

中国近 40 年来雾的研究*

李子华

(南京气象学院, 南京, 210044)

摘 要

自 1958 年以来, 中国一直重视人工消雾试验和雾的物理学研究。文中总结了 40 余年来中国在人工消雾、雾的物理化学特性、雾生消物理过程研究等方面的成就, 介绍了雾与生态环境之间的紧密关系及雾数值模式研究的发展过程和取得的重要成果。

雾是贴地层空气中悬浮着大量水滴或冰晶微粒而使水平能见距离降到 1 km 以内的天气现象。它不仅对水陆空交通有不利影响, 而且对工农业生产和人民身体健康也带来了严重危害。纯净雾水也有有利的一面, 比如云南省南部的雾对生产高质量的茶叶及发展橡胶林十分有利。对一些干旱地区还可“雾中取水”。近些年来发现, 雾与生态环境关系密切, 研究雾可为保护生态环境提供科学依据。

关键词: 中国雾, 40 年成就, 雾模式, 宏微观物理。

1 历史回顾

由于雾常给国民经济和社会生活带来重大损失, 中国自 1958 年以来一直重视人工消雾试验和雾的物理学研究。用干冰影响过冷雾的试验最先是在北京进行的。当时用的方法、工具十分简单、原始, 效果不太明显。1959 年先后在庐山、长白山用燃烧 AgI 丙酮溶液、燃烧红磷等方法来影响云雾, 取得了初步的效果。接着在上海机场用播撒盐粉和氯化钙方法开展了消暖雾的试验, 取得了较好的效果。20 世纪 60 年代和 70 年代, 除继续在重庆、庐山和福建邵武等地进行一些小规模的人工消雾试验外, 还在苏皖两省及成都机场使用飞机播撒氯化钙方法进行较大规模的消暖雾试验^[1], 获得了许多经验。20 世纪 80 年代以来, 在总结过去人工消雾的基础上, 又实施了 2 个经过严格设计的科学的人工消雾计划, 一个是 1985~1987 年的成都双流机场消暖雾试验^[2], 另一个是 1995~1997 年北京首都机场消冷雾试验。前者采用热力动力方法, 后者利用车载液氮喷洒系统和气球携带液氮作业技术, 两个计划均获得成功, 取得了明显的消雾效果。今后要在降低消雾成本、延长消雾时效上继续试验研究。

在经济建设和人工消雾的推动下, 雾的宏微观结构的观测也得到了发展。最早的观测

* 初稿时间: 1999 年 5 月 28 日; 修改稿时间: 2000 年 4 月 17 日。
资助课题: 国家自然科学基金项目(49665012, 49675250)。

是在上海进行的,当时的仪器比较简单,仅用滴谱仪观测雾的微结构。1968,1969 两年,中国南方各省作过一次雾的普查,对云、贵、川、皖、浙、闽、粤等省雾的微结构做过初步观测。20 世纪 80 年代以来,随着国民经济的发展,雾害愈来愈突出。雾害的研究受到了国家科委及有关省市的特别重视,雾的观测得到了很大的发展。比较大的计划有成都双流机场雾的观测^[3]、浙江舟山海雾研究^[4]、西双版纳辐射雾探测^[5]、上海城市雾研究^[6]、重庆雾害^[7]及沪宁高速公路雾的研究^[8]。这些计划多采用了比较先进的仪器设备,比如 ADAS 系统在边界层探测中得到了充分的应用。许多试验还采集了雾水,分析了雾水化学成分。其中重庆雾的观测规模大、项目多、测站密集,是一项包括雾的宏微观物理、雾水化学及大气污染等内容的综合观测。这期间,西双版纳雾的观测先后进行了 3 次,一次比一次深入。由于长江航运的需要,1987 年冬专门对长江沿线雾进行了考察^[9]。同时,北京、天津、新疆和吉林等省市,还作过中国北方冷雾的观测。

2 雾的物理化学特征

中国内陆雾多为辐射雾,南方多为暖性雾,北方冬季雾常为冷性雾。如北京、天津和乌鲁木齐等地区在冬季常出现过冷雾。发展成熟的都市雾,其厚度可达 200~300 m,山谷雾雾顶更高,在重庆和西双版纳的勐养观测到最大雾顶高度为 400 m(表 1)。这为人工消雾带来了困难。研究发现,这样厚的雾层与山风环流及城市热岛效应有关,周围山区下泄的冷空气在谷地汇合,在其上空形成上升气流,而城市热岛效应又可增强上升气流,从而使雾顶升到很高的高度。但城市热岛不利于地面雾的形成。例如景洪市,20 世纪 80 年代以来,城市有了很大发展,城区温度明显升高,但雾日明显减少,空中雾层常常不能及地。观测发现,辐射雾在形成和发展过程中,常有双层结构。这是在南京汤山最先发现的^[10],以后在西双版纳雾的观测中,几乎每场雾都出现过双层结构。分析表明,这与逆温层的分层结构有关,逆温层底常有水汽累积,导致了雾在形成和发展过程中的双层结构。

表 1 中国辐射雾的宏观特征

观测时间	地点	起雾时间 (时:分)	持续时间(h)	雾层厚度(m)	气温(°C)
1989 年~1991 年	重庆	23:52~4:10	6~12	200~400	3.8~10.0
1996 年 12 月	南京	4:00	8	200	1.0~5.0
1989,1990 年冬	上海	5:00~7:00	3~5		3.0~10.0
1985 年 12 月~1986 年 1 月	成都		5~8	15~350	1.0~4.0
1986 年 12 月~1987 年 2 月	景洪	3:38	4	200	12.0~13.0
1986 年 12 月~1987 年 2 月	勐养	0:20	9	400	10.0~12.0
1997 年 11 月	景洪	3:18~5:15	4	240	13.0~16.0
1997 年 11 月	勐养	0:10~1:35	9	430	12.0~15.0

中国对雾的微物理结构的观测面广,时间长。自 20 世纪 50 年代末 60 年代初起,持续在中国的南部、西南地区、长江流域以及京、津和乌鲁木齐等地进行雾的微结构观测,获得了丰富的资料,基本搞清了雾的微物理结构特征^[11](表 2)。雾滴数密度以城市雾最

大,其量级为 $10^2 \sim 10^3$ 个/cm³;山区雾次之,一般为 10^2 个/cm³;海雾最小,多为 $10^1 \sim 10^2$ 个/cm³。就雾滴尺度而言,大城市雾最小,其平均直径多在 $10\mu\text{m}$ 以下;海雾最大,舟山平均为 $22.1\mu\text{m}$;中小城市及山区雾介于两者之间。含水量以内陆大城市重庆市为最小,平均值小于 0.1g/m^3 ,其它各地雾多在 $0.1 \sim 0.5\text{g/m}^3$ 之间。研究发现,城市污染对雾的微结构影响较大。20世纪80年代以来,随着国民经济的发展,城市大气污染日益加剧,大气气溶胶粒子明显增多。大部分气溶胶粒子可成为雾滴凝结核,这必然使雾滴数密度增大。

表2 中国雾的微物理特征

地点		N (个/cm ³)	W (g/m ³)	D_1 (μm)	D_f (μm)	D_{max} (μm)	L (m)	样本数 (个)	观测时间
南京 汤山	最大值	132	0.38	12.9	9.5	59.2		31	1996年12月27日
	最小值	11	0.03	11.3	5.2	31.6			
	平均值	38.4	0.13	12.3	7.3	57.5			
南京 盘城	最大值	2037	0.25	6.0	4.9	40.0		56	1996年12月 29~30日
	最小值	152	0.09	3.5	3.5	29.0			
	平均值	1518	0.19	3.8	3.0	33.0			
云南 思茅 ^[11]	最大值	107.0	0.8	26.8	34.0	120.9			1968~1969年
	最小值	7.3	0.1	14.3	9.3	37.2			
	平均值	41.9	0.36	19.7					
云南 景洪 ^[11]	最大值	60.6	1.97	35.0	37.2	120.9			1968~1969年
	最小值	5.2	0.1	20.0	18.6	46.5			
	平均值	34.9	0.74	28.6					
云南 景洪 ^[11]	最大值	783.0	0.13	11.3	3.5	63.0			1986年12月26日 ~1987年2月18日
	最小值	17.9	0.01	3.9	3.5	28.0			
	平均值	153.0	0.08	6.8	3.5	51.6			
云南 勐养 ^[11]	最大值	270.2	0.74	22.8	21.0	66.5			1986年12月26日~ 1987年2月18日
	最小值	2.1	0.02	5.7	3.5	42.0			
	平均值	94.8	0.25	13.1	6.8	58.8			
云南 勐养	最大值	315.0	0.17	9.3	5.4	41.0		102	1997年11月 26~29日
	最小值	81.0	0.08	7.3	3.8	31.5			
	平均值	222.0	0.11	8.1	4.7	38.9			
四川 成都 ^[11]	最大值	285.0	0.34	31.7		129.0		102	1970年1月2日~ 1971年1月
	最小值	23.0	0.04	4.5		12.0			
	平均值	256.4	0.17	10.3		48.0			
四川 成都 ^[12]	最大值	959.0	1.32	16.2		79.4		102	1985年12月15日~ 1986年1月14日
	最小值	206.0	0.12	4.5		18.0			
	平均值	417.4	0.5	8.3		44.8			
重庆 ^[13]	最大值		0.20						1968年12月
	最小值		0.12						
	平均值								
重庆 ^[9]	最大值	182	0.41	14.3	10.8	36.0	100	3	1987年11月20日
	最小值	57	0.13	8.9	3.6	32.4	80		
	平均值	115	0.24	12.2	7.2	34.8			

表 2 续

重庆 ^[11]	最大值	1114.0	0.16	7.7	3.5	62.0			1989年12月15日~ 1990年1月15日
	最小值	146.0	0.02	3.5	3.5	7.0			
	平均值	606.0	0.07	3.2	3.5	23.8			
安徽 屯溪 ^[11]	最大值	182.9	0.76	15.3	7.0	56.0			1981年1月
	最小值	48.9	0.22	10.2	3.5	38.5			
	平均值	115.7	0.43	12.3	4.2	46.9			
福建 永安 ^[11]	最大值	223.0	2.6	34.4		111.6			1968~1969年
	最小值	28.3	0.03	7.0		37.2			
	平均值	83.2	0.32	12.5					
福建 永定 ^[11]	最大值	85.0	1.3	37.2	37.2	102.0			1968~1969年
	最小值	11.2	0.1	17.0	4.7	46.5			
	平均值	45.2	0.46	22.9					
浙江 舟山 ^[4]	最大值	122.0	2.68	27.7	40.2	338.1			1985年4~5月
	最小值	7.6		17.8	1.5	14.1			
	平均值	37.1	0.37	22.1	20.0	59.6			
贵州 水城 ^①	最大值	1178	0.47	14.3	4.3	50.0			50 1988,1989,1991年
	最小值	26	0.02	3.7	4.0	35.0			
	平均值	220	0.16	7.2	4.2				
贵州 娄山 ^[11]	最大值	1539	0.56	19.8	4.2	50.0			105 1990年
	最小值	39	0.02	4.1	4.0	35.0			
	平均值	267	0.25	7.6	4.1				
庐山 ^[14]	最大值	183	0.76	15.3	7.0	56.0	260		5 1981年1月11日
	最小值	49	0.22	10.2	3.5	38.5	50		
	平均值	116	0.43	12.3	4.2	47.0			
青岛 ^[15]	最大值	238.9	0.19	5.0	8~10		50		9 1993rh 6~7月
	最小值	5.4	0.01	4.2	2.0				
	平均值			4.4					
湖北 武穴 ^[9]	最大值	201	1.3	14.0	3.6	64.8	80		2 1987年11月20日
	最小值	46	0.07	9.5	3.6	39.6	60		
	平均值	124	0.68	11.7	3.6	52.2			
湖南 成陵矶 ^[9]	最大值	121	1.24	15.8	3.6	93.6	200		2 1987年11月21日
	最小值	117	0.11	8.9	3.6	25.2	100		
	平均值	159	0.67	12.3	3.6	59.4			
天津 ^[13]	最大值		0.25						1988年1月
	最小值		0.05						
	平均值								
上海 ^[16]	最大值	500	1.4		16.0	50	50		20世纪50年代 末60年代初
	最小值	100			10.0	40			
	平均值		0.5						
上海 ^[11]	最大值	518.4	1.53	9.9	3.7	125.8			50 1989年1月
	最小值	23.6	0.01	4.4	3.7	14.8			
	平均值	173.0	0.26	5.0	3.7	54.8			

说明:表中各项符号意义: N 为数密度, W 为含水量, D_1 为平均直径, D_f 为峰值直径, D_{\max} 为最大直径, L 为能见距离。①关罗宁、文继芬等,导线积冰与气象特征的分析研究,尚未发表

无论是用景洪、成都等地 80 年代后的观测资料与 60,70 年代相比较,还是用勐养、重庆等地 90 年代后的观测记录与 80 年代相比较^[17],雾滴数密度都明显增大,尺度明显减小,含水量降低。青岛海雾雾滴尺度和含小量比舟山海雾小得多(见表 2),数密度要大得多,这很可能是大城市污染所致。各地平均雾滴谱型多为单峰结构,整个谱分布偏向小滴一端,雾滴主要集中在 2~10 μm 区段内,峰值直径 3~4 μm 。在大滴一端虽然尾迹很长,最大直径可以达到 40~50 μm ,但数密度极小。拟合结果表明,平均谱多满足 Deirmendjian 分布^[18]。但在雾的发生发展过程中,雾滴谱是不断变化的,有时这种变化还相当大。在雾的发展和相对稳定阶段,雾滴谱变化表现出明显的起伏增长特征。与此相联,含水量、数密度和雾滴尺度发生巨大变化^[17]。

中国雾水化学研究起步较晚,但自 20 世纪 80 年代中期开始,通过 10 多年的取样分析,也取得了许多重要成果^[19~23](见表 3),研究表明:重庆、上海、庐山雾水均呈酸性。重庆市 1984~1990 年 7 a 期间获得 182 个雾水样本,其 pH 值在 2.96~8.00 之间,平均为 4.39。其中城区 pH 值在 2.96~7.52 之间,平均值为 4.30;郊区 pH 值在 4.45~8.00 之间,平均值为 4.99。如果以 5.6 为界,市区雾水 pH 值小于此值的占 81.2%,市中心区占 92.8%。可见市区 80% 以上雾水均已酸化。上海市 1989~1991 年间,在 7 次浓雾过程中收集雾水样品 28 个,pH 值在 4.3~6.5 之间,平均值为 5.19,其中有 3 次雾过程 7 个样品 pH 值小于 5.6。

表 3 中国雾水化学组成

地 点	K ⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NO ₂ ⁻	PO ₄ ³⁻	pH	观测时间	样本数	
重庆 ^[19]	39.88	34.19	59.67	147.71	36.04	20.21	73.11	61.49	619.59	/	/	4.39	1984~1990年	182	
上海(%) ^[20]	2.35	4.7	67.2	22.7	3.05	5.45	4.25	2.15	88.1	/	/	5.15	1988年冬~ 1991年春	28	
云南安宁	居民区	15.15	9.76	99.34	/	/	16.20	50.8	21.28	418.1	3.36	6.25	1988年冬	16	
	非居民区	0.62	1.61	48.55	/	/	12.70	20.1	13.47	257.4	2.60	6.71	1988年冬	40	
景洪 ^[22]	1.27	1.03	10.42	/	/	2.34	4.72	2.68	28.70	2.27	<0.1	/	1988年冬	6	
西双版纳	景洪	30.24	5.48	62.35	20.8	3.28	61.1	53.9	8.43	123.33	1.21	0.11	6.32	1997年11月	4
	勐养	24.78	1.08	0.60	36.12	0.96	5.91	9.11	2.26	41.97	2.40	0.00	8.34	1997年11月	8
庐山 ^[23]	0.56	0.43	5.83	4.27	0.31	0.17	0.91	4.56	21.32	/	/	5.36	1987年5月	60	
舟山 ^[21]	2.53	22.11	5.26	7.42	1.59	/	33.84	10.35	19.72	/	/	6.01	1987年4~5月	31	

说明:离子浓度的单位为相对雾水总质量的质量比,表中数据应乘以 10^{-6}

①,上海的资料是各离子相对于离子总质量的百分比;/:仪器检测限以下或缺测

酸雾的形成与城市空气污染程度有关。主要污染物是硫酸(盐)及钙、铵,其次是硝酸(盐)、氯及氟的化合物。如重庆市雾水离子平均浓度高达 $3.3 \times 10^4 \mu\text{mol/L}$,浓度最高时,约占雾水重量的 1.0%。雾水酸度主要来源于硫酸、盐酸和硝酸,它们的存在形式是各种盐。西双版纳地区的雾水相对纯净,离子浓度明显低于工业城市,雾水基本透明。但随着城市发展,1997 年与 1988 年相比,雾水离子浓度已有明显增高趋势。

3 雾中温湿垂直分布及生消的物理过程

许多 ADAS 及低探资料表明,雾顶上的温度、比湿和相对湿度存在着明显的跃变特征,风速差异也比较大。在时间剖面图中,雾顶部等温线、等比湿线密集,向上递增,有明显

的逆温、逆湿结构。雾层内温度随高度的分布特征是:形成时雾底层超绝热递减,中上部为逆温;发展阶段雾底层超绝热递减,中上部近似等温,逆温层移至雾顶;成熟阶段雾层内温度服从湿绝热递减率。

中国辐射雾的形成有两种情况,一是直接通过辐射冷却机制产生的;二是在山风作用下形成和发展的。重庆与西双版纳雾的产生多属于第二种机制。这两个地区地形特征有相似之处,东西两侧为山。夜晚随着辐射冷却增强,山上有冷空气下泄,与谷地(或盆地)上空暖湿空气混合而形成低云,而后及地成雾^[24]。对这种雾的形成起重要作用的因子除辐射冷却、山风环流之外,还有地面水汽的向上输送。重庆之所以雾多,是由于它为长江、嘉陵江所环抱,两江水面蒸发源源不断向峡谷上空输送水汽,重庆市区具有明显的湿岛结构^[25]。西双版纳雾所需水汽则来源于热带雨林的蒸腾,使谷区年平均相对湿度维持 80% 左右。

研究发现,辐射雾在发展时常有爆发性特征^[10],雾顶由 10^1 m 跃增到 10^2 m。南京、重庆、西双版纳雾都出现过这种现象,尤其是西双版纳冬季雾,多数都有爆发性发展特征。导致雾层爆发性发展的条件是:雾顶辐射冷却增强,地面雾微物理过程充分发展,大量潜热释放使雾底层出现增温,从而使雾层内稳定度减小,湍流混合增强,对于山谷雾则上升运动增强,引起热量、动量及水汽的垂直输送。雾的双层结构也为爆发性发展酝酿了条件。

此外,中国学者对沿海海雾也做了不少研究,主要对象是平流雾、平流辐射雾和锋面雾。从而对海雾的时空分布、物理属性和生消过程已有轮廓概念。

4 雾与生态环境关系

近年来,雾的研究逐渐揭示了雾与生态环境之间的紧密关系。西双版纳地区茂密的原始森林为辐射雾的形成提供了湿润的生态气候环境,而辐射雾又消除了冷害,弥补了西双版纳干季降水的不足,养育了生态质量较高的天然森林。西双版纳雾对生产高质量的茶叶及发展橡胶林十分有益。但自 20 世纪 70 年代末以来,随着城市和社会经济的发展,雾愈来愈少。20 世纪 50 年代景洪平均年雾日 166 d,90 年代(1990~1995)平均年雾日仅 58 d^[26]。有雾日,雾内含水量也明显减少。50 年代景洪平均年降雾量 17.5 mm,到 80 年代已不足 1 mm。重庆市也有类似情况,50 年代重庆市平均年雾日 103 d,到 80 年代仅 48 d。雾日及降雾量的减少,影响了森林的生长,破坏了生态平衡。雾减少的主要原因,一是城市扩大,工矿企业发展,二是森林覆盖率下降。前者导致空气温度升高,后者使得空气湿度减少。90 年代景洪市冬半年平均气温比 50 年代升高了 1.4℃,尤其是与成雾直接有关的夜晚最低气温,上升更为明显。对重庆市气溶胶粒子温度效应的计算表明,仅城市大气污染颗粒物影响夜晚长波辐射一项,就可使气温上升 0.5℃左右^[27]。夜晚长波辐射减少,直接影响了雾的生成。森林覆盖率的下降,主要是使蒸腾量减少,从而导致空气中水汽减少。景洪市冬半年 20 时的相对湿度,50 年代为 85%,到 80 和 90 年代分别下降到 71% 和 73%。夜晚相对湿度的降低,直接影响到雾能否形成,或者延迟起雾的时间,减少雾水的含量。可见生态环境的变化引起雾的明显变化,而雾的变化又会来影响生态环境。所以,减少向大气排放污染物,保护和发展森林,保护生态环境刻不容缓。

5 雾的数值模拟研究

中国雾的数值模拟研究起步较晚,是从20世纪80年代中期开始的。经过十多年不断的深入研究,已经取得了重大进展。起初,采用Brown和Roach^[28]的一维模式对辐射雾形成过程进行数值试验^[29],并分析探讨低层温度、湍流、相变、重力沉降等因子对辐射雾形成的影响。虽然模式中初始条件和湍流交换系数都作了简化处理,计算结果与实际有偏差,但毕竟是一个很好的尝试,由此开始了中国雾模式的研究。以后有人^[30]改进了辐射雾模式,交换系数由模式风、温方程来预报,模拟研究了辐射雾形成和发展过程,结果在一定程度上反映了辐射雾的特点。也有人^[31]用湍流能量方程闭合的一维边界层模式,研究夜间辐射雾的演变过程,得到了与Brown等基本一致的模拟结果。一维辐射雾继续发展,使其成为包含详细微物理过程的分档模式或采用雾微物理过程参数化方法的模式^[32]。“辐射雾生消的数值研究”^[33,34]论文建立了一个比较完善、各影响因子处理得比较合理的描述辐射雾生消过程的数值模式,构造了考虑水汽水滴对红外辐射吸收和发射以及水滴对短波红外辐射散射的参数化计算方案,采用了新的湍流交换系数公式,预报量包括风、温、湿、雾含水量及雾滴数密度。模式首次引入了碰并过程,考虑了碰并过程对含水量及雾滴数密度的作用。利用这个模式对Roach于1971年12月7日在英国Cardington观测的一次辐射雾过程^[35]进行了模拟,结果基本反应了实测雾生消全过程。以后又利用这个模式详细分析了雾过程中影响温度、含水量及雾滴数密度的各种因子的变化,在此基础上给出了清晰的辐射雾生消过程的物理图像。可以说,在一维辐射雾模式中,这个模式代表了当今世界的先进水平。

20世纪80年代末和90年代初,为研究长江上空辐射雾的形成和发展与长江水面及长江两岸复杂地形的关系,中国开始研究二维辐射雾模式。所设计的模式^[36]包括大气长波辐射冷却、地表能量收支、液态水重力沉降等影响雾的形成和发展的主要因子,并采用了一个高度变换坐标系,有效而简便地将长江两岸的复杂地形引入模式。模拟计算得到了一些有意义的结果,但没有实测雾过程的验证。在对重庆雾综合观测试验之后,建立的复杂地形二维非定常雾模式^[37],以实测资料为初始场,研究了一次重庆雾的形成和发展过程。对江河、城市热岛、重庆地形、长波辐射冷却等对雾的影响分别作了模拟试验,得到了一些符合观测事实的结论。其中城市热岛对雾的影响有二重性,一方面热岛环流可以增强市中心与长江之间的气流辐合上升,把水汽从低层带入高层,有利于已形成雾的垂直发展;另一方面,城市的高温又不利于雾的形成。这一重要结论可以解释重庆雾为什么随着城市发展而逐渐减少,有雾日雾顶很高,雾层很厚等问题。由于重庆雾分布不均匀,具有明显的三维结构特征,且地形复杂而又不对称,二维模式具有明显的不足。由此发展了复杂地形上雾的三维数值模式^[38,39]。用这个模式模拟重庆因山地、河流和城市热岛而引起的局地环流极为真实,模拟冬季雾的生消过程、空间分布特征与实况接近。后来用这个模式研究西双版纳地区的辐射雾也获得成功。在国外,目前尚未见到此类雾模式公开发表。考虑到生态环境对雾的影响,已有人将大气气溶胶和植被等因子引入到三维雾模式中,进行模拟试验。由上述可见,中国雾的模式研究虽起步较晚,但发展很快。

致谢:余香仁和陈万奎先生为本文提供了许多历史资料,在此表示衷心感谢!

参考文献

- 1 江祖凡,孙奕敏,黄美元. 用氯化钙消暖雾. 气象,1982,6:23~25
- 2 郭恩铭等. 人工影响暖雾试验研究. 气象学报,1990,48(2):232~238
- 3 郭恩铭等. 双流机场雾宏观结构研究. 全国云物理和人工影响天气会议文集. 北京:气象出版社,1989,35~38
- 4 扬中秋,许绍祖,耿骝. 舟山地区春季海雾的形成和微物理结构. 海洋学报,1989,11(4):431~438
- 5 黄玉生,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
- 6 郭恩铭,刘延刚,束家鑫. 黄浦江雾宏观结构研究. 北京气象学院学报,1990,1:46~49
- 7 李子华等. The physical structure of the winter fog in Chongqing metropolitan area and its formation process. AMS. 1994,8(3):316~328
- 8 李子华,黄建平,彭虎. 1996 年南京连续 5 天浓雾的物理结构特征. 气象学报,1999,57(5):622~631
- 9 余香仁等. 长江雾的考察与分析. 气象,1990,16(1):46~49
- 10 李子华等. 辐射雾发展的爆发性特征. 大气科学,1999,23(5):623~631
- 11 李子华,仲良喜,余香仁. 西南地区和长江下游的时空分布和物理结构. 地理学报,1992,47(3):242~251
- 12 蒋瑞宾等. 辐射雾的宏微观结构分析. 北京气象学院学报,1989,1:42~47
- 13 孙奕敏. 灾害性浓雾. 北京:气象出版社,1994. 13~27
- 14 余香仁. 云雾对激光传播及能见度的影响. 气象,1982,5:24~26
- 15 徐静琦,魏皓,张正. 青岛海雾雾滴谱与含水量观测与分析. 海洋湖沼通报,1994,16(2):174~178
- 16 顾震潮. 云雾降水物理基础. 北京:科学出版社,1980. 219pp
- 17 李子华等. 西双版纳冬季雾微物理结构及演变过程. 气象学报,2000,58(6):715~725
- 18 李子华,吴君. 重庆市冬季雾滴谱特征. 南京气象学院学报,1995,18(1):46~51
- 19 李子华,彭中贵. 重庆市冬季雾的物理化学特征. 气象学报,1994,52(4):477~483
- 20 鲍宝堂,束家鑫,朱炳权. 上海城市雾理化特征的研究. 南京气象学院学报,1995,18(1):114~118
- 21 莫天麟等. 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
- 22 黄玉生,郭慧光,刘富兴. 工业区和非工业区辐射雾水的化学组成. 地理学报,1992,47(1):66~73
- 23 丁国安等. 庐山云雾水化学组成的某些特征. 气象学报,1991,49(2):190~197
- 24 李子华,张利民,楼小凤. 重庆市冬季雾的宏微观结构及其物理成因. 南京气象学院学报,1993,16(1):48~54
- 25 李子华,唐斌,任启福. 重庆市冬季热岛和湿岛效应的研究. 地理学报,1993,48(4):358~366
- 26 宫世贤,凌井海. 西双版纳雾在减少. 气象,1996,22(11):10~14
- 27 李子华,涂晓萍. 考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应. 大气科学,1996,20(3):359~366
- 28 Brown R, Roach W T. The physical radiation fog, II — A numerical study. Quart. J Roy Meteor Sci, 1976,102:335~354
- 29 黄培强,郭岚. 辐射雾形成的数值模拟. 气象学报,1986,44(2):68~74
- 30 周斌斌. 辐射雾的数值模拟. 气象学报,1987,45(1):21~29
- 31 张福深,周明煜,吕乃平. 地面辐射雾和低层云对夜间边界层影响的数值研究. 大气科学,1987,11(2):128~137
- 32 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
- 33 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):315~359
- 34 尹球,许绍祖. 辐射雾生消的数值研究(II)——生消机制. 气象学报,52(1):60~67
- 35 Roach W T, et al. The physical of radiation fog I: A field study. Quart J Roy Meteor Sci, 1976,102:313~333
- 36 钱敏伟,雷孝恩. 长江上空辐射雾的数值模拟. 大气科学,1990,14(4):483~489
- 37 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
- 38 石春娥等. 3D Model Study on Fog over Complex Terrain Part I: Numerical study. AMS, 1996,10(4):493~506
- 39 李子华等. 3D Model Study on Fog over Complex Terrain Part II: Numerical experiment. AMS, 1997, 11(11):86~

STUDIES OF FOG IN CHINA OVER THE PAST 40 YEARS

Li Zihua

(*Nanjing Institute of Meteorology, Nanjing 210044*)

Abstract

Research of artificial dispersion and fog physics has been conducted in China since 1958. The paper presents the achievements of artificial fog dispersion, its physico-chemical characteristics, genesis/lysis processes and numerical studies. Finally a close relationship between fog events and ecoenvironments is given with which three-dimensional models to deal with fog effects of environmental factors have been established and developed.

Key words: Fog research in China, 40-year achievement, Fog models, Macro- and micro physics.

欢迎订阅 2002 年度《气象学报》

《气象学报》创刊于 1925 年,是由中国气象学会主办的全国性大气科学学术性期刊,旨在反映我国大气科学领域中最新科研成果,为大气科学研究提供学术交流阵地,以推动我国大气科学基础研究和理论研究的发展,服务于我国气象现代化建设事业。

《气象学报》以气象、水文、海洋及环境等相关学科的科研与业务人员和高等院校师生为主要读者对象,主要刊登大气科学各分支学科的创造性论文;国内外大气科学发展动态的综合评述;大气科学新观点、新理论、新技术、新方法的介绍;大气科学研究工作简报及重要学术会议报道;国内优秀大气科学专著的评介。为适应我国大气科学的迅速发展,扩大信息量,2002 年《气象学报》将改版为大 16 开本,以便尽快地反映气象科技工作者的最新研究成果。欢迎广大读者订阅。

2002 年《气象学报》仍为双月刊,128 页,国内外公开发行,邮发代号:2-482,地址:北京中关村南大街 46 号《气象学报》期刊社,邮编:100081,电话:68406942,68408571,每期订价 20.00 元,E-mail:cmsqxxb@263.net。