

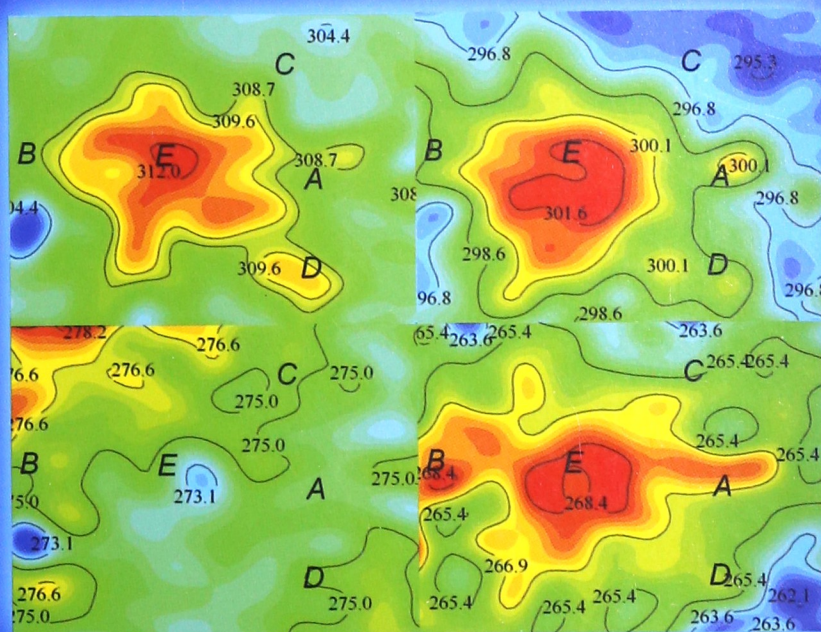


地球观测与导航技术丛书

城市空间热环境遥感

——空间形态与热辐射方向性模拟

陈云浩 周 纪 宫阿都 著
马 伟 占文凤



科学出版社

014032648

X21
89



地球观测与导航技术丛书

城市空间热环境遥感

——空间形态与热辐射方向性模拟

陈云浩 周 纪 宫阿都 著
马 伟 占文凤



科学出版社

北 京



北航

01720965

X21
89

内 容 简 介

本书以北京市为研究对象,着重论述开展城市空间热环境遥感研究的新方法和新进展,主要包括以下内容:城市热环境地表特征参量的遥感定量反演;城市热环境空间形态与模拟;城市下垫面特征与地表辐射平衡;城市区域热辐射方向性模拟。城市热环境空间形态模拟和下垫面热辐射方向性模拟,是开展城市热环境量化研究的重要方向,也是本书论述的重点。

本书有关内容对城市环境、遥感应用有一定的参考价值。本书可供从事地理学、环境科学和遥感应用等学科的科研工作者参考,也可供高校 RS、GIS 和城市环境等专业的师生,特别是研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

城市空间热环境遥感:空间形态与热辐射方向性模拟/陈云浩等著. —北京:科学出版社,2014.2

(地球观测与导航技术丛书)

ISBN 978-7-03-039751-5

I. ①城… II. ①陈… III. ①城市环境-热环境-环境遥感 IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 025884 号

责任编辑:杨帅英 苗李莉 彭胜潮/责任校对:宋玲玲

责任印制:钱玉芬/封面设计:王 浩

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2014 年 2 月第一次印刷 印张:14

字数:311 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

《地球观测与导航技术丛书》编委会

顾问专家

徐冠华 龚惠兴 童庆禧 刘经南 王家耀
李小文 叶嘉安

主 编

李德仁

副主编

郭华东 龚健雅 周成虎 周建华

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

鲍虎军	陈 戈	陈晓玲	程鹏飞	房建成
龚建华	顾行发	江 凯	江碧涛	景 宁
景贵飞	李 京	李 明	李传荣	李加洪
李增元	李志林	梁顺林	廖小罕	林 琿
林 鹏	刘耀林	卢乃锰	孟 波	秦其明
单 杰	施 闯	史文中	吴一戎	徐祥德
许健民	尤 政	郁文贤	张继贤	张良培
周国清	周启鸣			

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

地球空间信息科学与生物科学和纳米技术三者被认为是当今世界上最重要、发展最快的三大领域。地球观测与导航技术是获得地球空间信息的重要手段,而与之相关的理论与技术是地球空间信息科学的基础。

随着遥感、地理信息、导航定位等空间技术的快速发展和航天、通信和信息科学的有力支撑,地球观测与导航技术相关领域的研究在国家科研中的地位不断提高。我国科技发展中长期规划将高分辨率对地观测系统与新一代卫星导航定位系统列入国家重大专项;国家有关部门高度重视这一领域的发展,国家发展和改革委员会设立产业化专项支持卫星导航产业的发展;工业和信息化部、科学技术部也启动了多个项目支持技术标准化和产业示范;国家高技术研究发展计划(863计划)将早期的信息获取与处理技术(308、103)主题,首次设立为“地球观测与导航技术”领域。

目前,“十一五”计划正在积极向前推进,“地球观测与导航技术领域”作为863计划领域的第一个五年计划也将进入科研成果的收获期。在这种情况下,把地球观测与导航技术领域相关的创新成果编著成书,集中发布,以整体面貌推出,当具有重要意义。它既能展示973计划和863计划主题的丰硕成果,又能促进领域内相关成果传播和交流,并指导未来学科的发展,同时也对地球观测与导航技术领域在我国科学界中地位的提升具有重要的促进作用。

为了适应中国地球观测与导航技术领域的发展,科学出版社依托有关的知名专家支持,凭借科学出版社在学术出版界的品牌启动了《地球观测与导航技术丛书》。

丛书中每一本书的选择标准要求作者具有深厚的科学研究功底、实践经验,主持或参加863计划地球观测与导航技术领域的项目、973计划相关项目以及其他国家重大相关项目,或者所著图书为其在已有科研或教学成果的基础上高水平的原创性总结,或者是相关领域国外经典专著的翻译。

我们相信,通过丛书编委会和全国地球观测与导航技术领域专家、科学出版社的通力合作,将会有一大批反映我国地球观测与导航技术领域最新研究成果和实践水平的著作面世,成为我国地球空间信息科学中的一个亮点,以推动我国地球空间信息科学的健康和快速发展!

李德仁

2009年10月

前 言

自从 1833 年 Lake Howard 就伦敦市中心的气温比郊区高的现象提出“城市热岛”概念以来,城市热环境问题一直备受关注。尤其近年来,全球气候变化加剧、低碳社会理念的兴起和具有中国特色的快速城镇化进程相交织,无疑对我国广大城市建设和城市(热)环境演变产生了深刻且长远的影响。开展城市空间热环境的遥感研究,其意义自然不言而喻。

本书的研究基础主要源于国家自然科学基金多年的连续资助项目,包括“基于遥感与边界层数值模式的北京城市空间热环境研究(40201036)”“城市地表能量收支与人为热排放的遥感研究(40671130)”和“城市地表热辐射方向性模型及能量通量的角度订正方法(40771136)”等。得益于国家自然科学基金委员会的资助,使得我们能够维持一个有关城市热环境遥感的研究小组并将相关研究不断推进。参加上述项目研究的人员,主要是课题组的博士、硕士研究生们,许多同志对城市热环境遥感研究做出了贡献,有的直接参与并完成毕业论文,有的开展了外围或前沿探索研究。

城市热环境遥感研究中有关时空演变规律和热力景观分析的内容,已于 2004 年由科学出版社出版(《城市空间热环境遥感分析:格局、过程、模拟与影响》)。本书则以北京市为研究对象,着重论述开展城市空间热环境遥感研究中的新方法和新进展,主要包括以下内容:①城市热环境地表特征参量的遥感定量反演;②城市热环境空间形态与模拟;③城市下垫面特征与地表辐射平衡;④城市区域热辐射方向性模拟。其中,城市热环境空间形态模拟和城市区域热辐射方向性模拟两部分内容是本书论述的重点。

本书由陈云浩拟定大纲,各章具体写作分工为:第 1 章由陈云浩、周纪撰写;第 2 章由周纪、陈云浩撰写;第 3 章由宫阿都、周纪和占文凤撰写;第 4 章由宫阿都、周纪等撰写;第 5 章由马伟、陈云浩和周纪撰写。全书由陈云浩、周纪进行统稿、校稿,全金玲等也参加了整理和编辑工作。

本书部分内容来源于作者的学位论文,其中少部分阶段成果已在国内外有关刊物发表。本书以此为基础进一步系统组织、修订与提高。本书写作过程中参考了国内外大量优秀教材、研究论文和相关网站资料,在此我们表示衷心感谢。虽然作者试图在参考文献中全部列出并在文中标明出处,但难免有疏漏之处。本书虽几易其稿,但不当之处仍在所难免,我们诚挚希望各位同行专家和读者提出宝贵意见。由于作者水平有限,对城市空间热环境研究的理解还有待深入,书中所存在的不足和疏漏,恳请读者批评指正!

在本书主要内容研究过程中,得到了国家自然科学基金委员会宋长青研究员,北京师范大学史培军教授、李京教授和李晓兵教授,加拿大西安大略大学王今飞教授,美国俄亥俄大学隋殿志教授,首都师范大学宫辉力教授和赵文吉教授,南京大学杜培军教授,香港中文大学冯通教授,以及中国矿业大学郭达志教授等给予的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

本书的出版得到了教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-12-0057)、北京市优秀博士学位论文指导教师科技项目(20131002702)、科学技术部国际科技合作项目(2010DFA32920)、国家自然科学基金(41071258、41101380)和高等学校博士学科点专项科研基金(20100003110018)的资助,以及地表过程与资源生态国家重点实验室的支持。

陈云浩

2013年4月20日

于北京师范大学

目 录

《地球观测与导航技术丛书》出版说明

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 城市空间热环境遥感概述	1
1.1.1 城市空间热环境	1
1.1.2 城市空间热环境的研究意义	2
1.2 城市空间热环境遥感发展历程与现状	3
1.3 城市空间热环境遥感研究方向	5
1.3.1 城市热环境的空间格局与形态模拟	5
1.3.2 城市下垫面热辐射方向性	6
1.4 研究区介绍	6
1.5 小结	8
参考文献	8
第 2 章 城市热环境地表特征参量的遥感定量反演	12
2.1 地表温度	12
2.1.1 辐射传输方程	12
2.1.2 针对 HJ-1B IRS 数据的单窗算法	14
2.1.3 针对 HJ-1B IRS 数据的单通道算法改进	24
2.2 城市区域植被覆盖度	30
2.2.1 植被覆盖度研究数据	31
2.2.2 植被覆盖度估算方法	32
2.2.3 植被覆盖度估算精度检验	34
2.2.4 植被覆盖景观的季节变化	35
2.3 城市非渗透性地表覆盖度	37
2.3.1 非渗透性地表覆盖度研究数据	38
2.3.2 非渗透性地表覆盖度估算方法	38
2.3.3 非渗透性地表覆盖度估算精度检验	42
2.4 城市地表反射率	43
2.4.1 城市地表光谱反射率研究数据	44
2.4.2 CHRIS 传感器重定标	46
2.4.3 CHRIS 数据大气校正	48
2.4.4 地表反射率验证与分析	49
2.5 小结	52

参考文献	53
第3章 城市热环境空间形态与模拟	57
3.1 城市热环境要素提取	57
3.1.1 星-地同步观测实验	58
3.1.2 地表温度反演验证与分析	63
3.2 城区与郊区的地表温度对比分析	67
3.2.1 对比样区选择	68
3.2.2 城区与郊区地表温度统计特征	68
3.3 城市热环境的时空演变规律	72
3.3.1 城市热环境的空间格局	72
3.3.2 城市热环境的时空演变特征	74
3.3.3 城市热环境的剖面分析	77
3.4 基于热岛容量模型的城市热环境空间形态描述	88
3.4.1 基于高斯曲面的城市热岛容量模型	89
3.4.2 应用实例	90
3.4.3 城市热环境空间形态分析	93
3.5 基于支持向量机的城市热环境空间形态模拟	97
3.5.1 模型构建	97
3.5.2 应用实例	98
3.5.3 城市热岛制图及其变化规律分析	102
3.6 小结	105
参考文献	105
第4章 城市下垫面特征与地表辐射平衡	110
4.1 土地利用/覆盖与城市化	110
4.2 土地利用/覆盖与城市热环境	116
4.2.1 土地利用/覆盖类型的地表温度统计特征	116
4.2.2 土地利用/覆盖与城市热环境空间格局	118
4.2.3 植被覆盖状况对城市热环境的调节作用	123
4.2.4 土地利用/覆盖与城市热环境改善	124
4.3 建筑材质与城市热环境	125
4.3.1 城市下垫面建筑材质类别与参数提取	125
4.3.2 建筑材质与城市热环境的统计分析	128
4.3.3 建筑材质物理性质对城市热环境的影响	131
4.4 城市地表辐射平衡	133
4.4.1 城市地表能量过程与城市热环境	133
4.4.2 城市地表能量过程的特征	134
4.4.3 城市辐射平衡的遥感建模	137
4.4.4 地表净辐射精度检验与敏感性分析	141
4.4.5 下垫面对辐射平衡的影响	147

4.5 小结	152
参考文献	152
第5章 城市区域热辐射方向性模拟	157
5.1 热辐射方向性	157
5.1.1 热辐射方向性定义	157
5.1.2 城市区域热辐射方向性观测实验	159
5.1.3 城市区域热辐射方向性模拟	161
5.2 城市区域主要实体简化与组分分类	163
5.2.1 城市区域主要实体简化	163
5.2.2 组分分类与观测实验	167
5.3 城市区域热辐射方向性计算机模型	173
5.3.1 理论基础	173
5.3.2 计算机模型构建	175
5.3.3 传感器视场内组分比例计算	179
5.3.4 实体三维可视化模型	180
5.4 计算机模型验证与敏感性分析	187
5.4.1 城市区域物理模型坐标系构建	187
5.4.2 城市区域物理模型观测实验	188
5.4.3 热辐射方向性计算机模型验证	191
5.4.4 计算机模型参数敏感性分析	195
5.5 城市区域热辐射方向性规律研究	199
5.5.1 时空尺度上方向亮温模拟	199
5.5.2 城市区域物理模型热辐射方向性规律	201
5.6 小结	204
参考文献	205
本书涉及的缩略词	208
索引	209

第1章 绪 论

1.1 城市空间热环境遥感概述

1.1.1 城市空间热环境

由于城市下垫面自身的物理性质,加之强烈的人类活动影响,相对于乡村地区,城市区域内部热量集聚,从而形成显著的高温热环境。英国学者 Lake Howard 于 19 世纪提出的概念“城市热岛”(urban heat island,UHI)就是用于描述此类现象(Howard,1833)。通常,城市热岛效应是指由于城区气温比郊区和周边乡村地区高,造成城乡之间出现温度“峰”与“谷”的分布差异(图 1.1)。从严格意义上来讲,气象学上所说的“城市热岛”,应称为城市大气热岛(atmospheric heat island,AHI)。由于城市大气的分层结构,城市大气热岛又分为城市覆盖(冠)层(urban canopy layer,UCL)热岛与城市边界层(urban boundary layer,UBL)热岛(图 1.2)(Oke,1987)。其中,城市覆盖层热岛产生于从城市地表到平均建筑高度的范围内,而城市边界层热岛产生于城市覆盖层上方并受到城市下垫面影响。此外,二者的观测手段也存在较大差异,城市覆盖层热岛常基于近地面的气象观测设备获取数据进行分析,而城市边界层热岛则常基于高塔、气球等高空探测设备获取数据进行分析(Voogt and Oke,2003)。

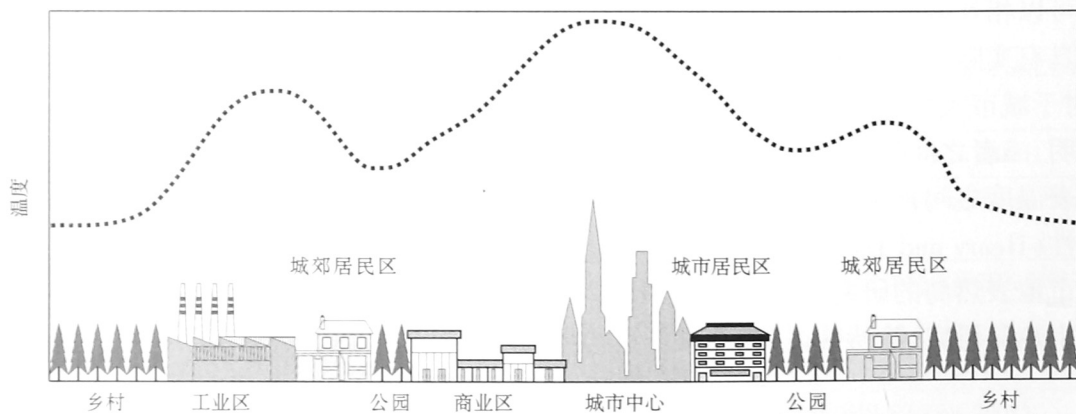


图 1.1 城市热岛示意图

(据美国国家环境保护局:<http://www.epa.gov/heatisd/about/index.htm>)

相对于气象观测设备直接获取近地表或高空温湿压参数而言,机载或星载热红外遥感传感器则通过非接触方式获取地物热辐射信息,进而估算出地表温度。由于城市内部不同下垫面、城乡下垫面热辐射性质差异等诸多原因导致地表温度在城市内部、郊区与乡村分布不均衡,也形成显著的城市热岛效应。此时,通过遥感观测设备获取的城市热岛信息,严格意义上应成为“城市地表热岛”(surface urban heat island, SUHI)。在不引起歧义

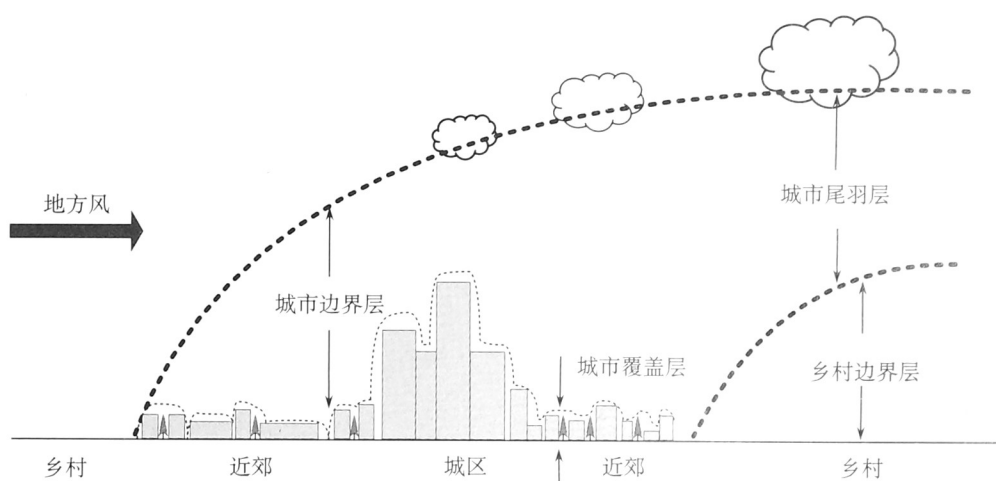


图 1.2 城市大气分层示意图(据 Oke,1987;徐祥德,2002)

的前提下,学术界也将其统称为“城市热岛”。

城市是一个复杂的巨系统。关于城市空间热环境的详细阐述可参见《城市空间热环境遥感分析:格局、过程、模拟与影响》(陈云浩等,2004)一书。从本质上,城市热岛效应可理解为一种四维的城市气候现象。城市空间热环境包含两种层次的含义:首先,在城市内部微观尺度的二维与三维空间上形成的热环境;其次,城区、郊区与周边乡村在区域尺度的二维与三维空间上形成的热环境。本书中,将“城市空间热环境”简称为“城市热环境”。

由于不同界面反映出不同的热岛效应,这就造成了一系列问题。第一,城市大气热岛与城市地表热岛之间究竟存在着什么样的关系?它们是近似耦合的关系还是差异很大?是否可以相互替代?第二,城市大气热岛与城市地表热岛的演变规律有无共同之处?哪个更具有实际意义,与我们的关系更密切?第三,它们各自该如何去衡量与评价?实际上,对于城市大气热岛与地表热岛之间的关系问题,国内外已开展了较多的研究。研究表明,二者之间确实存在着显著的差异;在极端情况下,衡量二者的基本因素——气温和地表温度之间甚至存在着较大的差别;在更多的情况下,气温与地表温度则有着较好的相似性(Henry and Dicks,1989;Gallo et al.,1995;Kawashima et al.,2000)。因此可以通过对城市地表热岛的研究,反映城市热岛基本规律和典型特征。本书以遥感数据源为主开展城市热岛研究,除特殊说明,本书所称的城市热岛指城市地表热岛。

1.1.2 城市空间热环境的研究意义

数十年来,随着全球工业化的迅猛发展,伴随着城市的快速扩展和人类活动的加剧,城市热岛效应日益凸显,并成为城市气候最显著的特征之一(周纪,2010)。一百余年来尤其是近年来的研究结果证明,城市热岛效应发生在各个纬度上几乎所有大城市中,城市热岛对城市人居环境、城市微气候、空气质量、能源消耗和公共健康等方面均产生深远影响,同时还会影响其他的城市气候效应,如大气污染扩展、降水空间分布和植被物候期变

化等。学术界普遍认为城市热岛效应是区域气候变化和高强度人类活动的集中体现,也是理解全球变化区域响应与适应的关键指标之一。

近年来,国际上对城市热环境的研究和治理工作正方兴未艾。例如,美国国家航空航天局(NASA)和美国国家环境保护局(EPA)共同发起的“Urban Heat Island Pilot Project”计划,选择 Los Angeles、Chicago、Salt Lake City、Sacramento 和 Baton Rouge 等城市,利用地面观测和遥感技术开展了针对夏季城市热岛的研究;京都、香港等大都市也纷纷开展了削减城市能源消耗、缓解城市热岛效应的研究工作(Kazuya et al., 2004; Giridharan et al., 2004);我国在 2006 年国务院公布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020 年)》中,“城市热岛效应形成机制与人工调控技术”被列为“城镇化与城市发展”领域中的一项重要研究内容(中华人民共和国国务院,2006)。显然,掌握城市热岛的产生机制与变化规律,对优化人居环境、合理规划城市发展具有重要的现实意义,对研究全球与区域气候变化也具有重要的理论意义。

1.2 城市空间热环境遥感发展历程与现状

遥感技术具有大范围同步覆盖、数据获取迅速和成本较低等优势,克服了传统气象站点观测无法实现面状覆盖的缺陷。自 Rao(1972)首次将卫星遥感数据用于城市热环境研究以来,许多学者纷纷利用遥感手段开展有关城市热环境的研究工作。所采用的遥感影像主要是带有热红外波段的中、低空间分辨率的卫星遥感影像以及高空间分辨率的航空遥感影像。表 1.1 归纳了近年来用于城市热环境研究的部分热红外遥感数据源。

表 1.1 部分用于城市热环境遥感研究的热红外遥感数据

空间分辨率 层次	平台与传感器	星下点空间 分辨率	回归周期	典型应用
高空间 分辨率	机载 ATLAS	5~10m	—	热环境空间格局与影响因子(Gluch et al., 2006; Lo et al., 1997)
	机载 TVR	IFOV: 1.8 mrad	—	微观尺度热环境格局(Saaroni et al., 2000)
	机载 AGEMA Thermovision	1.5m×3m	—	城市公园的降温效应(Spronken-Smith and Oke, 1998)
	机载 AHS	IFOV: 2.5mrad	—	空间分辨率与观测时间对热环境研究的影响(Sobrino et al., 2012)
	机载 OMIS	IFOV: 3mrad	—	城市地表能量平衡建模(Xu et al., 2008)
中空间 分辨率	Landsat ETM+	60m	16d	热环境空间格局与影响因子(Xian, 2008)
	Terra ASTER	90m	预订	热环境空间格局与影响因子(Tiangco et al., 2008)
	Landsat TM	120m	16d	热环境空间格局与影响因子(Chen et al., 2006)
	CBERS-02 IRMSS	156m	26d	热环境空间分布与分级(张勇等, 2006)

空间分辨率 层次	平台与传感器	星下点空间 分辨率	回归周期	典型应用
低空间 分辨率	HJ-1B IRS	300m	4d	热环境空间分布(Yang et al., 2010)
	ENVISAT AATSR	1000m	35d	热环境时间变化(Fabrizi et al., 2010)
	NOAA AVHRR	1100m	单星一天 2 次	热环境与城市扩展(Owen et al., 1998) 热环境昼夜变化(Dousset and Gourmelon, 2003) 空间形态(Streutker, 2002, 2003) 数值模拟(Hafner and Kidder, 1999)
	Terra/Aqua MODIS	1000m	单星一天 2 次	热环境空间形态、昼夜与季节变化(Tran et al., 2006; 周纪等, 2008) 驱动因素与驱动机制(Zhou et al., 2011a)
	FY-2C SVISSR	5000m	1h(常规)	热环境研究日内时空尺度扩展(Zhou et al., 2013)
	MSG SEVIRI	3100m	5min	热环境研究日内时空尺度扩展(Zakšek and Oštir, 2012)

总体而言,城市热环境遥感研究可分为以下几个方面(Voogt and Oke, 2003; 陈云浩等, 2004)。

(1) 城市热环境空间格局、形态与结构描述。基于热红外遥感影像反演所得的地表温度数据结合气象观测,通过对比法(城乡对比法、历史对比法和类型对比法等)(Henry and Dicks, 1989; 周淑贞和束炯, 1994; Spronken-Smith and Oke, 1998),分析城市热环境的二维或三维结构。例如,研究城市热环境对城市下垫面土地利用与土地覆盖的依赖性(Chen et al., 2006; 宫阿都等, 2007),借助景观生态学的分析方法研究城市热环境的空间格局特征(陈云浩等, 2002; 岳文泽, 2008)。这方面的研究主要借助中空间分辨率的遥感数据进行。此外,也有学者基于低空间分辨率的遥感数据,对城市热环境的空间形态进行曲面模拟,进而描述热环境的三维结构(Streutker, 2002, 2003; Tran et al., 2006; 周纪等, 2008; 占文凤等, 2011)。也有少数研究通过中、高空间分辨率的遥感数据来研究城市热环境的细节甚至街谷特征(Nichol, 1994, 1997; Lo, 1997; Saaroni et al., 2000; Gluch et al., 2006)。

(2) 城市热环境时间尺度变化特征研究。这方面的研究主要通过具有较高时间分辨率的卫星遥感数据进行。在此基础上,结合气象站点观测资料,揭示城市热环境的时间尺度演变规律,主要探讨热环境空间格局与热岛强度的昼夜、月份和季节变化(Streutker, 2002, 2003; Pongracz et al., 2006; Imhoff et al., 2010)。城市热环境时间尺度变化的另一方面——年际特征,则常常与城市空间扩展相联系(Owen et al., 1998)。少数研究试图利用较高空间分辨率的遥感数据,将城市热环境分析推演至更精细的时间尺度,如日内变化甚至逐时变化(Dousset and Gourmelon, 2003; Dousset et al., 2010; Zakšek and Oštir, 2012)。由于较低的空间分辨率,较高时间分辨率的遥感数据在解释城市热环境空间特征方面,存在较大的局限性。

(3) 城市热环境驱动因素与驱动机制的分析与模拟。城市热环境的时空特征,是其驱动因素与驱动机制的外在表现。因此,探讨驱动因素与驱动机制,成为城市热环境分析

不可避免的环节。长期以来,城市地表土地利用/覆盖、植被、非渗透性地表和景观格局等是热环境驱动因素的主要指标(Chen et al.,2006;Yuan and Bauer,2007),少数研究涉及地表反射率、反照率、发射率、热惯量等地球物理指标以及人口密度、能源消耗和建筑物容积率等社会经济统计指标(Small,2006;Wang et al.,2007)。分析手段主要是传统的相关分析或回归分析,这在客观、充分地描述城市热环境驱动机制上显得力不从心,在一定程度上阻碍了城市热环境遥感研究的发展(Voogt and Oke,2003)。最近,一些学者尝试将人工神经网络、支持向量机等机器学习方法用于模拟城市热环境的驱动机制,并结合高时间分辨率遥感数据、气象观测资料等,提出了描述城市热环境的驱动机制的概念模型并进行了表达,取得了一定的效果(陈云浩等,2006;Zhou et al.,2011a)。

(4) 城市地表辐射与能量平衡建模与应用。就内部机制而言,城市化导致的地表覆盖类型变化,改变了城市区域地气间水分、热量和物质交换过程,最终导致地表能量收支平衡和局地气候过程的改变,其外在形式则表现为以城市热岛为代表的一系列气候效应。在另一层次上,城市热岛效应对城市地表的辐射平衡与能量收支具有复杂的反馈作用,使得地表的长波辐射增加,同时又改变地表净辐射在显热通量、潜热通量及地表储热量之间的分配。因此,城市地表的辐射与能量平衡特征是分析城市热环境驱动机制的深层次环节。这方面的研究最早源于城市地表辐射平衡的航空观测实验(White et al.,1978)。此后,学术界开始关注城市地表的辐射平衡,并针对遥感数据建立了相关的辐射平衡估算模型(Chrysoulakis,2003;Frey et al.,2007)。同时,适用于自然地表(如农田、裸地等)的能量平衡模型等相继被用于估算城市地表的能量通量(Kim,1992;Zhang et al.,1998;Yang,2000;Rigo and Parlow,2007;Xu et al.,2008),并开始关注城市人为热排放对于城市热环境的影响(Kato and Yamaguchi,2005,2007;Zhou et al.,2011b)。总体而言,城市地表的能量平衡特征与城市热环境的关系尚不明朗,尤其是将大叶模型如 Penman-Monteith 模型(Monteith,1965)等直接用于异质性尤其突出的城市地表,存在较大的不确定性。

1.3 城市空间热环境遥感研究方向

1.3.1 城市热环境的空间格局与形态模拟

长期以来,空间格局与形态是城市热环境遥感研究的基本问题之一,这常常通过对来源于单一热红外遥感数据的地表温度场分析得到。例如,基于中空间分辨率热红外遥感数据的相关研究,揭示了城市热环境空间格局与下垫面土地利用/覆盖紧密相关,城市中心区、工业区常表现为热岛斑块,而水体、公园等常表现为冷岛斑块,主要交通线则常呈现出热环境发展的轴线。同时,由于中空间分辨率的卫星遥感影像多源于白天获得,在揭示空间格局上更多地反映出自然因素(如土地利用/覆盖等)对城市热环境的影响。

在宏观尺度上,对于千米级的低空间分辨率遥感数据而言,城市地表的热辐射特征又呈现出“相对均一性”。由于覆盖范围较广,低空间分辨率的遥感数据能够有效地反映出城区、郊区及周边乡村地区的热辐射差异,即城市热环境表现为“热岛”的整体特征。城市热环境的内部空间变异特征,则被传感器成像所平滑。同时,由于低空间分辨率遥感数据往往具备较高的时间分辨率,因此利用昼夜的低空间分辨率遥感数据,不仅能够充分反

映城市热环境形态的昼夜差异,更能够充分揭示城市热环境在白天、夜间分别受到的自然、人为活动因素的影响。

高空间分辨率的机载热红外遥感数据,对揭示城市热环境的微观格局具有突出的优势。在该空间尺度上,热红外遥感影像能够充分反映出城市地物为遥感传感器可视部分的热辐射特征。此时,城市地表由中空间分辨率的“相对异质性”过渡至“极度异质性”,热环境空间格局则与城市下垫面的热辐射方向变化紧密相连。

总体来看,城市热环境的空间格局与形态缺乏定量描述工具,对形态的模拟是认识和把握热环境变化规律的关键。

1.3.2 城市下垫面热辐射方向性

地表温度作为陆面过程最关键的热辐射参数,长期以来备受关注。地表温度的遥感反演算法,主要包括单窗算法与单通道算法(Qin et al., 2001; Jiménez-Muñoz and Sobrino, 2003)、分裂窗算法(Wan and Dozier, 1996; Wan and Li, 1997)、温度/发射率分离算法(Gillespie et al., 1998)以及一些简化算法。上述算法的主要目标是尽可能地消减大气及地表比辐射率对地表温度反演的影响,目前上述算法正日趋成熟和完善。

然而随着热红外遥感影像分辨率的不断提高,地表异质性已成为限制地表温度遥感反演精度提高的关键因素,已经引起了学术界的高度重视。观测表明,不同传感器甚至同一传感器在不同观测条件下,获取的表面辐射温度存在差异,即异质地表热辐射具有方向性。由于城市目标的三维空间结构、目标材料热特性的不同和地表能量交换的复杂性与多样性,城市地表热辐射具有复杂的空间分布(余涛等, 2006),且其热辐射的方向性较植被等自然地表强烈(Voogt and Oke, 2003; Soux et al., 2004)。Voogt 和 Oke(1998)针对加拿大温哥华的航空遥感实验表明,热辐射方向性对城市商业区地表温度造成的精度影响达到 9K,远超过了大气透过率、地表发射率对地表温度的影响。因此,城市地表热辐射方向性给地表温度带来的不确定性,严重制约了城市热环境的定量分析。

近年来,针对自然地表(如植被)热辐射方向性的研究,已经成为热红外遥感领域的重要课题,但是由于城市地表的研究难度较大,其热辐射方向性研究长期以来被学者们忽视或处于近视假设的状态(Voogt and Oke, 2003)。自 Roth 等(1989)指出城市地表热辐射方向性对城市热环境研究具有重要影响以来,国外开始出现关于城市地表热辐射方向性研究的零星报道(Voogt and Oke, 1998; Soux et al., 2004),而国内直到 2006 年才出现简单城市目标方向亮温模拟的研究报道(余涛等, 2006)。一些用于模拟太阳—地表—传感器几何位置关系,进而模拟城市地表热辐射方向性的模型开始出现(Soux et al., 2004),但这些模型是建立在对真实城市地表极大简化的基础上,精度有待提高;同时,这些模型通常仅限于计算机模拟研究,尚未与热红外遥感数据相结合。总的来说,关于城市地表热辐射方向性的研究尚处于起步阶段,已成为能否进一步提升城市热环境遥感研究水准的关键所在。

1.4 研究区介绍

本书选取我国首都北京市为研究对象(图 1.3)。北京地区位于 $39^{\circ}28' \sim 41^{\circ}05'N$,

115°25'~117°30'E,地处华北大平原北端,西、北和东三面环山,由西北向东南呈现出低地—丘陵—山前洪积—平原区的有序排列。根据2008年土地面积及利用状况的调查,全市总面积为16 410.54km²,其中农用地面积10 959.81km²,建设用地面积3377.15km²,未利用地面积2073.58km²,山区面积约占总面积的2/3;最高海拔2303m,城市平均海拔43m左右。气候季节分明,年平均气温10~12℃,具有明显的暖温带、半湿润大陆性季风气候特征,年降水量470~600mm,水资源总量约23.1亿m³(霍亚贞等,1989)。

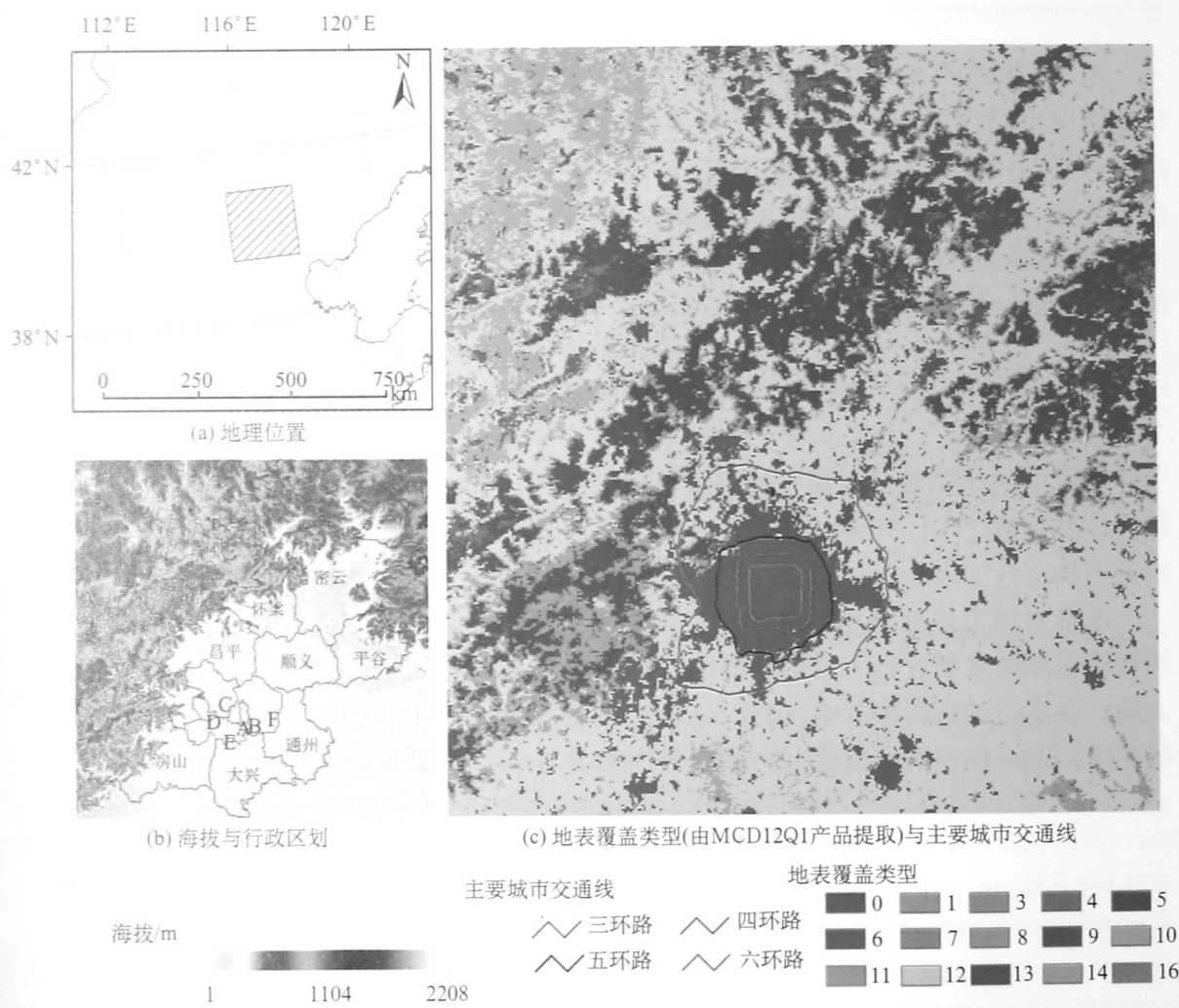


图 1.3 研究区——北京地区示意图

A. 西城;B. 东城;C. 海淀;D. 石景山;E. 丰台;F. 朝阳;

0. 水体;1. 常绿针叶林;3. 落叶针叶林;4. 落叶阔叶林;5. 混交林;6. 密闭灌丛;7. 稀疏灌丛;8. 木质草原;9. 稀树草原;10. 草地;11. 永久性湿地;12. 农用地;13. 城市与建成区;14. 农用地与自然植被混合区;16. 裸地与稀疏植被

在空间结构上,北京地区呈现出从中央大区到城市边缘区,再到外围乡村地区的结构,映射出了人类活动由强到弱的明显圈层变化(孙胤社,1992;何春阳等,2003)。各行政区的功能划分见表1.2(北京市统计局,2011)。至2010年,北京常住人口约1961.9万人,其中城镇人口1686.4万人,乡村人口275.5万人,男女比例为106.8:100;人均地区生产总值为75 943元,其中第一产业124.4元/人,第二产业3388.4元/人,第三产业10 600.8元/人(北京市统计局,2011)。