

雾的数值

模拟研究

张利民
石春娥
杨 军
李子华
等

■ 著

气象出版社

雾的数值模拟研究

张利民 石春娥 杨军 李子华等著

气象出版社

内 容 提 要

本书从近年来国内实施的几个比较大的雾研究计划出发,简要阐明了实际观测中发现的新的事实和结论,着重用数值模拟方法,从理论上阐明雾的微物理过程和宏观动力发展过程,以及与生态环境、空气污染的关系。

全书共分四章,包括雾的宏微观结构及化学特征,辐射雾一维、二维和三维数值模式,复杂地形上雾发展的物理过程,雾发生、发展的条件、影响因子及其变化规律,大气气溶胶粒子辐射特性及对雾形成和发展的影响。

本书可供从事云雾物理、人工影响天气及环境保护等方面的研究和业务人员参考,也可作为大气和环境科学专业的师生教学参考书,对一些常为雾害所困扰的部门和人员,也能从本书中得到启示和帮助。

图书在版编目(CIP)数据

雾的数值模拟研究/张利民等著—北京:气象出版社,2002.12
ISBN 7-5029-3492-8

I. 雾… II. 张… III. 雾-数值模拟-研究 IV. P426.4
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 098416 号

气象出版社 出版

(北京市海淀区中关村南大街 46 号 邮编:100081)

责任编辑:李太宇 终 审:纪乃晋

封面设计:曹 琦 责任校对:寇红薇

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

* * *

北京金瀑印刷有限责任公司

开本:787×1092 1/32 印张:4.625 字数:110千字

2002年12月第一版 2002年12月第一次印刷

印数:1~700

ISBN-5029-3492-8/P.1239

定价:15.00元

前 言

“数值模拟”是根据影响雾发展过程的基本规律所遵循的数学物理方程组，按实测的初始及边界条件，利用计算机求数值解，将所得结果与自然界实际雾发展的探测数据进行对比，如果相符，即模拟成功，就可以认为原采用的这些方程组所代表的过程与自然过程相符。这种模拟可以考虑较多因子的影响，更能近似地表达出客观雾的规律。自 Fisher、Zdunkowski 等建立雾的数值模式以来，雾的数值模拟研究得到了迅速发展。较为完善的雾模式是 Brown 和 Roach 建立的。Буѣков 和 Хворстыянов 提出的一维辐射雾模式很有特色，它对雾的各种物理过程考虑得较为全面，后来又发展了二维非定常低云和雾的模式。近些年来，Turton、Petter、Bott 等人都进行了辐射雾的模拟研究。国内对雾的数值模拟研究始于 20 世纪 80 年代中期。黄培强、周斌斌、张福深、钱敏伟、孙旭东和徐华英、尹球和许绍祖等都对雾的生消过程进行了数值研究，得到了许多有益的结论。

从 20 世纪 80 年代末开始，我们先后承担了重庆、西双版纳及沪宁高速公路等地雾的研究课题，进行了现场观测试验，同时开展了雾的数值模拟研究。先后建立了一维、二维和三维雾模式，用现代快速计算机，将雾中微物理过程和动力过程、雾与环境紧密结合，进行数值模拟和试验，从而阐明雾发生、发展的条件、物理过程、影响因子及其变化规律。模拟研究都是根据雾的观测事实，针对

实际雾而进行的。其特点是考虑了复杂的地形和下垫面，结合了实际大气环境的变化。特别是对空气污染的影响和植被的作用，进行了认真而又深入的研究。为搞清气溶胶粒子对雾形成和发展的影响，我们还专门研究了气溶胶粒子的辐射特性，对气溶胶粒子的温度效应进行了数值模拟。本书就是这些模式研究的总结，概括了十多年来我们的研究成果。

雾的一、二、三维模式研究先后由彭虎、张利民和孙学金、石春娥和黄建平完成。气溶胶粒子辐射模式则是由涂晓萍和杨军研究的。李子华教授主持了这些研究工作，王鹏飞教授给予了精心的指导。

随着国民经济的发展，雾害愈来愈突出。它不仅对水陆空交通有不利的影响，而且对工农业生产和人民身体健康带来严重危害。因此，建立雾的监测和预报系统十分必要。本书对雾的预测预警和人工消雾可提供理论基础和模式。由于雾与大气及生态环境关系密切，因此本书介绍的成果对从事气候变化、大气化学和环境科学的研究是有益的。但由于作者水平有限，时间仓促，因此书中错误在所难免，欢迎读者批评指正。

作者

2002年10月

目 录

前言

第一章 辐射雾的一些观测事实	(1)
1.1 雾的物理化学特征	(1)
1.2 雾中温湿垂直分布及生成的物理过程	(9)
1.3 雾与生态环境关系	(10)
第二章 辐射雾数值模式	(12)
2.1 包含详细微物理过程的一维辐射雾模式 ...	(14)
2.1.1 基本控制方程组	(14)
2.1.2 湍流交换	(16)
2.1.3 大气长波辐射模式	(17)
2.1.4 粒子凝结增长的分档计算方案	(21)
2.1.5 网格设计及差分方案	(22)
2.1.6 边界条件和初始场	(22)
2.1.7 模式验证	(23)
2.2 二维非定常雾模式	(26)
2.2.1 基本方程组	(26)
2.2.2 水汽的饱和调节	(28)
2.2.3 雾水重力沉降	(29)
2.2.4 交换系数和辐射模式	(29)
2.2.5 地表热量平衡	(30)
2.2.6 差分方案	(30)
2.2.7 边界条件	(30)
2.2.8 初始条件	(31)

2.2.9 模拟结果	(31)
2.3 复杂地形上辐射雾三维模式	(35)
2.3.1 基本方程组	(36)
2.3.2 边界层的参数化	(38)
2.3.3 大气气溶胶辐射	(39)
2.3.4 植被参数化	(41)
2.3.5 边界条件	(42)
2.3.6 数值算法	(43)
第三章 复杂地形下雾发展的物理过程	(48)
3.1 重庆城市雾	(48)
3.1.1 山谷风环流	(50)
3.1.2 雾形成及演变过程	(55)
3.2 西双版纳山谷雾	(59)
第四章 环境条件对雾形成和发展的影响	(69)
4.1 山脉对雾的影响	(69)
4.2 江水对重庆雾发展的作用	(71)
4.3 城市热岛的双重性	(71)
4.4 城市大小的影响	(73)
4.5 初始大气稳定度的影响	(74)
4.6 长波辐射冷却对雾的影响	(75)
4.7 大气气溶胶粒子辐射效应	(75)
4.8 植被作用	(79)
第五章 雾和气溶胶	(82)
5.1 气溶胶粒子夜晚温度效应	(83)
5.1.1 模式方程组	(83)
5.1.2 计算方法	(86)
5.1.3 模式验证	(87)

5.1.4	气溶胶粒子对夜间边界层的影响	(91)
5.1.5	气溶胶粒子物理化学性质不同对 温度场的影响	(96)
5.2	气溶胶粒子短波辐射特性	(99)
5.2.1	大气气溶胶模型	(99)
5.2.2	短波辐射计算方案	(102)
5.2.3	气溶胶短波辐射特性	(104)
5.2.4	气溶胶大气短波辐射增温率	(110)
5.3	气溶胶粒子白天温度效应	(114)
5.3.1	模式和计算方法	(114)
5.3.2	模式试验—实况模拟	(116)
5.3.3	气溶胶粒子数密度对白天边界层 温度场的影响	(120)
5.3.4	相对湿度对气溶胶粒子温度效应 的影响	(123)
5.3.5	大气湿度和气溶胶粒子数密度温度 效应的关系	(125)
参考文献		(130)

第一章 辐射雾的一些观测事实

由于雾常给国民经济和社会生活带来重大损失，中国自 1958 年以来一直重视雾的物理学研究。最早的观测是在上海进行的，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，雾的观测试验得到了很大的发展。比较大的计划有成都双流机场雾的观测^[1]、浙江舟山海雾研究^[2]、西双版纳辐射雾探测^[3]、上海城市雾研究^[4]、重庆雾害研究^[5]及沪宁高速公路雾的试验^[6]。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。其中重庆雾的试验规模大、观测项目多、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试验。

1.1 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。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 1.1.1）。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。比如,西双版纳的首府景洪市,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^[7],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 1.1.1 辐射雾的宏观特征

观测时间 (年·月)	地点	起雾时间	持续时间 (h)	雾层厚度 (m)	气温 (°C)
1989~1991	重庆	23:52~4:10	6~12	200~400	3.8~10.0
1996.12	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
1985.12~1986.1	成都		5~8	15~350	1.0~4.0
1986.12~1987.2	景洪	3:38	4	200	12.0~13.0
1986.12~1987.2	勐养	0:20	9	400	10.0~12.0
1997.11	景洪	3:18~5:15	4	240	13.0~16.0
1997.11	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,获得了丰富的资料,基本搞清了中国雾的微物理结构特征^[8](表 1.1.2)。雾滴数密度以城市雾最大,其量级在 $10^2 \sim 10^3$ 个/ cm^3 之间;山区雾次之,一般为 $100 \sim 200$ 个/ cm^3 ;海雾最小,平均为 37.1 个/ cm^3 。雾滴尺度以大城市雾最小,其平均直径多在 $10 \mu\text{m}$ 以下;海雾最大,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

庆市最小, 平均值小于 0.1 g/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。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。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^[9], 雾滴数密度都明显增大, 尺度明显减小, 含水量减小。各地平均雾滴谱谱型多为单峰结构, 整个谱分布偏向小滴一端, 雾滴主要集中在 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 区段内, 峰值直径 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 。在大滴一端虽然尾迹很长, 最大直径可以达到 $40 \sim 50 \mu\text{m}$, 但数密度极小。拟合结果表明: 平均谱多满足 Deirmendjian 分布^[10]。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起伏变化^[9]。

中国雾水化学研究起步较晚, 但自 80 年代中期开始, 通过十多年的取样分析, 也取得了许多重要成果^[16~20]。现已查明, 重庆、上海、庐山雾水均呈酸性。重庆市 1984~1990 年 7 年期间获得 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 1.1.2 中国雾的物理特征

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 (年·月·日)
南京	最大值	0.38	12.9	9.5	59.2		31	1996.12.27
汤山	最小值	0.04	11.4	5.2	41.6			
	平均值	0.14	12.4	7.3	57.5			
南京	最大值	0.25	6.0	4.9	40.0		56	1996.12.29~30
盘城	最小值	0.09	4.5	3.5	29.0			
	平均值	0.19	4.8	4.0	33.0			
云南恩 茅 ^[8]	最大值	0.8	26.8	34.0	120.9			1968~1969
	最小值	0.1	14.3	9.3	37.2			
	平均值	0.36	19.7					
云南景 洪 ^[8]	最大值	1.97	35.0	37.2	120.9			
	最小值	0.1	20.0	18.6	46.5			1968~1969
	平均值	0.74	28.6					
云南景 洪 ^[8]	最大值	0.13	11.3	3.5	63.0			1986.12.26~1987.2.18
	最小值	0.01	3.9	3.5	28.0			
	平均值	0.08	6.8	3.5	51.6			
云南勐 养 ^[8]	最大值	0.74	22.8	21.0	66.5			1986.12.26~1987.2.18
	最小值	0.02	5.7	3.5	42.0			
	平均值	0.25	13.1	6.8	58.8			

地点	续表						
	N (个/cm ³)	W (g/m ³)	D _i (μm)	D _f (μm)	D _{max} (μm)	L (m)	样本数 (个)
云南勐 养	最大值	315.0	0.17	9.3	5.4	41.0	102
	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 ^[8]	最大值	285.0	0.34	31.7		129.0	102
	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 ^[11]	最大值	959.0	1.32	16.2		79.4	102
	最小值	206.0	0.12	4.5		18.0	
	平均值	417.4	0.5	8.3		44.8	
重庆 ^[12]	最大值		0.20				1968.12
	最小值		0.12				
	平均值						
重庆 ^[13]	最大值	182	0.41	14.3	10.8	36.0	3
	最小值	57	0.13	8.9	3.6	32.4	
	平均值	115	0.24	12.2	7.2	34.8	
重庆 ^[8]	最大值	1114.0	0.16	7.7	3.5	62.0	1989.12.15~1990.1.15
	最小值	146.0	0.02	3.5	3.5	7.0	
	平均值	606.0	0.07	4.2	3.5	23.8	
安徽屯 溪 ^[8]	最大值	182.9	0.76	15.3	7.0	56.0	1981.1
	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	

续表

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 (年·月·日)
福建永安 ^[8]	最大值	223.0	34.4		111.6			1968~1969
	最小值	28.3	7.0		37.2			
	平均值	83.2	12.5					
福建永定 ^[8]	最大值	85.0	37.2	37.2	102.0			1968~1969
	最小值	11.2	17.0	4.7	46.5			
	平均值	45.2	22.9					
浙江舟山 ^[7]	最大值	122.0	27.7	40.2	338.1			1985.4~5
	最小值	7.6	17.8	1.5	14.1			
	平均值	37.1	22.1	20.0	59.6			
贵州水城·	最大值	1178	14.3	4.3	50.0		50	1988、1989 和 1991
	最小值	26	3.7	4.0	35.0			
	平均值	220	7.2	4.2				
贵州娄山关·	最大值	1539	19.8	4.2	50.0		105	1990
	最小值	39	4.1	4.0	35.0			
	平均值	267	7.6	4.1				
庐山 ^[14]	最大值	183	15.3	7.0	56.0	260	5	1981.1.11
	最小值	49	10.2	3.5	38.5	50		
	平均值	116	12.3	4.2	47.0			
湖北武穴 ^[13]	最大值	201	14.0	3.6	64.8	80	2	1987.11.20
	最小值	46	9.5	3.6	39.6	60		
	平均值	124	11.7	3.6	52.2			

续表

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 (年·月·日)
湖南城陵矶 ^[13]	最大值	1.24	15.8	3.6	93.6	200	2	1987.11.21
	最小值	0.11	8.9	3.6	25.2	100		
	平均值	0.67	12.3	3.6	59.4			
乌鲁木齐机场	最大值	0.125				80		装有粒子测量系统的飞机 在机场跑道催化时观测
	最小值							
	平均值							
天津 ^[12]	最大值	0.25						1988.1
	最小值	0.05						
	平均值							
上海 ^[15]	最大值	1.4		16.0	50	50		20世纪50年代末 60年代初
	最小值			10.0	40			
	平均值	0.5						
上海 ^[8]	最大值	1.53	9.9	3.7	125.8	50		1989.1
	最小值	0.01	4.4	3.7	14.8			
	平均值	173.0	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

* 罗宁、文继芬等,导线积冰与气象特征的分析研究,尚未发表

表 1.1.3 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 ^[16]	39.88	34.19	59.67	147.71	36.04	20.21	73.11	61.49	619.59	/	/	4.39	1984~1990	182
上海(%)** ^[17]	2.35	4.7	67.2	22.7	3.05	5.45	4.25	2.15	88.1	/	/	5.15	88冬~91春	28
居民区	15.15	9.76	99.34	/	/	18.20	50.8	21.28	418.1	3.36	10.3	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	8.96	6.71	1988年冬	40
景洪 ^[19]	1.27	1.03	10.42	/	/	2.34	4.72	2.68	28.70	2.27	<0.1	/	1988年冬	6
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
西双版纳	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 ^[20]	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 ^[18]	2.53	22.11	5.26	7.42	1.59	/	33.84	10.35	19.72	/	/	6.01	1987年4,5月	31

* : 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

** : 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严重有关。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%。雾水酸度主要来源于硫酸、盐酸和硝酸，它们的存在形式是多种盐。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。

1.2 雾中温湿垂直分布及生成的物理过程

许多 ADAS 及低探资料表明，在雾顶上下，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。在时间高度剖面图中，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^[21]。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