

中国东部城市群的天 气气候效应及其影响机理

钟时 万弘超 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国东部城市群的天 气气候效应及其影响机理

钟时 万弘超 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

城市化所引起的天气气候变化,尤其是区域性气候变化,是目前备受国内外关注的研究课题,城市化对降水的影响则是该领域的热点及难点。本书以我国的主要城市群为研究对象,通过开展数值模拟试验研究了城市化效应对城市及其周边地区天气和气候特征的影响,尤其是对夏季强降水天气的影响,对其物理机制进行了深入探究,并且比较了城市化带来的土地利用/土地覆盖变化和大气污染影响天气气候变化的相对贡献,最后还研究了城市化效应对东亚夏季风气候特征的影响,并从低频振荡的角度对其形成机理进行探讨。

本书可供城市化气候效应、陆-气相互作用、数值模拟等领域的科技工作者、工程技术人员参考,也可供相关专业的高年级学生、研究生和教师阅读。

图书在版编目(CIP)数据

中国东部城市群的天气气候效应及其影响机理 / 钟时, 万弘超著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2018. 12

ISBN 978-7-5170-7263-8

I. ①中… II. ①钟… ②万… III. ①城市群—城市气候—气候变化—研究—中国 IV. ①P463.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第298009号

审图号: GS (2018) 5785 号

书 名	中国东部城市群的天气气候效应及其影响机理 ZHONGGUO DONGBU CHENGSHIQUN DE TIANQI QIHOU XIAOYING JI QI YINGXIANG JILI
作 者	钟 时 万弘超 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	清淞永业(天津)印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.5印张 225千字
版 次	2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

联合国政府间气候变化专门委员会第五次科学评估报告指出,人类活动造成了地气系统辐射强迫改变,显著地影响了 20 世纪以来的全球气候。城市化对天气和气候变化产生了重要影响。一方面,城市化造成的土地利用/土地覆盖的变化不仅会产生显著的城市热岛效应,还会改变城市及其周边地区的降水分布,并影响对流系统的形成和发展;另一方面,城市的工业污染、汽车尾气排放产生的气溶胶粒子同样会影响城市及其周边地区的天气气候和水循环。一些氧化性气体(如臭氧)和细颗粒物(如硫酸盐、硝酸盐、黑碳等)可以影响辐射传输过程,改变大气边界层的结构,以及边界层与自由大气的物质和能量交换(直接效应);也可以充当云凝结核改变云的物理和辐射特征,从而影响城市及其周边地区的降水(间接效应)。目前,城市化所引起的天气气候变化,尤其是区域性气候变化,日趋成为 21 世纪备受国内外关注的研究课题,其中城市化对降水的影响则是城市化效应的热点问题。

我国东部地区土地利用快速扩张、能源消耗高度集中,已成为世界上城市化进程最为迅速的地区,形成了以京津冀、长三角、珠三角为代表的三个特大城市群。大规模城市化进程伴随的土地利用/土地覆盖变化和大气污染已给我国经济社会发展带来了巨大的环境压力。而中国东部地区位于全球最为活跃的东亚季风区,是全球气候脆弱区之一,近年来强降水等极端天气气候事件时有发生,给城市带来了巨大的物质和财产损失。本书主要通过开展数值模拟试验,研究了我国东部地区城市化效应对天气气候的影响机理,比较了城市土地类型改变和气溶胶浓度增加对温度、短期强降水以及极端降水概率的影响。城市热岛效应造成城市夏季平均温度增加了 1.49°C ,热浪天数平均每年增加 3.7d。气溶胶浓度增加吸收太阳辐射,对近地面温度起到降温作用,但是与城市热岛效应相比,降温幅度较小。受城市群影响,强降水系统推迟发展,但是降水强度更强,这是由于城市表现为干暖中心,不利于水汽输送,推迟了强降水的形成和发展。城市热岛效应导致地面温度增加,粗糙度增大,有利于地表辐合并造成午后极端降水增多。而气溶胶浓度增加吸收了更多的太阳辐射,使得大气增温而地面降温,导致大气稳定度增强,最终

导致城区以及下风向地区极端降水概率减小。

本书共分为6章。第1章论述了城市化对天气气候变化的影响在国内外的研究进展以及开展该领域研究的方法；第2章和第3章分别以我国京津冀和长三角地区为例，详细介绍了我国主要城市群的城市化效应对夏季强降水的影响；第4章比较了城市化所造成的土地利用变化和人为气溶胶对城市夏季强降水的影响；第5章主要介绍了长三角城市群的气候效应及其形成机制；第6章介绍了中国东部城市群的气候效应，并重点分析了其对降水的影响。

在本书的编写过程中，参考了大量的国内外文献，资料十分庞杂，疏漏之处在所难免，在此向所有的文献作者表示由衷的感谢。由于作者水平有限，书中难免存在诸多不完美之处，恳请读者批评指正。



目录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 城市化对天气气候变化的影响	1
1.2 城市化对降水的影响机制	8
1.3 我国主要城市群影响降水的观测与模拟研究	10
1.4 资料、模式、研究方法	11
第 2 章 京津冀城市群对夏季强降水的影响	16
2.1 试验设计	16
2.2 模式验证	17
2.3 城市化对短期强降水过程的影响	27
第 3 章 长三角地区城市群对夏季强降水的影响	38
3.1 个例选取及天气背景	38
3.2 试验设计	39
3.3 模式验证	40
3.4 城市化对短期强降水过程的影响	52
第 4 章 土地利用变化和人为气溶胶对城市夏季强降水的影响	72
4.1 试验设计	72
4.2 模式验证	73
4.3 土地利用的改变与气溶胶浓度增加对降水的影响	76
4.4 气溶胶直接/间接效应对降水的影响及其机制	78
第 5 章 长三角城市群的气候效应及其形成机制	82
5.1 试验设计	82
5.2 模式验证	84
5.3 城市化对温度和辐射的影响	84
5.4 城市化对夏季降水的影响	86
第 6 章 中国东部城市群的气候效应	95
6.1 试验设计	95
6.2 模式验证	96
6.3 中国东部城市群对降水的影响	109
参考文献	138



绪 论

1.1 城市化对天气气候变化的影响

城市化是人类活动引起地表特征显著变化的现象，其对天气和气候变化也产生了重要影响。联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）第五次科学评估报告认为，人类活动通过造成地气系统辐射强迫改变已经显著地影响了 20 世纪以来的全球气候。自工业化以来，温室气体的大量排放增强了温室效应，成为全球变暖的重要原因。人类活动引起的土地利用/土地覆盖变化（Land - Use and Land - Cover Change, LUCC）的极端表现就是城市化。城市化是土地利用/土地覆盖变化最显著、最为持久的形式之一，它可以影响局地 and 区域天气气候，甚至大尺度的大气环流。此外，城市不仅仅是热源，同时也是气溶胶源。仅就气溶胶而言，无论是直接还是间接效应，都会通过辐射效应影响局地城市微气候，甚至全球气候。城市化所引起的天气气候变化，尤其是区域性气候变化，日趋成为 21 世纪备受国内外关注的研究课题，其中城市化对降水的影响则是城市化效应的热点问题。

1.1.1 城市热岛效应

城市带来的土地利用/土地覆盖的变化，改变了下垫面的热力性质和三维结构：反照率的减小减少了向外反射或散射的短波和长波辐射，增加了大气对太阳短波辐射和地面长波辐射的吸收；高大的建筑物阻挡了天空视域，增加了到达地面的太阳辐射（拦截效应）；城市的人为热源所释放的热量增加了大气温度。以上这些因素会导致城市的温度高于乡村地区，产生城市热岛（Urban Heat Island, UHI）效应。城市热岛被广泛地认同为城市气候变化最重要的表现。Howard 于 1833 年观测到伦敦市的温度比周围郊区高，温差最大可达 3.7°F 。Manley 于 1958 年首次提出城市热岛的概念。Oke (1982) 对城市热岛的动力基础以及城市热岛与城市面积的关系进行了较为全面的总结，结果发现 UHI 的强度与城市的大小成正比，并且在日落之后更加明显。但是由于白天城郊的气压梯度大、垂直混合强，UHI 环流在白天比夜间更加明显，这就使得城市导致的对流运动不是简单的夜间和凌晨现象。此外，城市热岛的强度存在日变化和季节变化，并且受到云量和风速的影响。



响,研究表明 UHI 在晴朗无云的夜间至凌晨最为明显。

我国关于城市热岛效应的研究始于 20 世纪 80 年代。一些学者对上海、广州和北京等地都组织了规模较大的城、郊温度对比观测和研究,得到了诸多结果。周明煜等(1980)就北京地区热岛和热岛环流特征开展了分析研究。曾侠等(2004)在对珠江三角洲(以下简称珠三角)城市群热岛效应开展研究后指出,珠三角地区年平均热岛强度由 1983 年前的 0.1°C 上升到 1993 年的 0.5°C 。林学椿等(2005)利用北京地区 20 个气象站近 40 年的年平均温度资料,研究了北京城市热岛效应。结果表明,近半个世纪以来,随着北京城市化进程的不断加快,城市热岛强度也在不断加强,两者关系密切(相关系数超过 99% 置信度水平)。车惠正等(2006)对过去 50 年西安市气候观测数据进行统计分析,结果表明,过去 50 年西安城市热岛效应显著。朱家其等(2006)利用上海 13 个城区自动气象站和 10 个郊区气象站常规观测资料,对比分析了上海的城市热岛特征。结果表明,该市热岛存在明显的长期变化趋势,夏季 7 月的多年线性上升趋势超过 $0.05^{\circ}\text{C}/\text{a}$,且仍有继续增强的趋势。任春艳等(2006)对比分析我国西北地区省会城市气象站及各城市周边 3~4 个参照站 1960—2001 年的气象资料后指出,我国西北地区大城市均存在显著的热岛效应。阮蔚琳等(2006)利用气象站 1959—2003 年的逐日平均温度和日最高、最低温度资料,研究了无锡城市热岛效应。结果表明,城市化导致无锡热岛现象显著,该地区过去 45 年温度线性增暖趋势为 $0.25^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。李兴荣等(2007)采用北京地区 20 个常规地面气象站、2 个自动气象站和中国科学院大气物理研究所 325m 气象铁塔资料,对北京地区 2003 年 7 月热岛状况进行了统计分析,发现北京夏季夜间存在强热岛效应。此外,他们还应用 MM5 模式对热岛进行了初步的数值模拟研究,结果表明,城市人为热和热存储在夏季强热岛的形成中具有重要作用。李书严等(2008)利用北京地区 20 个气象站 1970—2005 年的观测资料,对北京城市热岛效应进行了分析。结果表明,36 年来北京地区热岛效应呈现出强度逐渐增强、面积逐渐增大、由单一向多个热岛中心演变的发展趋势。郑思轶和刘树华(2008)利用北京 13 个台站 1961—2000 年的气候观测资料对该地区热岛效应进行了分析。结果表明,尽管过去 40 年北京城区和郊区的年平均温度都呈明显上升趋势,但城区比郊区上升幅度快,热岛强度不断增强。曹爱丽等(2008)根据上海地区 2 个气象站近 50 年的温度观测数据研究了上海地区的城市热岛。结果表明,近 50 年上海城郊温差增温率为 $0.23^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。崔林丽等(2008)采用长江三角洲(以下简称长三角)地区国家基本/基准站历史温度资料,分析了城市化效应对温度的增温贡献率。结果表明,城市化效应对大城市平均最低温度的增温贡献率最大,而对平均最高温度的增温贡献率最小。

总体而言,目前研究城市热岛效应的方法主要有以下四种:①通过比较城市和郊区气象站的观测资料研究城市热岛效应,简称 UMR 方法。这类研究多见于 20 世纪八九十年代。研究主要采用气象站常规观测资料,系统性较好,但城区站点分布太少,不能研究城市热岛的空间分布状况,且观测时间间隔较长,时间分辨率不高;②通过比较气象站观测记录与再分析资料研究城市热岛效应,简称 OMR 方法;③采用卫星遥感数据和航空遥感数据资料,结合地面实测资料,研究城市热岛;④通过数值模拟的方法研究城市热岛。

20 世纪 90 年代, Jones 等(1990)对比城市气象站和临近的乡村气象站的观测记录,研究了城市化对温度变化趋势的影响。随后, UMR 方法被广泛应用于研究城市化对温度



变化趋势的影响。大体而言,人们主要采用人口数据或卫星测量的夜间灯光数据来划分城市气象站和乡村气象站。但是, Saaroni 和 Ziv (2010) 指出,采用城市站及其邻近的乡村站温差来研究城市热岛效应,由于受到地形、水体、城市下风效应以及乡村站自身属性特征的时空变化影响而存在缺陷。因此,他们基于城乡温差与城市人口间的线性关系,提出了一种用于估计缺少城市化前的观测资料、具有复杂地形地区的城市热岛效应计算方法。Portman (1993) 的研究结果表明,城市热岛会对温度变化趋势产生显著影响。Hua 等 (2008) 对中国地区 191 对气象站采用 UMR 方法,研究了城市化效应对温度变化的影响。他们的结果表明,1961—2000 年,大城市的城市热岛效应可达 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,中等城市和小城镇为 $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。Velazquez-Lozada 等 (2006) 采用 UMR 方法得出的结论是美国圣胡安地区热岛明显,过去 40 年该地区温度平均每年上升 0.06°C 。Ren 等 (2008) 指出,过去的 20 年见证了北京、天津和武汉地区受热岛效应影响而产生的最为显著的升温现象。通过对 322 个国家气象站和常规气象站的分析,唐国利等 (2008) 发现,中国西南部地区城市热岛对总体温度变化的影响相对较大,1961—2004 年大中型城市温度上升速率可达 $0.086^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。Zhang 等 (2010) 对比城乡气象站观测,分析了上海城市热岛的时空特征。结果表明,上海城市热岛强度年增长显著。他们还指出,在盛行天气条件下,该地区秋季热岛最强,夏季最弱。Du 等 (2007) 借助 DMSP/OLS (Defense Meteorological Satellite Program Operational Linescan System) 夜间灯光数据分辨出长三角地区位于大城市和非大城市的气象站,对其观测结果采用 UMR 方法进行分析。结果表明,1961—2005 年该地区城市热岛贡献为 $0.069^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,且热岛效应与长三角地区大城市的快速发展密切相关。

2003 年, Kalnay 和 Cai (2003) 提出用气象站观测记录与 NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research) 再分析资料之差 (OMR 方法) 研究城市化效应对温度变化的影响。他们指出, OMR 方法的实质在于再分析资料中没有同化地表温度、湿度和陆地风的观测,其地表温度是通过大气值估计出来的。因此,再分析资料对陆地地表特征以及该特征的变化不敏感。基于这一事实,使得城市热岛效应可以通过 OMR 方法得到。此后, OMR 方法得到广泛应用和发展。Zhou 等 (2004) 采用 OMR 方法,发现中国东南部地区 1979—1998 年由城市化效应所导致的温度上升率可达 $0.05^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。采用类似数据和方法, Zhang 等 (2005) 评估了中国地区城市化效应对温度变化趋势的影响。他们得到的结果是:1960—1999 年该地区由城市化和土地利用改变所引起的平均温度、最高温度和最低温度的变化率分别为 $0.12^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.03^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。Lim 等 (2005) 将关注区域扩展到北半球,采用 OMR 方法研究温度变化对土地类型的敏感度。其结果表明,城市和沙漠地区 OMR 趋势最强。Kalnay 等 (2006) 对其 2003 年的 OMR 方法进行了改正和延伸,即将 1979 年加入有卫星观测资料的年份,并同时剔除了美国西海岸的站点观测。他们的结果证明,采用 OMR 方法得到的结果与由 UMR 得到的结果一致。Yang 等 (2009) 计算观测到的地表温度与 ERA-40 再分析资料的差,得出城市区域 1960—1999 年增温率高达 $0.14^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 的结论。Fall 等 (2010) 使用对 NCEP/NCAR 改进后的再分析资料 NCEP/DOE,同样采用 OMR 方法研究美国地区地表温度变化趋势对土地利用变化的敏感度。他们的结果也表明,土地



利用/土地覆盖类型是地表温度变化强有力的促发原因。土地类型转变为城市的地区表现出正(暖)的 OMR 趋势,而土地类型转变为农田的地区表现出负(冷)的 OMR 趋势。Hu 等(2010)采用 OMR 方法研究了中国东部地区 1979—2008 年地表强迫效应对极端温度的影响。他们指出,地表变化效应可以部分解释暖夜温度上升现象和冷夜温度下降现象。孙敏等(2011)采用 1979—2003 年气象站观测与再分析资料的差值研究了中国东部地区城市化对区域温度气候趋势的贡献。诊断结果表明,夏季是城市化对区域温度气候趋势贡献最大的季节。不难发现,在上述研究中,不同学者得到的城市化对温度变化趋势的贡献也各不相同,这主要是由于研究所采用的站点密度、城乡气象站的划分标准、分析方法、研究时段和关注区域不同造成的。为了尽量避免误差产生, Yang 等(2011)综合利用 DMSP/OLS 夜间灯光数据、人口数据和 GIS 地理信息技术,提出了一种动态划分城市气象站和乡村气象站的客观方法,同时采用 UMR 方法和 OMR 方法,研究了城市热岛效应对中国东部地区 1981—2007 年温度变化的影响。结果表明,采用 UMR 方法和 OMR 方法得到的结果较为一致,快速的城市化对中国东部地区增温影响显著:城市热岛效应贡献了区域平均增温趋势的 24.2%,城市化对大都市和大城市气象站温度上升贡献率更是分别高达 44%和 35%,热岛趋势分别为 $0.398^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 和 $0.260^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。司鹏等(2009)也综合采用 OMR 方法和 UMR 方法研究城市化对北京温度变化的贡献。结果表明,采用 OMR 方法得到的城市化对温度增加贡献率达到 73.5%,而采用 UMR 方法得到的热岛效应贡献率仅为 34.4%。

随着现代计算机技术、空间技术和卫星遥感技术的迅速发展,使得遥感图像具有容易获取、范围广、数据量丰富等优势。因此,综合利用卫星和遥感资料获取较为准确的土地覆盖和土地利用信息,为城市热岛研究提供了基础。早在 20 世纪 70 年代,科学家便已将卫星遥感观测数据应用于城市热岛的研究中。Roth 等(1989)利用遥感红外数据对美国加州 3 个沿海城市的城市热岛进行了分析,并讨论了遥感红外数据在研究城市热岛时的参数设定和局限性等问题。Gallo 等(1995)总结了采用卫星资料研究城市热岛的步骤。丁金才等(2002)根据 1997—1998 年 7—8 月高温加密观测资料和卫星遥感资料,详细讨论并定量估计了上海城市化对热岛范围和强度的影响。结果表明,风向是影响上海地区热岛范围和强度变化最主要的气象因子。Voogt 和 Oke(2003)以城市热岛效应研究和对 Roth 等提出的问题所开展的相关研究进展为重点,回顾了热遥感在城市热岛研究中的应用。Hung 等(2006)将位于温带气候区和热带气候区的亚洲 18 个大城市作为研究对象,采用从 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 遥感数据中提取的 2001—2003 年地表温度数据研究上述大城市的城市热岛日周期和季节变化,并采用高斯估计定量比较了城市热岛的空间范围和强度。为了揭示城市热岛与地表特性之间的关系,他们还从 Landsat ETM+数据中提取城市植被覆盖和地表能通量信息,以分析城市热岛类型。他们对亚洲地区的城市热岛现象提供了一个总体的描述,其研究结果对融合卫星高分辨率数据、陆面模式以及中尺度气候模式,理解亚洲城市化对局地气候的影响提供了很好的指导作用。彭静等(2007)利用陆地卫星影像分析了北京市规划区 1987—2005 年间地表城市热岛的特征。结果表明,不同土地利用/土地覆盖类型与地表城市热岛有密切关系,城市化过程是城市热岛面积不断增加的主要原因。谢志清等(2007)利用 DMSP/OLS 夜间



灯光数据、土地利用统计数据和气象站常规观测资料,结合卫星反演的月地表温度数据,定量考察了长三角城市群热岛增温效应对区域温度气候趋势的贡献。他们指出,城市热岛效应对区域平均温度的影响夏秋季最强,春季次之,冬季最弱。城市的增温效应使得区域的年平均温度在1961—2005年间增温幅度达到 0.072°C ,年最高温度升高了 0.162°C 。

尽管资料诊断分析是研究城市化气候效应的一种常用手段,但是这种方法存在较大的局限性。而数值模拟能够通过试验探究城市环境影响天气气候过程的物理机制,因此,数值模式成为研究城市化效应的另一种重要手段。较早提出的城市热岛模式多为一维的地表能量平衡模式,如早期的 Myrup (1969) 就应用此类模式对城市热岛现象开展了研究。结果表明,城市地表水分的缺失以及城市较大的热惯量是导致城市热岛发展的重要因子。Oke 等 (1991) 利用一个简单的能量平衡模型对夜间的城市热岛效应做了理想化的模拟并提出了城市热岛的诊断方法和形成原因。但由于此类模式没有考虑平流的作用,更没有考虑城市冠层中如建筑物几何特征的影响等,很难再现城市热岛出现于夜间的观测事实。Bornstein (1975) 利用一个二维(垂直平面)城市边界层模式 URBMET 研究了不同类型城市的热岛效应,分别探讨了粗糙的城市、温暖的城市、粗糙和温暖的城市三种城市类型对环境流场的影响。第一个用于研究城市效应问题的三维模式由 Vukovich 等 (1976) 提出,他们应用所发展的原始方程静力学模式,研究了城市对环境流场的影响。尽管如此,他们对城市热岛的发展演变问题仍没有进行深入研究。之后的三维模式在城市效应问题研究中的应用越来越广泛。Schayes 等 (1996) 改进了 Bornstein 的 URBMET 模式并将其发展成考虑了地形影响的三维模式 URBMET/TVM。随着高分辨率中尺度数值模式的发展,国内外不少学者开始采用中尺度数值模式研究城市热岛效应问题,并取得了不少的研究成果。Tang 和 Miao (1998) 采用中尺度数值模式就长三角地区城市热岛效应开展了研究。杨玉华等 (2003) 采用非静力平衡的 MM5 中尺度模式对北京地区热岛进行了数值模拟。结果表明,考虑了日周期变化的人为热源作用后,模拟的热岛日变化与实况更接近。Kusaka 和 Kimura (2004) 采用耦合了单层城市冠层模式的简单二维大气模式开展了城市热岛效应的数值模拟研究,其结果证实了夜间城市和城市周边地区由于大气稳定性的差异会产生明显的热岛现象。他们还指出,造成城乡大气稳定度差异的原因是由于人为热以及城市冠层结构。刘洪利等 (2005) 在 MM5 的基础上,结合长三角地区的地域特色,发展了一个适用于该地区的非静力高分辨率区域气候模式,并就长三角地区地表特征改变对气候的影响开展了数值模拟研究。结果表明,大城市群的扩展导致城市热岛环流显著,地表温度全年增高,且增温效应以大城市群为中心向四周较为均匀地扩散。林炳怀和杨大文 (2007) 采用 MM5 模式探讨了北京城市热岛的形成机理。结果表明,城市化改变了感热和潜热的分配,从而导致城市近地温度升高,这是热岛形成的主要原因。Lo 等 (2007) 采用 MM5 模式研究城市化以及与之相关的城市热岛对珠三角局地和区域尺度环流的影响。结果表明,采用精确的城市土地利用数据和合适的城市土地利用参数化方案对于采用中尺度模式捕捉珠三角地区城市热岛效应的主要特征具有重要意义。Zhang 等 (2008) 采用非静力模式 RAMS 研究了重庆地区的城市热岛效应。数值模拟结果表明,在 RAMS 模式中耦合单层城市冠层模型,能够明显地改进对该地区城市热岛的模拟。Lin 等 (2008) 采用耦合了 Noah 陆面模式 (LSM) 和城市冠层模式 (UCM) 的 WRF 模式来评估台湾岛



北部城市化的影响及其城市热岛效应。他们指出, WRF/Noah/UCM 耦合模式能够显著地改进对城市热岛效应的模拟。此外, 城市热岛效应增强了昼间的海风, 削弱了夜间的陆风, 从而对空气污染扩散产生了显著的影响。Bounoua 等 (2009) 采用陆面模式评估了半干旱地区的城市化效应, 结果表明, 城市化热岛效应在半干旱地区并不显著。Wang 等 (2009) 数值研究结果表明, 城市化导致白天和夜间近地表温度分别上升了 0.6°C 和 1.4°C 左右, 说明夜间热岛现象更为显著。Zhang 等 (2010) 采用 WRF 模式研究后得出长三角地区城市化后的区域平均地表温度冬季平均上升 $(0.45 \pm 0.43)^{\circ}\text{C}$, 夏季平均上升 $(1.9 \pm 0.55)^{\circ}\text{C}$ 的结论。李欣等 (2011) 利用高分辨率数值模拟手段对长三角特大城市群的夏季气候效应进行了研究。张璐等 (2011) 采用耦合了单层城市冠层模型的 WRF 模式对长三角地区城市群进行了 5 个夏季 (2003—2007 年) 的高分辨率数值模拟, 研究了夏季长三角地区城市群热岛效应及其对大气边界层的影响。Zhang 等 (2009) 采用 WRF 模式研究了美国巴尔的摩地区城市化对城市热岛效应的影响。结果表明, 上游城市化加剧了城市热岛效应。他们还指出, 热岛环流呈现出向下游的平流输送。

1.1.2 城市降水

早在 1921 年, Horton 就强调, 大城市比乡村环境更容易发生雷暴。Lansberg 在 1956 年的研究以及 Atkinson 在 1968 年的工作也证实, 城市化对降水类型有显著影响。一些学者也发现主要城市下风区暖季降水增加 (9%~17%) 的证据 (Changnon, 1979)。早期观测结果还表明, 圣路易斯市及其下风区 50~75km 处降水呈现出背景值 5%~25% 的增加趋势 (Huff and Vogel, 1978)。美国于 20 世纪 70 年代开展了大城市气象观测试验 (METROMEX), 其目的是进一步研究大城市对中尺度和对流降水的影响。总体而言, METROMEX 的结果表明, 城市效应导致夏季月降水增加。Jauregui 和 Romale (1996) 分析历史记录发现, 随着墨西哥市的发展, 强阵雨频率近几十年呈现出增加趋势。Bornstein 和 Lin (2000) 采用观测数据研究亚特兰大地区城市热岛和对流雷暴触发的关系。他们指出, 城市热岛效应导致的辐合可以解释 1996 年观测到的几个雷暴的形成。Orville 等 (2001) 分析了休斯敦 1989—2000 年的闪电数据, 结果表明, 最高的年闪电发生频数和夏季发生频数均出现在城区及其下风区。Changnon 和 Westcott (2002) 发现了近几十年城市地区暴雨增加的证据。他们同时指出, 暴雨的强度和频率在将来会继续呈现增加趋势。Fujibe (2003) 将日本城市地区 (如东京) 的对流活动增强与地表辐合增强相联系。Inoue 和 Kimura (2004) 依据 NOAA 卫星图像, 得出日本东京大都市区午后低层云频数呈增加趋势的结论。他们还指出, 这可能与城市地区的感热通量较高有关。2002 年, Shepherd 等 (2002) 首次尝试采用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 卫星降水数据研究亚特兰大、蒙哥马利、纳什维尔、圣安东尼奥和达拉斯 5 个城市的暖季降水。结果表明, 城市及其下风区 30~60km 范围内月平均降水增加分别达到 28% 和 5.6%, 这与 METROMEX 的结果相一致。他们在总结中指出, 采用卫星降水估计研究城市长时间大尺度降水的影响是可行的。此后, Shepherd 和 Burian (2003) 采用 TRMM 卫星降水资料和地基雨量站观测资料对休斯敦降水异常开展了定量研究。定量结果揭示了休斯敦及其下风区存在全年和暖季降水异常, 并且观测到的降水异常与城市热岛效应影响密



切相关。2004 年, Shepherd 等 (2004) 开展 SPRAWL (Studies of Precipitation Anomalies from Widespread Urban Land Use) 试验, 旨在建立城市触发的雷暴以及相应的中尺度和天气尺度条件数据库。Burian 和 Shepher (2005) 采用从密集的雨量表网搜集的数据进行统计分析, 发现随着休斯敦城市的发展, 降水发生百分率显著增加, 降水日周期变化也从城市化前时期向城市化后时期移动。Kishtawal 等 (2010) 认为, 研究城市化对降水的影响, 多集中于局地区域, 缺少大尺度的评估。因此, 他们通过分析现场和卫星观测降水数据以及人口数据评估了城市化效应对印度夏季风强降水的影响。结果表明, 受城市化影响, 季风期强降水发生频率呈现出显著的增加趋势。采用类似方法, Mitra 等 (2012) 研究了城市化对印度季风前期 (3—5 月) 降水的影响。Mann-Kendall 统计检验结果表明, 印度东部大城市气象站及其附近下风区气象站过去 50 年季风前期降水增加趋势显著。基于对美国东南部 1997—2006 年的雷达反射率和闪电数据的分析, Ashley 等 (2012) 证实了城市对雷暴频数和强度的正效应。Niyogi 等 (2011) 和 Coquillat 等 (2013) 通过研究也得出城市下风区雷暴频数增加的结论。

尽管不断有新的研究表明城市化效应对城市及其下风区的降水变化起着增强的作用, 仍有一些研究给出了不同的结果。Tayanç 等 (1997) 对土耳其的四个大城市进行研究后没有找到城市对降水产生影响的证据。Rosenfeld (2000) 观测到城市地区工业气溶胶通过提供高浓度的小型云凝结核, 对雨雪形成起到抑制作用。他进一步解释, 云必须发展到一定厚度, 并且达到适合的云顶温度, 才能促发降水。这种要求意味着当气溶胶融入相对较薄、生命期较短的云中, 便会对降水产生抑制作用。Borys 等 (2000) 也提供了城市污染会抑制降水的证据。Ramanathan 等 (2001) 认为城市区降水由于受云微物理作用而减少。Robaa (2003) 声称埃及开罗城市化程度与降水存在反比关系。Changnon (2003) 分析 4 个城市地区 (芝加哥、纽约、圣路易斯和华盛顿) 1945—2000 年的冻雨频数后指出, 由于受到城市热岛效应的影响, 这 4 个城市地区的冻雨频数减少了 10%~30%。Kaufmann 等 (2007) 利用卫星和气象站资料, 通过统计分析方法发现城市化效应使得珠三角地区降水减少。他们还指出, 该地区降水减少可能与地表水循环改变有关。Rosenfeld 等 (2007) 研究表明, 受空气污染的影响, 城市下风区降水减少。Zhang 等 (2009) 也指出, 由于城市多为不透水表面结构, 蒸发量减小, 导致降水减少。

除了观测和数据分析外, 数值模式一直是研究城市化效应对降水影响的重要工具。Thielen 等 (2000) 采用二维模式开展数值模拟, 研究地表参数, 尤其是感热通量对法国巴黎地区降水发展的影响。结果表明, 当城市热岛强度较弱时, 影响降水发展的地表感热通量、辐合和浮力变化等因子在离热源中心一定的距离上最为有效。Baik 等 (2001) 采用二维中尺度模式研究与城市热岛相关的大气加热如何影响干湿对流。Rozoff 等 (2003) 对 1999 年圣路易斯的暴雨个例进行模拟, 以确定城市地表辐合机制在触发深湿对流中的作用。他们发现, 城市热岛下风方向的地表辐合对于城市下风区的对流形成起到了关键性的作用。Molders 和 Olson (2004) 的中尺度数值模拟结果表明, 城市土地利用、气溶胶和水汽源对城市下风区降水的影响显著 (超过 95% 置信度水平)。此外, 城市区域还导致降水系统发生分叉。Niyogi 等 (2006) 采用耦合的大气/海洋中尺度预报系统研究城市冠层对中尺度对流系统的发展和演变的影响。结果表明, 城市冠层导致降水强度增强。



Shem 和 Shepherd (2009) 采用 WRF 模式对亚特兰大两个对流降水个例进行模拟, 由此研究城市对降水变化的影响。他们的结果表明, 城市化效应对降水发生时间影响不大, 但是造成城市下风区降水量显著增加 (10%~13%)。Carrió 等 (2010) 采用耦合了 TEB 城市模型的 RAMS 模式, 研究城市化效应对休斯敦地区对流活动和降水特征及强度的影响。结果证实, 城市土地利用对对流活动和降水的影响显著。Shepherd 等 (2010) 采用 MM5 模式, 从大气-陆面如何相互作用的角度研究休斯敦地区城市化对夏季降水过程的影响。结果表明, 城市化导致休斯敦下风区累计降水增加, 这与城市地区形成的辐合带和低压扰动密切相关。Inamura 等 (2011) 采用 24 个成员的集合开展数值模拟, 研究大城市 (如东京) 对强降水的影响。结果表明, 东京地区城市效应导致其下风区辐合增强, 降水增加。

1.2 城市化对降水的影响机制

随着城市化效应研究的逐步深入, 人们对城市热岛的认识已日趋成熟, 但是城市化对降水的影响较为复杂, 目前仍然存在一定的不确定性。在全球变暖的气候背景下, 城市地区暴雨、洪涝等极端灾害天气频繁发生, 使得人们开始逐渐关注城市化效应对降水的影响。近年来, 国内外的学者们开始针对城市化效应的可能机理进行研究。数值模式的发展也为研究城市降水提供了新的途径, 学者们通过开展不同的数值试验, 模拟城市降水中的物理过程, 从而探究城市化影响城区及周边地区降水的可能机制。根据前人的研究结果, 可以总结出城市影响降水和对流的可能机制, 城市化会通过城市冠层以及气溶胶的作用影响降水, 其中城市冠层对于降水的影响主要包括以下几个方面。

(1) 城市的热岛环流对于降水的影响。根据第一部分的论述, 城市可以通过高大建筑物的拦截效应、反照率的减小、人为热的排放等增加城乡温度差异, 形成热岛环流。城市热力扰动增加了边界层的不稳定性, 有利于对流云的形成, 导致城区的降水增多。Baik 等 (2001) 认为, 城市的热岛环流在下风向地区的上升运动可以产生湿对流, 诱发该地区的对流性降水, 并且热岛强度越大, 云水或雨水的形成时间越短。Shepherd 和 Burian (2003) 基于卫星的降水资料分析了休斯敦城市的扩张对于降水的影响, 发现城市的扩张增加了城区以及下风向的全年和暖季降水, 并且城市热岛效应是导致降水异常最为重要的原因。Inoue 和 Kimura (2004) 同样利用卫星图像发现, 由于城市的混合层中存在较强的感热, 午后在东京低层云量明显增加。Lin 等 (2011) 对中国台湾的降水个例进行分析, 发现热岛的存在改变了暴雨发生的位置。Wan 等 (2013) 利用 WRF 模式对长三角地区的一次夏季降水过程进行模拟, 结果表明, 城市化使得大气不稳定性增加, 城市下风向扩散的热岛效应改变了大气热力结构和水汽交换过程, 使得下风向地区降水增加。

(2) 城市水汽含量的改变对于降水的影响。一方面, 城市下垫面蒸发和蒸腾量减小, 导致大气中水汽含量减少, 潜热也较郊区减少, 不利于城区的降水。Zhang 等 (2009) 利用数值模式模拟了北京的城市化进程对于两次夏季强降水过程的影响, 结果表明城市的扩张减少了边界层水汽含量, 导致市区降水减少。此外, 对长三角地区近 5 年来夏季气候特征的模拟结果同样显示, 在上午时段城市低层大气变干, 使得该地区中午前后的小雨减



少。而在 14:00—17:00, 城市化导致的城市干岛效应较弱, 而城市化显著地增加了大气对流运动, 导致此后的 17:00—20:00 时段特大暴雨降雨量增加。另一方面, 城市的灌溉作用使得地表和大气之间的水汽输送增加, 导致水汽含量增加, 使得城市及下风向的降水增多。另外, Shepherd (2005) 利用卫星资料研究了季风时期菲尼克斯夏季风暴的发展并指出, 在城市动力环流与城市灌溉输送的水汽共同作用下, 为对流的发展提供了有利的条件。

(3) 城市地表辐合辐散对于降水的影响。城市粗糙度的增加使得风速减小, 导致城区出现较强的辐合, 使得稳定性减弱 (Rozoff et al., 2003)。Bornstein 和 Lin (2000) 通过分析亚特兰大 (Atlanta) 地面气象站点资料研究城市对于六次风暴过程的影响, 结果发现城区地表辐合增强, 影响风暴的形成和发展, 并对其中三次风暴起到了触发作用。Thielen 等 (2000) 利用一个二维中尺度 γ 模式进行敏感性试验, 发现城市下垫面上感热、潜热、粗糙度的改变对于对流性降水都起到重要的作用, 粗糙度的增加使得湍流增强, 影响了城市下风向地区的降水空间分布。Fujibe (2003) 针对日本的一些重要城市对于降水的影响进行了研究, 发现东京等城市地表辐合的增加导致对流明显增强。Shepherd (2005) 对比了有无城市的试验中地表温度和风速的差异, 结果显示, 城市化使得地表温度增加、辐合增强, 并且云水量和雨水量也明显增加, 有利于城区的降水。

(4) 城市建筑物对降水的影响。城市高大的建筑物也会影响降水系统, 使得降水分散。例如: Loose 和 Bornstein (1977) 研究了纽约市对一次锋面系统的移动以及位置的影响, 结果表明在城市高大建筑物的影响下, 地表摩擦拖曳作用加强, 使得锋面移动途经城市的过程中速度明显减慢。Bornstein 和 Lin (2000) 也指出城市建筑物的阻拦作用使得降水中心分散, 对降水的空间分布有重要的影响。Miao 等 (2010) 的研究指出, 京津冀地区城市群建筑物的阻拦作用导致飑线分裂成多个对流单体, 最终增加了城区的降水总量。

以上是城市冠层对于降水的影响机制, 除此之外, 城市的工业废气中气溶胶颗粒也会对降水产生重要的影响: 首先, 气溶胶可以通过直接效应减少到达地面的太阳辐射, 通过降低大气温度影响降水。研究表明, 气溶胶的增加使得全球平均净辐射减少了 $5\text{W}/\text{m}^2$, 减少了热带地区的对流性降水 (Ramanathan et al., 2001)。其次, 气溶胶还可以通过间接效应, 即充当云凝结核改变云的物理特征和辐射特征, 同样会影响城市及其周边地区的降水 (Rosenfeld, 2000)。城市污染排放到大气中, 导致城区上空的云凝结核 (CNN) 增加为郊区的两倍以上。人为排放形成的 CNN 内有更多更小的水滴, 使得云滴密度增加, 有效半径减小, 影响云滴的碰并过程, 对降水起到抑制作用 (King, et al., 1993; Rosenfeld, 2000)。气溶胶浓度增加造成云滴有效半径减小, 而云顶温度升高, 不利于形成降水。与没有污染的区域相比, 污染严重的区域降水明显减少。Zhao 等 (2006) 发现, 我国中部和东部地区气溶胶的增加直接导致了近 40 年来大气稳定性的增加以及降水的明显减少。但是污染产生的超大云凝结核 (GCNN) 又会增强降水过程, 造成城市的降水增加。再次, 气溶胶还可以通过半直接效应, 即对云层的加热作用改变大气稳定度以及云的蒸发, 进而影响降水。黑碳气溶胶 (BC) 可以加热大气, 减弱大气的稳定度并且增强对流, 最终导致我国南部地区夏季降水增加。综上所述, 气溶胶可能增加或减少城区的降



水,但是还存在一些不确定性。

此外,对于沿海城市而言,还会通过复杂的海-陆-气相互作用而影响降水。Lin 等(2011)利用 WRF-Noah-UCM 模式研究了台湾岛北部 UHI 对于边界层和海陆风的影响,发现 UHI 对海陆风有重要的作用,在白天加强海风,夜间减弱陆风;Shepherd 和 Burian (2003)发现,休斯敦 UHI 与海陆风的相互作用为城市及其下风向对流发展提供了有利条件,导致降水量和降水范围明显增加;Simpson 等(2008)利用 MM5 模式解释了印度金奈城(Chennai) UHI 与海陆风相互作用的机理,认为城市热岛增加了海陆热力差异,加强海风,从而改变了海风锋带来的辐合与上升运动,使得西部地区降水大范围增加。Holt 等(2009)利用集合模拟分析了东京城市化对于海风锋的影响,指出在锋前城市热岛与海风锋的作用不明显,而在锋后,城市化对其影响较大,使得海风锋增强并伸向内陆。

1.3 我国主要城市群影响降水的观测与模拟研究

自改革开放以来,我国的城市化进程正在朝着大都市区和大城市集群方向发展(谢志清等,2007)。随着经济的高速发展,我国东部地区土地利用快速扩张、能源消耗高度集中、大气污染日趋严重,已成为世界上经济发展最快、工业化和城市化进程最为迅速的地区,以长三角、珠三角和京津冀三个特大城市群为代表的东部大规模城市群已经形成并在继续快速扩张。珠三角地区城市面积 1988—1996 年扩展了 364%,京津冀地区的城市用地 1990—2000 年扩展了 71%,而长三角 2005 年城市用地为 1979 年的 12 倍。城市群、特别是大城市群是我国经济发展的主要动力源,在我国经济社会发展中起着重大作用。我国东部大规模城市化伴随的土地利用/土地覆盖快速变化与大范围大气污染和高强度的区域性人类活动有关,给我国经济社会发展带来了巨大的环境压力。

近几年,我国东部地区强降水等极端天气气候事件时有发生,给城市带来了巨大的物质和财产损失(Miao et al., 2011; Zhang et al., 2009; Wan et al., 2013)。在针对该城市群对于降水的影响研究中,目前仍然存在争议。一些研究发现,京津冀地区城市群的城市冠层会增加城区的降水,并且城市冠层通过热力输送对于降水的影响要强于动力输送,也就是说,城市降水的增加主要是由于城市热岛现象导致对流降水增加。此外,城市的建筑物的拦截作用使得飊线分裂成多个对流单体,最终增加了城区的降水总量(Miao et al., 2011)。周建康等(2003)统计分析南京雨量站 1922—1999 年的观测资料发现,南京城市化后城区降水量增大,大雨和暴雨次数增多,出现峰高量大的暴雨洪水机会增多。蒙伟光等(2007)采用耦合了陆面模式的 MM5 模式研究珠三角地区城市化对强雷暴天气的影响。结果表明,更加真实的土地利用类型可以更加成功地模拟出强雷暴天气的发展和演变过程;雷暴系统的增强与城市热岛效应有关;城市下风方向的低层辐合增强导致了较强的上升运动,有利于新的对流活动的发展,促使雷暴强度增强。解令运等(2008)利用 MM5 模式对江苏 2003 年 6 月下旬至 7 月上旬强降水进行了数值模拟,研究城市化急剧扩张对区域强降水的影响和可能机制。结果表明,城市化地区降水减少,而在城市下风区会有局地的降水增加。Lin 等(2011)采用 MM5 中尺度模式研究城市热岛效应



对降水的影响后指出,台湾岛中部城市下风区降水显著增加。他们还指出,热岛效应影响了降水位置和降水量。江志红和唐振飞(2011)利用CMORPH卫星降水资料和再分析资料,综合分析了长三角地区主要城市的降水分布特征。分析结果表明,在700hPa平均引导气流的控制下,城市中心和其下风区夏半年降水强度比上风区增加了5%~15%,最大值通常位于城市中心下游20~70km。Miao等(2011)采用高分辨率数值模拟方法研究城市化对北京夏季局地强降水的影响。其结果还表明,1980年前北京早期城市化使得最大降水量减少,而此后的城市化发展容易导致降水路径发生分叉。受城市地表影响,降水局地集中现象更加明显,城市中心的高楼建筑导致降水路径分叉,但却增加了强降水的面积百分比。黎伟标等(2009)采用TRMM卫星降水资料,从珠三角及其周边地区的强弱降水时空变化角度出发,研究了该地区城市化效应对降水的影响,结果表明,城区降水强度增强而降水频数减少。敖翔宇等(2011)采用耦合了城市冠层模型的中尺度模式WRF,探讨了长三角地区城市化对夏季日降水特征的影响。结果表明,城市化对降水日变化的影响存在一定的地域差异;城市化效应导致长三角大部分地区夏季日降水强度增强。

尽管不少研究结果表明城市化效应对城市及其下风区的降水变化起着增强的作用,仍有一些研究给出了不同的结果。Guo等(2006)采用中尺度模式MM5开展数值模拟,研究了北京地区城市化对对流性降水系统的影响。结果表明,城市化导致城市和郊区的交界处降水增多,但在模拟的整个区域,尤其是城市化地区,降水总量则是减少的;降水强度高值中心位于城市下风区。Zhang等(2009)研究了近30年来京津冀城市群城区的降水变化,发现城市化的进程与夏季降水和全年降水有明显的负相关。他们利用数值模式模拟了北京的城市化进程对于两次夏季强降水过程的影响,结果表明城市的扩张减少了边界层水汽含量,导致市区降水减少。此外,还有研究指出,气溶胶含量的增加同样会导致该区域内降水的减少,Zhao等(2006)的研究发现,我国中东部地区气溶胶的含量较高,导致了该地区近40年来降水的显著减少。Xia等(2007)的研究发现京津冀城市群近30年来北京城区的气溶胶含量显著增加,气溶胶的直接效应导致了城区地表接收的太阳辐射明显减少,导致地表降温,抵消了城市热岛效应,不利于降水,并且气溶胶的间接效应同样会通过云凝结核抑制降水。解令运等(2009)利用MM5模式对江苏2003年6月下旬至7月上旬强降水进行了数值模拟,研究城市化急剧扩张对区域强降水的影响和可能机制,最终导致城市地区降水减少,而在城市下风区会有局地的降水增加。此外,京津冀城市群的城市化效应对城区降水的日变化规律产生影响,研究发现,城区的最大降水量出现的时刻比周边地区推迟,并且降水频率减少,但是降水强度增加。

1.4 资料、模式、研究方法

1.4.1 资料

本书研究工作主要使用了以下资料。

(1) NCEP/NCAR (National Centre for Environmental Prediction and National