

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

江苏高校优势学科建设工程

江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究”创新团队项目资助

雾

物理化学研究

牛生杰 ● 著



气象出版社

China Meteorological Press

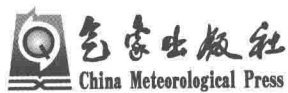
“十二五”国家重点出版物出版规划项目

江苏高校优势学科建设工程

江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究”创新团队项目 资助

雾物理化学研究

牛生杰 著



内容简介

本书介绍了著者有关中国雾物理化学过程宏观、微观特征的研究成果。内容涉及:雾外场综合观测试验;辐射雾、平流雾及平流辐射雾的宏观特征;陆地雾和海雾的微观特征;陆地雾和海雾的化学特征;过冷雾微物理特征。这些内容有利于读者系统、深入地认识中国雾物理化学过程及相应物理化学机制,可为中国雾害监测和预警等提供科学基础。

本书适用于大气物理学、大气化学、大气环境、气候变化、天气分析和预报等专业领域,也可供相关领域的研究、教学人员和研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

雾物理化学研究/牛生杰著. —北京:气象出版社,2014.10
ISBN 978-7-5029-6032-2

I. ①雾… II. ①牛… III. ①雾-物理化学-研究
IV. ①P426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 234707 号

Wu Wuli Huaxue Yanjiu

雾物理化学研究

牛生杰 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://www.cmp.cma.gov.cn>

责任编辑:黄红丽

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×1092 mm 1/16

字 数:270 千字

版 次:2014 年 10 月第 1 版

定 价:90.00 元

邮政编码:100081

发 行 部:010-68406961

E-mail: qxcbs@cma.gov.cn

终 审:周诗健

责任技编:吴庭芳

印 张:10

彩 插:4

印 次:2014 年 10 月第 1 次印刷

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

雾是发生在近地层水平能见度低于 1 km 的天气现象。随着经济社会的快速发展,雾造成的低能见度、高湿度天气对陆海空等交通运输、人体健康以及电力输送等均产生日益显著的不利影响,已经成为一种重要的气象灾害。长江三角洲地区是我国雾的高发区之一,为了深入研究该地区雾形成的物理机制、物理化学特性和监测预警方法,我们在 2006 年进行雾综合观测预研究的基础上,于 2007 年申请中国气象局公益性行业(气象)科研专项“长江三角洲雾害监测预警及灾情评估方法研究”并获资助(编号:GYHY200706026),同年樊曙先教授还获得国家自然科学基金项目“南京市郊区雾理化特性及酸化机理的观测和数值研究”(编号:40775012)资助。近年来,项目组主要成员南京信息工程大学牛生杰教授、杨军教授、樊曙先教授、朱彬教授、魏鸣教授和江苏省气象局曾明剑研究员等带领课题组成员按照课题任务书的要求,勤奋工作,刻苦攻关,圆满地完成了研究任务,其中 GYHY200706026 于 2013 年 9 月顺利通过管理部门组织的项目综合验收。项目组的研究主要涉及雾综合观测方法、雾分类及概念模型、雾微结构演变、雾边界层结构、雾水化学、雾与污染物的相互作用以及雾过程气溶胶成分变化等;建立了基于 MODIS、FY-2C 等资料的雾监测预警方法和基于 WRF 的雾数值预报方法等。此外,项目组于 2011 年和 2012 年春季赴广东湛江对海雾进行了综合观测,并取得初步成果。

2008 年冬季,我国南方连续发生了 4 次持续性冰冻雨雪天气,高压输电线路因积冰中断,造成了巨大经济损失。为了研究持续性冰冻雨雪天气的成因,科技部下达了由湖北省气象局主持的国家科技支撑计划项目“南方冰雪灾害天气监测预警评估技术研究”,我们承担第一课题“南方冰冻雨雪天气野外观测试验研究”(编号:2008BAC48B01)。在观测电线积冰形成气象条件的同时,增加了雾滴谱、雨滴谱及通量等物理观测;进行了传统的积冰架观测和高压输电线路上架设四要素自动气象站及拉力器等的积冰实时观测,并做初步对比分析;建立了电线积冰、道路积冰和地面积雪预报的物理模型并投入业务使用。

本书分为 5 章,主要总结介绍上述研究所取得的理论成果,内容涉及雾外场综合观测试验、雾的宏观特征、雾的微观特征、雾化学研究及过冷雾研究。

参加本项目研究的骨干成员有徐峰博士、陆春松博士、刘端阳博士、许丹博士、赵丽娟博士、周悦博士、岳岩裕博士、于华英博士、吕晶晶博士,博士研究生张舒婷、费冬冬,以及 38 名硕士研究生(他们参与研究并完成了硕士学位论文,论文列入附录——作者团队在该领域发表的主要学术论文)。

本书出版获江苏高校优势学科建设工程(PAPD)和江苏省青蓝工程“云雾降水与气溶胶研究”创新团队项目资助。

作者对美国布鲁克海文(Brookhaven)国家实验室研究员、南京信息工程大学兼职教授刘延刚博士及南京信息工程大学倪东鸿编审的帮助,表示感谢。

因作者学识水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者指正。

南京信息工程大学 牛生杰

2013 年 9 月 30 日

目 录

前 言

第 1 章 雾外场综合观测试验	(1)
1.1 外场观测概况、观测仪器及资料处理	(1)
1.1.1 外场观测概况	(1)
1.1.2 观测仪器	(1)
1.1.3 观测方案	(5)
1.1.4 资料处理	(6)
1.2 小结	(7)
参考文献	(8)
第 2 章 雾的宏观特征	(10)
2.1 雾的类型	(10)
2.2 雾的形成、维持及消散时间	(10)
2.3 雾层结构特征	(12)
2.3.1 雾层的一般特征	(12)
2.3.2 双层雾结构	(12)
2.4 雾层温度	(13)
2.4.1 雾层温度的一般特征	(13)
2.4.2 雾层高度与逆温层的相关关系	(14)
2.5 雾边界层的风场特征	(16)
2.6 浓雾长时间持续及深厚雾层的物理成因	(16)
2.7 个例分析	(18)
2.7.1 辐射雾的宏观热力和动力结构	(18)
2.7.2 平流雾宏观物理结构	(27)
2.7.3 平流辐射雾宏观物理结构	(30)
2.8 小结	(37)
参考文献	(39)
第 3 章 雾的微观特征	(41)
3.1 陆地雾微物理结构	(41)
3.1.1 雾微物理结构及雾滴谱分布特征	(41)
3.1.2 雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征	(48)

3.1.3	雾滴谱微物理参量的相关关系	(53)
3.2	海雾微物理结构	(56)
3.2.1	海雾过程概述	(56)
3.2.2	海雾的一般微物理特征	(57)
3.2.3	海雾的微物理参量随时间演变特征	(61)
3.2.4	海雾的微物理参量相关性	(62)
3.3	湍流、辐射、气溶胶与雾微物理结构的相互作用	(67)
3.3.1	湍流与雾微结构的相互作用	(67)
3.3.2	辐射与雾微结构的相互作用	(76)
3.3.3	气溶胶与雾微结构的相互作用	(80)
3.4	小结	(84)
	参考文献	(86)
第 4 章	雾化学研究	(89)
4.1	陆地雾水化学	(89)
4.1.1	雾水酸度及电导率	(90)
4.1.2	雾水化学组分	(92)
4.1.3	雾微物理特征量与雾水化学之间的联系	(97)
4.1.4	雾水沉降量	(100)
4.2	海雾雾水化学	(101)
4.2.1	海雾雾水酸度及电导率	(101)
4.2.2	海雾化学组分	(104)
4.2.3	海雾微物理特征量变化与雾水化学的联系	(108)
4.3	雾水浓度对比分析	(109)
4.3.1	不同地区雾水浓度对比	(109)
4.3.2	不同观测时间雾水浓度对比	(110)
4.3.3	辐射雾和平流辐射雾化学特征对比	(111)
4.4	雾日气溶胶粒子特征	(112)
4.4.1	陆地雾气溶胶粒子特征	(112)
4.4.2	海雾气溶胶粒子物理特征	(118)
4.5	小结	(120)
	参考文献	(121)
第 5 章	过冷雾研究	(124)
5.1	过冷雾气象条件	(124)
5.1.1	天气形势	(124)
5.1.2	边界层特征	(125)
5.1.3	气象要素特征	(131)

5.2 过冷雾微物理结构	(132)
5.2.1 过冷雾微物理特征	(132)
5.2.2 冻毛毛雨微物理特征	(135)
5.3 小结	(143)
参考文献	(144)
附:作者团队在该领域发表的主要学术论文	(147)

第1章 雾外场综合观测试验

1.1 外场观测概况、观测仪器及资料处理

1.1.1 外场观测概况

2006、2007、2008、2009年冬季在南京北郊(南京信息工程大学, $32^{\circ}12'N$, $118^{\circ}42'E$, 海拔高度 25 m)、南京城区开展了4期长江三角洲地区冬季雾外场综合观测试验(表 1.1, 图 1.1, 图 1.2)。观测场及周边地区地势平坦, 周围无高大建筑及树木。其中, 2008年又在南京市市区增设了观测点, 以对比城市中心与郊区雾的边界层结构、微物理特征及演变特征的差异。内容包括: 雾的边界层结构、雾滴谱微观结构特征、雾水化学特征、大气气溶胶粒子谱及化学成分、辐射和热平衡各分量、湍流结构, 以及水汽通量、热通量、气象和环境监测常规项目(陆春松等, 2008, 2010; 汤莉莉等, 2008; 樊曙先等, 2009a, 2009b; 封洋等, 2009; 刘端阳等, 2009; 徐杰等, 2009; 严文莲等, 2009, 2010; 杨军等, 2010a, 2010b; Liu *et al.*, 2010, 2011, 2012; Lu *et al.*, 2010; Niu *et al.*, 2010a, 2010b, 2012; 李子华等, 2011a, 2011b, 2011c; 刘端阳, 2011; 秦彦硕等, 2011)。

表 1.1 南京地区冬季浓雾外场观测情况(刘端阳, 2011)

年份	起止日期(年-月-日)	参加人数(人)	观测项目编号
2006	2006-11-25—12-27	38(学生)	FOG-06
2007	2007-11-15—12-29	39(学生)	FOG-07
2008	2008-11-13—12-31	40(学生)	FOG-08-suburbs
	2008-12-11—12-31	13(学生)	FOG-08-downtown
2009	2009-11-26—2010-01-05	32(学生)	FOG-09

1.1.2 观测仪器

观测仪器有雾滴谱仪、能见度仪、自动气象站、多普勒声雷达、系留气艇、开路涡动协方差系统、WPS-1000XP 型宽范围粒谱仪(MSP, 美国)以及自制主动式雾水采集器等, 仪器均架设在观测场或运动场中的草坪上(表 1.2, 图 1.3)。

在试验期间连续观测能见度, 每分钟产生一组数据; 雾微物理结构的观测利用美国 DMT 公司生产的 FM-100 型雾滴谱仪, 可以连续测量雾粒子数浓度、谱分布, 粒径范围为 $2 \sim 50 \mu\text{m}$, 最大数浓度为 10^4 cm^{-3} , 观测连续进行, 每秒钟产生一组数据。使用 WPS-1000XP 型宽范围粒谱仪测量 $10 \sim 10\,000 \text{ nm}$ 气溶胶粒子尺度谱分布, 每 5 min 可得一组数据。

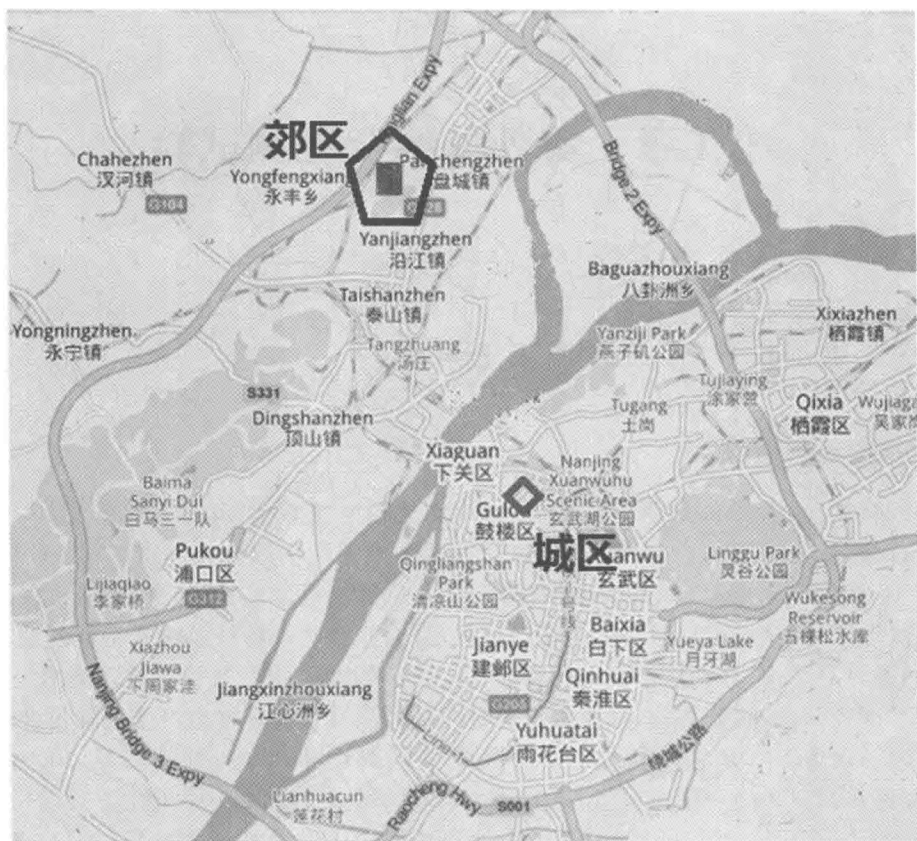


图 1.1 观测点位置(刘端阳,2011)

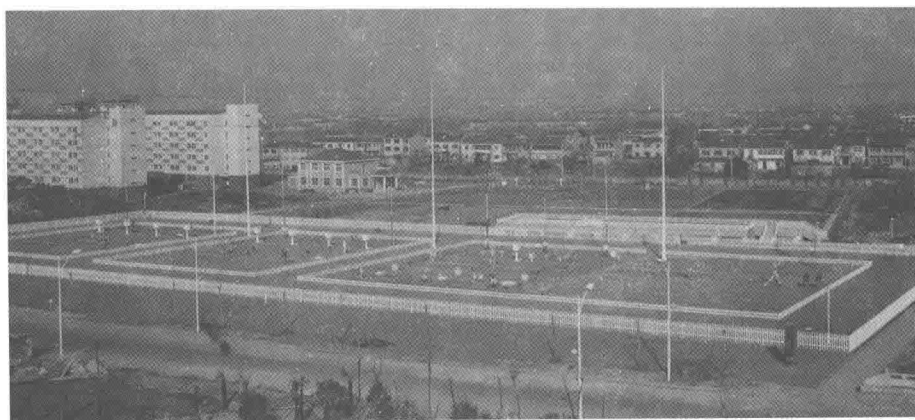


图 1.2 南京北郊观测场鸟瞰图(刘端阳,2011)

边界层观测采用芬兰 Vaisala 公司生产的 DigiCORA 系留气艇低空探测系统,它由飞艇携带传感器升空后探测不同高度的温度、气压、湿度、风向和风速等参数,一般每 3 h 观测 1 次,有雾期间加密为 1~2 h 观测 1 次,探测高度在 1 000 m 左右。

多普勒声雷达探测边界层内三维风的垂直分布,在有雾时有效探测高度为 500 m 左右,每 15 min 采样一组完整的风向风速廓线资料。

表 1.2 南京地区浓雾观测仪器一览表 (刘端阳, 2011; 李子华等, 2011b)

仪器名称	型号	生产商	观测项目	2006	2007	2008-suburbs	2008-downtown	2009
主动式雾水采集器	—	自制, 中国	雾水	•	•	•	•	•
雾滴谱仪	FM-100	DMT 公司, 美国	雾滴谱、雾含水量、数密度	•	•	•	•	•
雨滴谱仪	Parsivel	OTT 公司, 德国	雨滴谱	•	•	•	•	•
CCN counter	—	DMT 公司, 美国	云凝结核			•		•
能见度仪	ZQZ-DN2	江苏无线电科学研究所, 中国	能见距离	•	•	•		•
能见度仪	VVPF-710	Biral 公司, 英国	能见距离		•	•	•	•
光声黑碳浓度仪 PASS	—	美国沙漠研究所和 DMT 公司	气溶胶的光散射、光吸收 (针对炭黑) 和质量浓度			•		
宽范围粒谱仪	WPS-1000XP	MSP 公司, 美国	气溶胶粒子谱		•	•	•	•
系留探空	Vaisala DigiCORA Tether-sonde System	Vaisala 公司, 芬兰	温度、湿度、气压、风向风速		•	•	•	•
自动气象站	—	ICT International, 澳大利亚	温度、湿度、气压		•	•	•	•
紫外 DOAS 分析仪	AR500 系列	OPSIS AB 公司, 瑞典	SO ₂ 、NO ₂ 、O ₃ 、NO		•	•		
VOC 检测仪	ppbRAE Plus PGM7240	RAE 公司, 美国	TVOCs		•	•		
气溶胶在线检测仪	MP101M-LCD	Environment-S. A 公司, 法国	PM ₁₀ 质量浓度					
气溶胶撞击采样器	FA-3	辽阳康洁仪器研究所, 中国	气溶胶粒子采样		•	•	•	•
多普勒声雷达	MFAS	Scintec Corporation, 德国	三维风		•	•	•	•
超声风速仪	CSAT3		三维风速 U_x 、 U_y 、 U_z		•	•	•	•
红外 CO ₂ /H ₂ O 分析仪	LI7500		水汽和 CO ₂ 脉动量		•	•	•	•
空气温湿度传感器	HMP45C		温度和湿度		•	•	•	•
净辐射传感器	CNR-1	CAMPBELL, 美国	0.3~3 μm 太阳辐射, 5~50 μm 远红外辐射		•	•	•	•
土壤热通量传感器	HFP01		土壤热通量		•	•	•	•
IRR-P 传感器	IRR-P		地表温度		•	•	•	•

注: • 表示该仪器在观测中使用。

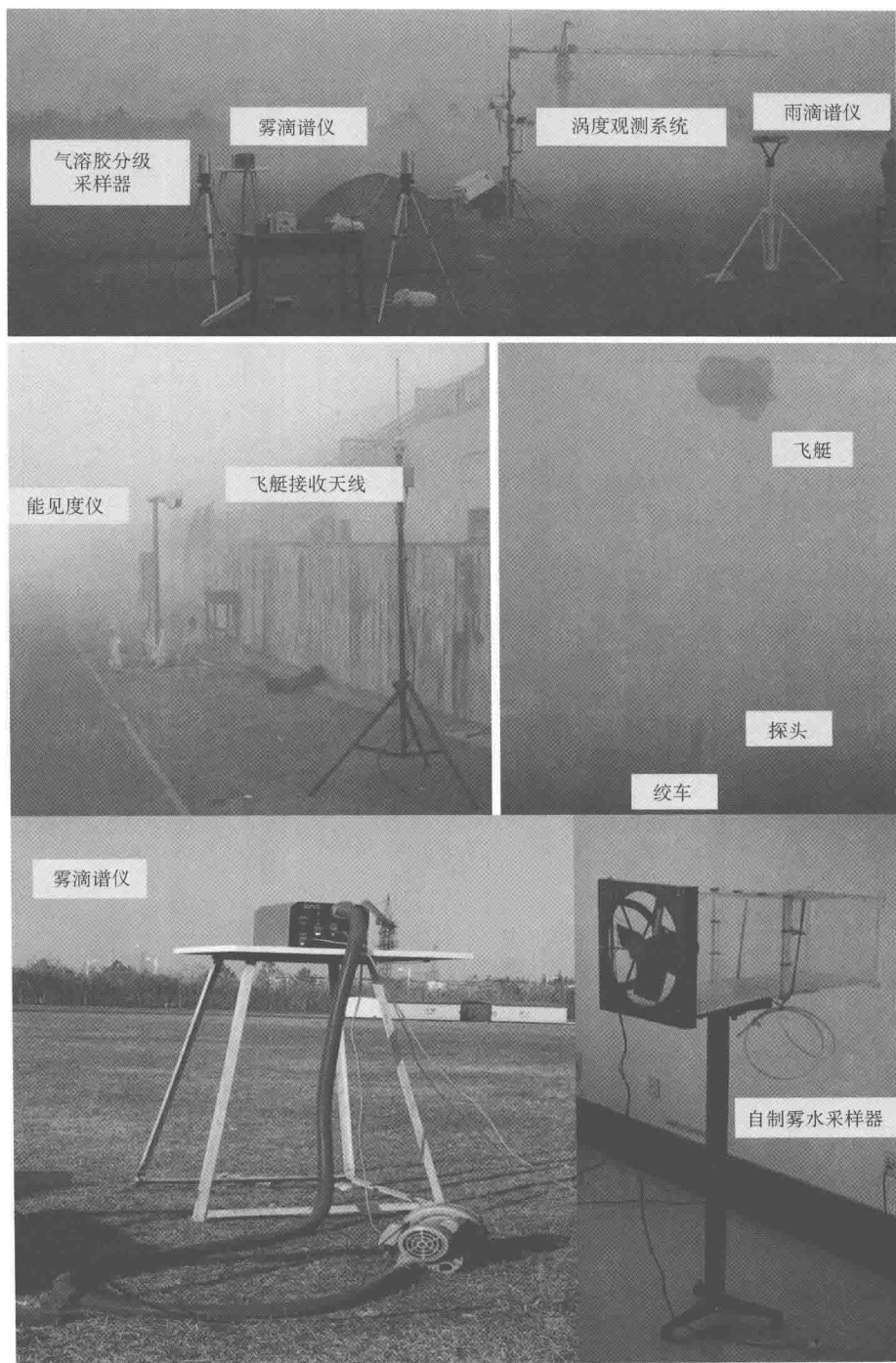


图 1.3 外场观测中使用的仪器

开路涡动协方差测量系统由 CR5000 数据采集器、CSAT3 超声风速仪、LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪等组成。CR5000 控制测量、运算及数据存储；CSAT3 测量三维风速和超声虚温；LI7500 测量 CO_2 和水汽通量。系统工作时计算在线通量，并存储通量数据和时间序列数据。

为了分析雾过程中详细边界层特征,三维风、超声虚温、水汽及 CO_2 数据均采用了每分钟平均。测量系统的其他传感器还有:HMP45C 温度/相对湿度探头、HFP01 热通量板(热通量传感器)、土壤温度和含水量传感器各 1 个,测量净辐射的仪器 Kipp&Zonen CNR-1(由 2 个短波和 2 个长波辐射组成,包括 2 个日辐射计和 2 个地面辐射计)1 套,都采用每分钟平均数据。LI7500 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 分析仪、CSAT3 超声风速仪和 HMP45C 温度/相对湿度探头均安装在距离地面约 3 m 高度处;CNR-1 距离地面约 1.5 m;热通量板、土壤温度和含水量传感器水平置于距地表 10 cm 处土壤中。开路涡动协方差测量系统的数据与其他仪器同步采集,全部数据都进行了不合理“野点”剔除。除此之外,还有雾水采集和分析系统以及气溶胶粒子和污染气体观测系统。

1.1.3 观测方案

根据观测内容,分为 5 个观测小组:综合观测组、微物理组、样品采集与化学分析组、边界层探测组和数据组。

(1)综合观测组

仪器设备:能见度仪、雨滴谱仪、自动气象站、DOAS。

工作内容:人工观测气温、相对湿度、能见度、云量、天气现象等;人工照相(选定目标,使用固定参数设置,以此判定能见距离)。

另外,为了分析地气相互作用,还增加了地表温度。

(2)微物理组

仪器设备:超声风速仪、激光雾滴谱仪、宽范围气溶胶粒谱仪、微电子天平。

工作要求:仪器维护要求较高,须十分细心。

工作内容:负责维护观测期间的仪器使用,每小时监测仪器运行状态,保证仪器正常运行。雾观测期间,连续取样,24 h 不停止。

(3)样品采集与化学分析组

工作内容:进行气溶胶、雾水、大气污染气体、降水采样。

主要包括:

(a)使用气溶胶分级采样器采集气溶胶样品,分析气溶胶 PM_{10} 中不同粒径段颗粒物质量浓度、水溶性阴阳离子、重金属离子含量特征,揭示其时空分布规律、污染特征及其来源。

(b)使用雾水采样器采集雾水样品,系统观测,定量分析出雾水 pH 值、电导率及可溶性阴阳离子的种类、浓度,重金属离子分布特征,低分子量有机酸分布特征,并揭示南京市与郊区雾水的化学特征和差异。

(c)观测大气污染物 SO_2 、 O_3 和 NO_x 冬季污染特征,雾天采集空气样本,观测 SO_2 和 NO_2 浓度特征,研究雾天典型污染物在三相(固态、液态和气态)中的分布特征,建立污染物在两相间的吸附动力学模型。

(d)收集每场降水,定量分析出雨水中可溶性阴阳离子、有机酸、重金属元素的种类、浓度,揭示南京大气降水的化学特征。

(e)雾水采样方案如下。

观测时间:有雾时开始,雾消后终止。

雾水收集:10~15 mL 为一个样品,采够量后换瓶,继续收集,一次雾过程的雾水样品愈多

愈好。

酸度:用酸度计现场测定。

样品编号:所有采样品要顺次编号于瓶外,并注明采样时段。

注意事项:收集样品的瓶,要用蒸馏水洗净。

(4)边界层探测组

观测仪器:系留气艇探测系统、多普勒声雷达、开路涡动协方差测量系统。

观测内容:雾发生过程中边界层结构、风廓线、近地层湍流特征的演变。

系留气艇探测系统的观测如下。

时间:一般每3 h观测1次(02、05、08、11、14、17、20、23时),预报有雾时,每2 h观测1次,出现雾后,每1 h观测1次。

升速:一般每升高5~10 m要有一组数据,最大升高800~1 000 m,一次观测时间30 min左右,飞艇下落时,继续观测。

校准:每次整点观测前要做好放飞艇的各项准备工作,特别要做好探头的校准工作。

注意事项:(a)注意风。飞艇升高过程中,若遇大于 $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 风速时,则停止上升。(b)注意雨。雨天停止观测。

(5)数据组

工作内容:负责收集整理所有外场观测资料并建库,确保原始资料完好。

收集的相关资料如下。

GTS:江苏省气象局、气象台;佛罗里达州立大学。

T213(中国气象局数值预报):江苏省气象局、气象台。

天气图及相关产品:中国气象局国家气象中心、韩国气象厅下载。

再分析气象资料:NCAR/NCEP再分析资料、FNL分析资料。

卫星资料:FY(风云卫星)/MODIS(中分辨率成像光谱仪,MODerate-resolution Imaging Spectroradiometer)卫星资料/NOAA卫星资料/GMS(日本地球静止轨道气象卫星)卫星资料收集。

收集整理天气预报、空气质量预报、雾监测报告、相关雾新闻报道等。

收集环境观测系统的环境监测资料。

1.1.4 资料处理

根据雾的定义,将能见度低于1 000 m的时段定义为雾的维持时段。根据冬季雾观测过程中获取的连续能见度观测资料,2006—2009年观测中共获得29次雾过程,表1.3给出了2006—2009年观测到的雾过程及生消时间。

雾滴谱为1 s产生一组数据。在分析过程中,剔除异常点,然后做切尾平均,分别获得10 s和1 min平均的数据;系留探空资料同样进行了异常点的剔除,之后分别做5 m、10 m、20 m高度的平均,以平滑数据。另外,开路涡动协方差测量系统的数据与其他仪器同步采集,全部数据都进行了不合理“野点”剔除。

为了分析长江三角洲地区雾的生消,研究中还使用了上海市卫星遥感与测量应用中心NOAA/FY1-D极轨卫星雾区监测图像、MICAPS资料、长江三角洲地区自动气象站资料以及南京气象观测站2006—2008年高空和地面常规观测资料,高空观测资料为一天2次(08时和

20 时)的探空资料,地面观测资料为逐时的地面气象要素资料。

2006—2009 年共观测到 29 次雾过程,按照相对湿度 $H_R \geq 97\%$ 为雾区的判据,根据湿度垂直廓线来划定雾区。在 29 次雾过程中,共有 16 次雾过程获取了完整的雾边界层数据,基于这些雾边界层数据,分析了南京雾的宏观物理特征(表 2.1,详见第 2 章)。

表 1.3 2006—2009 年观测到的雾过程及生消时间(刘端阳,2011;李子华等,2011b)

序号	雾类型	日期(年-月-日)	形成时间(BT)	消散时间(BT)	持续时间(min)	序号	雾类型	日期(年-月-日)	形成时间(BT)	消散时间(BT)	持续时间(min)
1	辐射雾	2006-12-09—10	21:20	09:30	730	17	雨雾	2006-12-06—07	16:15	07:09	894
2		2006-12-11—12	23:00	17:00	1 080	18		2007-11-26	03:09	11:37	508
3		2006-12-13—14	22:00	12:00	840	19		2007-12-11	19:21	23:10	229
4		2007-11-20	02:36	08:02	326	20		2007-12-12	08:59	17:07	488
5		2007-11-21	02:00	07:46	346	21		2007-12-16—17	21:07	08:39	692
6		2007-11-23	05:50	07:38	108	22		2007-12-17	09:39	10:56	77
7		2007-11-24	10:06	12:14	128	23		2007-12-22	02:07	10:46	519
8		2007-11-24	20:00	22:23	143	24		2007-12-27	09:25	14:36	311
9		2007-12-03—04	18:12	09:11	899	25	平流辐射雾	2006-12-24—27	22:00	14:14	3 854
10		2007-12-10—11	22:31	12:30	839	26		2007-12-18—19	16:06	12:30	1 224
11		2007-12-13—14	19:50	11:21	931	27	平流雾	2007-12-20—21	17:47	19:07	1 520
12		2007-12-14—15	20:48	12:00	912	28		2008-11-04—05	19:00	12:10	1 030
13		2007-12-18	02:30	11:30	540	29		2009-12-01—02	19:00	11:20	980
14		2007-12-19—20	16:36	16:14	1 418						
15		2007-12-22—23	22:10	00:38	148						
16		2007-12-23	01:16	05:30	254						

雾水资料分析方法如下:雾水采样前,用去离子蒸馏水反复冲洗雾水采集器,采样时间平均 3 h 采样 1 次,每个雾水样品的雾水量不低于 10 mL。雾水样品采集后,立即取少量样品用 pH 计和电导率仪现场测定雾水 pH 值和电导率,其余样品立即送至实验室保存于冰箱中,以备化学分析。测定雾水中无机离子化学组成时,先用滤膜过滤,再用毛细管电泳法测定阴离子,测定的阴离子有 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 F^- 、 HCO_3^- 。阳离子是用原子吸收分光光度计测定的,测定的阳离子有 Ca^{2+} 、 NH_4^+ 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 。

1.2 小结

2006—2009 年冬季在南京北郊、南京城区开展了 4 期长江三角洲地区冬季雾外场综合观测试验,使用国际上较为先进的观测仪器,进行了雾的边界层结构、雾滴谱微观结构特征、雾水化学特征、大气气溶胶粒子谱及化学成分、辐射和热平衡各分量、湍流结构,以及水汽通量、热通量、气象和环境监测的观测。

按照观测内容分为综合观测组、微物理组、样品采集与化学分析组、边界层探测组和数据组 5 个观测小组。各小组各司其职、全力配合,确保观测仪器的稳定运行和观测资料的准确真实。

2006—2009 年共观测到 29 次雾过程,按照相对湿度 $H_R \geq 97\%$ 为雾区的判据,根据湿度垂直廓线来划定雾区。在 29 次雾过程中,共有 16 次雾过程获取了完整的雾边界层数据,基于这些雾边界层数据,分析南京雾的宏观物理特征。

参 考 文 献

- 樊曙先,黄红丽,樊韬,等. 2009a. 南京北郊雾天 PM_{10} 中多环芳烃粒径分布特征[J]. 环境科学, **30**(9): 2707-2714.
- 樊曙先,杨雪贞,樊韬,等. 2009b. 南京冬季雾水金属元素及水溶性阴离子浓度特征[J]. 环境科学学报, **29**(9): 1878-1885.
- 封洋,张国正,朱彬,等. 2009. 一次罕见的辐射—平流雾研究(II)——雾水化学性质分析[J]. 气象科学, **29**(1): 17-24.
- 李子华,刘端阳,封洋,等. 2011a. 中国雾水化学研究进展[J]. 气象学报, **69**(3): 544-554.
- 李子华,刘端阳,杨军,等. 2011b. 南京市冬季雾的物理化学特征[J]. 气象学报, **69**(4): 706-718.
- 李子华,刘端阳,杨军. 2011c. 辐射雾雾滴谱拓宽的微物理过程和宏观条件[J]. 大气科学, **35**(1): 41-54.
- 刘端阳. 2011. 南京冬季雾宏微观物理结构的观测研究[D]. 南京:南京信息工程大学.
- 刘端阳,濮梅娟,杨军,等. 2009. 2006 年 12 月南京连续 4 天浓雾的微物理结构及演变特征[J]. 气象学报, **67**(1): 147-157.
- 陆春松,牛生杰,杨军,等. 2008. 南京冬季平流雾的生消机制及边界层结构观测分析[J]. 南京气象学院学报, **31**(4): 592-598.
- 陆春松,牛生杰,杨军,等. 2010. 南京冬季一次雾过程宏微观结构的突变特征及成因分析[J]. 大气科学, **34**(4): 681-690.
- 秦彦硕,刘端阳,银燕,等. 2011. 南京地区雾水化学特征及污染物来源分析[J]. 环境化学, **30**(4): 816-824.
- 汤莉莉,牛生杰,陆春松,等. 2008. 南京市郊雾水中重金属和大气污染物的观测分析[J]. 南京气象学院学报, **31**(4): 520-529.
- 徐杰,牛生杰,陆春松,等. 2009. 南京冬季平流雾微物理结构观测研究[J]. 南京气象学院学报, **32**(2): 269-276.
- 严文莲,刘端阳,濮梅娟,等. 2010. 南京地区雨雾的形成及其结构特征[J]. 气象, **36**(10): 29-36.
- 严文莲,濮梅娟,王巍巍,等. 2009. 一次罕见的辐射—平流雾研究(I)——生消物理过程分析[J]. 气象科学, **29**(1): 9-16.
- 杨军,牛忠清,石春娥,等. 2010a. 南京冬季雾霾过程中气溶胶粒子的微物理特征[J]. 环境科学, **31**(7): 1425-1431.
- 杨军,王蕾,刘端阳,等. 2010b. 一次深厚浓雾过程的边界层特征和生消物理机制[J]. 气象学报, **68**(6): 998-1006.
- Liu D, Pu M, Yang J, et al. 2010. Microphysical structure and evolution of a four-day persistent fog event in Nanjing in December 2006[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, **24**(1): 104-115.
- Liu D, Yang J, Niu S, et al. 2011. On the evolution and structure of a radiation fog event in Nanjing[J]. *Adv Atmos Sci*, **28**(1): 223-237.
- Liu D, Niu S, Yang J, et al. 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing, Part 1: Fog boundary layer[J]. *Pure & Applied Geophysics*, **169**(5/6): 809-819.
- Lu C, Niu S, Tang L, et al. 2010. Chemical composition of fog water in Nanjing area of China and its related fog microphysics[J]. *Atmospheric Research*, **97**(1/2): 47-69.
- Niu S, Lu C, Liu Y, et al. 2010a. Analysis of the microphysical structure of heavy fog using a droplet

- spectrometer; A case study[J]. *Adv Atmos Sci*, **27**(6):1259-1275.
- Niu S, Lu C, Liu Y, *et al.* 2010b. Fog research in China: An overview[J]. *Adv Atmos Sci*, **27**(3):639-661.
- Niu S, Liu D, Zhao L, *et al.* 2012. Summary of a 4-year fog field study in northern Nanjing, Part 2: Fog microphysics[J]. *Pure & Applied Geophysics*, **169**(5/6):1137-1155.

第2章 雾的宏观特征

2.1 雾的类型

对雾的分类有许多种。Gultepe 等(2007)将雾分为辐射雾、高逆温雾、平流辐射雾、平流雾和蒸发雾,而王鹏飞和李子华(1989)、李子华等(2008)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”4种。

辐射冷却、冷/暖平流、降雨、云覆盖等因素都会影响雾的形成、发展及消散过程。有些雾过程可以受到多个因子的影响,本章在分类时主要基于对雾的形成、发展、成熟及消散过程产生主要影响的因子。基于雾过程的物理机制,本章将分析的南京地区16次雾过程分为辐射雾、平流辐射雾、平流雾和雨雾。

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(李子华, 2001),且通常容易在反气旋控制的晴朗天气下的近地面形成(Gultepe *et al.*, 2007),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(Gultepe *et al.*, 2007, 2009; Niu *et al.*, 2010),有时也会出现在内陆(濮梅娟等, 2001)。平流雾中平流起到了主导作用(刘端阳等, 2011)。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,液滴蒸发形成水蒸气,水蒸气在冷却后达到露点温度而凝结形成雾(Tardif and Rasmussen, 2009, 严文莲等, 2010)。

根据上述分类,本章16次雾过程中,有10次辐射雾、3次平流雾、2次平流辐射雾和1次雨雾过程(表2.1)。

2.2 雾的形成、维持及消散时间

辐射雾具有明显的日变化特征,通常形成于日落以后或者午夜,个别形成于日出前后。而大部分在日出后或者正午前后消散,维持时间大部分为9~18 h(表2.1)。

平流辐射雾和平流雾的维持时间均较长,为16~64 h,维持时间最长的雾过程出现在2006年12月24—27日,这是一次平流辐射雾过程,维持时间超过了64 h。这两类雾的形成时间与辐射雾类似,并且具有显著的日变化特征,都是在正午前后减弱或者消散。

能见度 L 低于50 m的强浓雾一般出现在辐射雾及平流辐射雾中,都和辐射冷却有关。在连续四年的观测中发现,平流雾的最低能见度都要超过50 m,即平流雾中没有出现强浓雾。强浓雾的持续时间大都在1~6 h,最短的不到0.5 h,持续时间最长的强浓雾出现在2006年12月24—27日,持续时间接近40 h。分析还发现,大部分强浓雾出现在凌晨,在日出前或者日出后的1~2 h;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。