

The Physics of Regional Dense Fog

地区性浓雾物理

李子华 杨 军 石春娥 濮梅娟 等 著

6.4



气象出版社

China Meteorological Press

The Physics of Regional Dense Fog

地区性浓雾物理

李子华 杨 军 石春娥 濮梅娟 等 著

内容提要

本书从近 20 年来国内实施的几个比较大的雾研究计划出发,详细论述了重庆、西双版纳、南京等地的雾的物理化学特征和生消物理过程,并由雾开始,深入到气溶胶和污染气体,对其与生态环境的关系作了系统的研究,并用数值模拟的方法,由现象揭示了问题的科学本质。

全书共分七章,内容包括绪论、地区性雾的生消物理过程、雾的物理结构、雾水化学特征、生态环境变化对雾的影响、气溶胶辐射以及雾的数值模拟研究。

本书可供从事云雾物理、人工影响天气、天气预报及环境保护等方面的研究和业务人员参考,也可作为高等院校大气物理学和环境科学专业师生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地区性浓雾物理/李子华等著. —北京:气象出版社,2008.9

ISBN 978-7-5029-4590-9

I. 地… II. 李… III. 雾—物理—研究 IV. P426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 144456 号

Diquxing Nongwu Wuli

地区性浓雾物理

李子华 杨 军 石春娥 濮梅娟 等著

出版发行:气象出版社

地 址:北京市海淀区中关村南大街 46 号

总 编 室:010-68407112

网 址:<http://cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:李太宇 隋珂珂

封面设计:博雅思企划

印 刷:北京中新伟业印刷有限公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

字 数:269 千字

版 次:2008 年 9 月第 1 版

印 数:1~2000

邮政编码:100081

发 行 部:010-68409198

E-mail: qxcbs@263.net

终 审:黄润恒

责任技编:吴庭芳

印 张:10.5

印 次:2008 年 9 月第 1 次印刷

定 价:30.00 元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等,请与本社发行部联系调换

前 言

随着社会经济的发展,雾的危害愈来愈突出。它不仅影响水陆空交通运输事业,而且对工农业生产和人们的身体健康带来严重危害。从 20 世纪 80 年代末开始,我们(原南京气象学院大气物理系大气物理教研室)承担国家科委重点课题——重庆雾害研究,后来,在国家自然科学基金支持下,对西双版纳的雾开展了观测研究,同时研究中国气溶胶的辐射特性。随着高速公路迅猛发展,我们又研究了沪宁高速公路雾的物理结构和天气学特征。从 2006 年开始,在中国气象局研究型业务专项资助下,开始深入研究南京雾。本书是对我们近 20 年雾研究成果的总结和概括。

对雾的研究,是从现场观测试验开始的。我们详尽地观测了雾发生发展的物理过程,根据观测事实,又开展了雾的数值模拟研究。为搞清气溶胶粒子对雾形成和发展的影响,在实验室做了许多实验工作,以了解气溶胶的辐射特性,并对气溶胶粒子的温度效应,专门进行了数值模拟研究。

研究发现,雾的局地性很强。即使是同一天气形势下发生的区域性浓雾,各地雾的物理化学特性也不尽相同,故而书名定为地区性浓雾物理。本书总结了重庆、西双版纳、沪宁高速公路和南京雾的物理化学特征和生消物理过程。从大量个例研究中,得到了共性的认识。这就是生态环境的变化,引起了雾的变化,而雾的变化又影响了生态环境。随着城市和社会经济的发展,城市热岛强度增强,植被覆盖率减少,气溶胶粒子数密度增大,导致雾的频率减少,雾含水量减少,而雾水中离子浓度显著增大,雾中能见度更差。本书对共性的问题进行了数值模拟研究,在理论上进行了较深入的探讨。

参加雾研究的研究生和本科生,先后共约 30 余人。本书中许多重要部分都是由他们完成的。其中气溶胶粒子的辐射性特性和模式是由杨军、涂晓萍、董真研究的,雾模式是由石春娥、张利民、孙学金、彭虎和黄建平逐步完成的,陈宝君、朱彬等则在雾的物理化学特征方面做了大量的工作。这两年,在研究南京雾的物理化学过程中,濮梅娟、严文莲、刘端阳、李一、封洋、王巍巍等有了新的认识,书中也概述了他们的最新成果。所以,本书是一部集体研究的成果。李子华教授主持了这项研究工作,王鹏飞教授给予了精心的指导。

全书共七章。第一章以大量实例介绍雾的危害,阐述研究雾的实际意义和方

法体系。第二章介绍地区性雾生消物理过程和爆发性发展特征。第三章为浓雾的物理结构,重点论述浓雾微物理结构及演变特征。第四章介绍各地雾水化学特征。第五章对近些年来生态环境变化对雾的影响进行专门的讨论。第六章通过实验和理论计算等方法,阐述气溶胶的辐射特性以及它对雾生消过程的影响。第七章为雾的数值模拟研究。本书第一、四、五章由李子华编写,第二、三章由濮梅娟、李子华编写,第六和第七章分别由杨军和石春娥编写。

由于作者学识有限,时间仓促,因此书中错误在所难免,欢迎读者批评指正。

作者

2008年8月

目 录

前 言

第一章 绪 论	(1)
1.1 研究雾的实际意义	(1)
1.2 中国近 50 年雾的研究	(7)
1.3 研究雾的方法体系	(11)
第二章 地区性雾的生消物理过程	(13)
2.1 雾的种类、生消的一般规律	(13)
2.2 山城雾的生消物理过程	(14)
2.3 热带辐射雾宏观物理过程	(23)
2.4 雾宏微观物理过程之间的关系	(32)
2.5 平流辐射雾过程的特征	(39)
2.6 雨雾的形成	(44)
2.7 浓雾发展的爆发性特征	(47)
第三章 不同类型浓雾的物理结构	(61)
3.1 浓雾宏观物理结构特征	(61)
3.2 浓雾微物理结构特征	(62)
3.3 辐射雾微结构的变化	(66)
3.4 平流辐射雾微结构的变化	(68)
3.5 雾滴谱分布	(73)
第四章 雾水化学特征	(80)
4.1 重庆雾水化学特征	(80)
4.2 西双版纳雾水化学组成	(86)
4.3 南京一次平流辐射雾的雾水化学特征	(92)
第五章 生态环境变化对雾的影响	(97)
5.1 城市发展对雾的影响	(97)
5.2 植被对雾形成的作用	(101)

第六章 气溶胶粒子对城市边界层温度场的影响	(105)
6.1 中国地区边界层大气气溶胶辐射吸收特性	(105)
6.2 大气环境及化学组分对气溶胶辐射特性的影响	(110)
6.3 相对湿度对大气气溶胶粒子短波辐射特性的影响	(116)
6.4 考虑湿度影响的城市气溶胶夜晚温度效应	(123)
6.5 考虑湿度影响的城市气溶胶白天温度效应	(130)
第七章 雾的数值模拟研究	(136)
7.1 复杂地形上三维雾模式	(136)
7.2 重庆雾物理过程的模拟	(140)
7.3 气溶胶粒子对雾影响的模拟研究	(149)
7.4 植被对雾影响的模拟研究	(151)
7.5 小结	(155)
参考文献	(156)

第一章 绪 论

1.1 研究雾的实际意义

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 以下的天气现象。

随着社会经济的发展,雾的危害愈来愈突出。它不仅对水、陆、空交通有不利影响,而且对工农业生产和人们的身体健康带来严重危害。浓雾已成为影响经济和城市发展的灾害性天气之一。

1.1.1 雾对交通运输的影响

由于雾中含有大量的微小水滴(或冰晶),减小了水平能见距离,从而对水、陆、空交通造成了不利影响。有雾时,水平能见距离(L)可用下列公式计算

$$L = \frac{2.62r_e}{W}$$

式中 W 为雾的含水量, r_e 为雾滴有效平均半径,即

$$r_e = \frac{\int_0^{\infty} r^3 n(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 n(r) dr}$$

这里 $n(r)$ 为雾滴半径 r 的分布函数。由上面公式可以看出,雾中含水量愈高,数密度愈大而其尺度愈小,则能见距离愈小。根据我国上海、重庆、南京及云南西双版纳等地的观测,雾的含水量约为 $0.03 \sim 0.5 \text{ g/m}^3$,平均直径 $4 \sim 12 \mu\text{m}$,数密度变化于 $10^1 \sim 10^3 \text{ m}^{-3}$ 之间。一般讲空气污染愈重的地区,雾滴的数密度愈大。雾中能见距离在雾的生消过程中是变化着的,最浓时可小于 15 m。根据能见距离的不同,规定如下雾的强度的等级(特维尔斯伊等,1953):

重雾(我国地面气象观测规范定义为强浓雾)——能见距离小于 50 m;

浓雾——能见距离在 50~200 m 之间;

中浓雾——能见距离在 200~500 m 之间;

淡雾——能见距离在 500~1000 m 之间。

如果能见距离在 1~10 km 之间,那便是轻雾了。

由于雾中能见度低,因而浓雾时飞机不能起落,船只不能航行,行车安全得不到保证。特别是高速公路上,连环撞车事故屡有发生。

表 1.1.1 给出了近些年来报纸上刊载的部分浓雾事件。

表 1.1.1 浓雾引起的交通事故

序号	时间 (年.月.日)	地点	事故情况
1	1995.6.6 下午	山东荣成海域	韩国“亚洲希望”号货轮与香港“高登意”号货轮在山东荣成市成山头附近海域雾中相撞,韩国货轮沉没,6人失踪。韩国货轮载重 6203 吨,是由天津运钢坯回国途中与香港货轮相撞的。
2	1995.3.16	香港海域	美军核动力潜艇“德罗姆”号在横澜岛以东 4 km 海面,与一艘巴拿马货船相撞。
3	1996.2.12 上午	意大利威尼斯至米兰高速公路	由于浓雾造成能见度低,引发特大交通事故。300 多辆汽车在高速公路接连相撞,11 人死亡,100 多人受伤。此后出现了 15 千米的堵车长龙。
4	1997.1.26—27	大连	武汉、大连机场浓雾,大连有 79 个航班延误,滞留旅客上万人。
5	1997.2.26—27	台湾	桃园机场连日浓雾,近百架航班受阻,逾 2 万旅客行程受到延误。
6	1997.1.18	英吉利海峡	因海面被浓雾笼罩,一艘荷兰油轮行驶到法国水域时撞上一艘墨西哥货轮。油轮上装载的 4.7 万吨石油中约有 300 立方米泄露,被撞的货轮是专门用来运载化学制品的。
7	1996.9	京津高速公路	浓雾引起 100 多辆汽车追尾相撞。
8	1987.12.10	上海	因为浓雾使陆家嘴轮渡站停航 4 个多小时,待雾消开航时,旅客蜂拥而上,相互挤踏,造成 16 人死亡,71 人受伤。
9	1996.11.24	沪宁高速公路	高速公路无锡段,早晨 7 时因雾大,发生 44 辆车追尾相撞特重大事故,造成 9 人死亡,12 人受伤。
10	1996.12.27	南京	浓雾封锁石城,沪宁高速公路全线封闭,轮渡停航,机场 70 余个航班受影响,滞留旅客 3000 余人。
11	1997.11.4	重庆	凌晨浓雾使 210 国道肖家沟路段 39 辆车首尾相撞,10 人受伤,交警奋战 8 小时抢险排堵,交通始恢复正常。
12	1998.1.13	卡特加特海峡	13 日中午由于浓雾弥漫,挪威阿尔特内斯号货船在丹麦日德兰半岛与瑞典之间的卡特加特海峡被塞浦路斯沙农号货船撞沉。
13	1998.2.26	京津高速公路	上午 8 时,行驶在京津高速公路上的 140 多辆汽车在廊坊路段连续相撞,13 人死亡,2 人重伤。
14	2000.6.22	泸州合江县榕山镇长江水域	6 时 30 分左右“榕建一号”客运船,在长江行驶途中,江上突起浓雾,船撞上礁石而倾覆。乘客 221 人,生还 90 人,死亡 17 人,114 人下落不明。
15	2002.12.14	英、法之间的多佛尔海峡	凌晨海上有浓雾,挪威籍货轮“三色号”与巴哈马货轮“卡里巴”号相撞,挪威货轮撞后沉没。船上载有 2862 辆豪华轿车,价值 4900 万美元。
16	2003.5.26	土耳其马其卡	凌晨 4 时许,一架由吉尔吉斯斯坦首都比什凯克起飞前往西班牙萨拉戈萨的乌克兰飞机在土耳其北部特拉布宗省马奇卡县浓雾中坠毁,62 名西班牙籍维和士兵和 12 名机组人员全部遇难。
17	2002.4.15	韩国釜山	中日国际航空公司的 CA129 班机执行从北京到韩国釜山的飞行任务时,因浓雾影响在釜山机场附近坠毁。
18	2006.1.14	北京	因浓雾首都机场航班延误,截至当日 20 时 30 分,共有 396 架次进出港航班延误,近万名旅客滞留机场,约 10 万旅客出行受到影响。
19	2004.12.1—12.4	京津地区	连续 4 天浓雾,京津塘、京开、京沈、京石等高速公路全线关闭,天津港积压船舶 200 多条,辽宁新民 102 国道 20 多辆车连环相撞。

由表 1.1.1 可见,高速公路上浓雾可引起几十以至数百辆车追尾相撞,伤亡可达数十人;浓雾可使几十以至上百架航班受阻,使数千以至万名旅客滞留机场;海雾可造成货轮之间,甚至潜艇与货轮相撞,货轮沉没,人员失踪;更严重的是,浓雾可使城市交通混乱,影响职工正常

上班,甚至出现如上海 1987 年冬发生的因轮渡停航而造成相互挤踏、87 人伤亡的特大事故。因雾引起的空难事件也时有出现。

国外一些资料表明,对某些大型机场来说,一次雾的出现,其损失可达 50 万美元之多。日本在 1953—1978 年间共发生 910 次海损事故,其中 60% 发生在浓雾中。在美国国家公路上与雾有关的事故造成的损失每年超过 3 亿美元。根据 1986 年对重庆市区的调查,雾对交通造成的经济损失每年约为 2200 万元。近些年来,随着城市交通事业的发展,雾造成的经济损失可能更大。

1.1.2 雾对工农业生产的危害

雾对农业的危害之一,是雾缩短了日照时数,减弱了到达地面的太阳辐射,降低了绿色植物的光合效率。重庆是我国雾最多的城市,也是太阳辐射量的低值中心,其影响十分明显。据估算,由于这种原因,每年全市粮食要少收约 3 亿斤。雾对农业的危害之二,是它有利于植物病虫害的发生、发展与扩散。由于雾中工业污染物含量大,特别是酸雾,它可导致植株出现斑点,叶片黄化和退色,最终使作物产量和品质下降。重庆市沙坪坝地区的井口果园,处于工厂包围之中,工厂排放出大量的 SO_2 、氟、氯、铬、铅、镍等气体和重金属,雾滴易附着在植物表面,致使果园的柑桔、梨、桃等多种果树生长衰弱,枝梢纤细,叶片变小,叶色黄化,落叶落花落果,甚至致使梨、桃等果树受害而枯死。井口的丁家山曾有苹果树 1000 余株,也因空气污染和酸雾生长衰弱,产量低,甚至因不结果实而被全部砍伐。此外,研究表明,雾对水稻瘟病、番茄早疫病、十字花科蔬菜霜霉病等病害的发生发展起着重要作用,成为重庆市农作物常见的病害。

应该承认,纯净雾水也有有益的一面。比如云南省南部的雾,对生产高质量的茶叶十分有利。南美洲智利北面的雅边加玛沙漠被誉为地球最干旱的地方,当地居民日常用水十分困难,经过 7 年的试验研究,终于发明了“雾中取水”的科学方法,解决了当地的水荒。

雾对工业的直接危害,作者调查不多。对重庆钢厂的调查表明,由于起雾时能见度很低,往往使钢水无法出炉,严重影响炼钢业正常生产。雾还严重影响许多工矿企业的露天作业,给这些企业带来巨大的损失。雾对电力工业的危害更为惊人,下面将对其作专门介绍。

1.1.3 雾对电力设备的危害

受到大气中污染物影响的输变电设备外绝缘,如遇雾等潮湿天气,常常发生污闪,造成停电事故。因此,雾已成为电力系统重要的灾害性天气之一。

据统计,1979—1987 年,我国电网发生污闪跳闸 1500 余次,损失电量约 4670 万度。1950—1960 年,我国输变电设备外绝缘污闪主要发生在沿海少数工业比较发达的省市,如上海、天津、辽宁、山东等地区,中西部内陆地区的污闪事故很少。进入 1970 年以后,输变电污闪事故已分布于我国 28 个省、市、自治区。1980 年以来,全国几大电网大面积的污闪事故相继发生,而且污闪已由污染严重的城市和工业区逐步扩展到以往认为“清洁”和“较清洁”的地区。

当然污闪事故不全是因雾而引起的,而且污闪与大气污染有关,因为输变电设备外绝缘表面污秽与潮湿才会引起污闪。但从表 1.1.2 可以看出,随着工业生产迅速发展,大气污染日益严重,雾很容易使输变电设备外绝缘在工作电压发生闪络,由雾引发的污闪约占 70% 以上。对这些因雾引起的污闪,可称为“雾闪”。由于我国冬季雾最多,如表 1.1.3 所示,我国冬季污闪事故也最多,12 月、1 月和 2 月三个月,污闪出现的条次占全年的 76%。

表 1.1.2 1955—1994 年间我国区域性污闪概况(朱庚富,1996)

序号	时间 (起止年·月·日)	污闪波及 电网范围	主要气 象条件	污闪线路 条数(条)	污闪站厂 站数(座)	停电状况	损失电量 (kW·h)
1	1955.02.16	辽宁大连	浓雾	220 kV 及 66 kV 9 条			96 万
2	1964.11.25	上海	浓雾	220 kV 4 条 110 kV 2 条	220 kV 1 座		
3	1966.03.02	辽宁大连	浓雾	66 kV 7 条			20 万
4	1972.01.20	山东济南及淄博西部	浓雾		35~110 kV 21 条		
5	1973.12.12—14	上海	浓雾	220 kV 2 条 110 kV 2 条	110 kV 1 座		
6	1974.01.04—08	江苏西起南京 东至上海	持续浓雾	220 kV 6 条 110 kV 10 条 35 kV 58 条	110~220 kV 3 座		100 万
7	1974.01.21	山东淄博,烟台,青岛	浓雾	110 kV 多条			
8	1974.02.14—16	辽宁抚顺和沈阳	浓雾	220 及 44 kV 27 条	13 座	40 座站	60 万
9	1976.02.10 和 14	上海和江苏	持续浓雾	220 kV 3 条 110 kV 1 条	220 kV 2 座	1 厂 2 次 停电	1173 万
10	1977.02.11—13	山东淄博,惠民, 潍坊,烟台	浓雾	40 条	17 座站	63 条 104 座站	430 万
11	1979.01	山东淄博,惠民, 潍坊,泰安	浓雾	110~220 kV 多条			
12	1982.02.17--20	京津塘	连续浓雾	220 kV 4 条 110 kV 3 条			
13	1985.02.05—09	河北南网 6 地区	持续浓雾	110~220 kV 9 条			
14	1985.02.03	河南焦作	浓雾	220 kV 1 条 110 kV 4 条			
15	1985.12	山东淄博,济宁, 济南,聊城	浓雾	220 及 110 kV 5 条			
16	1987.01.04—07	河南北部 5 地区	持续浓雾	220 kV 5 条 110 kV 17 条		15 座站	
17	1987.01.05	京津塘	浓雾	550 kV 及 220 kV 各 1 条,110 kV 16 条		220 kV 3 座,110 kV 2 座站	
18	1987.12.28	辽宁西部	浓雾	500 kV 2 条 220 kV 5 条			
19	1988.03.15—16	新疆乌鲁木齐	浓雾、雨	220 kV 1 条 110 kV 10 条 25 kV 2 条			70 万
20	1988.12.20	浙江宁波	盐雾	220 kV 4 条 110 kV 5 条		4 座站	2 万
21	1989.01.06—07	江苏南部, 上海及浙江嘉兴	浓雾、阴雨	500 kV 5 条 220 kV 25 条 110 kV 11 条	220 kV 6 座	华东 500 kV 主网 停 122 h	
22	1989.12.30—02.15	河南北部和 西部 7 地区	4 次浓雾	220 kV 22 条 110 kV 49 条	220 kV 5 座, 110 kV 7 座		1300 万

续表

序号	时间 (起止年、月、日)	污闪波及 电网范围	主要气 象条件	污闪线路 条数(条)	污闪站厂 站数(座)	停电状况	损失电量 (kW·h)
23	1990.01.05—02.16	河南北网	连续浓雾	220 kV 27 条 110 kV 46 条	220 kV 5 座	23 座站	636 万
24	1990.02.09—20	山西南部及中部	连续浓雾	220 kV 12 条 110 kV 7 条	220 kV 4 座		
25	1990.02.15—22	京津塘	持续浓雾	500 kV 3 条 110~ 220 kV 41 条	220 kV 4 座, 110 kV 2 座		1245 万
26	1990.02.15—17	辽宁西部与南部	连续浓雾	500 kV 3 条 220 kV 4 条			
27	1991.12.07—24	浙江嘉兴, 绍兴和上海	浓雾、阴雨	500 kV 2 条 220 kV 4 条	220 kV 1 座		
28	1992.01.22—26	四川成都青白江地区	持续浓雾	220 kV 7 条 110 kV 10 条		26 条站 47 座	
29	1992.01.28	江苏徐州	浓雾、雪	220 kV 6 条			
30	1994.02.06—07	广东珠江三角洲	雾	220 kV 8 条			
31	1994.11.21 和 27	山西太原	连续浓雾	500 kV 1 条 220 kV 8 条 110 kV 2 条			

表 1.1.3 110 kV 及以上输电线路污闪条次年变化
(资料包括 28 个省市,统计时间多为 1980 年代到 1994 年)

月份	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	总计
污闪	11	13	12	38	53	203	367	488	140	46	9	9	1390
(%)	0.8	0.9	0.9	2.7	3.8	14.6	26.4	35.1	10.1	3.3	0.6	0.6	

由表 1.1.2 还可以看出,绝大多数大面积污闪事故发生在浓雾天气。浓雾引起绝缘子污闪有它的特点:当一个绝缘弱点发生闪络时,会引起电压波动,非故障相电压的升高,这又可能引起另一绝缘弱点相继发生闪络,闪络接二连三地出现会迫使断路器相继跳闸,破坏电力系统的稳定,使得电网发生瓦解,造成大面积停电。1989 年 1 月 6—7 日,上海浓雾使三条 500 kV 线路发生雾闪跳闸 9 次,造成事故 3 次,同时使周家渡、港口两座 22 万伏变电站发生短路事故,造成整个浦东和港口地区停电数小时,严重影响了重要企业、医院和人民生活等正常供电。1990 年 2 月 16—17 日,华北地区因浓雾弥漫造成输电线路大面积雾闪,京津塘地区 110~500 kV 线路跳闸 45 条,造成 500 kV 线路全部停电,220 kV 北京系统与山西、河北电网一度解列,京津塘电网两度解列,北京地区 220 kV 电网破坏,无法正常供电,如果不是抢修及时,后果不堪设想。由此可见,雾对电力系统的危害是非常严重的。

前些年各报曾报道武汉长江大桥出现“静电闪烁”的怪现象,引起社会关注。现已查明此现象与雾有关。“郑(州)武(昌)电气化铁路”是我国主干线电气化改造率先兴建的第一条电气化铁路。但自 1992 年底建成通车以来,特别是冬春季节,由于含盐浓度较高的大量粉尘对武汉长江大桥电气化高压过江供路线路的污染,当武汉长江水面雾气大时,轻则引起线路悬挂瓷瓶绝缘性能下降,出现向桥体轻微“放电”的现象(夜间能清晰可见),重则引起线路“跳闸”,致使电气化列车无法通过。这种污闪成了长期困扰京广干线“郑(州)武(昌)电气化铁路”大桥“咽喉”路段安全畅通的一大难题。后来,武铁汉口供电段曾先后出动 7000 多人次边治理边攻关,他们对正桥上空线路的上千组悬挂瓷瓶进行精细除尘养护,已使“污闪”得到控制。

1.1.4 雾对人体健康的危害

环境污染不仅会降低人们的生存质量,而且将直接威胁人类的健康和生命。而雾及雾日的逆温,不仅使污染物积聚,而且可使污染物在雾中发生物理化学反应,生成比原污染物毒性大得多的新物质,加剧大气污染的危害。

据研究,城市污染空气中尘埃含量比未污染的农村高 20 倍,一氧化碳高 30 倍,二氧化硫高 40~50 倍。这些有害的物质在雾日逆温条件下,不易穿过逆温层向上扩散,而在贴地层大量积聚,并与雾水结合,发生物理化学反应,比如二氧化硫在大气中被氧化与雾滴结合成硫酸盐气溶胶,毒性可提高 10 倍以上。若形成光化学烟雾,则毒性更大更剧烈。最大的危害是引起并加重呼吸器官疾病。特别是持续时间长的浓雾有利于病毒、细菌的生存和蔓延。

为了说明雾对人体健康的危害,下面列举几个例子:

1930 年 12 月,比利时缪斯河谷地区出现浓雾和逆温,当地工厂排放的大量污染物,使数千名居民发病,死亡 60 余人。这是废气中一氧化碳、二氧化碳、氟化物等造成的中毒事件。1948 年 10 月,在美国拥有 1.4 万人口的工业小镇多诺拉,由于雾和逆温的出现,空气中二氧化碳和金属粉尘迅速积聚,造成 6 千多人患病,17 人死亡。1952 年 12 月 5—9 日,伦敦持续 5 天浓雾,使工厂排放的污染物大量积聚,导致了约 4000 多位老人和心脏病、呼吸道疾病患者过早死亡。1972 年在人口不过 25 万的日本四日市,由于雾和逆温,使十多个大石油化工厂,一百多个中小企业排放的 13 万 t 粉尘和二氧化硫弥漫不散,造成数千人支气管病变,称为“四日哮喘病”,夺走了十余人的生命。

对我国重庆市几种主要气象要素与人死亡率的相关统计发现,月雾日是最好的相关因子,即月雾日愈多,死亡率愈大。重庆市渝中区对 1984—1986 年死亡人数统计结果表明,1986 年 1 月是 3 年中雾日最多的一个月,也是死亡人数最多的一个月。重庆市第三医院曾作“酸雾对人体肺功能影响”的定量检测试验研究,结果表明,含大量污染物质的雾滴大多数易沉积在细支气管、末端细支气管及肺泡内,从而损害呼吸器官使肺功能减退,引起呼吸困难、咳嗽、化学性肺炎、支气管炎、肺结核及肺癌等呼吸道疾病。重庆市渝中区肺癌发病率位全国之首,与该地区多酸雾不无关系。

1.1.5 建立雾的预测预警系统

雾的危害远不止以上所述。特别是酸雾,近些年来有进一步发展的趋势,它对建筑物、名胜古迹等危害极大。随着国民经济迅速发展,雾的预报愈来愈显得重要。建立或健全雾的预测预警系统,开展或完善雾的预报业务,提高预报准确率,已成为气象部门亟待解决的研究课题。我们高兴地看到,中央气象台及许多省市气象部门已开展了雾的预报业务。重庆市曾对雾进行大规模研究,目前已熟悉了重庆雾的基本规律,建立了雾的预报服务系统。上海市气象局为适应上海经济的快速发展,对上海雾经过几年的科学研究,现已建成雾的自动监测、预报服务系统,在防灾减灾中发挥了重要作用。沪宁高速公路建成通车后,曾组织一支科研力量,对沿线雾进行了现场考察与监测,在此基础上,开通了沪宁高速公路浓雾预警实时监测系统,可以提前 0.5~1 h 发布浓雾临近预报。与此同时,沪宁高速雾天行车诱导系统的试验研究已成功。该项技术一旦应用,一般性浓雾天高速公路将不再封闭。可以预料,中国雾的预报服务将对国民经济持续快速健康发展作出重要贡献。

我们还要深入开展雾过程的观测试验与理论研究。要揭示雾的发生、发展和消散规律,正确认识雾生消过程的微物理机理,这对准确预报雾的发生和消亡是非常重要的。雾具有局地性的特征,各地雾的生消规律及成因不尽相同,因此,对地区性的雾要给予足够的关注。雾与生态环境关系紧密,生态环境的变化可引起雾的明显变化,而雾的变化又会影响生态环境。研究认识这种关系可为保护生态环境提供科学依据。特别是环境空气污染与雾相互关系的研究,对预防重大空气污染事件,保护居民身体健康具有重要的应用价值。中国自1958年以来一直重视人工消雾试验。这种研究不仅可为重大庆典活动的气象保障提供重要基础,还对局地(如机场)消雾试验带来直接经济效益。此外,雾的研究在军事上更具有特别重要的意义。

1.2 中国近50年雾的研究

1.2.1 历史回顾

由于雾常给国民经济和社会生活带来重大损失,我国自1958年以来一直重视人工消雾试验和雾的物理学研究。用于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(碘化银)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(江祖藩等,1982),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,又实施了两项经过严格设计的科学的人工消雾计划,一项是1985—1987年的成都双流机场消暖雾试验(郭恩铭等,1990),另一项是1995—1997年北京首都机场消冷雾试验(曹学成等,1999;迟玉民等,1999)。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,两个计划均获得一定成功,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(郭恩铭等,1989)、浙江舟山海雾研究(杨中秋等,1989)、西双版纳辐射雾探测(黄玉生等,1992b)、上海城市雾研究(郭恩铭等,1990)、重庆雾害研究(Li等,1994)、沪宁高速公路雾的观测(李子华等,1999a,1999b)、广东南岭雾的研究(吴兑等,2004)以及南京雾的观测研究(濮梅娟等,2008)。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的雾进行了考察(俞香仁等,1990)。同时,在北京、天津、新疆和吉林等省、市、自治区,还作过中国北方冷雾的观测。

1.2.2 重要成果

(1) 观测分析地区性雾的物理化学特征

各地雾的研究都特别注意观测分析其物理化学特征。结果发现,中国内陆雾多为辐射雾,南方多为暖雾,北方冬季雾常为冷雾。如北京、天津和乌鲁木齐等地区在冬季常出现冷雾。发展成熟的城市雾,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。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。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(李子华等,1999a),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。

我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,先后在长江流域、西南地区以及京、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,基本搞清了中国雾的微物理结构特征(李子华等,1992b)。雾滴数密度以城市雾最大,其量级为 $10^2 \sim 10^3$ 个/ cm^3 ;山区雾次之,一般为 10^2 个/ cm^3 ;海雾最小,多为 $10^1 \sim 10^2$ 个/ cm^3 。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 0.1 g/m^3 ,其他各地雾多在 $0.1 \sim 0.5 \text{ g/m}^3$ 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。无论是用景洪、成都等地 20 世纪 80 年代后的观测资料与 20 世纪 60 年代、70 年代相比较,还是用勐养、重庆等地 20 世纪 90 年代后的观测记录与 80 年代相比较(黄玉生等,2000),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水量比舟山海雾小得多,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 $2 \sim 10 \mu\text{m}$ 区段内,峰值直径 $3 \sim 4 \mu\text{m}$ 。在大滴一端虽然拖尾很长,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(李子华等,1995)。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。

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(李子华等,1994a;鲍宝堂等,1995;莫天麟等,1989;黄玉生等,1992a;丁国安等,1991;吴兑等,2004)。研究表明: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 $2.96 \sim 8.00$ 之间,平均为 4.39。其中城区 pH 值在 $2.96 \sim 7.52$ 之间,平均值为 4.30;郊区 pH 值在 $4.45 \sim 8.00$ 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,在 7 次浓雾过程中收集雾水样品 28 个, pH 值在 $4.3 \sim 6.5$ 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。

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。

(2) 雾中温湿度垂直分布及生消物理过程研究

许多研究雾的计划对雾层垂直温湿结构进行了连续观测。分析飞艇探空资料表明, 雾顶的温度、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分布遵从湿绝热递减率。

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(Li *et al.*, 1999)。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地向峡谷上空输送水汽, 重庆市区具有明显的湿岛结构(李子华等, 1993a)。西双版纳雾的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在 80% 左右。

研究发现, 辐射雾在发展时常有爆发性特征(李子华等, 1999a), 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。

值得提出的是, 2006 年 12 月 24—27 日南京发生了一次罕见的辐射—平流雾。观测发现这次雾持续时间长, 能见度小于 50 m 的强浓雾就持续了 40 余小时; 雾顶高, 最高达到 943 m; 雾水酸, 离子浓度高; 由浓雾变为强浓雾, 具有爆发性增强的特征。对此, 将在后面章节中专门讨论。

此外, 我国学者对沿海海雾也做了不少研究(王彬华, 1983; 徐静琦等, 1994; 傅刚等, 2002; 傅刚等, 2004), 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。

(3) 揭示雾与生态环境关系

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 天, 90 年代前半期(1990—1995)平均年雾日仅 58 天(宫世贤等, 1996)。雾中含水量也明显减少。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 天, 到 80 年代仅 48 天。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°C ,尤其是与成雾直接有关的夜晚的最低气温,上升更为明显。对重庆市气溶胶粒子增温效应的计算表明,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°C 左右(李子华等,1996)。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年代和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能引起雾的明显变化,而雾的变化又会影响生态环境。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。

(4) 雾的数值模拟研究取得重大进展

我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。经过十多年不断地深入研究,已经取得了重大进展。起初,采用Brown等(1976)的一维模式对辐射雾形成过程进行数值试验(黄培强等,1986),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(周斌斌,1987)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(张福深等,1987)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(彭虎等,1992)。“辐射雾生消的数值研究”(尹球等,1993,1994)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进行了模拟,结果基本反应了实测雾生消的全过程。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,我国开始研究二维辐射雾模式。所设计的模式(钱敏伟等,1990)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(张利民等,1993),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。将江河、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