



城市化环境气象学引论

徐祥德 汤 绪 等/编著



气象出版社

城市化环境气象学引论

徐祥德 汤 绪 等编著

气象出版社

图书在版编目(CIP)数据

城市化环境气象学引论/徐祥德等编著. —北京:气象出版社, 2002
ISBN 7-5029-3315-8

I. 城... II. 徐... III. 城市气候-环境气象学
IV. P463.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 011939 号

内 容 简 介

《城市化环境气象学引论》一书是国家重点基础研究发展规划项目“首都北京及周边地区大气污染机理与调控原理”研究成果。本书共分十二章,涵盖以下内容:城市化环境大气污染模型动力学问题、城市气候概念、城市建筑风环境动力学、城市热岛、城市化特征雾、城市化大气电过程、城市沥涝、城市化气溶胶微结构、城市大气环境污染、区域(城市)边界层大气污染数值预报、城市环境气象与健康以及城市环境可持续发展对策。

本书可供环境与气象研究或业务专家,尤其是从事大气环境保障与气象研究、大气污染预测与理论研究和业务技术人员阅读,可供城市气候学、农业生态、大气物理、环境等学科领域的科研和教学人员参阅,也可以作为有关专业的博士、硕士研究生学习参考书。

气象出版社 出版

(北京中关村南大街 46 号 邮编:100081)

责任编辑:潘根娣 终审:纪乃晋

封面设计:刘 扬 责任技编:陈 红 责任校对:李 新

北京市兴怀印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:787×1092 1/16 印张:18.5 474 千字

2002 年 1 月第一版 2002 年 1 月第一次印刷

印数:1~2000 定价:46.00 元

《城市化环境气象学引论》编写委员会

主 编:徐祥德 汤 绪

编写组:徐祥德 汤 绪 徐大海 李维亮 章澄昌
薛 桁 韩海珍 章育仲 薛秋芳 高良成
张庆阳 陆 晨 谢以扬 于淑秋 许继武
李青春

序

城市环境气象问题的提出,适应了改善城市环境、保障经济建设和学科发展的需要。一个学科的发展绝大多数都是受人类社会发展要求的驱动。在当今人类活动已达到对气候产生显著影响的时代,我们尤其要对环境气象,特别是对城市环境气象的重要性和紧迫性进一步加深我们的认识。

城市环境气象方面工作,我们在几年前就已开始研究和部署。1996 年底全国气象局长会议期间,我们就向部分省气象局局长通报了国家环委会的决定,在全国各大重要城市,分期分批发布大气空气质量周报及预报。中国气象局党组也有比较明确的意见,要与环保部门合作,“积极参与,共同发布”。主要目标是解决大气污染潜势预报,进而开展大气污染预报。同时提出两条策略,第一,先在全国各大城市开展;第二,要把基础性的工作先做起来,解决好科研和业务之间的协调。现在回过头来看,这两条策略还是对的。在上述科研与业务相互促进关系方面处理得很好。

城市环境气象的科研与业务,从开展空气污染预报开始,现在已发展成为城市环境气象。由此,我们扩大了视野,同时找到了拓展气象服务领域的有效途径。现阶段虽先从大城市的环境气象做起,而大城市环境气象服务的开展必然也会惠及中小城市。从更广泛的意义上讲,只要有人类居住的地方就存在环境气象问题。要做好这项工作,既要和我们现有的工作很好地衔接起来,同时又要分工合作。我们的本意是扩大服务领域,扩大研究领域,扩大工作范围;使我们的气象工作更加有生气,从更好地为中国飞速发展的经济建设、生活质量不断提高,为人民群众提供优质的气象服务。

城市环境气象学的建立,城市环境气象业务的发展,是我国国民经济发展和社会发展的必然需求。为此,与其他气象工作一样,应当从趋利避害两个方面去开展工作、考虑问题,不能仅仅局限于“避害”,应当同时研究如何“趋利”的问题。其次,城市环境气象的领域和内涵需要进一步扩充。“城市环境气象研究”的提出,是经济发展的必然趋势。人类活动的发展导致城市化,而城市化又引发城市环境气象问题。

城市环境气象是一个新兴的气象科研领域,它必然带动气象其它领域的发展。城市气象服务的内涵已经不能仅仅局限于天晴、阴和气温的高低。要组织好城市环境气象的科研、业务和服务,仅凭我们用来搞天气预报的观测资料是远远不够的。因为,城市环境气象涉及的各种尺度的大气物理化学过程都发生在行星边界层里,而目前的气象业务观测网,主要是天气观测网,即使是发达国家也已建成的中小尺度监测网,也只能覆盖到 β 中尺度过程,而对行星边界层以下各种尺

度的大气物理化学过程的监测几乎是空白。因此,必须加快行星边界层的大气特种观测。另一方面,尽管我们已经开始制作各大城市的环境气象预报,但距离真正解决环境气象问题还差得很远。所以,应当清楚地看到,城市环境气象确实是一个新的研究课题。

城市环境气象,是一个尚待开发和发展的业务。这里,业务也不仅仅是指预报,还包括了监测网的建设,探测手段的改进。任何新兴学科的发展必然是以需求为牵引。如果我们关起门来研究,等全部解决问题之后,再开展业务工作,那就太迟了。因此必须要采用边研究、边开展业务的策略。一方面不断地向研究部门提出新的课题,一方面及时地把科研成果应用于业务。在现阶段,首先要把城市环境气象学响亮地提出来,并通过业务、科研和服务三者的结合,促进业务的发展,特别是要借助数值手段来开展城市环境气象学的研究。观测点毕竟不可能布满整个三维空间,更不能布满四维空间,所以即使数值手段还不十分精确,但仍然可以给我们提供某一要素的变化趋势。另外,为了尽快开展城市环境气象业务,必须加快大气监测系统的建设。首先,近地面或大气行星边界层的观测要加快发展。大气监测不能单靠气象部门自己建设,要充分利用我们现有的设备,同时要采取合作的方式,加强与环保等其他部门的合作,实现信息及科研成果、业务系统开发潜力资源共享。这样,我们才可以提供更好的服务。

城市环境气象,是一个极具潜力的气象信息服务领域,污染预报、花粉过敏预报、灰尘预报等,国外很早就开展了,我们也应当开展这些工作。有关人的健康的环境气象服务也可以搞,不仅可以公益性的方式开展,也可以探索采取有偿服务的方式。从这个意义上说,它是一个非常有潜力的气象信息服务的领域。

要搞好城市环境气象研究工作,应当坚持走合作研究的路。环境气象不管哪一项任务,都是一个跨学科的、综合性的。学科的交叉和融合是这个领域发展的一大特点,应当强调气象部门与其它的生产部门、科研部门、管理部门之间的合作。以空气污染潜势预报为例,城市空气质量预报领域深入发展下去必然需要和环保部门全面合作,只有两家合作研究,优势互补,资源共享,共同探索,才能把城市环境气象研究与服务领域的开拓真正做好。

程宏

2001年12月16日

前 言

展望 21 世纪,城市环境气象必将为中国气象事业的发展带来新的机遇。与时俱进,不断拓展气象业务和服务的新领域是新世纪气象科技不断适应经济和社会发展新需求的重要任务之一。中国气象局局长秦大河教授曾多次指出,要以国家社会经济发展需求和科学技术发展趋势作为指导气象事业发展的两个坐标。跳出气象,看气象,就是要充分利用气象科学发展和现代化建设的成果发挥学科交叉的优势,积极向气候系统乃至地球环境领域拓展,使气象科学技术与社会经济各个领域的结合更加紧密,与相关学科的结合更加紧密,使其在服务于社会经济、在形成学科综合优势等方面作出更大的贡献。这是气象人面对新世纪、新机遇、新挑战作出的战略性响应。城市环境气象服务就是其中的一个重要内容。它涉及到大气科学、环境科学、城市学、生态学、医学等诸多学科,影响到城市的规划设计、城市人居与健康、大气污染的调控与防治、城市交通管理以及城市灾害防治等诸多应用领域。加强城市环境气象的研究是适应我国城市化发展的必然要求。人是环境的主体,有关学者形象称世界人口增长趋势为“爆炸式”增长,人口急增最终导致自然资料的匮乏,生态环境的破坏。随着人口的急增和工业发展,人口不断向城市集中。人口在百万以上的大城市,1950 年全世界有 75 座,1980 年增至 230 座,且超千万人口特大城市也在迅速增加,发展中国家城市人口 1950 年占 18.9%,1980 年增长到 28.7%;欧美发达国家 1950 年城市人口占 61.3%,1980 年已增长到 77.0%。城市人口的急剧增长导致城市环境发生了巨大的变化。围绕城市大气环境问题,世界各国开展了很多的现场试验研究。在 90 年代,仅就大气臭氧现场试验研究,北美就有 18 项、欧洲 12 项、亚洲 1 项。其中比较有名的是墨西哥空气质量研究计划(MAEJ),欧洲模式评价研究(EMEP)等。以大气气溶胶细粒子 PM_{2.5} 研究为主的纽约 PM_{2.5} 技术评价和特征研究计划(PMTACS - NY)是近年来比较著名的城市环境现场研究计划之一。由于城市环境在大气科学中的重要性日益突出为此世界气象组织(WMO)在全球大气监测(GAW)计划中专门开辟了城市气象学和环境研究这一新的研究项目(GURME)。我国北京已被列为 GURME 的首批示范项目。

世界各国为充分和全面了解环境的真实面貌,都试图以各种方式来揭示环境所包含的内涵。近年来,美国、加拿大、俄罗斯及西欧的一些国家以环境污染和健康为主题,纷纷制定和实施阐明区域地球化学背景,监测工业化以来环境污染状况变化的各类方案和计划,如俄罗斯的“地质生态学和地球化学填图计划(1991—2005)”,英国的地球化学调查计划(1994—2012),美国的生物与地球化学相结合的研究项目等。各国学者都试图通过对大气、水、土壤污染状况的研究,揭示其与人

体健康的内在联系,探讨污染物在环境中的运移、吸收和释放机制,制定环境监控与治理的优化方案。西方发达国家在研究区域环境的同时,近几年更注意城市环境问题的研究,但主要涉及工矿企业的污染、防治与治理,未将水、土、大气作为统一系统探讨污染物传输机理动力学过程。我国属于发展中国家,城市环境问题较为严重。全面系统地监控城市环境、研究预测与调控机理十分重要。

随着科技的不断进步和城市的迅速发展,人们对城市环境气象研究的关注从来没有象今天这样迫切。为此,我们编著了《城市化环境气象学引论》,全书由徐祥德、汤绪策划、统稿,本书共分十二章,第一章:城市化环境大气污染模型动力学问题,徐祥德撰稿;第二章:城市气候概念,韩海珍、王梅华、于淑秋撰稿;第三章:城市建筑风环境动力学,薛桁撰稿;第四章:城市热岛,张庆阳、张沅撰稿;第五章:城市化特征雾,高良成、周景林、张云荣、贾朋群、刘东贤撰稿;第六章:城市化大气电过程,薛秋芳、孟青撰稿;第七章:城市沥涝,谢以扬撰稿;第八章:城市化气溶胶微结构,章澄昌撰稿;第九章:城市大气环境污染,徐大海撰稿;第十章:区域(城市)边界层大气污染数值预报,李维亮撰稿;第十一章:城市环境气象与健康,汤绪、陆晨、李青春、朱川海撰稿;第十二章:城市环境可持续发展对策,章育仲、袁凤杰撰稿。编写本书由于淑秋、许继武具体组织实施,于淑秋、徐大海对本书出版过程作了大量校对工作。中国气象科学研究院信息中心专家帮助检索信息资料,滑桃负责文字录入、绘图等技术工作,值得提出的是中国气象局科教司张柱以及院科教处王金星等在本书出版过程中做了大量的组织工作。本书完成过程承蒙周秀骥院士、李泽椿院士等专家、学者的各方面的支持与指导。在此一并谨表谢意。

因本书涉及到的知识面广,资料甚多,难免有误,诚望读者指正!

编著者

2001年12月16日

目 录

序

前言

第一章 城市化环境大气污染模型动力学问题	(1)
§ 1.1 城市大气环境多尺度特征	(1)
§ 1.2 城市建筑群及其周边地形影响效应	(2)
§ 1.3 城市下垫面及其陆面过程	(3)
§ 1.4 城市大气边界层模型	(5)
§ 1.5 城市环境多圈层作用	(7)
§ 1.6 BECAPEX 城市空气污染现场观测试验	(8)
第二章 城市气候概念	(11)
§ 2.1 城市气候	(11)
§ 2.2 城市气候学研究背景	(12)
§ 2.3 城市气候成因	(12)
§ 2.4 城市区域气候边界层动力结构	(26)
第三章 城市建筑风环境动力学	(32)
§ 3.1 城市建设与风环境	(32)
§ 3.2 城市街道尺度流体动力学	(49)
§ 3.3 城市建筑群局地气候效应	(53)
§ 3.4 城市建设规划与污染源影响问题	(55)
第四章 城市热岛	(62)
§ 4.1 城市热岛效应	(62)
§ 4.2 城市热岛动力学特征及其成因	(65)
§ 4.3 城市热岛效应与大气污染	(69)
§ 4.4 城市热岛模拟	(72)
§ 4.5 城市热岛的影响及其对策	(77)
第五章 城市化特征雾	(81)
§ 5.1 城市雾	(81)
§ 5.2 城市环境对雾的影响	(82)
§ 5.3 城市雾害	(83)
§ 5.4 城市雾监测和预报	(89)
§ 5.5 城市雾的人工影响	(92)

第六章 城市化大气电过程	(100)
§ 6.1 雷电对现代城市的危害	(100)
§ 6.2 雷电成灾原因	(101)
§ 6.3 雷电灾害的防御	(104)
§ 6.4 大气污染与雷击	(111)
§ 6.5 雷电探测	(113)
§ 6.6 雷电短时预报与预警系统	(115)
第七章 城市沥涝	(121)
§ 7.1 城市暴雨沥涝灾害	(121)
§ 7.2 城市沥涝灾害成因	(121)
§ 7.3 城市沥涝灾害的损失评估	(124)
§ 7.4 城市暴雨沥涝灾害监测预警技术	(127)
§ 7.5 城市沥涝灾害的风险分析	(131)
§ 7.6 沥涝灾害的减灾对策	(137)
第八章 城市化气溶胶微结构	(139)
§ 8.1 城市大气气溶胶的气候影响和环境危害	(139)
§ 8.2 城市大气气溶胶的成分和来源	(147)
§ 8.3 城市大气气溶胶的物理特征和化学转化	(159)
§ 8.4 城市大气气溶胶与城市云、雾和降水	(167)
§ 8.5 城市气溶胶与气象能见度	(170)
第九章 城市大气环境污染	(175)
§ 9.1 城市与大气污染	(175)
§ 9.2 城市空气污染危险性判据与空气质量标准	(176)
§ 9.3 城市空气污染的化学反应过程特征与光化学烟雾机理	(185)
§ 9.4 城市空气质量监测及预测模型	(187)
§ 9.5 城市空气污染预报技术与污染潜势预报	(193)
§ 9.6 城市大气污染控制与服务系统	(211)
第十章 区域(城市)边界层大气污染数值预报	(212)
§ 10.1 区域(城市)边界层大气污染预报问题	(212)
§ 10.2 区域(城市)边界层大气污染数值预报的特点	(213)
第十一章 城市环境气象与健康	(251)
§ 11.1 城市医疗气象概念	(251)
§ 11.2 城市大气环境对人体的生理机理影响	(253)
§ 11.3 城市医疗气象预报	(259)
§ 11.4 城市大气环境与生态设计	(265)

§ 11.5 城市污染与生存环境	(267)
第十二章 城市环境可持续发展对策	(272)
§ 12.1 城市发展的环境恶化问题	(272)
§ 12.2 城市水、土、气和固体废弃物的环境治理	(274)
§ 12.3 城市环境与城建规划	(277)
§ 12.4 城市发展与环境调控	(282)

第一章 城市化环境大气污染模型动力学问题

§ 1.1 城市大气环境多尺度特征

21 世纪的今天,人类生存环境科学研究已经到了不可忽视的程度。而城市化环境是当前人类生存科学的更为重要研究目标之一。环境污染作为一个重大的社会问题,是从产业革命开始的。产业革命的故乡—英国,1873 年以后连续发生一系列煤烟型大气污染事件,造成重大损失。进入 20 世纪,特别是二战以后,工业、交通和都市化迅猛发展,随着工业布局集中迅速兴起的城市化过程,环境污染日益加重。从 20 世纪 30 年代到 60 年代,一些工业发达国家,曾先后发生了八大公害事件(比利时的马斯河谷烟雾事件;美国多诺拉烟雾事件;英国伦敦烟雾事件;美国洛杉矶光化学烟雾事件;日本水俣事件;日本富士山事件;日本四日市事件;日本米糠油事件)。1970 年 4 月 22 日,美国环境保护主义者还推动了 2000 万人游行,首先打出了“环境保护”旗号,这一历史事件宣告“先污染、后治理”导致环境恶化不能再继续^[1]。城市环境污染问题研究领域广泛,首先城市内单体空气污染源直接造成微尺度和区域尺度的污染物传输,这种污染在特定的气象条件下易于造成严重危害,尤其是在城市大气多尺度环流系统的相互作用下城市点源、线源、面源空气污染等混合、扩散,并通过不同时空尺度的化学成分转化及光化学过程,形成污染的时空多尺度分布特征。污染物多尺度传输,呈跨境、跨省市地区远、近距离输送。经济发达区域多个城市可构成“城市群”,其污染扩散混合或特大城市之间的羽流影响效应,构成区域性大范围污染扩散、混合现象。如酸雨,大量的气溶胶、温室气体进入对流层后,经大尺度环流的动力效应,形成污染物的远距离输送和再扩散。研究表明,直径在 $1\mu\text{m}$ 左右的气溶胶粒子寿命最长。在对流层下部,稳定气溶胶粒子(直径在 $0.1 \sim 10\mu\text{m}$ 范围内)的寿命约为 1 个星期;在对流层上部,这一数字为 1 个月;在平流层中这部分粒子的寿命可达数年。在对流层下部直径大于 $10\mu\text{m}$ 和小于 $0.01\mu\text{m}$ 的粒子的寿命均小于 1d ^[2]。例如庐山云雾水中离子浓度和上风向污染源关系密切,其主要通过气溶胶的输送而影响云雾水成分^[3]。区域性及局地尺度污染传输最终也可扩散到城市周边地区,并远距离传输到其它相关区域,且由于城市周边地形的“山谷风”与其它局地环流的日变化,另外,城市尺度热岛效应可加剧城市内与郊区周边地区大气污染物扩散、混合等过程的相互影响效应。因此,在污染严重的大城市上空,城市边界层积聚着各种各样的排放气体,好像是污染物充满天幕的“大锅盖”,覆盖整个城市,甚至周边地区构成连成一片大范围城市群污染覆盖层结构。在大气风温湿特定条件下通常污染物以城市烟羽的形式被传播到下风方(Oke, 1982; Hanna 等, 1987),烟羽范围可以向下游输送数百公里远^{[4], [5]}。综合分析北京污染过程个例地面观测与卫星 TOMS 反演可吸收气溶胶指数高值区域逐日动态变化,可发现卫星反演气溶胶分布与天气系统动态演变的相关性,例如,2001 年 2 月 20 ~ 24 日北京一次重污染过程,当时北京处于西南气流之中,相对北京地区污染现场观测高值时段(图略),卫星 TOMS 反演气溶胶高值区自南缓慢北推,随后南压其气溶胶

指数高值区域北京及城郊周边地区呈连成一片的区域性特征。

城市“热岛”中尺度热力环流特征等现象亦对局地污染物动态分布的影响效应十分重要。城市局地尺度或微尺度(包括城市小区、街道尺度的街区污染源排放及汽车尾气等气体扩散与街道局地建筑物动力综合效应)与城市区域尺度之间动力、热力相互作用过程,对城市大气污染物的迁移、转化、扩散等各类影响效应是十分显著的。上述多尺度区域性污染特征改变了城市及“城市群”的经济圈形成的局地大气辐射分布特征及其热量平衡,影响了城市边界层及其经济圈的环境气候动力、热力结构时空变化。因此,城市大气多尺度动力学影响及其大气环境物理、化学反应过程均是解决城市环境问题的重要关键。

§ 1.2 城市建筑群及其周边地形影响效应

城市气象灾害主要有风灾、雾灾、雷电、局地暴雨等均与城市建筑动力效应相关,例如,城市建筑群“风洞”效应亦可形成街区局地强风异常。例如,特大火灾常与城市局地大风有关,特别是空气干燥时,城市局地大风更易诱发城市火灾,造成危害。所以,街道高层建筑动力效应及其街道尺度流场影响亦是研究城市污染扩散,甚至是风灾与火灾理论模型关键环节。因此,开发城市建筑群“数字风洞”研究是解决上述技术难点的途径与有效工具之一。

城市的最大特点是有高耸的建筑群落,大多数城市常常是依山或傍水。城市建筑群布局及其周边山体、水体或其它大地形对大气环境动力扩散影响效应是形成某些城市环境气候特征的重要背景。城市的出现和扩大,城市密集建筑群、街区道路纵横水泥路、高架桥等取代了自然地表,城市上空环流在楼群林立的环境中形成“树冠”动力效应。按照植物林冠来推论,屋顶和地面之间的边界层部分可以通称为城市冠层(Oke, 1987)^[6]。它使街区地表风场改变,建筑群及街道可导致湍流加强,也可形成显著的局地“狭管动力效应”,水泥路代替地表绿地形成城市“干岛”“热岛”环境,改变局地动力、热力结构及其特定的污染动力扩散条件。

城市周边大地形影响往往形成某些城市环境污染物扩散的“瓶颈”问题,例如兰州市地形与兰州市可持续发展及其环境影响问题亦是当地讨论城市发展的关键“热点”,北京市处于北面倚山,南部平原的“马蹄型”山谷地带。北京及城、郊周边地区在特定的气象条件下存在远、近距离污染物输送、扩散以及周边地形“山谷风”日变化等动力作用,其综合作用显然对北京地区的污染物城、郊“马蹄型”谷地内的“旋回”与“堆积”过程现象呈显著影响,北京市区域性污染问题与城市周边地形特征存在显著的相关影响。对于北京城市建筑群的发展,加之目前北京市多圈环型高速公路两边高楼林立的建筑布局,在不同的气象背景下,这些局地城市群结构影响亦是不可忽视的因素。图 1.1 表明,1959—1980 年为西北及偏南两类主导风向(黑色箭头),而近 10 年 1981—1998 年亦有变化,即转为偏北及偏西南两类主导风向(白色箭头)。由此可见,当地季节性盛行风(称高频风向)与郊区或周边工业排放源布局两因素的配置,加上城市周边及市区类似向南开口的“马蹄型”地形或建筑群复杂动力作用可能显著影响北京城区大气污染形成与分布。显然,上述地理、气候以及城市发展格局等诸多方面的影响,是否可能会导致北京地区污染“堆积”、“迁移”以及“减缓”的短期或持续影响效应?因此,对于城市周边的影响问题,我们需采用“点、面结合”的方法,将局地的大气化学与边界层动力特征观测与 MODIS、TOMS 等卫星遥感资料相结合,以便综合追踪分析城市环境污染周边影响效应。

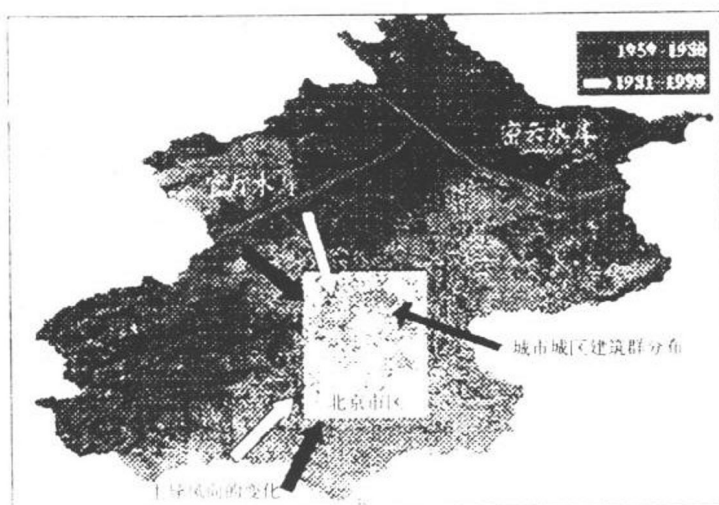


图 1.1 北京城市建筑群、周边大地形与主导风向的配置关系示意图

图内中心部位白色框内淡色阴影处为城市建筑群分布,图中深色阴影为卫星遥感北京周边山脉分布;黑色箭头为 1959—1980 年主导风向,白色箭头为 1981—1998 年主导风向

§ 1.3 城市下垫面及其陆面过程

大多数情况都是随着城市发展造成人为热源加剧。城市的发展使不渗水的水泥道路和建筑材料取代了天然的土壤与植被,改变地表与地下水径流,蒸发与空气湿度结构,地表反照率分布,并使热传导和热容量变大。这均形成了城市特殊的大气—土壤—水文动态平衡特征,地表辐射平衡以及能量、水分循环。在调节热量的绿地减少的同时,高速公路和高大建筑群增加,土地或植被被混凝土和沥青所覆盖,白天地面日照增温,夜里释放热量,而且日趋增多的汽车尾气排热,高层建筑群暖气或空调排出热能等,使大城市近地层的总体热量平衡状态发生显著变化,且城市下垫面热力结构亦具有很显著季节性准周期特征。观测分析表明百万或百万以上人口的城市最高气温相对市郊偏高程度与城市人口总数呈正相关关系(Oke, 1982; Katsoulis 和 Theoharatos, 1985)^[7]。城市居民、工业能源消费剧增,城市环境大气的动力、热力结构与乡间自然环境差异日益增大,城市原来人类生活的自然环境遭到破坏,形成了人类活动影响下的特殊局地气候特征,尤其造成城市局地“热岛”或“热岛群”特征,如图 1.2 所示。根据变分原理,卫星遥感反演数据与地面气温实测值的偏差场为 $CR(x, y)$,可通过变分订正因子场 $CR(x, y)$ 函数,构造泛函 J^* 满足如下趋于极小值条件:

$$J^* = \iint_D (CR - \bar{CR}) dx dy \rightarrow \min \quad (1.1)$$

$$\text{即: } J^* = \iint_D \left\{ (CR - \bar{CR})^2 + \lambda \left[\left(\frac{\partial CR}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial CR}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} dx dy \quad (1.2)$$

其中 λ 为约束系数,上式可写为

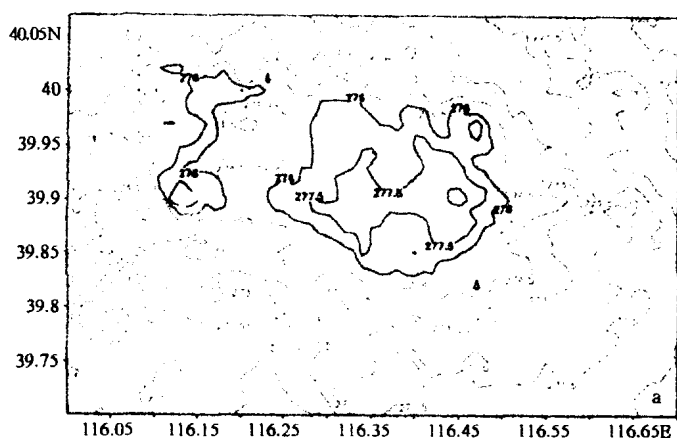
$$\delta J^* = \delta \sum \sum \left\{ (CR - \bar{CR})^2 + \lambda \left[\left(\frac{\partial CR}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial CR}{\partial y} \right)^2 \right] \right\} = 0 \quad (1.3)$$

其对应的 Euler 方程为

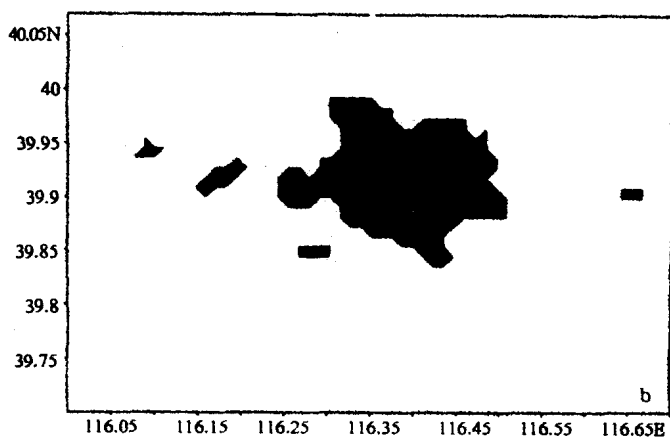
$$(CR - \bar{CR}) - \bar{\lambda} \left(\frac{\partial^2 CR}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 CR}{\partial y^2} \right) = 0 \quad (1.4)$$

其中 $\bar{\lambda}$ 亦为约束系数。

用迭代法求解上述 Euler 方程数值解,便可得到经变分订正的地面温度 $CR(x, y)$ 分布场。图 1.2(a)为采用卫星遥感资料,经北京地区自动气象站地面温度实测资料变分订正求取的地面气温“热岛”分布与 MM5 模式计算的城区水泥(楼层顶及路面)地表特征分布图(1.2b),比较图 1.2a 与 1.2b 两种方法的结果十分类似。因此,研究城市化下垫面及陆面过程特征及陆面影响问题,需从城市人类活动影响区域热量平衡失稳特征及其城市多类“动态”与“准静态”热源非线性或准周期性变化时空分布着手,探讨其影响规律及其动力、热力成因,建立城市环境气象动力学模型。



(a)



(b)

图 1.2(a) 1999 年 12 月 9 日 04:00 采用北京气象自动站及卫星资料变分处理的地面温度城市热岛分布; 图 1.2(b) 北京市及周边区域地表特征分布图(a 阴影为地面温度相对高值中心;b 中部阴影区为城区主体水泥下垫面特征区)

§ 1.4 城市大气边界层模型

1952年12月5~9日,英国伦敦上空连续烟雾弥漫,造成震惊世界的烟雾事件,使四千人死亡,主要原因之一是当时地面无风,城市近地层形成特殊持续的城市逆温层,致使城市边界层污染物不易扩散,引发严重污染中毒事件。当前,在气象研究领域城市边界层的结构特征及其城市局地环流问题越来越引起广大学者的关注。但由于城市下垫面及各种排放源过程的复杂性、城市观测手段的限制,人们对于城市内部的边界条件、初始条件以及各种物理过程的参数化仍缺乏足够的认识,还需要我们作大量的工作。城市经济的快速发展和城市建设的日新月异,使城市边界层研究更具有重要性和长期性。

城市大气边界层是近代气象学的重要课题之一,也是城市环境污染原理的基础。虽然边界层控制方程组也遵循质量、动量、能量、水物质守恒以及其它气体或气溶胶等物质守恒。城市边界层下垫面陆面特征异常,即城市水泥道路、建筑群顶下垫面的感热、潜热输送及其能量、水分循环特征均与自然状况存在很大差异。在市区中,由于建筑群和街道的巨大热容量,以及运输所释放的热量和空间加热作用,致使混合层热力结构呈显著的日变化特征,即混合层会整夜持续。黄昏前市内观测不到近郊出现的那种浅稳定边界层;黄昏后,当近郊稳定层比城市建筑群影响高度深厚时,虽然市内空气浅层可以保持完全混合状态,但它已被稳定层所覆盖(Godowitch等,1985)^[8]。城市边界层逆温层类似“大锅盖”效应条件下,大气由于局地“热岛效应”可形成城市相对低压以及由郊区指向市中心辐合流,形成城市边界层热岛垂直环流。这种“热岛强迫环流”具有中尺度系统特征。若多个发展城市相对集中,可能还会构成相对强度不同的多个中尺度热岛强迫环流;随着城市发展下垫面湍流、热力结构变化及其城市周边环型路两侧建筑群(北京三环、二环路等)“闭合筒壁”效应,有可能使城市边界层结构及其污染物分布特征越来越复杂,构成了城区“空气穹隆”动力结构综合物理图像(图1.3所示)。由于城市化下垫面陆面、水体、植被结构改变及建筑群流体动力特征,尤其城市建筑群的总体“树冠”效应,

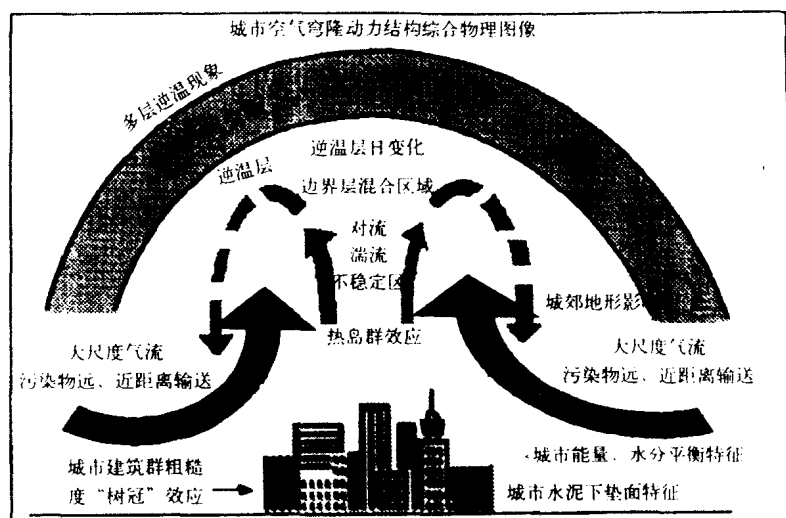


图 1.3 城区空气穹隆动力结构综合示意图

显著地改变了城市下垫面的粗糙度 Z_0 , 城市热岛形成的特殊热力下垫面、粗糙度及“树冠”效应特征, 可导致城市局地多尺度环流和湍流结构的特殊性和局地性, 强对流泡及其热力、机械

湍流过程及城市大气环境的多尺度与陆面过程特殊性使城市边界层动力、热力结构极为复杂。

上述问题的研究是解决城市区域大气数值预报模式及其治理原理基础理论的重点环节。城市大气环境模式中如何进行参数化设计以描述城市边界层及复杂的陆面过程? 如何设计城市大气动力—物理—化学过程耦合模式? 如何嵌套大尺度、中尺度区域以及街道区域模式? 这些均构成城市环境污染预报数值模式设计中的技术难点与关键科学问题。城市污染控制方案对城市进行功能分区, 限定大气污染物在各功能区的排放总量, 是对大气污染进行控制的一个有效方法。目前尽管有许多模式可以应用, 但是一般各模式都有各自对应的特殊对象。例如 Pandolfo 等^[9]早在 70 年代初就使用三维边界层动力学、热力学和扩散预报方程来模拟和预报城市大气的污染状态。为此, 近年来中尺度气象和边界层数值预报模式配合烟团扩散、随机扩散过程和化学过程组成的大气污染预测模型被广泛用于城市大气环境污染预测与调控方案的业务与研究^[10]。如加拿大 MC2—CSLGRID 模式系统^[11], 德国 EURAD 大气污染预报系统^[12], 挪威 NO_x 、 O_3 的光化学模式等^[13], 考虑了大气动力中尺度过程、光化学过程以及污染物的扩散传输、干湿沉降和化学反应方程式。中国气象科学研究院建立了非静稳多箱格大气污染浓度预报和潜势预报系统 CAPPS^[14], 该模式可在无污染源强资料的条件下预报城市空气污染潜势指数和污染指数。其中 CAPPS 模式系统的气象背景部分由改进后的 MOMS(中国气象科学研究院中尺度业务试验数值模式系统)^{[15]、[16]}提供。CAPPS 系统目前已在全国 47 个污染预报重点城市及部分专区气象台实施业务服务。在国家“八五”与“九五”自然科学基金委员会研究项目“长江三角洲低层大气物理化学过程及其与生态系统相互作用”等研究工作基础上, 中国气象科学研究院大气—化学—陆面过程耦合细网格, 多层嵌套模式已在长江三角洲气候—环境—生态的试验及“973”北京及周边地区大气、水、土环境污染机理与调控原理研究项目研究中取得成功试验及其模拟效果^{[17]、[18]}。

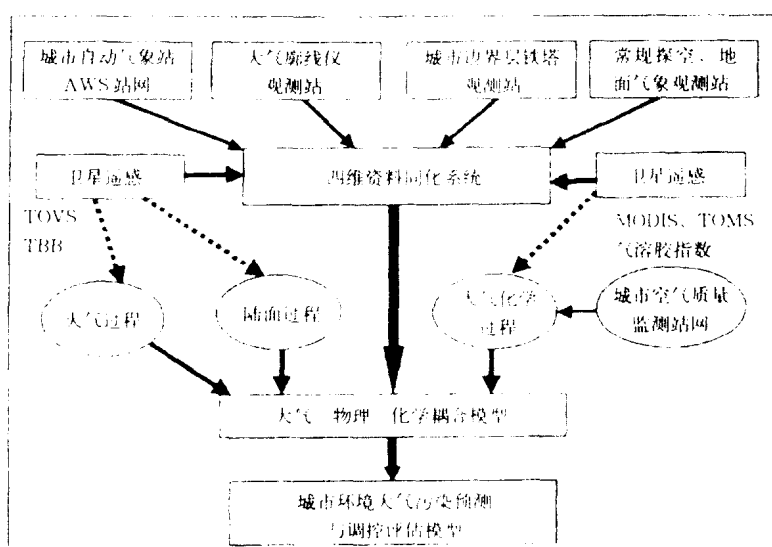


图 1.4 城市大气环境预测系统框架

对于上述各类城市环境污染数值模式总体设计思路需考虑城市大气环境多尺度特征, 陆面过程、边界层动力、热力及其相互作用的复杂结构, 包括城市“热岛”、建筑群粗糙度“树冠”效应, 以及城市特殊下垫面能量、水平平衡, 湍流混合结构等, 并需深入了解城市动力—物理—化学过程耦合作用, 包括在城市大气动力过程的背景下, 城市边界层污染物的扩散、传输、迁移以