

涂石飞,韩利国,徐峰,等. 华南海雾研究进展[J].海洋气象学报,2019,39(4):12-20.  
TU Shifei, HAN Liguó, XU Feng, et al. Research progress on sea fog over South China[J].Journal of Marine Meteorology, 2019, 39(4):12-20. DOI:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.002. (in Chinese)

## 华南海雾研究进展

涂石飞<sup>1,2,3</sup>,韩利国<sup>1,2,3</sup>,徐峰<sup>1,2,3</sup>,徐建军<sup>1,2,3</sup>,植炫惠<sup>4</sup>

(1. 广东海洋大学南海海洋气象研究院,广东 湛江 524088;2. 广东海洋大学海洋与气象学院,广东 湛江 524088;3. 南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江),广东 湛江 524000;4. 南京信息工程大学大气科学学院,江苏 南京 210044)

**摘要:**从海雾的气候特征、生消机制、微物理化学特征、遥感监测和模式预报等方面,回顾近年来开展的华南地区海雾研究。结果表明:华南海雾研究已经取得了许多重要的研究成果,但对于华南海雾的年际、年代际特征,华南不同地区的海雾微物理化学特征以及海面海雾与陆面海雾观测对比研究还不够,遥感监测及模式预报方面还有一定欠缺。为了对华南海雾有更加深入的认识,这些方面的研究需要进一步加强。

**关键词:**华南海雾;气候特征;生消机制;微物理化学特征;遥感监测;模式预报

**中图分类号:** P732 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-3599(2019)04-0012-09

**DOI:**10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2019.04.002

## Research progress on sea fog over South China

TU Shifei<sup>1,2,3</sup>, HAN Liguó<sup>1,2,3</sup>, XU Feng<sup>1,2,3</sup>, XU Jianjun<sup>1,2,3</sup>, ZHI Xuanhui<sup>4</sup>

(1. South China Sea Institute of Marine Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 2. College of Ocean and Meteorology, Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088, China; 3. Guangdong Laboratory of Southern Marine Science and Engineering (Zhanjiang), Zhanjiang 524000, China; 4. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

**Abstract** This paper reviews researches on the sea fog over South China in recent years from the aspects of climate characteristics, formation and dissipation mechanism, microphysical and chemical characteristics, remote sensing monitoring, and numerical model forecast. The results show that the research on the sea fog over South China has achieved important progress, but there are still some deficiencies in researches on interannual and interdecadal characteristics, the microphysical and chemical characteristics of sea fog in different areas of South China, the comparison of observational study between the sea fog over the sea surface and that over the land region, sea fog remote sensing, and numerical model forecast. In order to have a deeper understanding of the sea fog over South China, researchers needs to carry out further studies.

**Key words** fog over South China; climate characteristics; formation and dissipation mechanism; microphysical and chemical characteristics; remote sensing; numerical model forecast

收稿日期:2019-11-10; 修订日期:2019-11-29

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFA0605604);南方海洋科学与工程广东省实验室(湛江)资助项目(ZJW-2019-08);国家自然科学基金项目(41475120);广东海洋大学“创新强校”资助项目(230419053);广东海洋大学“冲一流”学科建设科研项目(平台)(231419022);海洋与气候变化人才培养和创新团队(002026002002)

作者简介:涂石飞,男,博士研究生,主要从事热带气旋、海气相互作用研究,shifei\_tu@126.com。

通信作者:徐建军,男,博士,教授,主要从事海洋气象与区域资料同化研究,jxu@gdou.edu.cn。

## 引言

海雾通常是指发生在海面上或者近岸区域,大气边界层中的水汽形成大量凝结,造成能见度低于1 km的天气现象<sup>[1]</sup>。海雾对海上交通运输、海洋渔业、航空以及海上军事活动等造成影响,成为近海地区主要的海洋气象灾害之一。据不完全统计,发生在海上的船舶搁浅或碰撞事故中,有超过一半的事件一定程度上受到海雾的影响<sup>[1-3]</sup>。不仅如此,海雾雾水中还含有大量的化学污染物,对农业生产以及人体健康也会造成严重的危害<sup>[4-5]</sup>。因此,对海雾的气候特征、生消机制、微物理过程以及化学特征研究,有利于对海雾的深入认识,提高遥感监测、数值模式预报等方面的能力,以减少对交通、农业、军事活动等带来的不利影响,具有十分重要的研究意义。

早在20世纪初期,TAYLOR<sup>[6]</sup>首次利用湍流理论来解释海雾的生消机制。之后,王彬华<sup>[1]</sup>系统总结了多年研究成果,出版了迄今唯一一部海雾著作《海雾》。李子华<sup>[4]</sup>回顾了我国近40年雾的相关研究,介绍了雾与生态环境之间的相互关系,以及早期雾的数值模式预报取得的一些成果。胡瑞金和周发琇<sup>[7]</sup>,胡瑞金等<sup>[8]</sup>从虚位温方程和比湿方程出发,推导出相对湿度时变方程,用以比较海雾中的平流、湍流、辐射作用的相对大小。黄渤海是我国海雾发生最为集中的区域之一,研究表明:黄海海雾频繁发生在每年的4—7月,且观测发现青岛的海雾发生频率要明显多于烟台地区<sup>[9]</sup>,黄海东部临近韩国海域的海雾发生频率在7月最高<sup>[10]</sup>。一些学者<sup>[11-12]</sup>总结了我国近几十年来有关雾及海雾的气候特征、海雾与层云的关系以及微物理化学特征等方面的主要成果,并讨论了遥感技术、数值模拟及资料同化在雾场研究中的应用进展,特别强调了城市化和工业化对雾的影响。韩美等<sup>[13]</sup>也从海雾发生时的天气气候性特征、监测手段以及微物理特征和数值预报方面,对比了台湾海峡海雾和其他海域大雾的研究进展状况。

海岸区是我国六大雾区之一<sup>[5]</sup>,对黄渤海以及东海地区的海雾研究起步相对早于南海北部沿海,对于华南海雾的研究较之黄渤海区域偏少。地理上,华南区域主要包括广西、广东、福建、台湾以及海南等地区,本文拟从华南海雾的气候学特征、生消机制及边界层特征、微物理化学特征、遥感监测和模式预报等方面,回顾当前华南海雾的研究进

展,旨在对华南地区海雾的研究现状有进一步认识。

## 1 华南海雾的气候学特征

由于前期对海雾的观测资料较少,故在海雾的气候学研究中,通常以雾日数来探讨其气候学特征变化。通过统计海雾在各个时段发生的次数,可以判断该区域的海雾发生多寡以及季节分布等特征;同时,结合其他气象要素资料,可进一步探寻该地区海雾生消机制。研究发现:南海北部海雾多集中于近岸海区,远离海岸线的海区海雾发生较少<sup>[14]</sup>,在偏陆地一侧也有类似特征,海雾发生频率随离岸距离的增大而减小<sup>[15]</sup>。图1显示了我国近岸地区年雾日数的空间分布特征,可以发现雾日数自北向南基本呈现递减的趋势,华南主要发生海雾的区域有雷州半岛、琼州海峡、广东沿岸、台湾海峡等地<sup>[2]</sup>,海雾年频数大于等于20 d,粤中和粤东雾日数相对较少<sup>[16]</sup>。

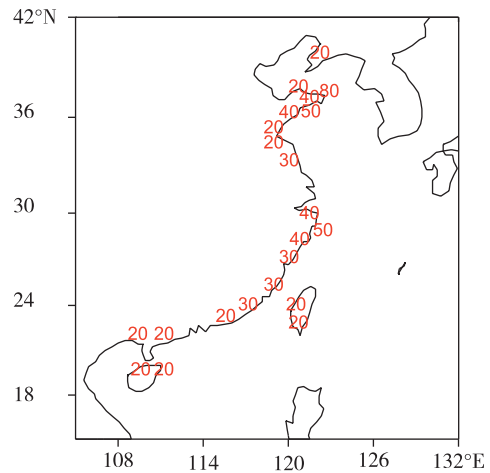


图1 我国近岸年雾日数空间分布(张苏平和鲍献文<sup>[2]</sup>)  
Fig.1 Spatial distribution of annual number of foggy days in the coast region of China<sup>[2]</sup>

### 1.1 北部湾区域

北部湾地区海雾多以平流雾为主,分冷锋前暖平流、地面高压后部暖平流和弱冷平流三种形势<sup>[17]</sup>,海雾多集中在冬春季节发生,以春季居多<sup>[18]</sup>;海雾空间分布极为不均,研究发现,在广西沿岸地区的多雾站点雾日数可达少雾站点的两倍以上<sup>[19]</sup>。陈燕丽等<sup>[20]</sup>研究了北部湾轻雾(水平能见度为1~10 km)和大雾(能见度小于1 km)的气候特征,发现该地区各站点海雾主要集中在12月一次年4月之间,轻雾发生频次在20世纪70年代后呈现出增加的趋势,而大雾频次却明显减少。由图2可以看出,1960—2016年北部湾地区8站(东兴、钦

州、北海、涠洲岛、湛江、徐闻、海口、东方)平均雾日数时间序列显示出明显的年代际变化,在20世纪60年代至90年代末,北部湾平均海雾日数明显减少,90年代海雾日数仅11 d左右。而自20世纪90年代末以来,海雾日数呈现明显的增长趋势,在2016年达到最大值,雾日数约为33 d。

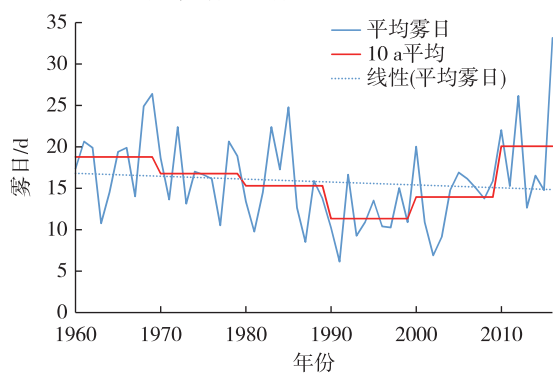


图2 北部湾区域8站平均雾日数时间曲线(蓝线为平均雾日数,红线为每10 a平均值,蓝色虚线表示线性趋势)

Fig.2 Time curve of annual average number of foggy days at 8 stations over the Beibu Gulf area (blue line for average number of foggy days, red line for 10-year average, blue dotted line for linear trend)

## 1.2 琼州海峡与广东沿海

研究<sup>[21]</sup>表明:琼州海峡沿海岸雾多发于冬、春季,从雾日数的年际变化看,近年海雾发生频次呈现显著减少趋势,雾日数的减少与气候变暖有密切关系,夜间最低温度升高是造成海雾减少的主要原因。

雷州半岛海雾发生时间主要集中在每年的1—4月、12月<sup>[22]</sup>。徐峰等<sup>[23]</sup>利用湛江、雷州、徐闻3个观测站的气象资料,分析了雷州半岛雾的发生规律,指出:3站年雾日数变化趋势基本一致,年平均雾日数分别为24.7 d、30.4 d和21.0 d;湛江站近10 a以来夜间雾发生频率为90%;海雾持续时间较短,在4 h以内的占75%。

如表1中统计结果所示,粤中和粤东沿岸海雾发生频数相对雷州半岛海雾的频次显著偏少<sup>[16]</sup>。珠江口地区持续性雾主要集中出现在10月—次年5月,尤其在春季(主要在3月和4月)持续性雾发生的概率(3月和4月雾发生频次占全年雾频次比例)最大,占到全年的46%,其次是冬季,雾频次达全年的37%,秋季仅占到16%左右,夏季未出现过持续性大雾天气<sup>[24]</sup>。粤东沿海岸海雾主要出现的时间是在1—5月,其中4月海雾发生频次最高,为海雾多发时段<sup>[25]</sup>。

表1 广东沿海海岸21站点1967年3月—2015年2月累计雾日数(夏天竹<sup>[16]</sup>)

Table 1 Cumulative number of sea fog days at the 21 stations over the coast region of Guangdong from March 1967 to February 2015<sup>[16]</sup>

区域	站号	站名	总雾日数/d
粤东	59313	饶平	479
	59324	南澳	553
	59319	澄海	754
	59316	汕头	698
	59318	潮阳	477
	59317	惠来	279
	59502	陆丰	304
	59500	海丰	205
	59501	汕尾	332
	59493	深圳	207
粤中	59488	珠海	501
	59487	斗门	742
	59678	台山	738
	59673	上川	372
	59663	阳江	589
粤西	59664	电白	224
	59656	吴川	389
	59650	遂溪	1 206
	59658	湛江	1 212
	59750	雷州	1 480
	59754	徐闻	894

## 1.3 福建沿海与台湾海峡

台湾海峡地区也是我国海雾的多发区域之一<sup>[26]</sup>。苏鸿明<sup>[27]</sup>研究表明,冬、春季是台湾海峡海雾多发季节,夏季海雾较少发生,其中西岸雾日集中出现于1—6月,约占全年雾日数86.5%;相比之下,东岸雾季早于西岸,主要出现在10月—次年5月;而澎湖列岛雾日数极少,基本集中在3—5月。海雾日变化表现为下半夜至上午明显,中午至傍晚期间海雾难以形成,雾的持续时间多为1~2 d。且台湾海峡西岸的雾日数要明显多于东岸及澎湖列岛地区。台湾海峡西岸的海雾多发于福建南部沿海地区,以崇武、厦门和东山等地居多,且西岸海雾在近10年来呈现递增的趋势,该趋势可能受福建南部地区经济发展的影响<sup>[28]</sup>。

总体上来看,华南沿海地区海雾主要集中发生在冬季和春季之间,秋季发生的概率较小,夏季无海雾发生或海雾发生概率极小,且雾季开始时间有一定差异,粤中和粤西海区最早(12月30日),台湾

海峡海区次之(1月10日),再次是北部湾海区(1月18日),粤东海域雾季开始最晚(1月21日)<sup>[29]</sup>。

## 2 华南海雾发生的天气形势及其生消机制

海雾是在近地面水汽充沛、平流运动、适宜的温度和大气层结相对稳定等背景条件下形成的,主要受增湿和降温<sup>[2]</sup>两种过程主导。增湿主要来自于海表面海水蒸发以及风场的水平输送。如周发琇等<sup>[30]</sup>、王鑫等<sup>[31]</sup>等从大气环流、水汽输送以及海表面温度(SST)等要素出发,分别探讨了黄海春季

和夏季海雾形成的条件,发现春夏季海雾形成的水汽主要由低空急流将热带区域的大气输送而来,配合黄海海域大气环流结构、SST等适宜条件形成海雾,同时指出夏季风的强弱是决定黄海夏季海雾多寡的主要因素之一。降温途径则相对较多,既能通过海气间湍流热量输送和辐射传输降温,也可通过雾顶长波辐射冷却<sup>[32]</sup>。表2给出了华南典型海雾类型及其发生天气形势相关研究结果,不同区域的海雾发生天气形势及其生消机制也会有所差异。

表2 华南典型海雾类型及其发生天气形势

Table 2 Typical types of sea fog and corresponding synoptic situations over South China

区域	统计时段	类型	天气形势
华南 <sup>[33]</sup>	—	平流雾、平流辐射雾	—
广西沿岸 <sup>[18]</sup>	—	—	静止锋型、冷锋前型、变性高压型、西南低槽型
粤西沿岸 <sup>[23]</sup>	湛江(1951—2009年)、雷州(1966—2008年)、徐闻(1961—2008年,其中1985、2000年缺失)	平流雾、辐射雾和锋面雾	高压入海型、低压前型、静止锋前型、冷锋前型、鞍形场或均压场型
珠江口 <sup>[39]</sup>	1980—2006年	平流雾	低压或倒槽的东侧型、高压底部或后部型、高低压之间型、均压场型
琼州海峡 <sup>[21]</sup>	1961—2006年	辐射雾、平流雾、平流辐射雾、锋面雾	均压场型、入海变性高压脊型和锋面型

HUANG et al.<sup>[33]</sup>指出:华南主要存在两种类型的海雾,一种是平流雾,其特征是海表面气温高于SST,形成机制是涡流扩散(eddy diffusion)将上层水含量饱和的空气输送至海面;另一种是平流辐射雾,海表面气温低于SST,这种类型的海雾在美国西海岸地区较为常见<sup>[34]</sup>。在雾的持续过程中,近地面暖湿气流的平流输入、水汽弱辐合、浅层抬升以及对流层中下部的“干暖层”,均有利于饱和湿空气中的水汽凝结和逆温层的维持,而伴随偏北风南下的干冷平流是导致珠江口持续性雾过程消散的主要因素<sup>[24]</sup>。边界层内的风场、温度场以及湿度场之间的相互影响、制约,共同促成了海雾的生消过程<sup>[35]</sup>。

广西沿岸海雾发生时主要有4种天气形势,分别是静止锋型、变性高压型、冷锋前型和西南低槽型<sup>[18]</sup>。广西近岸地区出现海雾时地面气温在11~25℃,气温大于25℃或小于11℃很少有海雾出现,温度平流的适当温差(气温与地表温度之差)也有利于广西沿海地区的平流雾的形成;逆温层是出现大雾的有利条件之一,但并不是必要的条件,一旦这些条件发生逆转或遭到破坏,比如水汽减少、

低层空气增温、风速加大或近地面层大气稳定状态遭到破坏时,海雾会消散或抬升成为低云<sup>[36]</sup>。

偏东的暖湿气流进入广东沿岸地区较冷的海面,气流冷却并达到饱和使得海雾形成,偏东南暖湿气流为广东沿岸浓雾的生成及成熟,提供了稳定的逆温层结和充沛的水汽等条件。吕晶晶等<sup>[37]</sup>研究了湛江东海岛一次春季海雾的结构以及边界层的演变特征,指出:在海雾发生前4h稳定的层结及偏东南暖湿气流持续增湿,这是海雾爆发性增长的酝酿阶段,雾滴谱拓宽经过活跃—稳定—爆发三个阶段完成,湍流混合产生的影响不大;浓雾快速消散主要有雾滴蒸发、重力碰撞并沉降、湍流碰撞并沉降三个途径共同作用而成,其中直径大于21 μm的雾滴大量耗散是该次海雾过程消散的重要阶段。

粤西沿岸海雾形成的天气形势可分为静止锋前型、高压入海型、冷锋前型、低压前型、鞍形场或均压场型五类,且主要形成的是平流雾、锋面雾和辐射雾三类。三种海雾的消散机制分别是新的冷空气南下补充,雾滴相互碰撞并沉降进而形成小雨以及日出后雾滴受热蒸发<sup>[23]</sup>。在琼州海峡地区,海雾形成的天气形势主要有均压场型、锋面型和入海

变性高压脊型三类,均压场型产生辐射雾,锋面型产生锋面雾,入海变性高压脊型通常产生平流雾以及平流辐射雾;一天中出现雾的峰值时间主要集中在上午 06—07 时,海雾消散时间主要集中在 08—09 时<sup>[21]</sup>。

在冬、春季和初夏季节,粤东海区受到沿岸流及黑潮的影响,等水温线大致呈东北—西南走向,当海上吹偏东或偏南风时,有利于暖湿空气向近岸较冷海面流动从而形成海雾。一般海雾生成时风以东北—东南风向为主,风速在  $3\sim 6\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  范围,平均气温通常低于  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,相对湿度达 80% 以上。若风速过大将破坏稳定的低层逆温层,抑制海雾生成,且过大的风速还会吹散已经形成的雾,不利于海雾发展<sup>[25]</sup>。在粤东沿岸大雾发生期间,大气层结主要表现为对流稳定或弱的不稳定特征,同时,近地面层出现明显的逆温结构;华南沿海西南方向低层(850 hPa)气流为大雾期间提供了充足的水汽条件;弱冷空气不断在近地面入侵,导致低层大气变得弱不稳定,进而使冷的下垫面维持,近地面层的逆温结构不被完全破坏;在深厚的逆温条件下,低空西南支暖湿气流的水汽持续输送以及适量的水汽辐合导致大气中水汽凝结,使得粤东地区的大雾得以维持;大雾后期消散的主要原因是强冷空气入侵,破坏了大气的层结和逆温条件<sup>[38]</sup>。

王婷等<sup>[39]</sup>分析珠江口海雾生消的环流形势发现:珠江口区域海雾的主要天气形势以低压或倒槽的东侧型、高低压之间型、高压底部或后部型、均压

场型四类为主,偏东风或偏南风将暖湿空气从西太平洋或南海输送至珠江口附近区域,形成平流雾。

### 3 华南海雾的微物理化学特征

华南海雾的观测研究晚于黄、渤海地区<sup>[40]</sup>,且较多着眼于海雾发生的天气背景特征及各个要素的变化趋势<sup>[41-44]</sup>,而对海雾的微物理化学特征研究相对较少。

#### 3.1 华南海雾的微物理结构

雾滴谱是雾中不同直径雾滴数密度的分布,同时也是表征雾结构的一个重要微物理特征。从宏观上看,雾滴谱可以反映出—个地区雾形成时的气候背景、地理环境甚至不同天气过程;从微观上来说,雾滴谱的分布特征既可以作为雾的数值模拟过程中参数化的重要参数,又可以通过雾滴谱分布计算雾的含水量,并进一步推算出当地大气能见度与含水量之间的关系,同时,它还能间接反映该地区背景气溶胶的特性<sup>[45]</sup>。近年在华南地区开展的一些海雾事件微物理特征研究如表 3 中所示。吕晶晶等<sup>[46]</sup>研究了 2010 年 3 月 31 日—4 月 2 日湛江地区两次海雾过程雾滴谱随时间的演化规律,发现两次海雾过程的雾滴谱均呈现单调递减趋势,海雾形成和消散阶段,雾滴谱谱宽表现为突然增大或减小的现象;且在海雾过程中,半径小于  $5\text{ }\mu\text{m}$  的雾滴占据整个雾滴数浓度(每立方厘米内的雾滴数)的较大比重。

表 3 华南地区一些代表性海雾事件微物理特征

Table 3 Microphysical characteristics of some representative sea fog events over South China

位置	时间	雾过程/ 次	数浓度/ $\text{cm}^{-3}$	液态水含量/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	平均直径/ $\mu\text{m}$	峰值直径/ $\mu\text{m}$	最大直径/ $\mu\text{m}$	雾滴谱分布
广东湛江 <sup>[46]</sup>	2010 年 3 月 31 日— 4 月 2 日	2	1~100	0.001~0.232	3~19.6	2.8~21.4	9~49	—
广东茂名 <sup>[47]</sup>	2007 年 3—4 月	8	57.1	0.018 3	4.7	2.9	—	J 分布
广东湛江 <sup>[48]</sup>	2010 年 3 月	1	4.5~17.5	—	2~10	2	46	—
广东湛江 <sup>[49]</sup>	2010 年 3 月	1	39.6	0.013	4.2	2.8	17.0	J 分布
广东湛江 <sup>[50]</sup>	2011 年 2—3 月	12	170~372	0.018~0.170	1.71~3.28	—	—	—
南海西北部 <sup>[51]</sup>	2017 年 3 月	1	198	0.116	5.6	—	—	—
福建厦门 <sup>[52]</sup>	2013 年 4 月 17 日	1	—	—	5~12	—	—	—

黄辉军等<sup>[47]</sup>于 2007 年 3—4 月,在广东茂名海洋气象科学实验基地对海雾进行了连续观测,共取得 51 次雾滴谱观测样本,通过分析其微物理结构特

征发现茂名地区海雾雾滴谱分布符合 J 分布,平均数密度为  $57.1\text{ cm}^{-3}$ ,平均液态水含量为  $0.018\text{ 3 g}\cdot\text{m}^{-3}$ ,雾滴平均直径和峰值直径分别为  $4.7\text{ }\mu\text{m}$



和  $2.9 \mu\text{m}$ 。徐峰等<sup>[48]</sup>通过对2010年3月在湛江东海岛观测到的一次海雾过程的研究,发现该地区海雾雾滴谱径主要出现在  $2 \sim 10 \mu\text{m}$ ,第一峰值位于  $2 \mu\text{m}$  处,最大谱径超过  $46 \mu\text{m}$ ,大滴数密度偏小,这与吕晶晶等<sup>[46]</sup>在该地区的同期观测结果基本一致。张舒婷等<sup>[49]</sup>以及岳岩裕等<sup>[50]</sup>在该地区也得到了类似的观测特征,并且研究发现在海雾的持续过程中湍流过程的参与使雾滴混合均匀,同时湍流作用还可以使雾体内部和外部空气相互交流,使得外部空气的凝结核活化、数浓度升高,凝结增长造成小雾滴变大。在南海西北部海面海雾雾滴大于邻近陆地区域观测的结果<sup>[51]</sup>。就整体而言,湛江地区观测到的海雾雾滴平均直径小于厦门地区的观测结果<sup>[52]</sup>。

### 3.2 华南海雾雾水的化学特征

海雾的形成条件之一是需要有空气中的细微颗粒作为凝结核以凝结水汽。因此,海雾雾水的化学特性与空气中微粒的不同有着直接的关系,大气污染物微粒的性质很大程度上决定了海雾的化学性质,偏酸性的海雾还会对人体及环境造成严重的危害。总的来说,针对华南海雾的化学特征开展的研究较少,观测主要集中在湛江东海岛<sup>[53]</sup>以及南海西北部( $110.86^\circ\text{E}$ ,  $21.02^\circ\text{N}$ )海面上<sup>[51]</sup>。两个区域海雾均偏酸性,东海岛海雾 pH 在  $4.80 \sim 6.05$  之间,电导率为  $229 \sim 6190 \mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ ;而海面海雾酸性更强, pH 为  $2.51 \sim 3.50$ 。海面海雾阴阳离子含量整体较陆面观测到的海雾偏大,其中以  $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  最为明显,陆面海雾中  $\text{K}^+$  浓度远小于  $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  浓度,但在海面海雾相反。这一现象说明陆地观测的海雾与海面观测的海雾雾水化学特征是有差异的。研究还指出:在海雾各个阶段雾水中同种离子含量也有一定差异,在雾发生前期的离子浓度最高,而海雾发生的时候离子浓度会相对偏低;不同类型的海雾雾水中离子浓度也有一定区别。

## 4 遥感监测在华南海雾中的应用

常规的监测方法主要是通过陆地上或海上布设站点进行人工或仪器观测,这不仅需要大量的人力、物力支持,而且站点观测基本难以满足实际需要,因而难以取得较为理想的监测效果<sup>[54]</sup>。随着卫星遥感技术的发展并逐步应用,遥感监测具有覆盖面广、信息量丰富、时间分辨率高、信息源可靠、成本投入低等独特优势,使其成为海雾研究中一种理想监测手段<sup>[55]</sup>。关于雾的遥感监测研究已经有

了较为悠久的历史,并取得了重大的进展。JAMI、CloudSat、MODIS(AQUA/TERRA)、风云二号等卫星资料,在研究我国黄海海雾的特征及其演变过程中得到了应用<sup>[56-58]</sup>。鲍献文等<sup>[59]</sup>利用 GMS5 和 NOAA 卫星的可见光和红外通道资料,结合光谱分析法、结果分析法以及相应的处理技术,对2001年4月17、18日的黄海海雾进行了个例监测试验,取得了较为理想的结果。刘希和胡秀清<sup>[60]</sup>利用 MTSAT 卫星资料对我国东部沿海地区的海雾自动识别技术做了探究,研究中利用可见光反射率阈值法、 $3 \times 3$  像元空间一致性检测法、红外亮温阈值法以及双通道差值法等,建立了全天候海雾遥感监测算法,该方法能够较好地分离云雾,在夜间,同样可以有效地分离低层云雾和晴空像元,甚至当出现逆温雾时,仍可以有效地识别海雾。

应用遥感监测的方式研究华南地区海雾整体来说还相对较少。以张春桂等<sup>[61-62]</sup>的研究最具代表性,他们发现基于 MODIS 数据的海雾遥感监测模型能够比较准确地监测台湾海峡海雾空间分布及其发展过程,台湾海峡地区海雾的遥感监测准确率可达 80% 以上,具有较好的业务化应用前景。基于多源卫星数据建立的海雾遥感监测模型能较准确地监测福建沿海海雾的分布和发展过程,能在大雾天气期间及时采取应对措施,减少大雾对农业生产活动的不利影响。我国的 FY-3B 气象卫星资料在华南地区海雾监测研究中也得到了一定的应用<sup>[63]</sup>。但整体上来说,有关华南海雾的卫星遥感监测研究还相对较少。

## 5 华南海雾的模式与预报

关于雾的预报主要有统计预报和数值预报两种方法<sup>[64]</sup>,统计预报中较常用的有人工神经网络法、决策树法、模糊逻辑法等。与传统的统计方法相比,这些方法的应用提高了对雾预报的准确率。然而,这些方法仍然具有一定缺陷,即缺乏对雾过程物理规律的描述,且对历史观测资料的质量和数量较为依赖。相较而言,数值模式在雾的预报方面具有更广泛的应用价值。研究发现,在一种天气类型下,单纯形成平流雾或蒸发雾的情况并不多见,一般情况下平流雾和蒸发雾伴随或者混合出现,这可能是导致雾的预报相对困难的原因之一<sup>[26]</sup>。数值预报较多应用于我国黄渤海地区的海雾研究中,GAO et al.<sup>[65]</sup>利用宾夕法尼亚大学/美国国家大气研究中心(PSU/NCAR)第5代中尺度模式(MM5),

对2005年3月9日发生在黄海的一次海雾过程做了模拟,发现此次海雾的形成是相对持续的温暖且潮湿的南风向北移动经过寒冷的海面造成。WRF (Weather Research and Forecasting)模式在研究黄渤海区域的海雾中得到了广泛的应用<sup>[66-67]</sup>。

在华南海雾预报研究中,统计预报相对较多<sup>[17,21]</sup>。如梁敏妍和黄潮光<sup>[68]</sup>利用江门地区海雾发生的6种天气类型(锋面低槽A型、锋面低槽B型、高压出海型、西南倒槽型、升温降压型和高湿型)进行雾的预报,取得了较好的结果。黄健等<sup>[69]</sup>建立了广东沿岸决策树预报模型,该模型对广东沿岸海雾的预报准确率可达73%以上,可直接用于业务中判别有无海雾。

袁金南和黄健<sup>[42]</sup>利用WRF模式,模拟了珠江口附近春季的一次海雾形成与发展过程,模拟结果与观测事实比较吻合。HUANG et al.<sup>[70]</sup>利用GRAPES (the Global and Regional Assimilation and Prediction System)模式输出统计数据,对广东省沿岸地区(以珠海、湛江、汕头为例)海雾做了预报,准确率高达84%~90%,TS (threat score)为0.4~0.5, HSS (Heidke skill score)为0.52~0.56。基于3 km的中尺度区域数值模式(GRAPES)的模拟结果显示:GRAPES-3 km可以大致预测中国南部沿海海雾的形成,演化和消散,并且研究还指出在雷州半岛周围多雾区附近的监测站相比其他地区预报分数更高<sup>[71]</sup>。总的来说,华南地区开展的海雾数值预报研究相对黄渤海区域偏少。

随着计算机的发展,机器深度学习方法在气象预报中也得到了应用。人工神经网络是一种由特定方式相互连接的多个神经元构成,并能够描述和模拟许多复杂行为的统计模型,具有较强的集体运算能力和自适应学习能力<sup>[72]</sup>。一些学者<sup>[73-74]</sup>也将这一方法应用到能见度的预报中。李昕蓓等<sup>[75]</sup>利用循环神经网络方法,结合福州气象观测站数据,建立了福州单站能见度短临预报模型,结果表明:循环神经网络预报与观测变化有着较好的一致性,随预报时效的延长,绝对误差平均值与均方根误差平均值都随之增大;进一步对循环神经网络与传统BP (back-propagation)神经网络的预报效果进行了对比,发现循环神经网络对于能见度的预报总体上较BP神经网络好。这一方法在华南其它区域应用较少。

## 6 小结与展望

华南海雾主要集中发生在冬季和春季,不同地

区的雾季略有差异。在雷州半岛、琼州海峡、广东沿岸、台湾海峡等地区的年平均雾日数大于等于20 d,粤中和粤东雾日数相对较少。华南海雾主要以平流雾、平流辐射雾以及锋面雾为主,局部区域形成辐射雾;在华南的不同区域,海雾发生的天气形势往往会有一定区别。对于华南海雾的微物理化学特征研究发现,不同雾过程以及同一雾过程中不同阶段的海雾微物理化学特征具有一定差异,陆面海雾阴阳离子浓度较海面海雾偏小。遥感监测以及数值预报在华南海雾的研究中也取得了重要的研究成果,能较好地应用于业务预报中。

本文回顾了近年华南地区开展的海雾研究,在综述中难免会遗漏一些学者的研究工作,但总的来说,对于华南地区海雾的研究还相对较少。因此,未来需要有更多工作投入到海雾的研究中。在气候特征方面,下一步研究可着眼于华南海雾的年际、年代际特征,探究华南海雾变化与ENSO、PDO等大尺度海气年际、年代际信号的可能联系。同时,由于早期对于海雾观测的局限性,其气候特征仅从过去几十年雾日数的统计结果得出,缺少海雾过程的连续观测数据;因此,还需进一步加强对海雾过程的观测,加深对其生消过程的认识,为提高华南海雾的数值模拟能力奠定基础。目前华南海雾的微物理化学特征研究主要集中在粤西以及台湾海峡区域,未来需要增加常规的海雾微物理化学特征观测,并有针对性的加大观测范围,以加深对华南其它区域海雾微物理化学特征的认识。对于海面海雾与陆面海雾观测对比研究目前基本还处于起步阶段,未来也需要有更多工作投入。卫星遥感监测以及数值预报在海雾研究中的应用仍需要进一步加强;统计预报和数值预报相结合可作为未来华南海雾研究的一个重要方向。

## 参考文献:

- [1] 王彬华.海雾[M].北京:海洋出版社,1983.
- [2] 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),2008,38(3):359-366.
- [3] 李晓丽,唐跃,王雷.舟山海雾发生问题探讨[J].海洋预报,2011,28(1):60-65.
- [4] 李子华.中国近40年来雾的研究[J].气象学报,2001,59(5):616-624.
- [5] 王丽萍,陈少勇,董安祥.中国雾区的分布及其季节变化[J].地理学报,2005,60(4):689-697.
- [6] TAYLOR G I. The formation of fog and mist[J]. Quart J Roy Meteor Soc,1917,43(183):241-268.

- [7] 胡瑞金,周发琇.海雾生成过程中平流,湍流,辐射效应研究: I 理论分析[J].海洋学报,1998,20(1):25-32.
- [8] 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[J].海洋科学进展,2006,24(2):156-165.
- [9] ZHANG S P, XIE S P, LIU Q Y, et al. Seasonal variations of Yellow Sea fog: Observations and mechanisms[J]. J Climate,2009,22(24):6758-6772.
- [10] CHO Y K, KIM M O, KIM B C. Sea fog around the Korean Peninsula [J]. J Appl Meteor, 2010, 39(12): 2473-2479.
- [11] 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.
- [12] 傅刚,李鹏远,张苏平,等.中国海雾研究简要回顾[J].气象科技进展,2016,6(2):20-28.
- [13] 韩美,高珊,曾瑾瑜,等.台湾海峡西岸海雾研究现状与未来发展方向[J].气象科技,2016,44(6):928-936,955.
- [14] 何云开,黄健,贺志刚,等.南海北部近岸春季海雾的年际变化[J].热带海洋学报,2008,27(5):6-11.
- [15] 何小娟,张雪波,谢仁忠,等.钦州市大雾天气的气候特征及天气分型[J].安徽农业科学,2012,40(31):15359-15362.
- [16] 夏天竹.华南沿海海雾及南海海气温差气候特征分析与研究[D].湛江:广东海洋大学,2016.
- [17] 卢峰本,黄滢,覃庆第.北部湾海雾气候特征分析及预报[J].海洋预报,2006,23(增刊):68-72.
- [18] 孔宁谦.广西沿海雾的特征分析[J].广西气象,1997,18(2):41-45.
- [19] 邓英姿,李勇,许文龙.广西沿海地区大范围雾气候特征与天气形势分析[J].气象研究与应用,2008,29(4):20-22.
- [20] 陈燕丽,黄永麟,何立,等.北部湾海雾气候特征及变化初步解释[J].科学技术与工程,2016,16(36):127-132.
- [21] 许向春,张春花,林建兴,等.琼州海峡沿岸雾统计特征及天气学预报指标[J].气象科技,2009,37(3):323-329.
- [22] 杨彩福,吴阳,张佃波.湛江港雾的统计分析[J].海洋通报,1998,27(5):34-39.
- [23] 徐峰,牛生杰,张羽,等.雷州半岛雾的气候特征及生消机理[J].大气科学学报,2011,34(4):423-432.
- [24] 王婷,潘蔚娟,湛志刚,等.珠江口持续性雾生消的环流特征和成因分析[J].气象,2010,36(6):13-20.
- [25] 张朝锋.粤东海区海雾的气候特征分析[J].广东气象,2002,24(2):20-21.
- [26] 李昫英,王汉杰.台湾海峡地区雾形成的天气类型分析[J].热带海洋学报,2000,19(4):65-70.
- [27] 苏鸿明.台湾海峡海雾的气候分析[J].应用海洋学报,1998,17(1):25-28.
- [28] 马治国,张春桂,陈家金,等.福建省沿海雾的气候变化特征分析[J].中国农业气象,2011,32(增刊):69-73.
- [29] 战淑芸,林玉英.华南沿海海雾的气候特征及其与赤道东太平洋海温的关系[J].海洋预报,1988,5(1):23-32.
- [30] 周发琇,王鑫,鲍献文.黄海春季海雾形成的气候特征[J].海洋学报,2004,26(3):28-37.
- [31] 王鑫,黄菲,周发琇.黄海沿海夏季海雾形成的气候特征[J].海洋学报,2006,28(1):26-34.
- [32] 沈忱.华南沿岸雾分类和海雾冷却机制的初步研究[D].南京:南京信息工程大学,2009.
- [33] HUANG H, HUANG J, MAO W, et al. Two typical boundary layer structures in sea fog on the coast of southern China, abstract id A43A-0200[C]//AGU 2013 Fall Meeting. Washington: American Geophysical Union,2013.
- [34] LEIPPER D F. Fog on the U.S. West Coast: A review [J]. Bull Amer Meteor Soc,1994,75(2):229-240.
- [35] 陆春松,牛生杰,杨军,等.南京冬季平流雾的生消机制及边界层结构观测分析[J].大气科学学报,2008,31(4):520-529.
- [36] 黄滢,江源源,郭亮.广西沿海雾的气候特征及形成条件分析[J].安徽农业科学,2012,40(31):15343-15345.
- [37] 吕晶晶,牛生杰,张羽,等.湛江东海岛一次春季海雾的宏微观结构及边界层演变特征[J].气象学报,2014,72(2):350-365.
- [38] 王桂娟,郑有飞,黄小丹,等.粤东一次罕见持续性大雾天气过程的分析[J].广东气象,2013,35(2):1-7,13.
- [39] 王婷,潘蔚娟,刘云香.珠江口海雾生消的环流形势及物理机制分析[C]//中国气象学会2007年年会天气预报预警和影响评估技术分会场论文集.北京:中国气象学会,2007.
- [40] 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.
- [41] 林晓能,宋萍萍.南海一次典型海雾过程的特征分析[J].海洋预报,1990,7(4):75-80.
- [42] 袁金南,黄健.珠江口附近春季一次海雾的观测分析及三维数值模拟[J].气象学报,2011,69(5):847-859.
- [43] 谢小敏,刘敏.深圳一次罕见连续大雾天气的特点及成因[J].广东气象,2006,28(2):34-36.
- [44] 蒋静,凌宗良,李新华,等.广西防城港市一次连续大雾天气的特点[J].广东气象,2010,32(2):39-41.
- [45] LEWIS J M, KORAČIN D, REDMOND K T. Sea fog research in the United Kingdom and United States: A



- historical essay including outlook [J]. Bull Amer Meteor Soc, 2004, 85(3):395-408.
- [46] 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.
- [47] 黄辉军,黄健,刘春霞,等.茂名地区海雾的微物理结构特征[J].海洋学报,2009,31(2):17-23.
- [48] 徐峰,王晶,张羽,等.粤西沿海海雾天气气候特征及微物理结构研究[J].气象,2012,38(8):985-996.
- [49] 张舒婷,牛生杰,赵丽娟.一次南海海雾微物理结构个例分析[J].大气科学,2013,37(3):552-562.
- [50] 岳岩裕,牛生杰,赵丽娟,等.湛江地区近海岸雾产生的天气条件及宏微观特征分析[J].大气科学,2013,37(3):609-622.
- [51] 徐峰,韩利国,吕晶晶,等.南海西北部一次上海雾的微物理及化学特性分析[J].热带气象学报,2019,35(5):596-603.
- [52] 张悦,樊曙先,张舒婷,等.海峡西岸一次雾过程微结构及其起伏特征研究[J].热带气象学报,2015,31(3):385-394.
- [53] 徐峰,牛生杰,张羽,等.湛江东海岛春季海雾雾水化学特性分析[J].中国环境科学,2011,31(3):353-360.
- [54] 李亚春,孙涵,徐萌.气象卫星在雾的遥感监测中的应用与存在的问题[J].遥感技术与应用,2000,15(4):223-227.
- [55] 陈林,牛生杰,仲凌志.MODIS 监测雾的方法及分析[J].大气科学学报,2006,29(4):448-454.
- [56] 吴晓京,李云,黄彬,等.利用动态阈值方法改进的风云二号卫星海雾检测技术[J].海洋气象学报,2017,37(2):31-41.
- [57] ZHANG S P, YI L. A comprehensive dynamic threshold algorithm for daytime sea fog retrieval over the Chinese adjacent seas [J]. Pure Appl Geophys, 2013, 170(11):1931-1944.
- [58] YI L, THIES B, ZHANG S P, et al. Optical thickness and effective radius retrievals of low stratus and fog from MTSAT daytime data as a prerequisite for Yellow Sea fog detection [J]. Remote Sens, 2016, 8(1):8.
- [59] 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[J].高技术通讯,2005,15(1):101-106.
- [60] 刘希,胡秀清.基于 MTSAT 卫星的我国东部沿海雾区的自动识别[J].应用海洋学学报,2008,27(1):112-117.
- [61] 张春桂,蔡义勇,张加春.MODIS 遥感数据在我国台湾海峡海雾监测中的应用[J].应用气象学报,2009,20(1):8-16.
- [62] 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.
- [63] 刘少军,吴胜安,李伟光,等.基于 FY-3B 卫星资料的中国南海海区 1—3 月海雾时空分布特征研究[J].海洋气象学报,2017,37(4):85-90.
- [64] 冯蕾,田华.国内外雾预报技术研究进展[J].南京信息工程大学学报,2014,6(1):74-81.
- [65] 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 [J]. Adv Atmos Sci, 2007, 24(1):65-81.
- [66] 高荣珍,李欣,时晓曦,等.基于 WRF 模式的青岛近海能见度算法比较研究[J].海洋气象学报,2018,38(2):28-35.
- [67] 李伟,邵利民,唐君,等.基于 WRF 的黄渤海海雾数值模拟参数化方案研究[J].海洋预报,2019,36(2):88-96.
- [68] 梁敏妍,黄潮光.江门地区 2、3 月雾的分型预报[J].广东气象,2007,29(1):31-33.
- [69] 黄健,黄辉军,黄敏辉,等.广东沿岸海雾决策树预报模型[J].应用气象学报,2011,22(1):107-114.
- [70] HUANG H J, HUANG J, LIU C X, et al. Prediction of sea fog of Guangdong coastland using the variable factors output by GRAPES model [J]. J Trop Meteor, 2011, 17(2):166-174.
- [71] HUANG H J, HUANG B, YI L, et al. Evaluation of the global and regional assimilation and prediction system for predicting sea fog over the South China Sea [J]. Adv Atmos Sci, 2019, 36(6):623-642.
- [72] 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[J].应用气象学报,2005,16(6):794-803.
- [73] 李沛,王式功,尚可政,等.基于神经网络逐级分类建模的北京地区能见度预报[J].兰州大学学报(自然科学版),2012,48(3):52-57.
- [74] 徐志鹏,张苏平,衣立,等.青岛近岸能见度逐小时分级预报模型初探[J].海洋湖沼通报,2018(1):9-17.
- [75] 李昕蓓,张苏平,衣立,等.基于循环神经网络的单站能见度短临预报试验[J].海洋气象学报,2019,39(2):76-83.