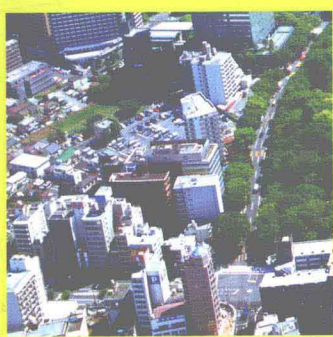


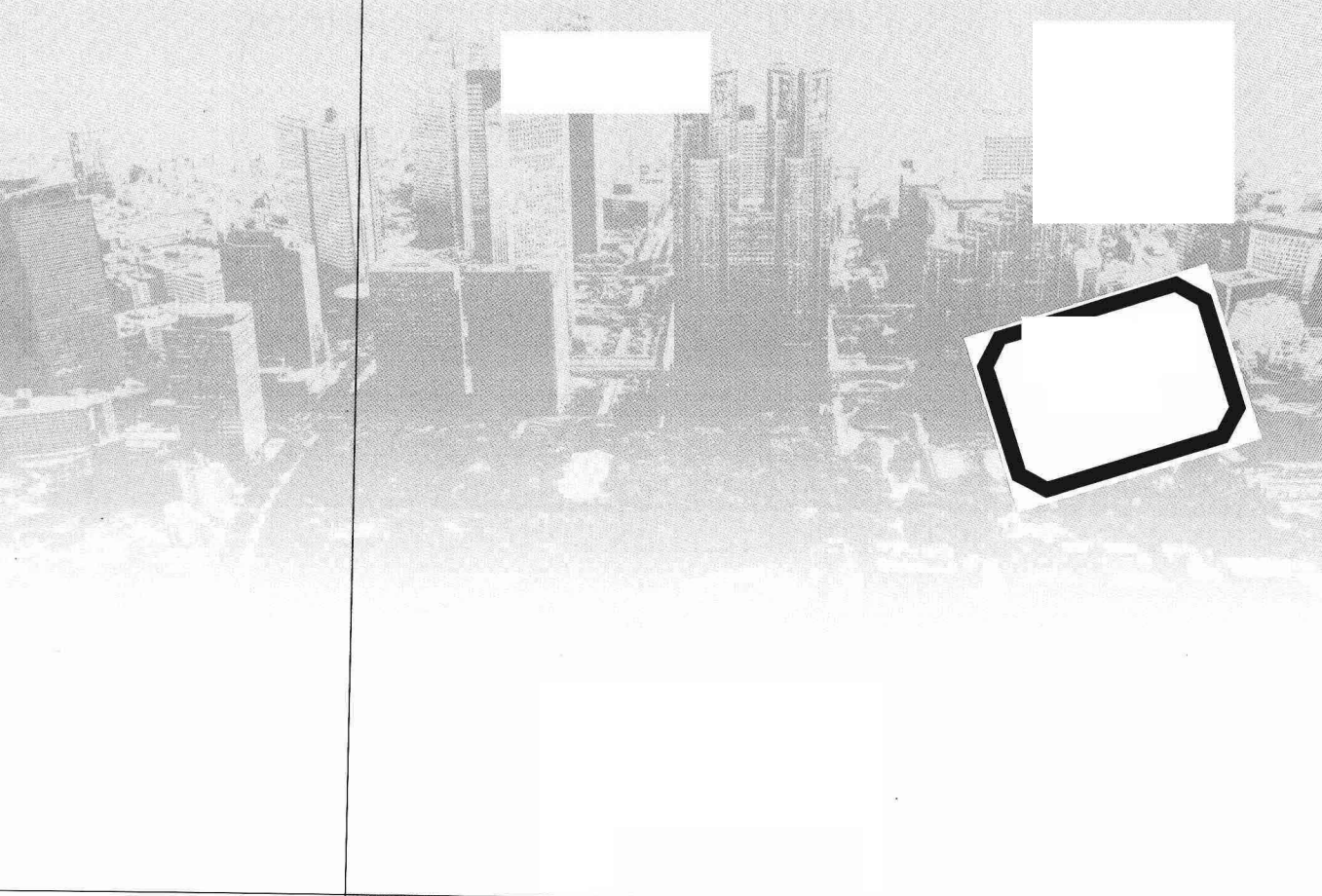
城市能源系统 分析模型研究

基于北京的案例分析

丁 辉 编著



科学出版社



城市能源系统 分析模型研究

基于北京的案例分析

丁 辉 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书从城市可持续发展的角度分析城市的能源系统,通过建立城市经济-能源-环境模型,对北京未来城市发展的诸多方面——人口与经济发展趋势、产业结构演变、能源供应能力和大气污染物排放进行分析及预测,从未来发展情景的设定、能源需求预测、能源系统结构优化等方面来分析北京市能源系统的现状及发展趋势。重点介绍城市能源需求预测的 LEAP 模型、系统动力学模型和投入产出模型,以及能源系统结构优化分析的 MARKAL 模型,并以北京为对象展开了全面细致的实证分析。

本书适合能源与环境领域的政府公务员、企业管理人员、科研人员和高等院校师生及相关的工作者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

城市能源系统分析模型研究:基于北京的案例分析/丁辉编著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033527-2

I. ①城… II. ①丁… III. ①城市经济:能源经济-研究 IV. ①F407.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 021167 号

责任编辑:王 倩/责任校对:邹慧卿

责任印制:钱玉芬/封面设计:耕者设计

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>

天津市新科印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 3 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2012 年 3 月第一次印刷 印张:19 1/2 插页:2

字数:450 000

定价:78.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



“首都经济、能源、环境、安全系统的模拟与动态 分析技术支撑体系建设” 课题组

课题负责人 丁 辉 北京市科学技术研究院

课题组成员 (按姓氏笔画排序)

王 立 北京城市系统工程研究中心

朱 伟 北京城市系统工程研究中心

许 健 中国科学院研究生院管理学院

李 际 国家发展和改革委员会能源研究所

刘大成 清华大学工业工程系

刘建兵 北京城市系统工程研究中心

许凡芯 北京城市系统工程研究中心

佟贺峰 中国科学技术信息研究所

张 亮 轻工业环境保护研究所

张晓梅 北京城市系统工程研究中心

周景博 中国人民大学环境学院

金 镭 中国石油大学

段远源 清华大学热能工程系

袁富华 中国社会科学院数量经济研究所

徐丽萍 北京城市系统工程研究中心

程言君 轻工业环境保护研究所

执行编辑 徐丽萍 刘建兵 许凡芯 张晓梅 王 玢

序

近几十年来，中国经历了人类史无前例的城市化进程。以北京为例，2000年北京常住人口为1356.9万，2010年上升为1961.2万，提前10年突破了2020年常住人口总量控制在1800万的目标，成为巨大型城市。随着经济一体化趋势的逐渐加强，各国的大城市日益成为国际经济交流的焦点和中心，担负着生产流通、资源配置、信息传递等多种功能。巨大型城市的兴起推动着地区经济的快速发展。然而人口密集导致的居住、交通、生产成本和管理成本增加，以及生存环境恶化等各种城市问题，也阻碍着城市生活质量的进一步提升，其中能源问题是最突出的问题之一。当前，世界各国就能源引发的经济安全、环境污染，以及气候变化对城市可持续发展影响的认识，正在取得越来越多的共识。城市能源问题已成为束缚城市可持续发展的重要因素。

从2008年开始，北京采取了节能减排、调整能源和经济结构、转变发展方式等一系列政策措施来提高能源利用效率并取得了显著的成效。在充分肯定成绩的同时我们必须清醒地看到，北京城市能源消费的增长与资源、环境约束的矛盾还在加大。北京的发展任重而道远。北京作为世界超大型城市的典型，单纯靠一些具体技术进步是不能解决能源供应问题的。城市经济-能源-环境问题是一个多维度的复杂动态系统，能源系统分析模型是城市管理者处理该问题的科学决策参考工具之一，迄今为止，中国国家层面的能源需求预测模型较多，但区域性的城市能源需求研究较少。当前城市层面的研究主要依靠单一模型工具（如LEAP或MARKAL模型），并重点分析单个部门（如建筑、交通或电力）的能源利用情况。因此，构建适用于城市的综合模型对城市经济-能源-环境复杂系统进行全面分析是当前城市能源系统研究的迫切要求。

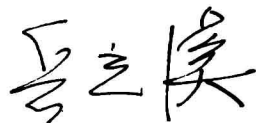
本书旨在帮助大家更深刻地了解城市发展与能源环境的紧密关系。本书以分析北京能源消费与城市可持续发展为出发点，通过对北京人口与经济发展趋势、产业结构演变规律、北京能源供应现状、北京交通运输的能耗、北京大气污染物排放等因素的现状分析及情景预测，从能源消耗现状、能源预测情景和能源系统优化三个方面讨论北京的能源系统分析模型及其应用，把握北京能源发展的现状与趋势。本书就能源和经济发展及环境质量的内在关系，探讨了促进经济建设、能源保障、环境保护和城市安全统一协调的模型及应用方法，并提出了建立城市能源需求预测模型的具体方法，介绍并讨论了多种能源预测研究和能源系统优化分析的方法和理论。

本书在合理构建能源模型的基础上，对北京的具体问题进行情景分析和预测，得到了较为科学的预测结果。作者多年从事北京能源系统的研究，对北京能源系统（如煤炭、电力、石油、天然气等方面）的基础数据有着丰厚的积累，在此基础上的案例

城市能源系统分析模型研究——基于北京的案例分析

分析对北京决策部门具有重要参考价值。

同时，本书对城市能源系统模型的建构论述深入浅出，相关案例及数据论证翔实。阅读本书不仅可以对北京的能源现状有初步的了解，更重要的是可以让读者系统地学习城市能源系统模型的具体应用。



清华大学热能工程系教授

中国工程院院士

中国能源学会副会长

2011 年 12 月 5 日

前 言

当今世界,能源问题已经成为全球共同关心的焦点问题之一,能源在社会发展进程中具有重要的战略意义。关于能源引发的经济安全、环境污染以及气候变化对城市可持续发展影响的认识,世界各国都已经取得了越来越多的共识。伴随着“十二五”期间中国城市化进程的推进,未来能源需求增长仍比较强劲,能源问题将成为中国城市(尤其是大型城市)发展进程中亟须应对的挑战。

北京作为我国的首都和政治文化中心,对能源供应保障方面的要求要显著高于其他地区。北京属于能源资源短缺地区,经济发展所需能源绝大多数依靠从外地调入。北京经济社会发展迅速,能源消费水平逐年增长,能源结构不断优化,但整体能耗水平仍然偏高,能源结构有待进一步改善。与此同时,北京本地能源资源有限,能源对外依赖度较高,能源瓶颈制约愈加突出。如何结合首都功能定位和对能源的需求状况,促进能源与首都经济、社会、环境协调发展,是我们面临的一个重要发展战略问题。

能源系统是一个城市系统得以有效运行的基础。能源系统作为城市系统中的一个重要子系统,与社会经济运行、自然环境、科技水平等有着极为密切的联系,它既是国民经济系统运行的产物,又是国民经济系统发展的动力。能源系统是城市经济发展的重要支撑,它的一个极小的扰动也可能使整个城市系统受到影响,甚至可能威胁到社会稳定。由于突发事件导致的城市能源供应中断或短缺,会给城市系统的稳定运行带来冲击。在短期内,由于现有的资本设备及其能源消费水平难以改变,能源短缺将造成设备闲置、能源价格上涨、通货膨胀、产出下降、失业增加,严重情况下将引发经济危机,引起社会动荡,影响城市系统稳定的运转。在长期内,如果能源供给持续无法获得保障,城市系统将面临解体的风险。

能源与城市可持续发展问题的关系错综复杂,研究城市能源系统对于城市实现可持续发展至关重要。当前中国城市在发展过程中面临的诸多限制与挑战提示我们,中国将难以重复发达国家曾经历过的不可持续的经济与能源发展模式和消费模式,中国城市必须探索经济-能源-环境可持续发展的新道路。

本书围绕北京近年来出现的经济、能源和环境等问题,重点从经济增长与产业结构变化的角度,分析北京能源强度与经济增长演变规律,研究北京能源系统的若干焦点和热点问题。全书共分为三篇:理论及模型研究篇、现状及外部趋势分析篇、情景预测与系统优化篇。研究关注的主要问题包括以下内容:

第1章能源与城市可持续发展,从城市可持续发展问题引出对城市能源系统的研究,分析了城市能源系统的定义和构成,以及研究的基本内容及基础理论;第2章城市能源需求预测模型,建立了北京能源需求预测模型,重点分析其在电力、石油、天然气、煤炭需求预测中的应用;第3章北京能源系统结构优化模型,利用 MARKAL 模

型将能源结构和能源转化过程与经济成本、环境污染联系起来,寻找最佳的能源系统结构,确定适宜的能源供应技术;第4章北京能源供应能力分析与能源消耗现状,分析了北京能源消耗现状,预测北京能源供应的发展趋势,并对北京“十二五”期间及未来的能源供应能力发展情况做出展望;第5章北京人口与经济发展趋势预测,依据系统动力学原理,分析了城市人口规模、结构和城市经济发展的主要结构、变量,分别对其进行预测;第6章北京产业行业结构演变趋势分析,研究了北京产业结构演进状况、工业内部和服务业内部的行业结构情况以及产业结构和行业结构演进趋势;第7章北京能源需求分析的情景设定,对各部门生产结构调整、能源消费结构调整、技术进步发展情况进行模拟计算,分析现有技术条件下北京能源发展的途径和能够达到的程度;第8章北京未来能源需求的情景预测,建立了城市能源中长期需求预测模型,分析预测了三种情景下北京未来的能源需求情况;第9章北京能源消费环境排放的情景预测,讨论了由于能源使用所带来的空气污染物排放的演变趋势和未来发展情景分析;第10章北京能源供应系统优化分析,建立了北京 MARKAL 模型,在城市尺度上对能源系统进行优化,寻求能源系统成本最小化和能源环境质量目标的有机结合。

本书是北京市科学技术研究院和北京城市系统工程研究中心对北京经济、能源、环境系统相关的重要问题长期研究基础上形成的总结,在系统研究的基础上突出实证性。本书坚持立足实际,充分运用科学分析方法,紧密结合当前形势新变化,全面贯彻落实北京“十二五”期间的节能目标,针对打破资源与环境制约条件下能源系统的可持续发展桎梏,力图提出具有操作性的政策建议和措施,提供科学的管理方法和技术。希望本书的出版为决策者提供思路和决策参考的同时,也能与从事能源系统研究的同行们交流。

本书由北京城市系统工程研究中心牵头,汇集清华大学、国家发展和改革委员会能源研究所、中国科学技术信息研究所、中国科学院研究生院、人民大学、中国石油大学等中央在京高校和研究机构的力量共同完成。在课题的研究过程中,得到了香港城市大学、澳大利亚基础设施联合会、新南威尔士州政府和奥克兰大学等不同形式的支持和帮助,在此表示诚挚的谢意。并对参与本书编写的工作人员表示衷心的感谢。

由于受到数据、时间等客观条件的限制,本书在分析和综合方面难免存在疏漏、不妥之处,诚恳希望社会各界和专家提出宝贵的意见和建议,我们将在今后的工作中不断改进。

2011 年 11 月 5 日

目 录

序

前言

第一篇 理论及模型研究

第 1 章 能源与城市可持续发展	3
1.1 城市可持续发展及其影响因素	3
1.1.1 城市可持续发展	3
1.1.2 城市可持续发展的影响因素	5
1.2 城市能源系统	7
1.2.1 城市能源系统定义	7
1.2.2 城市能源系统构成	9
1.3 能源系统与城市可持续发展的内在关系	11
1.3.1 能源系统对城市运行的影响	11
1.3.2 城市可持续发展中的能源制约	13
1.4 城市能源系统研究的基本内容	14
1.4.1 预测类：城市能源供应、能源需求及环境排放预测	15
1.4.2 评价类：城市能源安全评价预警研究	16
1.4.3 优化类：城市能源结构优化调整研究	17
1.4.4 规划类：城市低碳发展路径及可持续能源规划研究	18
1.5 城市能源系统分析的基础理论	19
1.5.1 能源系统分析方法	19
1.5.2 能源系统模型	27
第 2 章 城市能源需求预测模型	30
2.1 城市能源需求预测方法概述	30
2.1.1 部门分析法	30
2.1.2 经济计量分析	30
2.1.3 投入产出分析法	30
2.1.4 系统动力学模型	31
2.1.5 灰色系统理论	31
2.1.6 神经网络模型法	32

2.2 北京能源需求预测系统动力学模型	34
2.2.1 系统动力学模型原理与结构	34
2.2.2 北京能源系统动力学模型的结构	36
2.2.3 电力预测模块	38
2.2.4 石油需求预测模块	41
2.2.5 天然气需求预测模块	41
2.2.6 煤炭需求预测模块	42
2.3 北京能源需求预测的 LEAP 模型	44
2.3.1 LEAP 模型的基本原理	44
2.3.2 北京 LEAP 模型的结构	47
2.3.3 能源消费部门和行业的划分	49
2.4 能源投入产出模型	51
2.4.1 北京能源环境投入产出模型的设计	52
2.4.2 未来年份“附加能源和污染物的投入产出表”的编制方法	56
2.4.3 终端需求结构和最终需求向量的预测方法	58
2.4.4 未来年份的能耗和污染物排放的预测方法	62
2.4.5 北京能源投入产出模型的应用方法	65
第3章 北京能源系统结构优化模型	70
3.1 城市能源供应系统概述	70
3.1.1 城市能源供应系统	70
3.1.2 城市能源供应系统优化问题	72
3.2 MARKAL 模型的基本原理及结构	74
3.2.1 MARKAL 模型简述	74
3.2.2 MARKAL 模型的基本原理	75
3.2.3 MARKAL 模型的应用分析	76
3.3 北京 MARKAL 模型设计	77
3.4 RES 网络结构及能源技术	79
3.5 北京 MARKAL 模型的能源结构	81
3.6 模型数据收集处理	83
3.6.1 能源基础数据	83
3.6.2 数据收集处理要求	83
3.7 能源供应技术划分与数据核算	84
3.7.1 发电供给技术参数	85
3.7.2 供热技术参数	86

第二篇 现状及外部趋势分析

第4章 北京能源供应能力分析 with 能源消耗现状	91
4.1 煤炭供应能力展望	91
4.1.1 未来煤炭供应能力影响因素分析	91
4.1.2 未来北京煤炭供应能力预测	94
4.2 电力供应能力展望	95
4.2.1 未来电力供应能力影响因素分析	95
4.2.2 未来北京电力供应能力预测	101
4.3 油品供应能力展望	103
4.3.1 未来油品供应能力影响因素分析	103
4.3.2 未来北京油品供应能力预测	107
4.4 天然气供应能力展望	109
4.4.1 未来天然气供应能力影响因素分析	109
4.4.2 未来北京天然气供应能力预测	113
4.5 其他能源供应能力展望	115
4.5.1 生物质能	115
4.5.2 地热能	116
4.6 北京能源消费历史概况	117
4.7 分行业能源消费现状及特点	118
4.8 分品种终端能源消费现状及特点	120
4.8.1 煤炭	121
4.8.2 石油	122
4.8.3 天然气	125
4.8.4 电力	128
4.8.5 热力	130
4.9 能源利用效率现状	131
4.9.1 能源强度	131
4.9.2 能源消费弹性系数	133
第5章 北京人口与经济发展趋势预测	135
5.1 城市发展的系统动力学分析	135
5.2 城市人口规模预测的系统动力学模型	138
5.2.1 人口模块的主要结构及假设	138
5.2.2 人口模块的主要变量及关系	141
5.3 城市经济发展预测的系统动力学模型	142
5.3.1 经济模块的主要结构及假设	142

5.3.2 经济模块的主要变量及关系	145
5.4 北京人口和经济发展的预测分析	146
5.4.1 人口规模及结构预测	146
5.4.2 经济规模及结构预测	149
第6章 北京产业行业结构演变趋势分析	151
6.1 北京产业结构演进状况	151
6.2 工业内部的行业结构情况	154
6.3 服务业内部的行业结构情况	157
6.4 北京产业、行业结构趋势的 Logistic 预测	158
6.4.1 三次产业结构预测	158
6.4.2 工业内部行业结构预测	159
6.4.3 服务业内部行业结构预测	162
第三篇 情景预测与系统优化	
第7章 北京能源需求分析的情景设定	167
7.1 情景分析方法	167
7.1.1 情景分析方法概述	167
7.1.2 情景研究的基本思路	167
7.2 基准情景的设定	168
7.2.1 人口规模的基准情景	169
7.2.2 经济总量和产业结构的基准情景	169
7.2.3 北京交通情况的基准情景	170
7.2.4 各部门能耗的基准情景	172
7.3 其他情景的设定	175
7.3.1 经济增长减速情景 (EC)	175
7.3.2 发展公共交通情景 (TR)	176
7.3.3 新能源汽车的推广使用 (NEC)	177
7.3.4 汽车燃料效率提高情景 (FE)	177
7.3.5 加大建筑物节能力度情景 (BET)	178
第8章 北京未来能源需求的情景预测	179
8.1 基准情景下的能源需求量预测	179
8.1.1 能源需求总量	179
8.1.2 能源利用水平的演变趋势分析	184
8.2 分品种能源需求趋势分析	187
8.2.1 电力需求趋势分析	187

8.2.2 煤炭需求趋势分析	190
8.2.3 石油需求趋势分析	191
8.2.4 天然气需求趋势分析	192
8.2.5 可再生能源利用情况分析	194
8.3 最终需求变动对能源消耗的影响分析	196
8.3.1 最终使用增加带来的能源消耗分析	196
8.3.2 调入、进口产品对减轻北京能源环境压力的影响	197
8.4 六类主要部门的能源需求分析	198
8.4.1 分部门能源需求总量预测	198
8.4.2 第一产业分品种能源需求预测	200
8.4.3 工业分品种能源需求预测	201
8.4.4 交通部门分品种能源需求预测	202
8.4.5 居民生活分品种能源需求预测	202
8.4.6 商业及服务业分品种能源需求预测	204
8.5 北京 38 个行业的能源需求分析	204
8.5.1 各行业未来能源需求总量比较	205
8.5.2 各行业完全能耗系数	206
8.5.3 各行业的乘数效应分析	209
8.5.4 各行业的能源消费主系数分析	210
8.6 其他情景下的能源需求预测分析	210
8.6.1 发展公共交通情景 (TR) 的预测分析	210
8.6.2 经济增长减速情景 (EC) 的预测分析	212
8.6.3 几种组合情景下的预测结果	214
第 9 章 北京能源消费环境排放的情景预测	222
9.1 北京大气环境现状	222
9.1.1 城市大气环境概述	222
9.1.2 北京能源消费污染物排放现状	224
9.1.3 北京环境容量需求分析	228
9.2 基准情景下二氧化碳排放的预测与分析	232
9.2.1 二氧化碳排放量的预测结果	233
9.2.2 北京二氧化碳排放强度预测	234
9.2.3 人均二氧化碳排放量预测	235
9.2.4 分部门碳排放分析	237
9.2.5 北京主要行业的碳排放分析	238
9.2.6 北京居民生活碳排放演变趋势	240
9.3 基准情景下其他污染物排放预测与分析	242
9.3.1 二氧化硫排放量的预测结果	242

9.3.2	氮氧化物排放量的预测结果	244
9.3.3	烟粉尘和甲烷排放的预测结果	247
9.4	经济增长减速情景下污染物排放预测	248
9.4.1	二氧化碳排放的预测分析	248
9.4.2	二氧化硫排放的预测分析	250
9.4.3	氮氧化物排放的预测比较	251
9.5	发展公共交通情景 (TR) 下污染物排放预测	252
9.5.1	二氧化碳排放预测分析	252
9.5.2	二氧化硫排放的预测比较	254
9.5.3	氧化亚氮排放的预测比较	256
9.6	几种组合情景下的预测结果	257
9.6.1	二氧化碳排放的多情景分析	257
9.6.2	二氧化硫排放的多情景分析	261
9.6.3	氮氧化物排放的多情景分析	264
第 10 章	北京能源供应系统优化分析	268
10.1	能源供应系统现状	268
10.1.1	电力供应系统现状	268
10.1.2	热力供应系统现状	269
10.1.3	一次能源供应现状分析	270
10.2	情景设定	272
10.2.1	基准情景的设定	272
10.2.2	其他情景的设定	273
10.3	基准情景下的北京能源供应结构分析	274
10.3.1	初始能源供应结构分析	274
10.3.2	能源供应技术结构分析	276
10.3.3	污染物排放量分析	278
10.4	多情景的分析结果比较	279
10.4.1	初始能源供应结构的比较分析	280
10.4.2	污染物排放量的比较分析	283
参考文献		287

第一篇 理论及模型研究

城市的全面、协调和可持续的发展需要能源的支撑，能源战略和政策的实施需要能源系统研究的支持。在实施人文北京、科技北京、绿色北京战略，以及建设中国特色世界城市的过程中，不断加快能源结构升级，优化经济结构的重要性更加凸显。本篇主要论述城市能源系统研究的基础理论及模型，为后面的篇章奠定研究基础。从对城市可持续发展问题的阐述引出对城市能源系统的研究，分析城市能源系统的定义和构成，总结城市能源系统研究的基本内容及基础理论；介绍城市能源需求预测模型，主要包括北京能源需求预测的系统动力学模型、LEAP（long-range energy alternatives planning system）模型和投入产出模型；最后阐述北京能源系统结构优化的建模方法。

第1章 能源与城市可持续发展

城市是社会的重要组成部分，担负着生产流通、资源配置、信息传递等多种功能。据世界银行预计，城市作为地区性经济中心，在不久后的将来将带动全球80%以上的经济增长。随着世界经济一体化的加强，各国的大城市逐渐被推上国际经济交流的大舞台，成为世界经济交流的中心，也日益成为国际竞争的焦点和中心。

目前世界上有400多个百万人口级城市（一多半在亚洲）。由于城市具有规模经济递增的特点，规模较大的城市可以提供较好的基础设施条件，较完善的生产、金融、信息和技术服务，相对集中、较大规模的市场，并且会由于企业和人口的集中而在技术、知识、信息传递、人力资本贡献等方面形成溢出效应，因而会产生较高的经济效益。但是我们也注意到，随着城市规模的扩大，城市的负效应也会逐渐增加，包括由于人口密集导致的居住、交通、生产成本和管理成本增加，生存环境恶化等，在某种程度上抵消城市规模带来的正效应。由于城市发展不可避免将伴随着反效应，使得城市在发展的同时会遇到种种挑战。在21世纪城市面临的全球性挑战中，能源问题是最突出的问题之一。目前，城市在整个地球上的占地面积不到2%，却消耗了地球的75%的能源，排放了约85%的温室气体。当前，世界各国对于能源引发的经济安全、环境污染，以及气候变化对城市可持续发展影响取得了越来越多的共识。长期以来，粗放型的经济增长方式造成的资源枯竭和环境恶化，使得能源资源和环境问题成为中国社会发展过程中的刚性约束。一般而言，各国因为发展模式、技术水平、资源禀赋等差异，在经济发展的各阶段体现出不同的能源需求特性。中国正处于城市化和工业化加快发展的时期，可以预见，伴随着“十二五”期间中国城市化进程的推进，未来能源需求增长仍比较强劲，能源问题将成为中国城市（尤其是规模较大的城市）发展进程中亟须应对的挑战。因此，研究城市可持续发展进程中的能源问题，在当下中国具有很重要的现实意义。

1.1 城市可持续发展及其影响因素

1.1.1 城市可持续发展

城市是社会生产力发展到一定阶段的产物，城市的发展水平是一定时期人类文明程度的反映。就城市的概念而言，国内外学者从经济、社会、地理、历史、生态、政治、军事等不同方面，运用不同的科学学科观点对城市提出了各种各样的定义。钱学森从系统论的观点，将城市概括为：“以人为主体的，以空间和自然环境的合理利用为前提，以聚集经济效益和社会效益为目的，集约人口、经济、科技和文化的空间地域大