海域最主要的观测信息来源,特别是卫星数据,所占的比重越来越大。例如,欧洲中期数值预报中心(ECMWF)预报系统所同化的卫星观测数据所占比例达到90%以上。目前在国内,卫星数据在台风、暴雨等强对流天气系统的数值模拟与预报方面的同化研究与业务应用较多,而在具有“弱信号”特征的海雾数值模拟中的同化研究相当少,它们更多地被应用于海雾的监测^[7,52]。李冉等^[53]在高山红等^[50]工作的基础上,利用循环3DVAR开展了黄海海雾数值模拟的TOVS辐射数据的同化研究。他们针对6次明显的黄海海雾过程,实施了一系列直接同化ATOVS卫星辐射数据的数值试验。结果表明,分别单独同化常规观测数据与卫星辐射数据对模拟雾区的影响互有优劣。总体平均而言,同时同化它们所给出的模拟雾区最好。

李冉等^[53]的研究还发现,尽管同化卫星辐射数据后海上大气边界层的温度结构得到了改善,但是湿度场几乎没有改进。Wang等^[9]提出了一种改进湿度场的思路:如果模拟起点之前已经发生了一片海雾,那么利用MTSAT卫星的红外和可见光卫星探测数据反演这片海雾的水平分布与垂直厚度信息,然后假定海雾

雾体内部的相对湿度为100%,将此湿度信息利用高山红等^[50]构建的循环3DAR方案加以同化。他们首先选取了2个典型海雾个例将此思路付诸于数值预报试验,详细分析了同化效果及其改进的原因。然后进行了10个海雾的同化试验,进一步评估了该方法的综合效果。个例一海雾发生面积大且广泛分布于黄海上,个例二仅局限于青岛沿岸。结果显示,同化海雾湿度信息后,前者的预报雾区集中率POD(Probability of Detection)与公正预兆得分ETS(Equitable Threat Score)分别提高了20%与15%。对于后者,若不同化,海雾则无法预报出来。多个例的数值试验中同化过程运行稳定,12h同化窗的结果显示,POD与ETS的平均改进率分别为76%与72%,大气边界层内的比湿与温度分别改进了16%与9%。Wang等^[9]提出的方法对于海雾的数值业务预报非常有用,因为预报模式每天运行少则2次多则4次,如果碰到海雾天气,其中至少有1次预报的模拟起点之前一定存在海雾。除了通过数据同化手段提高海雾数值模拟的初始场之外,还必须选择合适的大气边界层(PBL)方案与云微物理(CMP)方案。陆雪等利用2005—2011年10个春季黄海海雾个例^[54],开展了WRF模式的PBL方案与CMP方案的敏感性研究。总体来讲,PBL方案对WRF模式雾区模拟结果起决定性作用,而CMP方案影响较小,主要影响海雾的浓度和高度。大气边界层方案与微物理方案的最佳组合为YSU方案与Lin方案,最差为Mellor-Yamada方案与WSM5方案。Mellor-Yamada方案和QNSE方案模拟的近海面湍流过强,导致大气边界层过高,不利于海雾的发展与维持。而MYNN方案与YSU方案刻画的湍流强度与大气边界层高度合适,有利于海雾发展与维持。

一些研究工作^[9,50-51,54]皆是在事先确定好最优CMP,PBL方案以及SST的情形下得到的。陆雪等^[54]的研究表明,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,所用大气边界层方案仍需在他们之中选择最优者。这意味着在对一次海雾进行确定性预报之前,难以知道谁是最优的PBL方案。此外如果没有耦合海洋模式来进行SST的预报,那么在整个海雾数值预报过程中不得不采用固定不变的SST场,这极有可能严重影响预报结果。假若采用集合预报途径,初始场误差、CMP与PBL方案的选择以及SST场等问题,理论上讲皆可以迎刃而解。因为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CMP与PBL方案以及扰动的SST场。

在雾的集合预报方面，Zhou等的工作^[55]是开创性的。他们利用多模式的区域中尺度集合系统对中国东部的雾事件进行了连续8个月（2008年2—9月）的预报试验，结果表明集合预报，特别是多模式的集合预报可以比单一确定预报提供更全面的有用信息，基于集合预报的中值预报也可以大大地提高雾预报的准确性。现在雾的集合预报方法已在NCEP投入业务运行。在此工作的鼓舞下，高山红等基于WRF模式及其杂合三维变分（Hybird-3DVAR）同化模块，对2006年3月黄海海域发生的一次大范围海雾进行了集合预报尝试^[56]，详细分析了其预报效果，并与确定性预报结果做了比较。此次集合预报采用随机扰动法生成了40个初始成员，海温进行了扰动，在数据同化过程中借助杂合三维变分引入了来自集合体的“流依赖”背景误差信息。研究显示，集合预报50%概率雾区预报的ETS得分优于确定性预报29%左右，集合预报中加入海温扰动非常必要，它对浓雾预报改善作用显著，ETS至少提高10%。在集合预报中混用大气边界层YSU方案与MYNN方案的做法，可以降低只使用其中之一可能导致的预报误差。研究表明，借助Hybrid-3DVAR开展黄海海雾的集合预报技术上可行，集合预报将成为黄海海雾数值预报的一种有希望的途径。

6 结束语

本文对近30a来我国海雾研究领域的一些重要进展进行了回顾，并对海雾的微物理学特征、海雾与层云的关系、北太平洋与大西洋上海雾发生频率的气候学特征、海雾的数值模拟、海雾的数据同化和集合预报等重点问题进行了总结与讨论。然而必须指出，海雾研究还面临诸多困难和挑战，未来的海雾研究要想取得进展，海雾研究者还必须认真思考以下问题。

1) 海雾可以看作是和海面相接的云。众所周知，云雾的形成、演变和消散过程涉及非常复杂的微物理学过程和化学过程。未来加强对云雾的物理过程、化学过程以及海雾与气溶胶相互作用过程的深入认识，将是推动海雾研究向前发展的一个重要研究方向。

2) 海雾发生在海上的大气边界层内。我们对大气边界层的认识大多来自陆地上大气边界层的研究^[57]。由于缺乏足够的海上直接观测资料，我们对中国近海雾天气过程中的海上大气边界层的结构、海雾特性等认识程度还相当有限，这与美国、加拿大等发达国家尚有较大差距^[42, 58-59]。随着我国对海洋气象观测的逐步加强，如浮标站、自动站的布设和船舶观测资料的积累，有理由相信对海雾的认识程度会逐步加深。

3) 数值模拟不仅是海雾机制研究的重要手段，而且更是海雾客观预报的必然途径。目前被国内外研究者广泛使用海雾研究的数值模式，如RAMS，MM5与WRF等中的大气边界层与微物理方案并不是直接针对海雾研究而设计的。尽管海雾是接海的云，但它与一般意义上的云还是有很大区别。云通常可以看成绝热膨胀降温的产物，而海雾却是底部与海面之间通过湍流混合、雾顶通过长波辐射进行热量交换的一个非绝热过程的产物。因此大力推进能细致地刻画近海面湍流过程的大气边界层方案、精确描述气溶胶作用下雾顶长波辐射过程中的辐射方案，以及水汽凝结的微物理方案的改进工作，是我们亟待努力的重要研究方向。

4) 海雾主要发生在常规观测资料稀少的海上。因此一方面要利用先进的能够体现“流依赖”特性的数据同化方法（如ENKF，Hybrid-3DVAR，4DVAR等）充分消化吸收已有的常规观测的信息，另一方面要尽可能地同化大量分布于海上的非常规观测资料。同化的目的不仅仅是改进控制海雾的高低压天气系统，更重要的是要改善海上大气边界层内的湿度与温度分布状态。当然海雾对初始场、海温以及参数化方案的高度敏感性，决定了集合预报应该是今后要重点关注的一个研究方向。

5) 从社会服务的角度来看，我们不能只满足于海雾的机制研究，以及某片海域上海雾有无的预报。跟海雾有关的社会最迫切的需求是大气水平能见度的预报。因此如何从海雾的数值预报结果中进行大气能见度的准确诊断，是一个看起来简单，实际做起来却非常不易的工作。

6) 在太平洋西岸等的一些国家和地区，由于海雾是以与其相伴随的大气低能见度形式出现的，会对空中、海上和沿岸的交通运输带来严重影响，因此海雾是被当做“灾害”来研究的。在南部非洲的纳米比亚等国家的内陆沙漠地区，受海洋的影响每年有200多天会发生海雾。但由于沙漠地区淡水资源奇缺，这些常年滞留在空气中的雾是被当做珍贵的“空中水源”来对待的，有科学家研究不同材质的“俘获网”在空中取水的效率问题，期盼能利用高效率的“俘获网”从雾中获得更多的淡水资源。如何减少海雾带来的负面影响，提高其作为正面的淡水资源的利用效率？这是值得海雾研究工作者认真思考的另一个重要问题。

致谢：衷心感谢美国NCEP的杜钧博士对本文编写过程的关心和指导。

参考文献

- [1] 王彬华. 海雾. 北京: 海洋出版社, 1983: 1-352.
- [2] 傅刚, 张涛, 周发琇. 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.
- [3] 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. 中国海洋大学学报, 2004, 34(5): 720-726.
- [4] 周发琇, 王鑫, 鲍献文. 黄海春季海雾形成的气候特征. 海洋学报, 2004, 26: 28-37.
- [5] 鲍献文, 王鑫, 孙立潭, 等. 卫星遥感全天候监测海雾技术与应用. 高技术通讯, 2005, 15: 101-106.
- [6] Zhang S P, Xie S P, Liu Q, et al. Seasonal variation of Yellow Sea fog: Observations and mechanisms. *Journal of Climate*, 2009, 22: 6758-6772.
- [7] Gao S H, Wu W, Zhu L, et al. Detection of nighttime sea fog/stratus over the Huanghai Sea Using MTSAT-1R IR Data. *Acta Oceanologica Sinica*, 2009, 28(2): 23-35.
- [8] Fu G, Zhang S P, Gao S H, et al. Understanding of Sea Fog over the China Seas. Beijing: China Meteorological Press, 2012.
- [9] Wang Y M, Gao S H, Fu G. Assimilating MTSAT-derived humidity in nowcasting sea fog over the Yellow Sea. *Weather and Forecasting*, 2014, 29: 205-225.
- [10] Li Y, Zhang S P, Thies X M, et al. Spatio-temporal detection of fog and low stratus top over the Yellow Sea with geostationary satellite data precondition for ground fog detection-A feasibility. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 212-223.
- [11] Wang B. *Sea Fog*. Beijing: China Ocean Press, Berlin: Springer-Verlag, 1985.
- [12] 李子华, 杨军, 石春娥, 等. 地区性浓雾物理. 北京: 气象出版社, 2008.
- [13] 牛生杰. 雾物理化学研究. 北京: 气象出版社, 2013.
- [14] 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, 2008, 38(3): 359-366.
- [15] 牛生杰, 陆春松, 吕晶晶, 等. 近年来中国雾研究进展. 气象科技进展, 2016, 6(2): 6-19.
- [16] 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, (2): 174-178.
- [17] 屈凤秋, 刘寿东, 易燕明, 等. 一次华南海雾过程的观测分析. 热带气象学报, 2008, 24: 490-496.
- [18] Li Y, Zheng Y. Analysis of the atmospheric turbulence characteristics near the top layer of sea fog. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2015, 33: 809-818.
- [19] 赵柏林, 张霏琛. 大气探测原理. 北京: 气象出版社, 1990.
- [20] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989.
- [21] Huang H J, Liu H N, Huang J, et al. Atmospheric boundary layer structure and turbulence during sea fog on the southern China coast. *Monthly Weather Review*, 2015, 143: 1907-1923.
- [22] Li M, Zhang S P. Impact of sea surface temperature front on stratus-sea fog over the Yellow and East China Seas- A case study with implications for climatology. *Journal of Ocean University of China*, 2013, 12(2): 301-311.
- [23] 张苏平, 刘飞, 孔扬. 一次春季黄海海雾和东海层云关系的研究. 海洋与湖沼, 2014, 45(2): 341-352.
- [24] 宋亚娟. 北太平洋海雾发生频率的气候学特征. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [25] Zhang S P, Chen Y, Long J C, et al. Interannual variability of sea fog frequency in the Northwestern Pacific in July. *Atmospheric Research*, 2015, 151: 189-199.
- [26] 王冠岚. 北大西洋海雾发生频率的气候学特征. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [27] Fisher E L, Caplan P. An experiment in numerical prediction of fog and stratus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1963, 20: 425-437.
- [28] Musson-Genon L. Numerical simulation of a fog event with a one-dimensional boundary layer model. *Monthly Weather Review*, 1987, 115: 592-607.
- [29] Duynkerke P G. Radiation fog: A comparison of model simulation with detailed observations. *Monthly Weather Review*, 1991, 119: 324-341.
- [30] 周斌斌. 辐射雾的数值模拟. 气象学报, 1987, 45: 21-29.
- [31] 彭虎, 李子华. 包含详细微物理过程的一维辐射雾模式. 重庆环境科学, 1992, 14(3): 49-54.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 张利民, 李子华. 重庆雾的二维非定常数值模拟. 大气科学, 1993, 17: 750-755.
- [35] 胡瑞金, 周发琇. 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): 282-289.
- [36] 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: 156-165.
- [37] 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: 293-303.
- [38] 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. 气象科学, 2004, 24: 1-8.
- [39] 王菁茜. 对2005年春季黄渤海一次海雾的观测分析与数值模拟研究. 青岛: 中国海洋大学, 2006: 1-69.
- [40] 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(1): 65-81.
- [41] Zhang S P, Li M, Meng X G, et al. A comparison study between spring and summer fogs in the Yellow Sea: Observations and mechanisms. *Pure and Applied Geophysics*, 2012, 169 (5/6): 1001-1017.
- [42] Lewis J M, Koračin D, Redmond K T. Sea fog research in the United Kingdom and United States: A historical essay including outlook. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2004, 85(3): 395-408.
- [43] Mack E J, Katz U, Rogers C, et al. The microstructure of California coastal stratus and fog at sea. *Calspan Corp Rep, CJ-5405-M-1*, 1974.
- [44] Pilić R, Mack E, Rogers C, et al. The formation of marine fog and the development of fog-stratus systems along the California Coast. *Journal of Applied Meteorology*, 1979, 18: 1275-1286.
- [45] Findlater J, Roach W, McHugh B. The haar of North-East Scotland. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1989, 115: 581-608.
- [46] Barker E H. A marine boundary layer model for the prediction of fog. *Boundary Layer Meteorology*, 1977, 11: 267-294.
- [47] 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.
- [48] Nicholls S. The dynamics of stratocumulus: Aircraft observation and comparison with a mixed layer model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1984, 110: 783-820.
- [49] Ballard S, Golding B, Smith R. Mesoscale model experimental forecasts of the haar of northeast Scotland. *Monthly Weather Review*, 1991, 119: 2107-2123.
- [50] 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, 2010, 40(10): 1-9.
- [51] 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, 2010, 40(11): 1-10.
- [52] 张纪伟. 基于MODIS的黄海海雾研究. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [53] 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, 2012, 42(3): 10-20.
- [54] 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.
- [55] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. *Weather Forecasting*, 2010, 25: 303-322.
- [56] 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, 2014, 44(12): 1-11.
- [57] Stull R B. *An introduction to boundary layer meteorology*. Dordrecht, Boston, London: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [58] Lewis J M, Koracin D, Rabin R, et al. Sea fog off the California Coast: Viewed in the Context of Transient Weather Systems. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D15): 4457, doi:10.1029/2002JD002833.
- [59] Koračin D, Dorman C E, Lewis J M, et al. Marine fog: A review. *Atmospheric Research*, 2014, 143: 142-175.