

东海海雾研究进展

何执政¹, 冀蕊^{2*}, 邱璟怡²

¹舟山市气象服务中心, 浙江 舟山

²舟山市气象台, 浙江 舟山

收稿日期: 2025年6月15日; 录用日期: 2025年7月14日; 发布日期: 2025年7月21日

摘要

雾对海洋经济发展与生产生活密切相关, 随着海洋强国战略的推进, 东海作为重要领海, 对航运安全等有极高要求。本文从东海海雾监测与预报发展历史出发, 概述历史研究进展与当下研究热点, 总结眼下难点, 探讨改进方向。系统地认识监测及预报进展, 能有效整合资源, 针对性加强海雾监测和预报能力, 为后续制定海雾预警预报发展策略提供思路, 简化流程。

关键词

东海, 海雾, 监测, 遥感

Research Progress on Sea Fog in the East China Sea

Zhizheng He¹, Rui Ji^{2*}, Jingyi Qiu²

¹Zhoushan Meteorological Service Center, Zhoushan Zhejiang

²Zhoushan Meteorological Observatory, Zhoushan Zhejiang

Received: Jun. 15th, 2025; accepted: Jul. 14th, 2025; published: Jul. 21st, 2025

Abstract

With the advancement of China's maritime power strategy, the East China Sea, as a key territorial sea, imposes stringent requirements for maritime safety, particularly in shipping. This paper traces the developmental history of sea fog monitoring and forecasting in the East China Sea, summarizes research milestones and current research hot-spots, identifies existing challenges, and explores potential directions for improvement. A systematic understanding of monitoring and forecasting advancements will facilitate effective resource integration, enhance targeted capabilities in sea fog monitoring and prediction, and provide insights for formulating future early-warning and forecasting

*通讯作者。

文章引用: 何执政, 冀蕊, 邱璟怡. 东海海雾研究进展[J]. 气候变化研究快报, 2025, 14(4): 743-748.

DOI: 10.12677/ccrl.2025.144074

strategies, thereby optimizing operational processes.

Keywords

East China Sea, Sea Fog, Monitoring, Remote Sensing

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

雾是灾害性天气中分布范围广、出现频率高的一类,是由近地层中的气溶胶颗粒和微小水滴(小冰晶)构成的气溶胶系统。其造成的低能见度、污染物质聚集等因素,会对农业、交通运输、人体健康等方面造成严重危害[1]。雾根据成因可分为辐射雾、平流雾、混合雾、地形雾等[2],在陆地与海洋上均有发生。陆地上发生的雾天气以辐射雾为主,海洋上则以平流雾居多。近年来随国家海洋开发战略推进和可持续发展观念的深入人心,海洋相关的经济活动日益增加,对海雾事件的重视与日俱增。据统计[3]海雾引起的碰撞沉没事故可以占到海上事故总数的3成。东海的舟山-宁波港作为全球吞吐量最大的港口,海上航行安全至关重要。自上世纪40年代以来国内海雾研究兴起,至80年代《海雾》著作发布并成为国际海雾研究重要参考依据,对于海雾的机理研究很大程度上趋于当前技术水平基础上的完善,因此本文着重对近年来东海海雾的观测和预报研究进行粗浅地概述和总结,以期为之后的东海海雾监测和预报工作提供基础的参考,并对当下气象预警预报实践中可实现的未来技术做出浅薄展望。

2. 海雾时空分布

依照雾的消生原理,海雾易发生在海陆交界地带以及春夏季的冷水海面。例如冷性高压后部湿度增加[4]或者重力波条件下[5]引起的海雾。Koranic等[6]依据1950~2007年间船舶观测资料统计的全球(不包括极地区域海洋)雾频分布发现,海雾高频发生区域可分为副极区海洋环流圈的西侧、北半球大洋的西海岸和东海岸、亚热带海洋环流圈的东侧等几个大组。

国内的雾分布则无明显区域划分,按年平均雾日数梯度判断整体呈现东南部多西北部少[7]。其中年平均雾日数在60天以上地区集中在东部沿海省份以及四川盆地和云南西南部[8]。海雾的形成时间也没有明显的特征[1],既有在中午时分形成,也有傍晚或午夜前后形成。持续时间根据海雾类型集中在几小时到几十小时不等,具有较为明显的日变化。国内各地区海雾特征中,南海海雾雾滴数浓度最高,黄海的海雾数浓度、含水量、平均半径、最大半径都最小,而东海的海雾(如舟山)具有含水量、雾滴粒径最大的特征[9]。时间分布上,东海区域浙江沿海海雾4~6月最多[10](一说3~7月[11]),其中舟山沿海3~6月居多[12],每日4~6时成雾最多。雾日数高的年份水温一般偏低,相反则水温偏高。

3. 海雾监测与识别

海雾机理的深入研究和计算机算力及算法的发展使得近年来海雾的监测水平和方案发展加快。传统雷达、海图、红外波在很大程度上被新型遥感监测例如卫星遥感、毫米波雷达等手段迭代。现在的遥感监测具有对大范围、离岸海雾监测的优势,能够宏观、定时监测目标海区的海雾分布状况

上世纪70年代起,国外对于使用卫星可见光数据的海雾监测应用已经逐渐成为主流。此后Beyer等[13]和Turner等[14]在前人研究上提出的“双波段亮温差法”在极轨卫星平台乃至静止卫星平台上得到

应用和拓展[15]。

国内对于海雾的卫星遥感监测与反演起步于 80 年代对极轨卫星的海雾图像特征分析[16]，研究主要集中在黄海海域[17][18]，对东海区域海雾特征及演变规律[19]也进行了研究，计算筛选海雾的卫星遥感“天窗”。其后采用 CALIPSO 主动遥感卫星对海雾垂直结构进行云雾分离[20]、利用 MODIS 数据分析海雾时空变化及高度特征[21]、结合多种卫星数据对比分析雾信息检出率[22]。随着国际范围内对静止卫星的铺设和应用逐渐增多，国内各海域海雾研究人员开始广泛地应用 GOES 系列卫星结合探空资料对图片进行识别来监测海雾[23]，日本的高分辨率静止卫星葵花系列卫星被广泛应用于海雾天气个例研究[24][25]，何月等人[26]基于 MASAT 卫星逐小时资料与地面综合观测资料，优化给出了浙江省陆域、周边海域 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 网格点的小时尺度的遥感大雾产品。

近年海事活动密度与广度增加，传统船舶和洋面观测很难满足长途、洲际航线的对高频率、高密度资料的需求。随风云系列气象卫星不断发射升空投入使用，成序列、成系统的极轨卫星和高分辨率、多通道的静止卫星为海洋少观测资料甚至无观测资料区域提供了重要的参考依据。蒋璐璐等[27]采用多波段阈值法对 FY-3A 数据进行处理，实现中国东部沿海海雾的遥感监测，得到雾的垂直厚度以及能见度等信息。新一代高分辨率静止卫星出现后，天津市[28]结合风云四号卫星 A 星(FY-4A)反演温湿廓线等数据与秒级探空数据，补充 FY-4A 垂直风场动力信息，拓展了使用范围；耿丹等[29]结合 FY-4A 数据与随机森林算法建立模型，相对于阈值法模型提高了海雾区域识别精度。

此外研究人员依据海雾的形成机制、卫星及雷达图像纹理、光学及辐射参量等，在研究过程中发现了海雾特征量之间存在的密切关系和互相反演可能性[30]，沿用并开发出多通道组合法[31]、阈值判定法[32]、纹理分形[33]和神经网络法[34]等多种遥感资料识别和反演方法。

总体来看，目前卫星遥感的海雾反演结果，检出率有所进步，但在海雾范围识别和实际生消时刻判断上表现不佳。卫星观测手段从被动遥感到主动遥感，很大程度弥补了卫星反演无法准确识别大雾与低云这两种物理性质并无本质差别的系统，但主动遥感卫星以极轨卫星为主，在观测上仍无法满足需求。以 CALIPSO 中 CALIOP 传感器为例，其垂直廓线观测数据底层可达 30 m 精度，但只能以 16 d 的重复周期观测星下点位置，在观测范围和连续性上难以满足海雾的预警要求。此外，CALIOP 对于云层穿透能力一般，云层较厚时云下低层数据基本为缺测或者统一识别为海洋性气溶胶与低云，识别精度低，数据完整性一般。

4. 海雾预报

海雾预报自海雾概念诞生起就从海雾研究中独立出来，成为海雾研究者重点关注目标。自上世纪 60 年代山东海洋学院(现中国海洋大学)对中国黄海海雾进行系统性研究开始[12]，中国在海雾预报上就开始了长远规划。从国家“八五”规划到“十五”规划期间，海雾遥感监测系统与海雾 MOS 预报方法试验初步建立并取得了一定成果。纵观海雾预报发展历史，天气学方法受限于个人经验和无法定量的缺点，前期预报研究基本从数学统计方法简单直接的回归方法开始，于润玲等[35]就结合东海岛屿地面观测站资料和美国国家环境预报中心(NCEP)气象资料，综合选用风向、风速、相对湿度、气海温差 4 个预报因子建立多元回归预报方程对东海海雾进行预报，但受限于单个站点和主观阈值预设，实际预报效果一般，推广性不佳。后续研究人员对预报因子和回归方法进行了优化[36]，或是进行了不同类型的统计学方法尝试[37]-[39]，预报效果有所改善，但仍难以避免仅单站适用的缺点。直至目前的海雾预报方法中，统计学方法仍旧是前处理或本地化方案中的重要组成。其资源占用低，模型建立简单，但较为依赖个人经验，难以推广。

海雾生消具有复杂的机理和演变过程，不同类型的海雾其机制具有较大差异，依靠数学统计方法获得计算方程或模型显然无法准确描述这一复杂过程。在科学技术发展过程中，算力与算法的进步使得数

值天气预报模型在海雾预报中被广泛传播应用。从国外研究者建立一维数值预报模型开始[40], 海雾数值预报开始长达几十年的检验与发展。起初的一维模型考虑的预报因子不多, 后续研究者[41] [42]的模式调整则逐渐将湍流交换、长波辐射冷却等因素的重要性展现出来。国内在 20 世纪 80 年代开始利用一维数值模式进行海雾预报, 但为了改善其存在的局限性, 张利民等[43]、胡瑞金等[44]开始进一步尝试和改进综合考虑长波辐射、地表热收支、雾水沉降和湍流的整体作用的二维数值模式。一直到 MM5、RAMS、WRF 和 COAMPS 等具有较完善的大气边界层及辐射方案的三维模式开始被广泛应用, 当下最为流行的模式预报的基础正式基本建立。此后, 高山红等[45]在模式应用和改进途中, 再一次将提出边界层湍流方案、云微物理方案与初始场对三维海雾数值预报模式的重要意义, 因此在实验过程中对三维初始场模块进行了循环试验, 验证了数据同化方法优化初始场质量的方式, 在海雾预报质量提升上效果显著。后续李冉等[46]的研究结果同样支持这一结论, 并从中发现可以优化湿度场的思路。在数值预报相对完善的现在, 海雾数值预报是海雾客观预报的必然途径, 其依旧可以通过海气耦合模式来实现 SST 场的优化, 并且研究表明[47] [48], 集合预报整体效果要优于确定性预报, 其在未来发展中具备一定的前景。

在过往海雾数值预报研究中, 东海海域由于水汽输送、SST 和风速的显著异常被视为夏季雾研究的“关键区域”[49]。在日常海雾预报实际运用中, 气象工作者对数值预报和天气过程都有相应的校验[36] [50]和对特征天气形势下的海雾个例进行过程分析[35] [51]。但在整体发展过程中, 对东海海雾数值模式的对应研究较少, 对应的效果检验仅局限在利用阈值法检验传统 WRF 模式上。

5. 总结与展望

总体来说, 东海海雾监测和预报仍处在发展阶段, 在海雾数值模式预报精度上有所欠缺。尽管不同类型海雾生消机理的研究逐步深入, 正在不断融入到海雾检测与预报的实践中去。当下的遥感观测手段可以有效解决海上无资料区域的数据补足问题, 并为今后的远海观测数据的连续性和完整性提供保证, 但目前仍有不少问题亟待改进。

对于海雾监测来说, 手段已经相对成熟, 卫星观测等遥感技术仍在不断发展进步, 海雾监测和识别会越来越依赖卫星的长时间、高精度、大范围观测资料。

(1) 目前的海雾监测、识别使用的热门视觉方案还是面临难以区分海雾与低云的问题。两者即便物理性质极其相似, 但本质上仍是具备不同特征的两个对象。

(2) 海雾的卫星监测资料在实现矫正和落地时依赖气象部门地面观测结果的准确性, 但日常气象测报实践反映, 能见度仪等设备的稳定性和误判性有待改进, 尤其在洋面上, 海雾的发生和形态特征无从实施人工订正, 仅有的仪器数据可能被水滴、海鸟等各类因素干扰, 难以鉴别。

(3) 海雾预警中对近实时卫星数据的传输和反演、识别有着较高的要求, 尤其是发生突然, 位置不确定性强, 影响范围小但能见度影响程度大的团雾, 是今后研究的重点方向。

另外, 星载传感器已经运行多年, 随着国家卫星及传感器技术不断发展, 卫星遥感数据在常规数据缺乏的洋面上有着无可替代的优势, 其海量高分辨率的数据能够很大程度上满足机器学习所需的数据量, 未来在图像识别领域能够为海雾监测提供助力。

对海雾预报来说, 卫星数据正在逐步成为模式预报最主要的初始场来源, 不断进步的数值预报模型在结合机器学习后能够进一步提高海雾预报的准确性, 但集合预报仍需要不断完善。

此外, 长久以来海雾预报局限在有雾天的定性预报, 但气象工作者不应当仅满足于此, 社会需要直接明了的, 能够明确时间和具体位置的海雾预报产品。

基金项目

本研究由舟山市科技局项目(2025C31013)资助。

参考文献

- [1] 牛生杰, 王天舒, 陆春松, 等. 近年来中国雾研究进展[J]. 气象科技进展, 2016(2): 14.
- [2] 王彬华. 海雾[M]. 北京: 海洋出版社, 1983.
- [3] 范悦敏. 国外海雾研究进展综述[J]. 科技视界, 2020(16): 283-284.
- [4] 杨薇, 张春花, 冯箫, 等. 琼州海峡两次高压后部型海雾的对比分析和数值模拟[J]. 高原气象, 2022, 41(3): 762-774.
- [5] 宋美琪, 张苏平, 戴光耀. 一次重力波对黄海海雾发生、发展的影响研究[J]. 国海洋大学学报(自然科学版), 2022, 52(6): 27-38.
- [6] Koraćin, D., Dorman, C.E., Lewis, J.M., Hudson, J.G., Wilcox, E.M. and Torregrosa, A. (2014) Marine Fog: A Review. *Atmospheric Research*, **143**, 142-175. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.12.012>
- [7] 刘小宁, 张洪政, 李庆祥, 等. 我国大雾的气候特征及变化初步解释[J]. 应用气象学报, 2005, 16(2): 220-230.
- [8] Niu, S., Lu, C., Yu, H., Zhao, L. and Lü, J. (2010) Fog Research in China: An Overview. *Advances in Atmospheric Sciences*, **27**, 639-662. <https://doi.org/10.1007/s00376-009-8174-8>
- [9] 吕晶晶, 牛生杰, 赵丽娟, 等. 湛江地区一次冷锋型海雾微物理特征[J]. 大气科学学报, 2014, 37(2): 208-215.
- [10] 侯伟芬, 王家宏. 浙江沿海海雾发生规律和成因浅析[J]. 东海海洋, 2004(2): 9-12.
- [11] 郭乙运, 于守水, 赵巍, 等. 海雾能见度监测预报技术发展研究综述[J]. 环境生态学, 2021, 3(3): 39-42.
- [12] 张苏平, 鲍献文. 近十年中国海雾研究进展[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008(3): 359-366.
- [13] Eyre, J.R., Brownscombe, J.L. and Allam, R.J. (1984) Detection of Fog at Night Using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Imagery. *The Meteor Magazine*, **113**, 266-271.
- [14] Turner, J., Allam, R.J. and Maine, D.R. (1986) Case Study of the Detection of Fog at Night Using Channels 3 and 4 on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *The Meteor Magazine*, **115**, 285-290.
- [15] Ellrod, G.P. (1995) Advances in the Detection and Analysis of Fog at Night Using GOES Multispectral Infrared Imagery. *Weather and Forecasting*, **10**, 606-619. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(1995\)010<0606:aitdaa>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(1995)010<0606:aitdaa>2.0.co;2)
- [16] 郑新江. 黄海海雾的卫星云图特征分析[J]. 气象, 1988, 14(6): 7-9.
- [17] 刘树霄, 衣立, 张苏平, 等. 基于全卷积神经网络方法的日间黄海海雾卫星反演研究[J]. 海洋湖沼通报, 2019(6): 13-22.
- [18] 王峥, 滕骏华, 蔡文博, 等. 基于 GOCI 影像的黄海海雾提取方法研究[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(6): 941-946.
- [19] 刘宝银. 渤海与东海云雾屏障及其对遥感海洋信息有效性的研究[J]. 地球信息科学, 1999(2): 63-67.
- [20] Wu, D., Lu, B., Zhang, T. and Yan, F. (2015) A Method of Detecting Sea Fogs Using CALIOP Data and Its Application to Improve MODIS-Based Sea Fog Detection. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, **153**, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2014.09.021>
- [21] 张春桂, 何金德, 马治国. 福建沿海海雾的卫星遥感监测[J]. 中国农业气象, 2013, 34(3): 366-373.
- [22] 赵耀天, 吴东. CALIOP、CPR 数据在探测海雾中的应用[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2020, 50(10): 125-133.
- [23] 于海鹏, 田付友. GOES9 云图在黄海海雾区域识别中的应用[J]. 海洋预报, 2010, 27(3): 23-29.
- [24] 卢博, 王彬, 于博等. 基于 Himawari-8 的东中国海日间海雾检测阈值分析及其能见度反演的研究[J]. 海洋预报, 2022, 39(6): 62-73.
- [25] 郝姝馨, 郝增周, 黄海清, 等. 基于 Himawari-8 数据的夜间海雾识别[J]. 海洋学报, 2021, 43(11): 166-180.
- [26] 何月, 张小伟, 蔡菊珍, 等. 基于 MTSAT 卫星遥感监测的浙江省及周边海区大雾分布特征[J]. 气象学报, 2015, 73(1): 200-210.
- [27] 蒋璐璐, 魏鸣. FY-3A 卫星资料在雾监测中的应用研究[J]. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 489-495.
- [28] 曲平. 基于 FY4A 垂直反演资料的海雾高空中 β 尺度天气特征研究[Z]. 天津: 天津市气象科学研究所, 2022-05-19.
- [29] 耿丹, 刘婷婷, 李超. 结合 FY-4A 卫星及随机森林的日间沿海海雾识别模型的研究[J]. 海洋预报, 2022, 39(3): 83-93.
- [30] 肖艳芳, 张杰, 崔廷伟, 等. 海雾卫星遥感监测研究进展[J]. 海洋科学, 2017, 41(12): 146-154.
- [31] 居为民, 孙涵, 张忠义, 等. 卫星遥感资料在沪宁高速公路大雾监测中的初步应用[J]. 遥感信息, 1997(3): 25-27.

- [32] 陈林, 牛生杰, 仲凌志. 监测雾的方法及分析[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 448-454.
- [33] 陈伟, 周红妹, 袁志康, 等. 基于气象卫星分形纹理的云雾分离研究[J]. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 133-139.
- [34] 张顺谦, 杨秀蓉. 神经网络和分形纹理在夜间云雾分离中的应用[J]. 遥感学报, 2006, 10(4): 497-501.
- [35] 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[J]. 大气科学研究与应用, 2007(2): 28-37.
- [36] 杨棋, 欧建军, 李永平. 洋山海域海雾客观预报方法研究[J]. 热带海洋学报, 2013, 32(5): 59-64.
- [37] 史达伟, 张静, 曹庆, 等. 基于决策树算法的海州湾地区海雾预测[J]. 气象科学, 2022, 42(1): 136-142.
- [38] 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[J]. 海洋预报, 2014, 31(5): 82-86.
- [39] 俞涵婷, 廖晨昕, 王可欣, 等. 浙江中南部海雾预报决策树模型研究[J]. 海洋预报, 2020, 37(6): 96-101.
- [40] Fisher, E.L. and Caplan, P. (1963) An Experiment in Numerical Prediction of Fog and Stratus. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **20**, 425-437. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1963\)020<0425:aeinpo>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1963)020<0425:aeinpo>2.0.co;2)
- [41] Musson-Genon, L. (1987) Numerical Simulation of a Fog Event with a One-Dimensional Boundary Layer Model. *Monthly Weather Review*, **115**, 592-607. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115<0592:nsoafe>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115<0592:nsoafe>2.0.co;2)
- [42] Duynkerke, P.G. (1991) Radiation Fog: A Comparison of Model Simulation with Detailed Observations. *Monthly Weather Review*, **119**, 324-341. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1991\)119<0324:rfacom>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1991)119<0324:rfacom>2.0.co;2)
- [43] 张利民, 李子华. 重庆雾的二维非定常数值模拟[J]. 大气科学, 1993(17): 750-755.
- [44] 胡瑞金, 周发琇. 海雾过程中海洋气象条件影响数值研究[J]. 青岛海洋大学学报, 1997, 27(3): 282-289.
- [45] 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(自然科学版), 2010, 40(10): 1-9.
- [46] 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[J]. 中国海洋大学学报, 2012, 42(3): 10-20.
- [47] Zhou, B. and Du, J. (2010) Fog Prediction from a Multimodel Mesoscale Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, **25**, 303-322. <https://doi.org/10.1175/2009waf2222289.1>
- [48] 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(自然科学版), 2014, 44(12): 1-11.
- [49] Bai, H. and Zhang, S.P. (2010) Discuss about the Characteristic Area of the Most Direct Water Vapor Source of the Formation of Sea Fog over the Adjacent Marginal Sea of Qingdao in Summer. *Periodical of Ocean University of China*, **40**, 17-26.
- [50] 陈梅汀, 王连喜, 徐哲永, 等. 舟山海雾特征及其对数值模式的初步订正[J]. 气象科学, 2018, 38(1): 130-138.
- [51] 曹宗元, 刘飞, 郭文明, 等. 黄、东海春季海雾“楔”形雾区分布特征及其成因分析[J]. 气象与环境科学, 2022, 45(4): 45-52.