

近年来中国雾研究进展

牛生杰¹ 陆春松¹ 吕晶晶¹ 徐峰² 赵丽娟³ 刘端阳⁴ 岳岩裕⁵ 周悦⁶ 于华英¹ 王天舒¹
(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 广东海洋大学, 湛江 524088; 3 厦门市环境监测中心站, 厦门 361000;
4 江苏省气象台, 南京 210008; 5 武汉中心气象台, 武汉 430074; 6 武汉区域气候中心, 武汉 430074)

摘要: 雾对交通运输、人体健康和农产品质量等有着重要的影响, 因此, 系统全面地认识雾过程, 对雾的预警预报、人民身体健康和经济建设, 具有特别重要的研究价值和现实意义。从雾的气候特征、宏观特征、微观特征, 雾与湍流之间的相互作用, 雾的化学特征, 雾的遥感监测, 数值模拟, 以及人工消雾等方面, 对近年来我国在雾研究方面取得的进展进行回顾和展望。

关键词: 雾, 观测, 模拟, 遥感

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.02.001

Advances in Fog Research in China

Niu Shengjie¹, Lu Chunsong¹, Lü Jingjing¹, Xu Feng², Zhao Lijuan³, Liu Duanyang⁴,
Yue Yanyu⁵, Zhou Yue⁶, Yu Huaying¹, Wang Tianshu¹

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 Guangdong Ocean University, Zhanjiang 524088 3 Xiamen Environmental Monitoring Central Station, Xiamen 361000

4 Jiangsu Meteorological Observatory, Nanjing 210008 5 Wuhan Central Meteorological Observatory, Wuhan 430074

6 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan 430074)

Abstract: Fog is a severe phenomenon affecting the transport, human health, the quality of agricultural products, and so on. Thus, a good comprehensive understanding of fog processes is quite important and valuable to the early warning and forecast of fog, to human health and economy. In this study, recent progresses in fog studies in China are reviewed in terms including the climatic characteristics, macro characteristics, micro characteristics of fog, the interactions between fog and turbulence, fog chemistry, fog remote sensing, fog numerical simulations and the fog dispersal. Some further studies on fog processes are also suggested.

Keywords: fog, observations, numerical simulations, remote sensing

0 引言

雾是由大量悬浮在近地层空气中的气溶胶粒子、微小水滴(或冰晶)组成的气溶胶系统, 而微小水滴(或冰晶)是近地层空气中水汽凝结(或凝华)的产物。浓雾已成为影响经济和社会发展及人民健康的重要灾害性天气之一。主要危害表现在以下四个方面: 1) 持续性浓雾对交通的危害最为直接, 往往造成高速公路汽车追尾相撞, 航班延误甚至发生空难, 海上轮渡停航甚至相撞, 严重影响交通安全和运输效率; 2) 雾中污染物含量高, 缩短日照时数, 降低农产品产量和品质, 增加植物病虫害的发生概率; 3) 输变电设备外绝缘受到雾中污染物和水分影响, 常常发生

污闪, 造成停电事故, 严重威胁电力供应安全; 4) 雾日的逆温, 使污染物质积聚, 雾中产生的二次污染物毒性更大, 严重损害人体健康。

为了提高对雾害的科学认识, 增强防御雾害的能力, 需要对雾害的成因、影响和监测预警等进行深入研究, 提高模式对雾的模拟预报能力, 减少雾害带来的损失。Niu等^[1]对我国2009年以前雾的研究进行了全面的总结。2009年以来, 国内雾的研究又取得了突出的成果, 本文将从雾的气候特征、宏观特征、微观特征, 雾与湍流之间的相互作用, 雾的化学特征, 雾的遥感监测、数值模拟和人工消雾等方面, 对近年来国内雾的研究进展进行总结, 最后将展望未来雾的研究方向。

1 雾的气候特征

国内外研究雾的气候特征方法很多, 最常用的方法是统计区域内的雾日数^[2-4]。我国自20世纪50年代以来, 地面气象观测站对雾过程有着长期系统的观测, 其形成的长序列资料是研究雾的气候变化的基础。中

收稿日期: 2015年7月27日; 修回日期: 2015年9月22日
第一作者: 牛生杰(1962—), Email: niusj@nuist.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金(41375138, 41275151, 41305120)

国雾的地理分布较复杂,一般而言,沿海、高山、城市为雾的多发地区,大陆多为辐射雾。雾的全国分布并不具有很强的规律性,但是从年平均雾日数来看,我国雾分布为东南部多西北部少^[5]。年平均雾日数在60d以上的多雾地区集中在辽宁东部沿海、山东半岛沿海、江浙沿海、福建西北及沿海、四川盆地和云南西南部^[1]。

多年来有许多学者对地区性的大雾变化进行了统计,给出局地雾的时空分布与气象因子之间的关系,并提出雾可能出现的原因^[6-9]。吴兑等^[10]提出暖冬造成强冷空气偏弱是雾多发的原因之一。刘小宁等^[5]指出中国大多数地区雾日数呈减少趋势,并指出雾日数变化的原因是复杂的,从相对湿度、城市热岛效应、空气污染、降水、生态环境多方面解释雾日数减少的原因。张人禾等^[11]研究了2013年1月中国东部严重的雾和霾天气,指出这次雾和霾事件的逐日演变超过2/3的方差可以由气象条件解释,而雾和霾事件的逐日演变同时受到大气动力因子和热力因子的影响。尹志聪等^[12]揭示了华北黄淮不同等级雾和霾的气候变化特征,并指出雾日数和降水量、相对湿度之间一直保持稳定的正相关关系。于华英等^[13]的研究发现北极涛动(Arctic oscillation, AO)的正异常,使得东亚大槽变弱,不利于冷空气南下,同时长三角地区中层高压异常,有利于大气稳定。La Niña事件有利于中国南海地区水汽增加,可能为南京雾的发生提供了水汽条件。

2 雾的宏观特征

2.1 雾的类型

对雾的分类有许多种,根据雾出现的地点可以分为内陆雾、海雾、沿海雾和山地雾。根据物理过程, Gultepe等^[14]将雾分为辐射雾、高逆温雾、平流辐射雾、平流雾和蒸发雾,王鹏飞等^[15]则将雾分为冷却雾、蒸发雾、混合雾及吸湿雾,又将冷却雾细分为“上坡冷却”、“辐射冷却”、“平流冷却”及“局地膨胀冷却”四种。

沿海雾是由于海上或者沿海冷暖平流相互交汇而使空气饱和形成的雾。内陆雾中的辐射雾是由于地面的强辐射冷却到露点而形成的。辐射雾绝大部分出现在内陆,且通常容易在反气旋控制的晴朗天气下形成^[14],所以辐射雾的主导因素就是辐射冷却。平流辐射雾主要受两种因素影响:辐射冷却和平流。这种雾大都出现在沿海地区^[1, 14, 16],有时也会出现在内陆^[17]。平流雾中平流起到了主导作用^[18]。雨雾(有时称为蒸发雾)的形成则基于以下物理机制:当大的雨滴下落到云下较干的空气中后,液滴蒸发形成水汽,

水汽在冷却后达到露点温度而凝结形成雾^[19-20]。

2.2 雾的形成、维持及消散时间

海雾的形成时间没有明显的特征,既有在中午时分形成,也有傍晚或午夜前后形成^[21-23]。沿海雾的消散时间与其形成时间类似,没有明显的特征。根据在南海北部和黄河的观测发现,海雾的持续时间一般在3~20h。辐射雾具有明显的日变化特征^[24-25],通常在日落以后或者午夜形成,个别的形成于日出前后。辐射雾大部分在日出后或者正午前后消散,维持时间为9~18h(表1、表2)。根据南京雾的观测资料,平流辐射雾和平流雾的维持时间均较长^[18, 25],为16~64h,2006年12月24—27日平流辐射雾过程维持时间超过了64h。平流辐射雾的形成时间与辐射雾类似,并且具有显著的日变化,都是在正午前后减弱或者消散。能见度低于50m的强浓雾一般出现在辐射雾及平流辐射雾中,其均与辐射冷却有关。然而,根据在南京五年的观测中发现,平流雾的最低能见度都要超过50m,即平流雾中没有出现强浓雾。强浓雾的持续时间大都在1~6h,最短的不到0.5h,最长的强浓雾出现在2006年12月24—27日,持续时间接近40h。不同类型雾最低能见度的差异受到雾的微物理过程影响。分析还发现,强浓雾大部分出现在凌晨,在日出前或者日出后的1~2h;还有部分的强浓雾出现在午夜时分。这些强浓雾的形成都与辐射冷却或者蒸发有关系。此外,南京雨雾中的能见度均在250m以上^[26]。

2.3 雾层结构特征

许多研究^[17, 27-29]表明,有些雾形成于离地的空中,接着向下发展及地成雾。Meyer等^[30]对于空中形成的雾给出了两种物理解释:一是雾首先形成于空中,二是雾形成于所有高度,接着平流到观测区域。早期的辐射雾的数值模拟中也发现了此现象^[31]。Zhou等^[32]对此作了理论分析:由于地面湍流和其阈值的存在,雾只能生成在离地面一定的高度上。Ye等^[29]的观测发现,离地形成的雾在地面附近存在一个不稳定层,这一定程度上证实了Zhou等的观点。Zhou等^[32]还认为,离地形成的雾往往预示着发生强度大的雾,这对雾的预报有重要意义,但这一点还需进一步验证。表1给出了南京各类雾宏观特征的观测结果^[18, 25]。南京雾层都比较厚,平流雾和平流辐射雾的厚度最大,这两类雾的5个过程中的最高雾顶高度超过了650m,平均为420m。雾顶高度以平流辐射雾最高,2007年12月20—21日平流辐射雾过程,最高雾顶达1050m;2006年12月24—27日雾过程快消散时(27日07时)雾顶抬升到943m。这样高的雾顶与东南暖湿平流有关^[33-35]。

表1 南京地区雾的宏观结构特征^[18, 25]
Table 1 The macroscopic features of fog in Nanjing

雾类型	日期	形成时间	消散时间	持续时间/ min	最小能见度/m	强浓雾持续时间 (能见度<50m)	形成时风向	形成时风速/ (m·s ⁻¹)	主导风向	风速范围/ (m·s ⁻¹)	强浓雾前 风向	雾顶*					
												平均	范围	平均	范围		
雨雾	2006年12月6—7日	16:15	07:09	894	51		NW	NW				9.7	7.7~11.7	331	261~428	12.8	12.0~13.7
辐射雾	2006年12月9—10日	21:20	09:30	730	290							-0.2	-1.8~3.0	426	262~483	-0.72	-1.4~1.0
辐射雾	2006年12月11—12日	23:00	17:00	1080	15	12日04:26—10:20						4.1	-1.8~6.5	347	192~527	4.9	3.8~6.3
辐射雾	2006年12月13—14日	22:00	12:00	840	15	14日08:37—10:11						5.7	4.8~7.0	526	258~738	5.7	4.6~7.5
平流辐射雾	2006年12月24—27日	22:00	14:14	3840	15	25日00:41—26日12:36 26日19:32—23:10	NW		NW NE		NE-SW/ NE-NW	5.0	0.6~7.0	447	175~653	7.7	5.1~9.7
辐射雾	2007年12月3—4日	18:12	09:11	900	15	04日06:30—06:55	SSE	0.4	N/S	0~2.2	N	3.5	0.6~5.5	144	70~220	4.5	4.0~4.7
辐射雾	2007年12月10—11日	22:31	12:30	840	15	11日07:35—09:35	NW	0.5	N/S	0~3.0	S-N	3.8	1.8~7.7	131	103~150	5.4	5.2~5.8
辐射雾	2007年12月13—14日	19:50	11:21	930	15	14日05:48—09:58	NNE	0.3	SE/SW/N	0~1.0	SW-NW	1.0	-1.1~4.5	223	30~623	3.0	0.2~4.4
辐射雾	2007年12月14—15日	20:48	12:00	902	15	15日04:50—06:12	NE	0.5	S/NW	0~2.7	SW	2.2	-0.3~7.2	106	55~152	5.7	4.3~6.5
辐射雾	2007年12月18日	02:30	11:30	540	15	08:30—10:15	NW	0.4	SW/NW	0~2.0	NW	4.2	2.9~6.6	768	739~840	3.1	2.1~4.0
平流辐射雾	2007年12月18—19日	16:06	12:30	1230	15	19日01:43—04:00 19日04:45—09:25	NW	0.4	S N	0~5.3	S-NW	3.8	-0.2~8.6	477	200~650	5.9	4.3~7.5
平流雾	2007年12月20—21日	17:47	19:07	1520	51		S	0.6	W/N	0~3.3		7.7	6.7~9.7	848	664~1050	6.7	5.6~7.7
辐射雾	2007年12月22—23日	22:10	00:38	149	66		NW	0.2	W-S	0~0.6		7.6	7.3~9.1	124	50~180	9.4	8.6~10.0
辐射雾	2007年12月23日	01:16	05:30	255	15	01:46—03:08	NE	0.3	NE	0~0.8	NE	5.6	5.4~7.7	427	110~780	7.0	5.1~8.6
平流雾	2008年11月4日				52												
平流雾	2009年12月1—2日	19:00	11:20	980	51		NE	2.0		0.4~3.9		3.9	3.0~6.1	555	260~690		
辐射雾	2010年11月17—18日	00:00	09:00	1980			静小	<1.0	静小	<1.0		4.0~8.0		116~450			

注：空白为缺测值；*表中仅包含了雾边界层数据，没有边界层数据的雾个别没有在此列举。

表2 不同地区雾的观测仪器及宏观结构特征
Table 2 The observation instruments and macrostructure of fog in different regions

雾类型	地点	观测仪器	日期	形成时间	消散时间	持续时间/ min	最小能见度/ m	雾过程中地面气象条件				雾顶*		
								形成时风向	形成时风速/ (m·s ⁻¹)	主导风向	风速范围/ (m·s ⁻¹)	平均	范围	平均
辐射雾	北京	系艇 ^[36]	2001年2月22—23日	2:00	2:00	1440		S-SW	<1.6	SW	1.0			
平流辐射雾	北京	铁塔 ^[37]	2002年12月2—4日	0:00	12:00	3600		N	<3.0	N		380~700	0~4	
辐射雾	北京	L波 ^[38]	2006年12月11—12日	19:40	10:40	900	100	S-SW	0.6~2.2	S	2.0	—1~—4	150	—1
辐射雾	北京	微波 ^[39,40]	2007年10月25—26日	20:00	8:00	720						200	200	10
辐射雾	天津	铁塔 ^[41]	2006年2月13—14日	7:00	9:00	1560						500		
平流辐射雾	天津	铁塔 ^[42]	2010年11月30—12月2日	19:00	4:00	2040	50	E	1.0~3.0	S-N	1.0~5.0	—2.4~—0.6		
平流辐射雾	天津	铁塔 ^[43]	2010年11月30—12月2日	0:00	4:00	3120	50	NE-E	0.47	E	0.57~1.55			
辐射雾	天津	铁塔 ^[44]	2010年12月22日	2:40	11:00	500		NE	2.0	NW	2.0	0.6~2.5		
海雾	青岛	L波+探空仪 ^[22]	2008年7月7—11日									200~500		
海雾	青岛	L波+探空仪 ^[45]	2008年5月2—3日											
海雾	黄海3站	L波 ^[23]	2010年2月22—25日	20:00	8:00		100	N/SE	6.0~8.0	N/SE	<4			
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[46]	2011年2月23—24日	22:00	12:00		40						390	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月23—24日	21:58	12:01	843	40					1.8	0.8~3.5	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月24—25日	17:17	11:48	1111	10					3.4	0.6~6.3	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月25—26日	23:13	10:55	702	50					4.4	1.8~7.4	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月27—28日	18:37	6:53	736	27					2.3	0.8~4.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月28日	17:58	21:46	228	73					2.4	1.0~3.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年2月28—3月1日	23:29	10:00	631	70					1.7	0.0~3.3	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月12—13日	23:37	10:42	665	40					1.5	0.0~2.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月13—14日	17:49	9:54	965	50					2.3	0.7~4.7	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月14—15日	23:12	7:54	522	50					1.1	0.0~2.5	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月2日	4:04	14:12	608	100					1.1	0.0~2.2	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月20—21日	14:46	13:09	1343	60					1.5	0.0~3.3	
海雾	湛江	边界层风廓线雷达 ^[29]	2011年3月21—22日	14:00	6:39	999	60					2.9	1.0~4.5	

注：空白为缺测值；*表中仅仅包含了雾边界层数据，没有边界层数据的雾个例没有在此列举。

表2是北京等地雾边界层的宏观特征,可以看到,北京地区雾层厚度差异较大^[38-40],在150~700m,其中北京最高雾层出现在2002年的一次平流辐射雾中,最高雾层700m。海雾雾顶高度的观测较少,但通过已有的个例来看,黄海海雾^[22]雾顶高度在200~500m,南海海雾^[46]高度在390m左右。

辐射雾雾顶也比较高^[17, 25, 33, 34, 47-49],最高雾顶在500~800m的约占60%,100~200m的约占40%。高的雾顶常与雾的多层结构有关。例如2007年12月13—14日雾过程,在地面辐射雾发展的同时,中高空受冷平流影响形成低云。以后低云不断下降,地面辐射雾爆发性上升,结果上下相接而成600m厚的雾层^[50]。雨雾最高雾顶低于前两类雾,一般为300~400m,变化幅度较小^[20]。由于雨雾是暖雨下落到近地层冷空气中蒸发而成,因此它的雾层厚度与近地层冷空气厚度有关。除雨雾外,南京辐射雾和平流辐射雾的雾顶高度都比国内其他地区(如北京^[51-52]、天津^[53]、景洪^[17, 54]等城市)的雾要高得多,这给人工消雾试验增加了困难。与国外的研究相比,南京的雾也高于国外其他地区的雾层厚度,如Pilié等^[27]分析了11个雾过程的雾层厚度,平均为60~170m,而Roach等^[55]分析的平均雾层厚度仅为50m,Holets等^[56]观测到的高逆温雾的厚度为400~550m。

在对南京连续5年的冬季雾观测中,一共监测到3次双层雾过程,2006年12月13—14日过程、2007年12月10—11日过程以及2007年12月13—14日过程。在2007年12月10—11日雾过程中出现了双层逆温结构,从而形成了双层雾,低空急流将两层雾隔开^[49]。但是在2007年12月13—14日过程中,近地层雾由地面的辐射冷却形成,上层雾则是由低空冷平流形成的云层;接着下层雾向上发展,上层云向下发展最后连接起来形成深厚的雾层^[50]。

3 雾的微观特征

3.1 内陆雾

刘端阳^[18]利用南京的雾滴谱观测资料(仪器:美国DMT公司的FM-100雾滴谱仪),统计了不同类型雾中微物理量和谱分布的差异。平流辐射雾的雾滴数浓度最大,达到211cm⁻³,平流雾和辐射雾次之,分别为108和78cm⁻³,雨雾的雾滴数浓度最小,仅3cm⁻³。辐射雾的含水量为0.023g·m⁻³,与平流雾的0.021g·m⁻³相当,平流辐射雾的含水量最大,为0.12g·m⁻³,约为平流雾和辐射雾的6倍左右。雨雾的含水量最小,仅0.00004g·m⁻³,最大值仅0.00021g·m⁻³。平流辐射雾的平均直径最大,为5.0μm,辐射雾为3.7μm,雨雾和平

流雾分别为3.1和3.6μm。与微物理量相对应的,雨雾的谱分布最窄,最大雾滴不超过7μm,平流雾和平流辐射雾的谱宽都超过45μm,辐射雾的谱型分两种,一类雾的谱分布较宽,谱宽超过35μm,另一类的谱宽不超过15μm。Quan等^[57]在污染地区武清(北京和天津这两个大城市之间)观测到的三场浓雾中,平均含水量分别为0.20、0.31和0.29g·m⁻³,数浓度分别为715、782和683cm⁻³,均高于南京雾中的结果。

浓雾过程往往具有爆发性发展的特征^[18, 34, 45, 58-62],即在很短时间(约30min)内,数浓度明显增大,雾滴谱明显拓宽,含水量明显增大,浓雾突变为强浓雾。雾滴谱爆发性拓宽都是在降温(即过饱和度加大)条件下出现的。浓雾阶段,当地面有弱冷平流时,最易爆发性增强;日出后湿地表水分蒸发也易引起雾滴谱爆发性拓宽。浓雾雾滴谱爆发性拓宽的微物理过程是:在过饱和度增大的条件下,核化、凝结过程快速进行,雾滴个数大量增加,在较强的湍流扩散条件下,雾滴间相互碰并,从而使雾滴不断增大,大滴继续碰并小滴,致使雾滴谱拓宽,浓雾增强为强浓雾。这种“拓宽”具有阶梯式的特征。

微物理量之间的关系受到不同物理过程的影响,因此可以通过微物理关系去研究物理过程。南京雾的观测资料表明,体积平均半径和数浓度、含水量均为正相关关系,表明雾过程中的主要微物理过程是凝结并伴随持续的核化过程^[58, 63]。Quan等^[57]在武清观测到的三场浓雾具有类似的微物理关系。Niu等^[63]和Lu等^[58]利用云雨自动转化阈值函数分离出了碰并过程中微物理量之间的关系。

近年来,我国学者对山区过冷雾微物理特征也进行了深入的研究,罗宁等^[64]对贵州西部、北部和中部山区过冷云雾的微物理特征进行了对比分析,发现其没有显著性的地区差异,过冷云雾滴的平均数浓度为140~312cm⁻³,液态水含量为0.2g·m⁻³,且在-6~0℃,液态水含量随着气温的降低而降低。Niu等^[65]进一步对湖北恩施的过冷雾微物理特征进行分析发现,云雾滴的微物理特征量变化范围都较小,数浓度基本处在120~300cm⁻³,平均半径处在1.5~4.0μm,含水量为0.01~0.11g·m⁻³,其导致的积冰厚度大小也与含水量呈正相关关系;而雨滴数浓度变化范围较大,但平均半径变化较小,基本都处在0.2~0.4mm范围内,雨强为0.02~0.25mm·h⁻¹。贾然等^[66]则分析了恩施一次积冰过程中雨天、雾天和雨夹雪天气下过冷云雾的微物理特征,发现雾滴平均数浓度雨天最大(223.5cm⁻³),其次为雨夹雪天

(181.3cm^{-3})，雾天最小(138.7cm^{-3})，且雾天和雨天的雾滴谱均为双峰型，而雨夹雪天为单峰型。Zhou等^[67]进一步分析了过冷雾微物理特征受冻毛毛雨的影响，发现冻毛毛雨的出现会抑制过冷雾的发展，显著减少大雾滴的数浓度，且大雾滴粒径的判断阈值与雨强大小呈正相关关系。

3.2 海雾

与陆地雾相比，中国、加拿大、美国沿海地区海雾的含水量与数浓度均较小^[68]。与中国其他典型海雾的研究结果相比较，南海海雾（如湛江、茂名）具有雾滴数浓度最高的特征，东海的海雾（如舟山）具有含水量及雾滴粒径最大的特征，而黄海的海雾（如青岛）则具有雾滴数浓度、含水量、平均半径、最大半径都最小的特征^[21]。茂名海雾的平均数密度为 57.1cm^{-3} ，平均含水量为 $0.018\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均半径为 $2.4\mu\text{m}$ ，峰值半径为 $1.4\mu\text{m}$ ^[69]。雷州半岛海雾雾滴数浓度的变化范围为 $10^0\sim 10^2\text{cm}^{-3}$ ，含水量为 $0.001\sim 0.23\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ，平均半径为 $1.71\sim 3.28\mu\text{m}$ ，雾滴峰值半径多位于 $1.4\mu\text{m}$ ^[21, 39, 68]。

海雾的微物理特征与边界层稳定度有关^[68]。在夜间急流显著时，边界层不稳定，不利于雾滴生长，含水量较低。风向的转变会引起气团来源的变化，改变雾滴凝结核的来源，对雾的微结构产生影响。风速减弱，稳定的边界层条件和风向、湿度的转变可能是导致含水量和平均半径跃增的原因。张悦等^[70]也指出气象要素突变对厦门海雾微物理起伏特征具有显著影响。

海雾的微物理特性也受天气型影响。雷州半岛地区受冷锋前暖部影响形成的海雾，通常其液态水含量、平均半径、最大半径较大，其次是受低压前部影响而形成的海雾，再次是受鞍型场或均压场影响形成的海雾，最后是受回流天气影响形成的海雾^[68]。此外，无论在有云或无云条件下，茂名博贺的海雾都可发展和维持，但有云条件下的含水量明显小于无云条件下^[71-72]。

与微物理量紧密相关的是雾滴谱。岳岩裕等^[68]分析了雷州半岛海雾不同含水量的振荡周期中，微物理特征量的变化。在第一、二次振荡周期中，雾滴以核化凝结增长为主，水汽不充足时，大量的雾滴凝结核争食水汽，使得数浓度增加而平均半径几乎不变；碰并效率在第三、四次振荡周期明显增大，导致大滴增多，滴谱拓宽，含水量增加显著。在雾的消散阶段雾滴平均半径出现跃增，并在雾结束时达到最大值。

雷州半岛海雾雾滴谱分布被单调递减类型控制，谱宽一般 $> 20\mu\text{m}$ ^[21, 73]，雾滴谱径主要出现在

$2\sim 10\mu\text{m}$ ，峰值位于 $2\mu\text{m}$ 处，岳岩裕等^[68]指出，雷州半岛海雾的雾滴谱也可呈双峰分布，成熟阶段碰并增长明显，大滴增多，雾滴瞬时谱符合Gamma分布。更有研究表明，雷州半岛地区海雾发展的雾滴平均谱符合Junge分布，平均雾滴谱结果为： $N(D) = 24.3D^{-1.33}$ ，拟合优度为 0.96 ^[74]，这一结果与茂名和青岛地区的海雾滴谱分布类似，都符合Junge分布，但与舟山地区差异明显^[69, 74]。而雷州半岛海雾发展过程中雾滴谱谱宽存在突然增宽和迅速减小的现象，雾滴数浓度变化则主要是由半径 $< 5\mu\text{m}$ 的雾滴数浓度的变化引起^[21]。

此外，黄辉军等^[69]在茂名测得的雾滴谱径平均半径 $2.4\mu\text{m}$ ，峰值半径 $1.4\mu\text{m}$ ，并指出轻雾的雾滴谱较窄，而雾的雾滴谱相对较宽；轻雾的质量谱较窄，单峰值出现在 $4.0\mu\text{m}$ 处，而雾的质量谱较窄，呈现出多峰值的特征，最大峰值出现在 $18.7\mu\text{m}$ 处。直径 $10\mu\text{m}$ 以上雾滴的增多是含水量增大的主要原因；随着含水量的增大，雾滴谱分布有向大雾滴方向增宽的趋势，其峰值高度也不断增大^[75]。

在海雾过程中，各微物理量之间往往存在一定联系。Zhao等^[76]利用观测资料，指出贯穿雷州半岛的雾事件中雾滴数浓度、液态水含量、平均半径、雾滴谱分布的标准偏差一般都是彼此正相关的。吕晶晶等^[39]进一步指出，数浓度与平均半径在雷州半岛海雾发展初期（生成、发展）和末期（消散）多呈正相关趋势，而在成熟阶段两者多呈负相关趋势，这与浓雾不同阶段核化、凝结、碰并及沉降的微物理过程交替变化有关。茂名电白海雾过程中的雾滴数的变化趋势与液态含水量变化趋势一致^[77-78]。

4 雾与湍流之间的相互作用

4.1 雾宏观结构与湍流的相互作用

湍流是影响雾过程的重要因素，在不同条件下湍流运动可能促进雾的发展，也可能导致雾的消散^[30-31, 37, 47, 49, 55, 79-80]。较强的湍流运动会加强空气垂直混合并导致雾滴蒸发，抑制辐射雾的形成；在雾形成后湍流运动又会促使雾层垂直向上发展，特别是日出后随着太阳短波辐射对地表加热，露蒸发产生的水汽通过湍流运动向上输送，可以促进雾的发展^[14, 22, 31, 34, 47, 55, 79, 81]。雾发生时的稳定大气层结会抑制垂直湍流运动发展，而雾滴凝结增长会释放凝结潜热，可以增强大气中的湍流运动^[82-83]。强烈的湍流运动会导致强烈的湍流混合，并会对辐射雾及其强度产生决定性的影响。

湍流交换是影响海雾的关键物理过程，在海雾的热量和水汽平衡过程中起重要作用^[84]。垂直湍流运动与海雾发展过程密切相关，在雾层中以热力湍流

界面为分界存在两个湍流层，热力湍流界面以上为长波辐射产生的热力湍流层，热力湍流界面以下为风切变产生的机械湍流层，热力湍流界面的高度通常在 $180\sim 380\text{m}$ ^[85-87]。由风切变产生的湍流混合过程是海洋边界层降温、增湿的主要机制，在海雾生成阶段，弱的湍流交换有利于雾生成^[85, 88-89]。湍流运动太强，不利于海雾的发展与维持，会导致雾层消散^[90-91]。湍流交换的强弱与海雾发展—消散—再发展的周期性变化有密切关系^[78]。海洋大气边界层中湍流混合层向上发展，是导致海雾抬升转化为低云的主要原因^[46]。Ye等^[29]在平流雾的生成期，观测表明湍流动能随时间呈下降趋势。Li等^[92]发现在海雾形成期，正好相反，湍流动能呈加强趋势，表明湍流混合冷却对海雾形成有重要贡献。当雾形成后，不论是平流雾还是海雾，雾内湍流的动量和热力通量随高度增强，造成雾内热量和动量的损失，有效维持了雾内的冷却率和较小的下垫面风速，有助于雾的稳定和发展。

4.2 雾微观结构与湍流的相互作用

湍流过程使得雾滴混合均匀，趋向平均化；同时湍流促使雾体内、外部空气交换，外部空气凝结核化，数浓度升高，雾滴平均半径向 $1.8\mu\text{m}$ 附近集中^[74]。此外，湍流是雾滴碰并增长不可缺少的条件，对雾滴谱的增宽有重要影响^[49, 60]。小尺度的湍流运动会限制云雾滴凝结增长过程，但湍流运动也可以增加云雾滴的碰并效率并有效促进雾滴谱增宽^[93-98]。雾的微物理参量随时间快速变化，这种高频的随机变化过程中存在低频的准周期变化特征，微物理参量的这种高频随机变化是由间歇性的湍流混合过程引起的^[27, 99]。辐射雾发展阶段，在湍流扩散作用下雾水通量谱具有明显的振荡特征，而辐射平流雾的雾水通量谱不存在振荡特征^[100]。雾中含水量的准周期振荡现象主要与湍流对液态水的混合作用与高空海雾液态水大量生成阶段的雾顶长波辐射间接相关^[72]。

4.3 湍流对雾影响的阈值现象

湍流对雾的发展具有正反两方面影响，雾层中存在一个湍流强度临界值，雾发生时的边界层结构（冷却降温率、饱和层厚度等）决定了湍流强度临界值的大小^[32]。当湍流强度小于此临界值时，湍流运动增强会增大雾微物理结构空间分布的不均匀性并促进雾宏微物理结构的发展；而湍流强度超过此临界值时，湍流运动增强会使得雾层微物理结构在近地层混合得更加均匀并抑制雾宏微物理结构的发展，进而促使雾层消散^[82-83]。在雾的形成阶段雾层较薄，湍流运动增强会导致雾滴蒸发，雾滴数浓度和液态含水量减少、雾

滴平均半径也较小；而在雾的发展和成熟阶段雾层较厚，雾层可承受的湍流强度阈值较大，湍流运动增强可加强热量、水汽、雾滴、气溶胶的垂直输送，从而使得雾滴数浓度、含水量和雾滴平均半径的平均值和起伏量增大，可促使雾层垂直向上发展，而雾层厚度增加又可使得湍流强度临界值增大。Li等^[92]借鉴Zhou等^[32]的理论，提出了雾生消过程中湍流动能的阈值，用于解释海雾内的湍流动能的大小对海雾的形成、发展和消散的影响。当湍流动能低于临界值时，湍流有助于含水量的产生。

湍流运动对不同尺度雾滴空间分布的影响不同，雾滴尺度越小，湍流运动对雾滴空间分布的影响越大。湍流对半径大于 $5\mu\text{m}$ 雾滴的空间分布影响很小，雾滴空间分布的不均匀性主要是由半径小于 $5\mu\text{m}$ 的雾滴造成，雾滴空间分布不均匀性随着湍流运动增强而增大，这有利于雾滴起伏凝结增长，促使雾中出现个别尺度较大的雾滴。雾滴最大半径小于 $10\mu\text{m}$ 时，仅通过凝结增长过程，雾滴谱拓宽很慢，雾滴最大半径基本不随湍流强度的增强而增大；而当雾滴最大半径超过 $10\mu\text{m}$ 时，雾滴碰并过程开始发生，不同尺度雾滴在气流中的相对运动速度不同，湍流运动增强可增加雾滴的碰并速率和碰并效率，加强雾滴的碰并增长，雾滴最大半径随湍流强度增强显著增大，导致雾滴谱迅速拓宽。

4.4 雾中湍流统计特征

雾的不同发展阶段湍流强度和湍流动能存在显著差异，雾前湍流由强转弱，雾消散时湍流逐渐转强^[39, 49]。黄海海雾的发展阶段和成熟阶段低空水平风速和垂直风速的平均动能显著减小，而南海海雾的观测结果表明平均动能在雾前和雾中有两次跃增，雾成熟期湍流动能大幅跃增主要是由雾顶辐射冷却产生的热力湍流和风切变引发的机械湍流增强所致^[39, 49]。平流雾生消过程中，大气稳定度参数数值主要集中在弱不稳定到弱稳定范围内，且多呈现弱不稳定状态^[101]。雾中各方向风速能谱密度峰值频率偏于高频段，雾前和雾后风速能谱峰值频率偏向于低频段；雾形成前期温度谱峰值频率变化大于速度谱，雾消散期间温度谱峰值频率更偏向于低频；雾过程中，平均动能较小，但湍流扰动活跃，湍流输送以垂直方向为主^[102]。城区浓雾过程中，大气层结由雾前的强稳定转为雾中的偏中性层结，风速归一化标准差数值随稳定度的变化符合近地面经典湍流相似理论^[103-104]。

5 雾的化学特征

雾是清除大气中污染物的一个重要途径，雾和霾

频发成为中国中东部地区的普遍现象,雾的出现对大气中细小颗粒物的清除起到了一定的作用,但也会导致雾水中包含更多的污染物^[105]。作为酸沉降的一个重要部分,雾水比雨水有更高的污染物浓度^[106],因此,雾水化学可以更好地指示区域排放物成分,在缺少降雨和污染物监测的情况下对于研究远距离输送的空气污染物是一个有效的信息^[107]。同时雾中高浓度的污染物对人体健康也存在潜在的危害^[108]。

在描述雾水时,pH、电导率(EC)和雾水的离子浓度是三个最重要的参数。表3给出了不同地区的pH、电导率和雾水的离子浓度。1984—1990年重庆地区^[109]雾水pH为4.4,<5.6(酸雾的临界阈值)。在清洁地区,如南岭地区^[110]雾水也是酸的,在对闽南地区^[111]的研究中发现,雾水酸度比城市大,而雾水的离子浓度低,属低污染高酸度地区。同时,在表3中的一些城市地区(如云南安宁)雾水pH值高于5.6。因此,pH值不能准确反映污染情况,因为它是雾水中所有阴阳离子共同作用的结果,需要考虑雾水中酸、碱性物质的含量。电导率反映了介质导电的能力,与可溶性离子有着直接联系。在重庆、南京和东海岛等地^[106, 109, 112-113]雾水中电导率很高,超过了 $600\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$,与其他地区相比,其雾水中离子浓度也很高。电导率与雾水的总离子浓度相关性最好,呈正相关。

雾水离子成分及浓度与雾水采集位置有着密切的关系^[105]。重庆、南京、上海、广州等地的雾水化学性质分析^[108-109, 114-115]表明,在污染较严重的城市阴离子中以 SO_4^{2-} 为主,而阳离子则以 Ca^{2+} 或 NH_4^+ 最多,总的离子浓度由市中心向外逐渐减少,且冷季雾水离子浓

度要比暖季高。在中国的黄海、东海和南海区域开展的一些海雾化学特征的研究发现,与陆地雾相比较,海雾的各离子所占比例不同,阴阳离子分别以 Cl^- 和 Na^+ 为主,且受到大气环流影响,使得陆地上的污染物对海雾雾水化学组分有一定的影响^[116-118]。而山地雾的化学组成成分与陆地雾的一致, SO_4^{2-} 、 Ca^{2+} 或 NH_4^+ 为主,但其离子浓度较低,海洋源和周边地区的气团都会对其造成影响^[119-120]。

雾水化学不仅与空气中污染物浓度相关,而且是多种因子共同作用的结果^[121]。不同的气团轨迹会带来性质不同的污染气团,来自不同区域的空气团具有不同的雾滴凝结核源决定了雾滴的初始成分,进一步会通过吸收可溶性气体和液相化学反应而改变雾水化学成分^[122]。南京地区辐射雾的发生主要受局地大陆气团影响,受南面长江水汽影响,将发展为平流雾;而受东北风带来的海洋气团及附近工业区污染物控制影响下的平流雾,离子浓度会大幅度增加^[123]。Yue等^[124]指出气团路径较短时受到局地影响,离子沉降值高;当气团完全来自于东部洋面时离子浓度和离子沉降都最低。

学者们进一步研究了微物理特征量与雾水化学之间的联系。雾滴形成后,大气中污染气体和部分气溶胶进入雾滴,增加化学成分种类和浓度,这个过程受雾滴的总表面积影响,表面积越大,可溶解的离子成分越多,因此Lu等^[112]提出雾水离子浓度要考虑到雾滴表面积(S),其反映了吸收能力,并根据相关性分析提出了利用 S/LWC (LWC 为含水量)来反映雾滴的清除能力。Yue等^[124]进一步将该参量应用于海雾雾水

表3 不同地区雾水中的pH、电导率EC(单位: $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)和雾水中的各种离子浓度(单位: $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)
Table 3 The pH, EC (unit: $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) and several kinds of ion concentration (unit: $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) of fog in different regions

观测地点和时间	pH	EC	F^-	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Na^+	Mg^{2+}	NH_4^+
南京2006—2007年 ^[112]	5.90	681.0	493.0	1010.0	945.0	3485.0	384.0	1886.0	1282.0	174.0	6654.0
重庆1984—1990年 ^[109]	4.40	815.0	1063.9	2062.3	991.6	6450.0	1019.9	3685.4	1486.4	1482.7	3307.5
上海1993—1995年 ^[125]	6.00		550.0	480.0	2530.0	8650.0	510.0	6610.0	1760.0	3050.0	1630.0
云南景洪1997年 ^[130]	6.30		2734.0	794.0	115.0	1113.0	773.3	518.8	238.3	134.9	3211.0
云南勐养1997年 ^[130]	8.30		258.2	100.4	32.5	330.5	320.1	784.1	31.9	32.4	28.3
闽南1993年 ^[111]	3.60		29.0	214.0	257.0	395.0	91.0	149.0	344.0	53.0	469.0
云南安宁(居民区)1988年12月 ^[131]	6.25		957.9	1474.3	343.2	4355.2	387.0		424.3		5844.0
云南安宁(非居民区)1988年12月 ^[131]	6.71		668.4	582.0	217.3	2681.3	15.9		70.0		2856.0
舟山1987年 ^[116]	6.00			982.3	166.9	205.4	64.7	185.0	961.3	65.4	309.4
湛江东海岛2010年 ^[133]	5.35	1883.0	102.0	12391.0	3602.0	1253.0	627.0	1811.0	11666.0	1801.0	858.0
庐山1987年 ^[119]	5.40		9.1	25.6	73.5	219.9	14.5	212.9	18.9	12.6	323.1
南岭1999年 ^[110]	6.10	220.0	79.0	105.0	250.0	663.0	187.0	255.0	65.0	11.0	1300.0
南岭2001年 ^[110]	5.20	127.0	7.0	9.0	8.0	688.0	103.0	818.0	56.0	26.0	82.0
黄山2009年 ^[120]	6.40	91.8	7.2	115.6	121.4	161.6	40.7	130.0	120.2	19.0	293.5
乌鲁木齐南山2003年 ^[132]	6.40			265.0	122.0	717.0	39.5	86.1		55.5	

注:空白为缺测值。

化学分析中,得到了较好的相关性。

雾过程不同阶段的雾水化学特征是不同的,这主要受雾滴生长和蒸发过程的影响,反映于雾过程中含水量的大小,轻雾和消散阶段的雾通常会呈现高浓度的污染物浓度。徐峰等^[113]对海雾的研究中发现在雾发生前期雾水中各离子成分浓度最高,雾发生期间采集的雾水浓度偏低。李德等^[125]研究了1994年1月9日出现在上海的浓雾,发现pH、电导率和离子浓度与初始阶段相比在雾的后期都有明显下降。

此外,对于有机气溶胶如:多环芳烃(PAHS)等,通常受季节、局地排放、传输和气象条件影响^[129-130]。樊曙先等^[131]通过对比研究雾发生、发展及消散过程对PAHS粒径分布的影响,发现雾对细粒子分布影响明显;且雾天中 $0.65\sim 2.10\mu\text{m}$ 粒子中PAHS质量浓度有增加的趋势,呈现出积聚模态颗粒物富集^[132]。

6 雾的遥感监测

借助遥感技术开展大雾监测具有直观、全面和及时的显著优势,是常规地面观测所无法比拟的。早在20世纪70年代,气象卫星可见光数据已被应用于雾的生消监测^[133-134]。此后Eyer等^[135]和Turner等^[136]基于Hunt^[137]的研究提出了“双波段亮温差法”,该方法不仅在极轨卫星平台上得到广泛应用,而且被推广至具有短波红外通道的静止卫星平台^[138-140],均具有良好的应用表现。中国的大雾遥感监测起步较晚,1988年,郑新江^[141]利用极轨卫星NOAA/AVHRR的可见光和近红外波段对黄海海雾图像特征进行了分析,同时利用静止卫星GMS分析了海雾的演变过程。此后,很多研究学者利用卫星资料针对雾的成因、图像纹理和辐射特性,提出了一系列雾的遥感监测方法,其中较常用的如:多通道组合法^[142-143]、阈值判定法^[144-146]、纹理分形^[147]和神经网络法^[148]等,从而进一步增强了人们对雾遥感监测的理性认识。

近年来,由于中国近海海事活动增多,对海雾监测预报的气象服务需求显著提高。但海雾以平流雾居多,覆盖范围甚广,而由船舶和洋面观测所获得的资料稀疏,很难满足对海雾时空演变分布的监测要求,这无疑为目前时空分辨率俱佳的卫星遥感提供了合适的机会。如:蒋璐璐等^[149]依据FY-3A卫星的VIRR数据,利用多波段阈值法对中国东部沿海地区日间雾进行了遥感监测,并估算了雾的垂直厚度、光学厚度以及能见度等特征参数。Li等^[150]利用MTSAT的IR通道数据,提出了一种基于主成分分析、纹理分析和阈值判别的海雾监测方法,并对2006—2009

年中国近海各月大雾发生频次进行统计分析。张春桂等^[151]结合2000—2010年福建沿海能见度资料和NOAA/AVHRR、FY-1D和MODIS遥感数据,分析了海雾时空变化特征;并针对不同传感器给出白天和夜间海雾遥感监测模型。吴晓京等^[152]基于1989—2008年AVHRR卫星资料,给出黄渤海海雾及云的频数、分布百分率信息,得到了黄渤海海雾季节变化的较全面特征。何月等^[153]结合MTSAT资料和地面观测数据,对2008—2012年浙江及其周边海区的雾进行了专题信息提取,并给出了浙江省陆域、周边海域 $0.05^\circ\times 0.05^\circ$ 网格点的小时尺度的遥感雾产品和频次分布。

此外,由于雾和低云具有相似的微物理本质和辐射特性,在遥感影像中雾和低云分离仍然是个挑战性问题,其中关键是云雾顶高度反演的精度。Bendix等^[154]尝试将MODIS陆地雾和云检测结果与地形高度数据比对,得到云顶高度、厚度及云底高度用于云雾分离,但该方法并不适用于海雾检测。Zhang等^[155]基于中国近海探空资料分析,发现雾和层云的云顶温度与海面温度的差值存在显著不同,并基于此提出了一个海雾动态阈值检测算法。Wu等^[156]利用垂直分辨率高的星载激光雷达CALIPSO(Cloud-Aerosol Lidar and Infrared Pathfinder Satellite Observation)数据,实现了黄海海雾和低云的分离。Yi等^[157]利用静止卫星MTSAT-1/2和极轨卫星MODIS水汽及劈窗通道提出了一个黄海云雾顶高度的反演算法,通过将个例反演结果与CALIPSO测量及WRF模拟结果比对,显示出较高精度。可见,主动遥感仪器相比于传统的被动遥感仪器,实现云雾分离更具优势。

7 雾的数值模拟研究

中国雾的数值模拟研究始于20世纪80年代,科学家们建立了一维雾模式^[31, 158-161],分析探讨低层温度、湍流、相变、重力沉降及重力碰并等因子对雾形成的影响。通过建立二维雾模式^[162-163],科学家们研究了大气边界层风场、海陆风环流、水汽的平流输送、湍流混合、长短波辐射、凝结(蒸发)、重力沉降及下垫面对雾生消过程的影响。考虑到重庆和西双版纳地形的复杂性,石春娥等^[164]和黄建平^[165]建立了三维雾模式,模式考虑了湍流交换、地表及大气的长波辐射、短波太阳辐射、水汽的蒸发和凝结以及地表热收支等,研究了植被和气溶胶辐射效应对雾的生消的影响。傅刚等^[166]在大气边界层模式的基础上建立了一个三维雾的数值模式,较好地模拟出黄海海雾的生消过程,对海雾的三维结构有一定的模拟能力。

以上的模式都是针对雾设计的,无法考虑大尺度

环境场变化对雾生消的影响,具有一定局限性。20世纪90年代后,随着中尺度数值模式发展的日趋成熟和完善,人们逐步开始利用中尺度数值模式进行雾模拟研究的尝试^[167-171]。王帅等^[172]利用RAMS模式对黄海的一次海雾过程进行了模拟,计算了雾顶高度和大气水平能见度分布,两者分布形态均与卫星云图所显示的雾区吻合较好。刘现鹏等^[173]用WRF模拟了黄渤海海域的一次海雾过程,结果表明增加模式边界层垂直精度可提高海雾能见度模拟效果,并一定程度上消除低云对雾区模拟的干扰。何晖等^[174]利用非静力中尺度模式MM5,模拟了北京地区的一次辐射雾过程,结果表明:地面的长波辐射冷却促使辐射雾的形成,而短波辐射的加热是辐射雾消散的主要原因。增加模式的垂直分辨率以及选取更加详细的云微物理方案可以使模式模拟的辐射雾的结果有明显的改善。梁爱民等^[175]利用MM5模式,模拟了北京地区一次平流雾过程,结果表明:模拟的雾区范围及其移动基本与实况吻合,显示了中尺度模式预报平流雾的潜在能力。进一步分析表明:雾区的边缘具有明显的水平温度梯度;在贴地面层东南气流被雾区阻挡偏向西,在雾区前沿辐合;雾区的逆温区前沿930hPa以下存在一个明显的垂直热力环流,雾区下沉,雾区前沿上升。王小雁等^[176]利用WRF模式,对沪宁高速公路镇江段团雾过程进行了数值模拟,结果表明:耦合三种不同陆面方案后比没有耦合陆面方案的模拟结果更接近实况。高山红等^[177]利用WRF模式及其先进的3DVAR同化模块,循环3DVAR同化方案能有效改进黄海水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。胡朝霞等^[178]利用MM5模式,模拟了我国中东部的一次大雾过程,结果表明:MM5可以较好地模拟出这次雾发生、发展的演变过程,基本反映雾的日变化特征,还能够清晰地看到雾的垂直结构。贾星灿等^[179]基于WRF/Chem模式和雾的观测资料,开展了包含和不包含人为污染排放源两种大气背景条件下的数值模拟对比试验。结果表明,在考虑污染排放源时,模式模拟的雾的空间分布和强度变化与卫星、能见度仪和微波辐射计的观测更为接近,污染条件下的边界层结构更有利于雾的形成。

Hu等^[180]利用WRF集合预报系统来研究发生在华北的一次平流雾的数值模拟对初始条件中各要素误差的敏感性。发现初始条件的改善可以有效地改善雾的模拟;模拟雾对与湍流有关联的要素误差比与对流有关联的要素更敏感,对低层要素误差比高层要素更敏

感,对温度和水平风误差比对湿度更敏感。这些结果说明,目前雾的预报能力低下与初始条件的较大误差有关。除了雾对初始条件误差的依赖性以外,雾对模式所采用的物理方案也有较强的依赖。这也可以通过敏感性试验来研究。比如, Lin等^[181]利用WRF对浦东机场的一次平流(海雾)的模拟对WRF所有可采用的微物理和边界层方案以及辐射方案进行了系统的敏感性试验,发现微物理方案对雾的起始时间影响不大,起作用的是边界层和辐射方案;而微物理、边界层和辐射方案对雾的消散都有影响。另外这三种方案还决定了雾的垂直结构。尽管针对一次雾的模拟试验不能确定哪一个方案组合最好,但说明了模式中方案的选取对雾的预报影响很大。Hu等^[180]和Lin等^[181]的敏感性试验表明雾的预报与初始条件中的误差和模式方案的系统误差影响很大。这也是发展雾的集合预报的原因。在美国国家环境预测中心,雾的短期集合预报已存在10年了,并在2008年北京奥运会的天气预报示范项目,显示了比单模式更好的优越性^[182]。国内外的研究都表明,一种物理方案可能只对某一种雾有效,或只在某一局域、某一时间有效。加上对初始条件的误差敏感,所以单一模式的雾预报有很大的局限性。而集合预报技术的发展为提高雾的预报水平带来了曙光。目前随着中尺度模式的发展,越来越多的微物理、边界层等方案可以利用。这也为建立多方案的集合预报系统提供了有效途径。

8 人工消雾

为了抗御该自然灾害的影响,国内进行了多方面的人工消雾试验工作,在冷暖雾消雾技术等方面取得了一定的研究成果^[183-186]。

催化剂方面,高建秋等^[187]测试了新的环保型冷暖雾催化剂RC/XW的消雾性能,并与氯化钙和氯化钠进行对比,结果表明:不同种类的催化剂、同种类不同尺度的催化剂之间消雾效果都存在很大差异。消雾效果与播撒剂量直接相关。RC/XW适用于消除含水量在 $0.3\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上的严重影响视程的暖雾。张铮等^[188]鉴定了液氮的成冰性能,实验结果表明:液氮成核率与液氮的播撒量有关,当云雾的温度在 $0\sim-17.0\text{C}$,液氮的适宜播撒量可取 $26.3\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$,成核率为 10^{11}g^{-1} 。液氮能使过冷雾迅速冰晶化,播撒液氮2min后,占总量90%左右的冰晶生成。

暖雾催化方面,郭恩铭等^[189]应用喷气发动机改装的热力动力系统在成都双流机场进行人工消暖雾试验,该系统的原理是发动机发射出高温气体,随动力场扩散,形成一个较大范围的高温区,使雾滴蒸发,

达到局部消雾的目的。试验结果表明：喷气发动机开始工作2min后，在影响区内雾滴蒸发了，能见度由试验前30m改善到260m。濮江平等^[190]把飞机涡轮喷气发动机改装成消雾装置，采用多点探测设备对消雾装置的温度、湿度和气流作用场进行了性能测试，首次取得了涡喷发动机消雾装置在单台、双台和多台组合情况下的实测资料，分析了单台涡喷发动机作用场分布以及与实际测试数据的对比情况和消雾效果。

过冷雾催化方面，岳治国等^[191]在临潼机场，采用液态二氧化碳对冷雾进行人工引晶催化。液态二氧化碳的温度可低至-90℃，使得过饱和水汽凝结成小冰晶，继而引起一系列的繁生增长过程。结果雾中产生了降雪，消耗近地层过冷水，从而减小雾滴的数密度，提高能见度，试验取得了明显的效果。何晖等^[192]在中尺度数值模式MM5的Reisner2方案中引入了液氮粒子与云相互作用的过程，在中尺度模式MM5中实现了催化功能。利用该模式对北京地区的一次冷雾天气过程进行了消雾的数值模拟研究。结果表明：催化作业开始9min后，目标区开始显现作业效果，最好的效果出现在作业后24min。消雾机理主要为播撒后人工冰晶通过凝华增长消耗了大量的水汽，导致了水汽通过凝结过程形成雾滴的减少，同时上游作业导致雾滴向下游目标区平流的减少。曹学成等^[193]在首都机场人工消雾作业过程中进行了大气边界层特征的观测，观测结果表明：用喷洒液氮进行人工消雾可以形成小面积降雪从而提高能见度，达到安全飞行的目的。人工消雾作业过程可影响小面积大气湍流特征，使湍流谱略偏离-5/3规律。金华等^[194]在天津市武清区，利用燃烧烟条的方式播撒吸湿性焰剂对暖雾过程实施催化，利用播撒液氮的方式实施冷雾消雾试验。催化前后，雾的微物理量变化显著，催化期间雾滴谱均出现了谱宽加大的现象，雾滴谱发生了单峰分布和双峰分布间的变换，催化结束后谱宽恢复至催化前状态。分析认为：催化后暖雾中发生成熟过程（ripening process），而冷雾催化后则启动了贝吉隆过程（Bergeron process）。

9 结语与展望

近年来，我国科学家从观测分析、数值模拟等方面对雾进行了深入的研究，取得了丰硕的成果，但仍然存在不足，例如目前的数值模式还不能准确地预报雾的发生、发展和消散，原因是对雾的各个影响因子的定量认识不够。目前对雾过程的认识还不能满足经济发展对雾害的监测预警及防灾减灾的业务应用需要。

在未来的研究中，需要进一步加强雾中湍流的研究，定量分析雾与湍流之间的相互作用；气溶胶与雾之间的相互作用也值得深入研究，包括雾与霾之间的相互转化^[195]和区分^[196]等；加强对雾发生阈值的研究，进一步开展雾的集合预报，提高对雾的预报能力，同时研发雾发生频次的短期气候预测方法；研究雾害时空分布规律及雾害灾情的评估方法（对人体健康、交通、电力输送等的影响）；近年来中国气象事业高速发展，雾的探测条件和探测能力不断提高，利用大量新的探测设备，研发基于空间和地面气象信息的雾综合监测预警方法。

参考文献

- [1] Niu S, Lu C, Yu H, et al. Fog research in China: an overview. *Adv Atmos Sci*, 2010, 27(3): 639-662.
- [2] Peace R L. Heavy-fog regions in the conterminous united states. *Mon Wea Rev*, 1969, 97: 116-123.
- [3] Meyer M B, Lala G G. Climatological aspects of radiation fog occurrence at Albany, New York. *J Climate*, 1990, 3: 577-586.
- [4] Muraca G, Maciver D C, Auld H. The climatology of fog in Canada. St. John's, Newfoundland: Conf. Fog and Fog Collection, 15-20 July 2001.
- [5] 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. *应用气象学报*, 2005, 16(2): 220-230.
- [6] Niu F, Li Z, Li C, et al. Increase of wintertime fog in China: potential impacts of weakening of the Eastern Asian monsoon circulation and increasing aerosol loading. *J Geophys Res*, 2010, 115: D00K20.
- [7] 余庆平, 孙照渤. 长三角地区11月大雾频次变化的天气气候背景. *大气科学学报*, 2010, 33(2): 205-211.
- [8] 孙斌, 马振峰, 牛涛, 等. 最近40年中国雾日数和霾日数的气候变化特征. *气候与环境研究*, 2013, 18(3): 397-406.
- [9] 魏建苏, 朱伟军, 严文莲, 等. 江苏沿海地区雾的气候特征及相关影响因子. *大气科学学报*, 2010, 33(6): 680-687.
- [10] 吴兑, 吴晓京, 朱小祥. 雾和霾. 北京: 气象出版社, 2009.
- [11] 张人禾, 李强, 张若楠. 2013年1月中国东部持续性强雾霾天气产生的气象条件分析. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(1): 27-36.
- [12] 尹志聪, 王会军, 郭文利. 华北黄淮地区冬季雾和霾的时空气候变化特征. *中国科学: 地球科学*, 2015, 45(5): 649-655.
- [13] 于华英, 牛生杰, 刘鹏. 2007年12月南京大雾频发的尺度环流特征研究. *热带气象学报*, 2014, 30(1): 167-175.
- [14] Gultepe I, Tardif R, Michaelides S C, et al. Fog research: a review of past achievements and future perspectives// Gultepe I. *Fog and Boundary Layer Clouds: Fog Visibility and Forecasting*. Birkhäuser Basel, 2007: 1121-1159.
- [15] 王鹏飞, 李子华. 微观云物理学. 北京: 气象出版社, 1989.
- [16] Gultepe I, Hansen B, Cober S G, et al. The fog remote sensing and modeling field project. *Bull Amer Meteor Soc*, 2009, 90(3): 341-359.
- [17] 濮梅娟, 李良福, 李子华, 等. 西双版纳地区雾的物理过程研究. *气象科学*, 2001, 21(4): 425-432.
- [18] 刘端阳. 南京冬季雾宏微观物理结构的观测研究. 南京: 南京信息工程大学, 2011.
- [19] Tardif R, Rasmussen R M. Evaporation of nonequilibrium raindrops as a fog formation mechanism. *J Atmos Sci*, 2010, 67(2): 345-364.
- [20] 严文莲, 刘端阳, 濮梅娟, 等. 南京地区雨雾的形成及其结构特征. *气象*, 2010, 36(10): 29-36.
- [21] 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. *大气科学学报*, 2014, 37(2): 208-215.
- [22] 任兆鹏, 张苏平. 黄海夏季海雾的边界层结构特征及其与春季海雾的对比. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2011, 41(5): 23-30.
- [23] 黄彬, 王皓, 陆雪, 等. 黄渤海一次持续性大雾过程的边界层特征

- 及生消机理分析. 气象, 2014, 40(11): 1324-1337.
- [24] 李子华, 刘端阳, 杨军, 等. 南京市冬季雾的物理化学特征. 气象学报, 2011, 69(4): 706-718.
- [25] Liu D Y, Niu S J, Yang J, et al. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing. Part 1: fog boundary layer. Pure Appl Geophys, 2012, 169(5/6): 809-819.
- [26] 于华英, 牛生杰, 刘鹏, 等. 2007年12月南京六次雨雾过程宏、微观结构演变特征. 大气科学, 2015, 39(1): 47-58.
- [27] Pilić R J, Mack E J, Kocmond W C, et al. The life cycle of valley fog. Part 1: Micrometeorological characteristics. J Appl Meteor, 1975, 14(3): 347-363.
- [28] Fitzjarrald D R, Lala G G. Hudson valley fog environments. J Appl Meteor, 1989, 28(12): 1303-1328.
- [29] Ye X, Wu B, Zhang H. The turbulent structure and transport in fog layers observed over the Tianjin area. Atmos Res, 2015, 153: 217-234.
- [30] Meyer M B, Lala G G, Justo J E. Fog-82: a cooperative field study of radiation fog. Bull Amer Meteor Soc, 1986, 67(7): 825-832.
- [31] 周斌斌. 辐射雾的数值模拟. 气象学报, 1987, 45(1): 21-29.
- [32] Zhou B, Ferrier B S. Asymptotic analysis of equilibrium in radiation fog. J Appl Meteorol Clim, 2008, 47: 1704-1722.
- [33] 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. 南京气象学院学报, 2008, 31(4): 520-529.
- [34] 濮梅娟, 严文莲, 商兆堂, 等. 南京冬季雾爆发性增强的物理特征研究. 高原气象, 2008, 27(5): 1-8.
- [35] 严文莲, 濮梅娟, 王巍巍, 等. 一次罕见的辐射——平流雾研究 I: 生消物理过程分析. 气象科学, 2009, 29(1): 9-16.
- [36] 张光智, 卞林根, 王继志, 等. 北京及周边地区雾形成的边界层特征. 中国科学:地球科学, 2005, 35(增刊1): 73-83.
- [37] 刘照明, 胡非, 邹海波, 等. 北京地区一次典型大雾天气过程的边界层特征分析. 高原气象, 2010, 29(5): 1174-1182.
- [38] 江玉华, 王强, 王正兴, 等. 一次平流辐射雾的边界层特征及雾水离子组分研究. 气象, 2009, 35(2): 19-28.
- [39] 何晖, 郭学良, 刘建忠, 等. 北京一次大雾天气边界层结构特征及生消机理观测与数值模拟研究. 大气科学, 2009, 33(6): 1174-1186.
- [40] 刘建忠, 张蕾, 杨道侠. 雾日期间边界层特性分析. 干旱气象, 2010, 28(1): 41-48.
- [41] 吴彬贵, 张宏升, 汪靖, 等. 一次持续性浓雾天气过程的水汽输送及逆温特征分析. 高原气象, 2009, 28(2): 258-267.
- [42] 蔡子颖, 韩素芹, 吴彬贵, 等. 天津一次雾过程的边界层特征研究. 气象, 2012, 38(9): 1103-1109.
- [43] 马翠平, 吴彬贵, 李江波, 等. 一次持续性大雾边界层结构特征及诊断分析. 气象, 2014, 40(6): 715-722.
- [44] 吴彬贵, 马翠平, 蔡子颖, 等. 辐射雾局地爆发性增强原因探讨. 高原气象, 2014, 33(5): 1393-1402.
- [45] 张苏平, 龙景超, 尹跃进, 等. 我国东部沿海一次局地海雾抬升成云过程分析. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2014, 44(2): 1-10.
- [46] 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. 气象学报, 2014, 72(2): 350-365.
- [47] 陆春松, 牛生杰, 杨军, 等. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析. 大气科学, 2010, 34(4): 681-690.
- [48] 陆春松, 牛生杰, 岳平, 等. 南京冬季雾多发期边界层结构观测分析. 大气科学学报, 2011, 34(1): 58-65.
- [49] Liu D, Yang J, Niu S, et al. On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing. Adv Atmos Sci, 2011, 28(1): 223-237.
- [50] 杨军, 王蕾, 刘端阳, 等. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制. 气象学报, 2010, 68(6): 998-1006.
- [51] 周小刚, 王强. 北京城市重烟尘雾与水雾过程的边界层结构. 气象科技, 2004, 32(6): 404-409.
- [52] 熊秋芬, 江开军, 王强. 北京一次浓雾过程的边界层结构及成因探讨. 气象科技, 2007, 35(6): 781-786.
- [53] 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 天津南部地区平流雾过程塔层气象要素特征分析. 北京大学学报(自然科学版), 2008, 3(1): 39-45.
- [54] 黄玉生, 许文荣, 李子华, 等. 西双版纳地区冬季辐射雾的初步研究. 气象学报, 1992, 50(1): 112-117.
- [55] Roach W T, Brown R, Caughey S J, et al. The physics of radiation fog: I - a field study. Quart J Roy Meteor Soc, 1976, 102(432): 313-333.
- [56] Holets S, Swanson R N. High-inversion fog episodes in central California. J Appl Meteor, 1981, 20(8): 890-899.
- [57] Quan J, Zhang Q, He H, et al. Analysis of the formation of fog and haze in North China Plain (NCP). Atmos Chem Phys, 2011, 11(15): 8205-8214.
- [58] Lu C, Liu Y, Niu S, et al. Examination of microphysical relationships and corresponding microphysical processes in warm fogs. Acta Meteor Sin, 2013, 27: 832-848.
- [59] 刘霖蔚, 牛生杰, 刘端阳, 等. 南京冬季浓雾的演变特征及爆发性增强研究. 大气科学学报, 2012, 35(1): 103-112.
- [60] 李子华, 刘端阳, 杨军. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件. 大气科学, 2011, 35(1): 41-54.
- [61] Niu S J, Liu D Y, Zhao L J, et al. Summary of a 4-year fog field study in Northern Nanjing, Part 2: fog microphysics. Pure Appl Geophys, 2012, 169(5/6): 1137-1155.
- [62] 郭丽君, 郭学良, 方春刚, 等. 华北一次持续性重度雾霾天气的产生、演变与转化特征观测分析. 中国科学:地球科学, 2015, 45(4): 427-443.
- [63] Niu S, Lu C, Liu Y, et al. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet spectrometer: a case study. Adv Atmos Sci, 2010, 27(6): 1259-1275.
- [64] 罗宁, 文继芬, 赵彩, 等. 导线积冰的云雾特征观测研究. 应用气象学报, 2008, 19(1): 91-95.
- [65] Niu S, Zhou Y, Jia R, et al. The microphysics of ice accretion on wires: observations and simulations. Sci China Earth Sci, 2012, 55(3): 428-437.
- [66] 贾然, 牛生杰, 李蕊. 鄂西电线积冰微物理特征的观测研究. 气象科学, 2010, 30(4): 481-486.
- [67] Zhou Y, Niu S J, Lü J J. The influence of freezing drizzle on wire icing during freezing fog events. Adv Atmos Sci, 2013, 30(4): 1053-1069.
- [68] 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. 大气科学, 2013, 37(3): 609-622.
- [69] 黄辉军, 黄健, 刘春霞, 等. 茂名地区海雾的微物理结构特征. 海洋学报, 2009, 31(2): 17-23.
- [70] 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. 热带气象学报, 2015, 31(3): 385-394.
- [71] Shen C, Huang J, Liu S D, et al. Characteristics of quasi-periodic oscillations during sea fog events. J Prop Meteorol, 2011, 17(1): 50-57.
- [72] 沈忱, 黄健, 刘寿东. 海雾的准周期振荡特征. 热带气象学报, 2010, 26(1): 71-78.
- [73] 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. 气象, 2012, 38(8): 985-996.
- [74] 张舒婷, 牛生杰, 赵丽娟. 一次南海海雾微物理结构个例分析. 大气科学, 2013, 37(3): 552-562.
- [75] 黄辉军, 黄健, 毛伟康, 等. 茂名地区海雾含水量的演变特征及其与大气水平能见度的关系. 海洋学报, 2010, 32(2): 40-53.
- [76] Zhao L, Niu S, Zhang Y, et al. Microphysical characteristics of sea fog over the east coast of Leizhou Peninsula, China. Adv Atmos Sci, 2013, 30(4): 1154-1172.
- [77] Li X N, Huang J, Shen S H, et al. Evolution of liquid water content in a sea fog controlled by a High-Pressure Pattern. J Prop Meteorol, 2010, 16(4): 409-416.
- [78] 李晓娜, 黄健, 申双和, 等. 一次高压型海雾中的液态含水量演变特征. 热带气象学报, 2010, 26(1): 79-85.
- [79] 张苏平, 杨育强, 王新功, 等. 低层大气季节变化及与黄海雾季的关系. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2008, 38(5): 689-698.
- [80] 汤鹏宇, 何宏让, 向阳荣. 大连海雾特征及形成机理初步分析. 干旱气象, 2013, 31(1): 62-69.
- [81] 周涛. 上海市金山区平流雾特征分析. 大气科学研究与应用, 2014, (1): 13-30.
- [82] 赵丽娟. 雾宏微观结构与湍流、辐射、气溶胶相互作用. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [83] 牛生杰. 雾物理化学研究. 北京: 气象出版社, 2014.
- [84] 黄健, 王斌, 周发诱, 等. 华南沿海暖雾过程中的湍流热量交换特征. 大气科学, 2010, 34(4): 715-725.
- [85] Huang H, Liu H, Jiang W, et al. Characteristics of the boundary layer structure of sea fog on the coast of Southern China. Adv

- Atmos Sci, 2011, 28(6): 1377-1389.
- [86] Li P, Fu G, Lu C, et al. The formation mechanism of a spring sea fog event over the Yellow Sea associated with a low-level jet. *Wea Forecasting*, 2012, 27(6): 1538-1553.
- [87] Guo J, Li P, Fu G, et al. The structure and formation mechanism of a sea fog event over the yellow sea. *J Ocea Uni China*, 2015, 14(1): 27-37.
- [88] 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.
- [89] Li X, Huang J, Shen S, et al. Evolution of liquid water content in a sea fog controlled by a high-pressure pattern. *J Trop Meteor*, 2010, 16(4): 409-416.
- [90] 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.
- [91] 袁夏玉, 高山红. 一次典型高压型海雾过程中海上大气波导的数值模拟. *海洋与湖沼*, 2014, 24(5): 907-917.
- [92] Li Y, Zheng Y. Analysis of atmospheric turbulence in the upper layers of sea fog. *Chinese J Ocea Limnology*, 2015, 33(3): 809-818.
- [93] Vaillancourt P A, Yau M K. Review of particle-turbulence interactions and consequences for cloud physics. *Bull Amer Meteor Soc*, 2000, 81: 285-298.
- [94] Shaw R A. Particle-turbulence interactions in atmospheric clouds. *Annu Rev Fluid Mech*, 2003, 35: 183-227.
- [95] Wang L P, Ayala O, Kasprzak S E, et al. Theoretical formulation of collision rate and collision efficiency of hydrodynamically interacting cloud droplets in turbulent atmosphere. *J Atmos Sci*, 2005, 62: 2433-2450.
- [96] Franklin C N. A warm rain microphysics parameterization that includes the effect of turbulence. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 1795-1816.
- [97] Pinsky M, Khain A, Krugliak H. Collisions of cloud droplets in a turbulent flow. Part V: application of detailed tables of turbulent collision rate enhancement to simulation of droplet spectra evolution. *J Atmos Sci*, 2008, 65: 357-374.
- [98] Wang L P, Grabowski W W. The role of air turbulence in warm rain initiation. *Atmos Sci Lett*, 2009, 10: 1-8.
- [99] 徐杰, 牛生杰, 陆春松, 等. 南京冬季平流雾微结构观测研究. *南京气象学院学报*, 2009, 32(2): 269-276.
- [100] 郑炜, 杨军, 刘端阳, 等. 南京冬季辐射雾雾水沉降特征研究. *干旱气象*, 2014, 32(1): 52-59.
- [101] 吴彬贵, 张宏升, 张长春, 等. 华北地区平流雾过程湍流输送及演变特征. *大气科学*, 2010, 34(2): 440-448.
- [102] 吴彬贵, 张宏升, 王兆宇, 等. 平流雾过程湍流微结构与能量输送的分析研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 2011, 47(2): 295-301.
- [103] 吴彬贵, 王兆宇, 解以扬, 等. 秋季天津城区雾中风速、温度和湿度的湍流统计特征. *高原气象*, 2013, 32(5): 1360-1367.
- [104] 李敏娜, 牛生杰, 张舒婷, 等. 南京雾-霾天气个例湍流运动特征的对比研究. *气象学报*, 2015, 73(3): 593-608.
- [105] Wang Y, Zhang J, Marcotte A R, et al. Fog chemistry at three sites in Norway. *Atmos Res*, 2015, 151(0): 72-81.
- [106] 樊曙先, 杨雪贞, 樊韬, 等. 南京冬季雾水金属元素及水溶性阴离子浓度特征. *环境科学学报*, 2009, 29(9): 1878-1885.
- [107] Błaś M, Polkowska Ż, Sobik M, et al. Fog water chemical composition in different geographic regions of Poland. *Atmos Res*, 2010, 95(4): 455-469.
- [108] 吴兑, 李菲, 邓雪娇, 等. 广州地区春季污染雾的化学特征分析. *热带气象学报*, 2008, 24(6): 569-575.
- [109] 李子华, 彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特性. *气象学报*, 1994, 52(4): 477-483.
- [110] 吴兑, 邓雪娇, 叶燕翔, 等. 南岭大瑶山浓雾雾水的化学成分研究. *气象学报*, 2004, 62(4): 476-485.
- [111] 刘红杰, 王玮, 高金和, 等. 闽南地区酸性雾水特征初探. *环境科学研究*, 1996, 9(5): 30-32.
- [112] Lu C, Niu S, Tang L, et al. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics. *Atmos Res*, 2010, 97(1/2): 47-69.
- [113] 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. *中国环境科学*, 2011, 31(3): 353-360.
- [114] Yang J, Xie Y J, Shi C E, et al. Ion composition of fog water and its relation to air pollutants during winter fog events in Nanjing, China. *Pure Appl Geophys*, 2012, 169(5/6): 1037-1052.
- [115] 鲍宝堂, 束家鑫. 上海城市雾理化特性的研究. *南京气象学院学报*, 1995, 18(1): 114-118.
- [116] 莫天麟, 许绍祖, 陈帆. 舟山地区雾水酸度及其化学组成. *上海环境科学*, 1989, 8(8): 22-26.
- [117] 宋金明, 李鹏程, 詹滨秋. 青岛雾水中的氯离子. *海洋环境科学*, 1992, 11(4): 14-22.
- [118] Yue Y, Niu S, Zhao L, et al. Chemical composition of sea fog water along the South China Sea. *Pure Appl Geophys*, 2012, 169(12): 2231-2249.
- [119] 丁国安, 纪湘明, 房秀梅, 等. 庐山云雾水化学组分的某些特征. *气象学报*, 1991, 49(2): 190-197.
- [120] 文彬, 银燕, 秦彦硕, 等. 2009年夏季黄山云雾水化学特征及来源分析. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2113-2122.
- [121] Collett Jr J L, Bator A, Sherman D E, et al. The chemical composition of fogs and intercepted clouds in the United States. *Atmos Res*, 2002, 64(1/2/3/4): 29-40.
- [122] Raja S, Raghunathan R, Yu XY, et al. Fog chemistry in the Texas-Louisiana Gulf Coast corridor. *Atmos Environ*, 2008, 42(9): 2048-2061.
- [123] 秦彦硕, 刘端阳, 银燕, 等. 南京地区雾水化学特征及污染物来源分析. *环境化学*, 2011, 30(4): 816-824.
- [124] Yue Y, Niu S, Zhao L, et al. The influences of macro- and microphysical characteristics of sea-fog on fog-water chemical composition. *Adv Atmos Sci*, 2014, 31(3): 624-636.
- [125] 李德, 陈明华, 邵德民. 上海雾天大气污染及雾水组分研究. *上海环境科学*, 1999, 18(3): 117-120.
- [126] 朱彬, 李子华, 黄建平, 等. 西双版纳城、郊雾水化学组成分析. *环境科学学报*, 2000, 20(3): 316-321.
- [127] 黄玉生, 郭慧光, 刘富兴. 工业区与非工业区辐射雾雾水的化学组成. *地理学报*, 1992, 47(1): 66-73.
- [128] 迪丽努尔·塔力甫, 阿布力克木·阿不力孜. 乌鲁木齐市南山雾水的化学组成及对环境的影响. *城市环境与城市生态*, 2005, 18(6): 7-9.
- [129] He J, Fan S, Meng Q, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with fine particulate matters in Nanjing, China: distributions, sources and meteorological influences. *Atmos Environ*, 2014, 89: 207-215.
- [130] Meng Q, Fan S, He J, et al. Particle size distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons during a heavy haze episode in Nanjing, China. *Particuology*, 2015, 18: 127-134.
- [131] 樊曙先, 黄红丽, 顾凯华, 等. 雾过程对大气气溶胶PM10中多环芳烃粒径分布的影响. *高等学校化学学报*, 2010, 31(12): 2375-2382.
- [132] 顾凯华, 樊曙先, 黄红丽. 南京冬季雾天颗粒物中PAHs分布与气象条件的关系. *中国环境科学*, 2011, 31(8): 1233-1240.
- [133] Gurka J J, Oliver V J. Fog persistence under a cirrus band. *Mon Wea Rev*, 1974, 102(12): 869-870.
- [134] Gurka J J. The role of inward mixing in the dissipation of fog and stratus. *Mon Wea Rev*, 1978, 106(11): 1633-1635.
- [135] Eyre J R, Brownscombe J L, Allam R J. Detection of fog at night using Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) imagery. *Meteor Mag*, 1984, 113: 266-271.
- [136] Turner J, Allam R J, Maine D R. Case study of the detection of fog at night using channels 3 and 4 on the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). *Meteor Mag*, 1986, 115: 285-290.
- [137] Hunt G E. Radiative properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. *Quart J Roy Meteor Soc*, 1973, 99(420): 346-369.
- [138] Ellrod G P. Advances in the detection and analysis of fog at night using GOES multispectral infrared imagery. *Wea Forecasting*, 1995, 10(2): 606-619.
- [139] Lee T F, Turk F J. Stratus and fog products using GOES-8/9 3.9- μm data. *Wea Forecasting*, 1997, 12(2): 664-677.
- [140] Turk J, Vivekanandan J, Lee T, et al. Derivation and applications of near-infrared cloud reflectances from GOES-8 and GOES-9.

- J Appl Meteor, 1998, 37(8): 819-831.
- [141] 郑新江. 黄淮海雾的卫星云图特征分析. 气象, 1988, 14(6): 7-9.
- [142] 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. 遥感信息, 1997(3): 25-27.
- [143] 李亚春, 孙涵, 李湘阁, 等. 用GMS-5气象卫星资料遥感监测白天雾的研究. 南京气象学院学报, 2001, 24(3): 121-129.
- [144] 邓军, 白洁, 刘健文, 等. 基于MODIS多通道资料的白天雾监测. 气象科技, 2006, 34(2): 188-193.
- [145] 陈林, 牛生杰, 仲凌志. 监测雾的方法及分析. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 448-454.
- [146] 马慧云, 李德仁, 刘良明, 等. 基于MODIS卫星数据的平流雾检测研究. 武汉大学学报: 信息科学版, 2005, 30(2): 143-145.
- [147] 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. 自然灾害学报, 2003, 12(2): 133-139.
- [148] 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. 遥感学报, 2006, 10(4): 497-501.
- [149] 蒋璐璐, 魏鸣. FY-3A卫星资料在雾监测中的应用研究. 遥感技术与应用, 2011, 26(4): 489-495.
- [150] Li J, Han Z G, Chen H B. Fog detection over China's adjacent sea area by using the MTSAT geostationary satellite data. Atmos Oceanic Sci Lett, 2012, 5: 128-133.
- [151] 张春桂, 何金德, 马治国. 福建沿海海雾的卫星遥感监测. 中国农业气象, 2013, 34(3): 366-373.
- [152] 吴晓京, 李三妹, 廖蜜, 等. 基于20年卫星遥感资料的黄海、渤海海雾分布季节特征分析. 海洋学报, 2015, 37(1): 63-72.
- [153] 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. 气象学报, 2015, 73(1): 200-210.
- [154] 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.
- [155] Zhang S, Yi L. A comprehensive dynamic threshold algorithm for daytime sea fog retrieval over the Chinese adjacent seas. Pure Appl Geophys, 2013, 170(11): 1931-1944.
- [156] Wu D, Lu B, Zhang T, et al. A method of detecting sea fogs using CALIOP data and its application to improve MODIS-based sea fog detection. J Quant Spectrosc Ra, 2015, 153: 88-94.
- [157] Yi L, Zhang S P, Thies B, et al. Spatio-temporal detection of fog and low stratus top heights over the Yellow Sea with geostationary satellite data as a precondition for ground fog detection: a feasibility study. Atmos Res, 2015, 151: 212-223.
- [158] 黄培强, 郭岚. 辐射雾形成的数值模拟. 气象科学, 1986(2): 68-74.
- [159] 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.
- [160] 朱平, 蒋瑞滨. 辐射雾中振荡现象的数值研究. 大气科学, 1995, 19(2): 228-234.
- [161] 周小刚, 王强, 邓北胜, 等. 北京市一次大雾过程边界层结构的模拟研究. 气象学报, 2004, 62(4): 468-475.
- [162] 钱敏伟, 雷孝恩. 长江上空辐射雾的数值研究. 大气科学, 1990, 14(4): 483-489.
- [163] 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(6): 750-755.
- [164] 石春娥, 杨军, 孙学鑫, 等. 重庆雾的三维数值模拟. 南京气象学院学报, 1997, 20(3): 308-317.
- [165] 黄建平, 李子华, 黄玉仁, 等. 西双版纳地区雾的数值模拟研究. 大气科学, 2000, 24(6): 821-834.
- [166] 傅刚, 张涛, 周发琇. 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.
- [167] 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. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2005, 6(4): 404-408.
- [168] 樊琦, 吴兑, 范绍佳, 等. 广州地区冬季一次大雾的三维数值模拟研究. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(1): 83-86.
- [169] 胡朝霞. 降水性层状云系与雾的观测和数值模拟研究. 北京: 中国科学院大气物理研究所, 2007.
- [170] Fu G, Guo J, Pendergrass A, et al. An analysis and modeling study of a sea fog event over the Yellow and Bohai Seas. J Oceanic Uni China, 2008, 7(1): 27-34.
- [171] Fu G, Guo J, Xie SP, et al. Analysis and high-resolution modeling of a dense sea fog event over the Yellow Sea. Atmos Res, 2006, 81(4): 293-303.
- [172] 王帅, 傅聃, 陈德林, 等. 2009年春季一次黄淮海雾的观测分析及数值模拟. 大气科学学报, 2012, 35(3): 282-294.
- [173] 刘现鹏, 邵利民, 魏海亮. WRF模式垂直分辨率对海雾模拟影响的个例研究. 海洋技术学报, 2014, 33(6): 85-89.
- [174] 何晖, 金华, 刘建忠, 等. 北京地区一次辐射雾的数值模拟. 气候与环境研究, 2009, 14(4): 390-398.
- [175] 梁爱民, 张庆红, 申红喜, 等. 北京地区一次平流雾过程的分析和数值模拟. 应用气象学报, 2009, 20(5): 612-621.
- [176] 王小雁, 包云轩, 严明良, 等. 不同陆面方案对沪宁高速公路团雾的模拟. 气象科学, 2010, 30(4): 487-494.
- [177] 高山红, 张守宝, 齐伊玲, 等. 利用循环3DVAR改进黄淮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.
- [178] 胡朝霞, 雷恒池, 董剑希, 等. 一次区域暖雾的特征分析及数值模拟. 气候与环境研究, 2011, 16(1): 71-84.
- [179] 贾星灿, 郭学良. 人为大气污染物对一次冬季浓雾形成发展的影响研究. 大气科学, 2012, 36(5): 995-1008.
- [180] Hu H, Zhang Q, Xie B, et al. Predictability of an advection fog event over North China. Part I: sensitivity to initial condition differences. Mon Wea Rev, 2014, 142(5): 1803-1822.
- [181] Lin Y, Zhang Z, Pu Z, et al. Sensitivity of numerical simulations of an advection fog event over the Shanghai Pudong airport to WRF physical parameterization schemes. J Meteor Soc Japan, 2016: in press.
- [182] Zhou B, Du J. Fog prediction from a multimodel mesoscale ensemble prediction system. Wea Forecasting, 2010, 25(1): 303-322.
- [183] 孔君, 苏正军. 关于人工影响消减雾霾的思考. 科技导报, 2015(6): 86-90.
- [184] Guo X, Fu D, Li X, et al. Advances in cloud physics and weather modification in China. Adv Atmos Sci, 2015, 32: 230-249.
- [185] Guo X, Zheng G. Advances in weather modification from 1997 to 2007 in China. Adv Atmos Sci, 2009, 26: 240-252.
- [186] 雷恒池, 洪延超, 赵震, 等. 近年来云降水物理和人工影响天气研究进展. 大气科学, 2008, 32(4): 967-974.
- [187] 高建秋, 王广河, 关立友, 等. 新型消暖雾催化剂与传统吸湿性催化剂消雾性能的室内对比试验. 干旱气象, 2008(2): 67-73.
- [188] 张铮, 任婕, 韩光. 液氮消雾成冰性能的实验研究. 北京大学学报(自然科学版), 1996, 32(3): 372-378.
- [189] 郭恩铭, 刘钟源, 蒋瑞滨. 人工影响暖雾试验研究. 气象学报, 1990(2): 232-238.
- [190] 濮江平, 魏阳春, 王伟民, 等. 涡喷消雾装置试验研究. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2001(5): 87-91.
- [191] 岳治国, 谢军, 李燕, 等. 人工消冷雾试验. 陕西气象, 2003(2): 6-8.
- [192] 何晖, 郭学良, 李宏宇, 等. 人工消除冷雾的个例模拟分析. 大气科学, 2011(2): 272-286.
- [193] 曹学成, 任婕, 周明煜, 等. 北京首都机场的人工消雾及大气边界层特征的演变. 地球物理学报, 1998, (6): 772-779.
- [194] 金华, 何晖, 张蕾, 等. 人工消雾试验中的雾微物理响应. 热带气象学报, 2012(2): 228-236.
- [195] 杨军, 牛忠清, 石春娥, 等. 一次雾霾转换过程长波辐射特征初步分析. 环境科学, 2010, 31(7): 1425-1431.
- [196] 马楠, 赵春生, 陈静, 等. 基于实测PM2.5、能见度 and 相对湿度分辨雾霾的新方法. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(2): 227-235.