



能值分析理论与实践

生态经济核算与城市绿色管理

刘耕源 杨志峰 / 著

Emergy Theory and Practice:
Ecological Environmental
Accounting and Urban
Green Management



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

能值分析理论与实践： 生态经济核算与城市绿色管理

刘耕源 杨志峰 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书研究并发展了能值分析方法,提出了能量视角的可持续发展观,修正了能值基准及方法学,建立了国家、省、城市多级核算框架及 NEAD V2.0 数据库,摸清生态家底;对城市代谢过程、城市健康水平、城市水系统、城市生态系统服务功能进行能值核算和评估;创新性地提出了覆盖废物流的城市生态过程能值模拟技术,突破了原能值方法无法覆盖废物流的瓶颈,弥补了原有技术对关键生态要素考虑不全的缺陷,开发了城市循环经济政策动态分析工具,实现了城市多种政策的耦合分析和调控。

本书可供生态城市建设及环境管理政策制定者参考,可作为最新能值转换率参数参考工具书,也可作为高等院校生态经济学、生态环境核算等课程的教学用书。

审图号: GS(2018)965号

图书在版编目(CIP)数据

能值分析理论与实践:生态经济核算与城市绿色管理 / 刘耕源, 杨志峰著.
—北京: 科学出版社, 2018.11

ISBN 978-7-03-056250-0

I. ①能… II. ①刘…②杨… III. ①城市经济学-生态经济学-研究 IV. ①F290

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第006110号

责任编辑: 王喜军 / 责任校对: 蒋 萍

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 壹选文化

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>

三河市春园印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年11月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2018年11月第一次印刷 印张: 27 1/2

字数: 554 000

定价: 240.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



序 —

The authors of this book are the most important emergy researchers in China. Their contributions to the field are unparalleled. This book on urban green management is the culmination of well over 10 years of studies involving urban systems and emergy which began when I first met Gengyuan and Zhifeng in 2008 at China Agricultural University in Beijing, where I was giving an emergy short course. Several years later, while a visiting scholar in the Center for Environmental Policy at the University of Florida in Gainesville, Florida USA, Gengyuan, Zhifeng and I collaborated on several studies that ultimately formed the prelude to the urban studies reported here. Since those early years, I have returned each year to Beijing Normal University to teach an emergy short course in cooperation with Gengyuan and Zhifeng where we train a new generation of scientists in a “systems understanding” of the role of humans within the biosphere.

The complex questions concerning the fit of humanity in the biosphere require that we look at things from a different perspective. Until very recently, the energies released by humans were small, compared with the renewable driving energy. Not so today. At the present time human society releases about 3 times the emergy in non-renewables than flows into the biosphere from renewable sources. The vast majority of that non-renewable emergy is directly related to humans living in cities.

Currently more than half the world's population lives in urban systems, and China is no different, with nearly 56% of its population considered urban dwellers. China has four of the top 10 largest cities, and has eight cities greater than 10 million people. While less than 5% of the habitable land of the globe is considered urbanized, there is no doubting that the global impact of urbanization is far greater than its mere footprint. How best to fit urban systems within the biosphere? How best to develop an understanding of the workings of the biosphere with an increasing urban population? How do we make decisions concerning the allocation and use of environmental services and natural capital in the face of their increased depletion? This book tries to answer these questions from the perspective of China's urbanizing landscape. It is an important

book, not only for the people of China but also for anyone interested in how to manage urban systems.

This book approaches the subject of urban management from the new discipline of emergy accounting, a method of evaluation that is free of human bias and willingness to pay. It is not surprising that development of resources and exploitation of the environment continues unimpeded when evaluated using human centered value systems based on willingness-to-pay. The only things given value are those things that humans decides are valuable. The only values given things are human values. Economic valuation cannot get away from the fact that its main underlying principle is that value is derived from utility (use). Thus things must be useful to humans for them to have value. However, a biosphere perspective, a perspective that seeks to balance humanity and environment, needs a valuation system free of human bias. Emergy accounting, as outlined in this book, is a method of valuation that is based on the principle that value is derived from the energy and resources that are required to make something rather than on what one gets out of it. Emergy is a scientific value system grounded in physical processes and the energetics that support them.

It is my hope that, through this book and others like it, a new generation of scientists, policy makers, and managers will be equipped to look differently at the complex questions concerning the fit of humans within the biosphere. One of their tools that will enable a more complete picture of the greening of urban systems is the emergy accounting method of evaluation. Urbanization is not slowing down. Projections suggest that the future global urban population will be 66% by the year 2050. To face this future from a strategic perspective, rather than from a reactive one, we need to get urbanization right. We need to understand how to make urban areas environmentally sustainable. This book provides a pathway toward those goals.



Mark T. Brown

Emeritus Professor of Environmental Engineering Sciences

University of Florida

UF | UNIVERSITY of
FLORIDA

序 二

Howard T. Odum's environmental accounting theories and methods (so-called "emergy" approach, spelled with an M) were introduced in China at the beginning of the 1990's, finding very soon a fertile audience among the Chinese scholars, also due to the holistic characteristics of Chinese culture and traditions. This approach inspired a large number of research papers, books, PhD and Master dissertations, as well as the Chinese translations of Odum's "Systems Ecology" (1992), "Environmental Accounting" (1996) and "Prosperous Way Down" (2002) books. This new systemic approach soon became the starting point for innovative environmental accounting assessments of economies and production processes at local, regional and national scales in China, pointing out concepts of resource quality, natural capital and ecosystem services evaluation, environmentally friendly urban development, sustainable agricultural and industrial activities, in so paving the way to the penetration of the emergy method in Chinese Universities and research Institutions.

A pioneer of emergy understanding in China was Prof. Lan Shengfang, who expanded the focus of the emergy method to a large number of fields, regions and production sectors, also benefiting of a strong collaborative link with Odum himself. The emergy approach was applied by other researchers to a large number of cases (regions, agro-ecosystems, urban systems, waste management, development and ecological engineering projects) till more recent studies about environmental and resource-use benefits in eco-industrial parks. The diversity of actual and potential applications of the emergy approach required and inspired an effort to adapt its conceptual basis to the specificity of environment, economy, and technology of China, a country characterized by fast economic growth, increasing population, and related environmental problems.

The emergy theory suggests a new framework to better understand the relation of human dominated systems (mining, agro-industrial, urban, transport) and fully natural systems (water cycle, material cycles, wilderness, marine and continental crust phenomena). The integration among systems thinking, environmental accounting and

economy that characterizes the emergy method is likely to help identify new ways towards sustainable production and consumption, and improve the decision-making process towards appropriate resource use and environmentally friendly development. In particular, understanding the supply-side value of resources as well as quantifying the work performed by nature for resource generation and turn-over provides a very innovative point of view for policy making, based on the awareness that sustainability stems from understanding, respecting and protecting the environmental integrity and dynamics at the larger spatial and time scales of biosphere, much beyond the short-run sight of human technology and politics.

The “Emergy Theory and Practice: Ecological Environmental Accounting and Urban Green Management” book by Dr. Gengyuan Liu and Prof. Zhifeng Yang makes available a large number of results from their environmental research activities developed over the last decade together with their national and international network of colleagues and students, and further contributes to the emergy approach penetration in China, by showing appropriate applications to specific cases and needs of the Chinese fast urban growth and related resource costs and environmental problems.

Understanding the environmental costs of economic growth and policies in terms of resource quality as well as in terms of withdrawn natural capital and available ecosystems services is not an easy exercise, yet it is crucial for economic, social and environmental sustainability of China and the world. Aspects of environmental support to sustainable production and consumption, growth of urban population and assets, urban transportation, waste management and recycling, global urban metabolism and resource trade, environmental ethics related to a much needed repositioning of human communities within the larger context of the natural dynamics, contribute to the appropriate use of resources and the definition of environmental constraints within which sustainable wellbeing of humans and other species can be designed and achieved. The importance of recognizing the donor-side quality of resources (i. e. their generation and turnover cost by nature) should not be disregarded in that our economies and social assets are strictly dependent on resource availability, renewability and complexity, but most often try to ignore it. The emergy method allows biosphere work foot-printing and the recognition of the existing hierarchy of resources and processes, to enlighten and drive an environmentally sound policy making at local, regional and national levels. The book provides a theoretical and practical starting point for interested researchers as well as a valuable reference textbook in environmental accounting courses and may

inspire further progresses towards a balanced relation between humanity and nature in China, to foster environmental integrity and social wellbeing.



Sergio Ulgiati

Professor

Environmental Chemistry - Life Cycle Assessment

Department of Sciences and Technologies

Parthenope University



前 言

(一)

从 20 世纪 80 年代起,环境核算方法逐渐步入研究者的视野,并很快成为研究者理解自然资源在经济活动中重要地位的有力工具。在环境核算方法不断发展、丰富和完善的过程中,一直较为受到普遍关注的环境核算是绿色 GDP,即在货币核算基础上,从 GDP 中扣除资源耗减成本和环境降级成本。很多国家都尝试计算绿色 GDP,为此,联合国于 1993 年公布了《环境与经济综合核算体系》(SEEA),将环境因素纳入国民核算中。但是,由于在实现过程中面临的种种困难,加之不够成熟的实践经验,使得 SEEA 在施行过程中往往无法达到预期的目的。

在此情况下,研究人员开发出更多的环境核算方法,开始主要从物质计量角度开展环境核算。典型的方法包括:生态足迹法,即计算生产性土地的直接、间接需求;物质流分析法,即计算自然界到经济系统中的直接和隐性物质投入;体现能核算法,主要计算全生命周期的累积能量消耗;各种计量经济过程排放物的环境影响核算法,如 IPCC 温室气体核算、CML2000 环境影响系数等。此外,还有能值分析法,即从生物圈能量运动角度来计量某物质或某系统所需要的所有能量总值等。这些环境核算方法都能从一定角度反映人类活动对自然资源 and 环境的真实载荷,因而得到了学界乃至政府组织的广泛认可,成为指导和评价环境绩效和可持续发展的重要工具。

环境核算方法从弱可持续向强可持续的过渡也就发展出生态环境核算方法。这与我们近年提出的要贯彻创新、协调、绿色、开放、共享的发展理念相一致。坚持绿色发展,就是要在未来的发展中倡导生态、绿色、低碳、循环的理念,坚持走可持续发展的道路。坚持绿色发展,必须明确“浅绿色”和“深绿色”。“浅绿色”强调了局部,忽视了整体,甚至以邻为壑,譬如污染产业向欠发达地区转移就是仅仅强调了发达地区的绿色发展等。“深绿色”强调大自然是一个互相影响、互相依赖的共同体,即使是最不复杂的生命形式也具有稳定整个生物群落的作用,每一个有生命的“螺丝和齿轮”对生态系统的健康运行都是重要的。“深绿色”倡导人、社会和自然的协调和谐发展,并努力探寻环境与发展双赢的道路,倡导人类文明的创新与变革。

能值分析作为生态环境核算领域的重要方法之一，能够持续受到广泛关注的原因是源于它具有一套独特的理论和方法体系。能值理论和方法是由美国著名生态学家、系统能量分析先驱——H. T. Odum 于 20 世纪 80 年代创立的一种新的系统分析理论和方法，它从地球生物圈能量运动角度出发，以能值来表达某种资源或产品在形成或生产过程中所消耗的所有能量，并在此基础上建立一般系统的可持续性能值评价指标体系。相比较于其他环境核算方法，能值分析法具有较为明显的优点：它能够将所有不同类别的能量、资源、产品，甚至劳务和服务等这种不可比、难核算的项目换算为统一的量纲——“太阳能值”，这就为环境负载计算和环境经济绩效的评价带来了极大助益；能值理论是基于生物圈内物质和能量流动规律而建立的，在反映资源和环境真实价值上，能值更具有说服力；能值分析不仅是环境核算的重要方法，它对物质流动和能量传递的细致剖析，也使其成为系统分析和评价的重要工具。能值理论与分析方法被认为是连接生态学和经济学桥梁，它为各种生态经济系统、各种生态流的综合分析开辟了定量研究新方法，提供了一个衡量和比较各种物质流、能量流、价值流的共同尺度；可以衡量分析整个自然界和人类社会经济系统，定量分析资源环境与经济活动的真实价值以及它们之间的关系，有助于调整生态环境与经济发展，对自然资源的科学评价与合理利用、经济发展方针的制定、可持续发展战略的实施，均具有重要意义。

但在城市这种复合生态系统问题上使用能值分析，在研究过程中发现有很多困难需要解决。

第一，长期困扰能值研究者的不同能值基准和能值转换率问题。H. T. Odum 等经过长期的努力已积累了大量的能值转换率，但面对一个复杂大系统时，有时仍显不足。特别是一些物质（能量）的能值转换率会因所在区域、所处环境、生产方式和运输距离等产生很大差别，能值转换率失真，会影响城市生态系统能值分析的有效性。因此，如何确保评价所使用的能值转换率的准确性，是能值研究领域的焦点问题。

第二，城市这一复杂巨系统，输入端的物质种类庞杂、吞吐量大，系统内单元和组分间具有横纵向多重耦合关系，而能值分析对数据的要求又很高。这种情况下，如何清晰明了地梳理出物质和能量的输入、输出以及反馈等流量和流向问题，是城市系统能值分析的一个难题。

第三，能值分析的尺度推演问题。现有研究中，对于城市系统的能值研究以系统层的单层次灰箱系统分析研究为主，而这种单一要素的灰箱系统分析已经不能够满足城市生态系统的评价要求。能值分析方法亟待补充面向复合生态系统的尺度推演方法和总体分析框架。

(二)

城市是一个以人类活动为中心的社会—经济—自然复合生态系统。长期以来,我国城市所遵循的高投入、低产出、高污染的粗放型发展模式导致了严重的结构性隐患与环境问题,如高度依赖外界物质能源投入、物质与能源利用效率低、城市废弃物恣意排放、环境污染、生态破坏等。这些生态环境问题已对我国的城市生态系统和居民健康产生了一系列惩罚性影响。基于生物物理的视角考虑,城市生态环境问题的出现,与城市代谢不良密切相关,可以归结为城市生态系统日益增大的代谢流量,日趋复杂的代谢结构,不断降低的生态效率,持续恶化的环境影响,凸显出两方面问题:一方面,城市空间拓展和人口膨胀对资源消耗的需求持续增加,且资源利用效率低下,能源、土地和水三大核心资源的供需矛盾日益突出,资源短缺的“瓶颈效应”越来越显著;另一方面,在当前的产业结构和生产工艺水平下,高物质投入和高能量消耗必然导致高污染排放。近年来松花江水污染、太湖蓝藻等越来越多的环境污染事件为我国城市发展模式敲响了警钟。毫无疑问,如果仍然沿用现有发展模式,必将更为强烈地影响我们赖以生存的自然生态基础,最终导致城市健康程度降低甚至生态系统崩溃。

由此,城市代谢全过程的研究成为实现城市生态规划和环境管理等实际工作优化与决策的关键理论研究之一,通过对城市代谢过程的追踪和量化,摸清其运行机制,不但可以定量描述城市资源系统支撑和环境负荷,更可以找到城市代谢过程的优化路径,提高其资源利用效率。但是,在利用代谢研究方法剖析我国城市生态系统的过程中,无论是在方法体系上,还是其在我国城市生态系统应用实践上,都逐渐凸显出如下亟待解决的问题。

(1) 城市生态系统代谢分析的研究对象包括物质性和非物质性两大类,目前的研究主要集中在前者,如原材料、能源及“三废”污染物等。由于当前主要能源类型为化石能源,其可用能储存于含能物质中,因此本质上能源也属于原材料,仅加工转化过程和利用形式有所不同。需要特别注意的是,上述研究对象均已被纳入经济分析,但事实上城市中的生产生活行为还获得了大量生物圈可再生资源的支撑,包括阳光、土壤、风力等,以及环境容量、劳动力和信息,传统的研究对此考虑较少。而如何真正实现城市资源消费的高效和“减量化”,必须全面、系统地考察城市生态经济系统的各种资源消费。

(2) 传统的对系统代谢研究的方法主要有以质量守恒为基本依据的物质流分析方法(MFA)和以能量守恒为基本依据的能量流(EFA)分析方法。但是,物质质量相加,忽视了各种资源之间的品质差异,即为社会提供最终福利能力的差异。最重要的问题是,因为其计量过程是以物质和能量守恒定律为基本依据,

传统的城市物质代谢方法体系无法真正体现资源品质的衰减过程，也就很难理清废弃物资源利用的层级结构。换句话说，很多“强制性”资源回用往往导致整体过程中更大的资源浪费，也是很多循环经济设计“只循环不经济”的根本原因所在。

(3) 大多城市代谢的研究把系统看作灰箱，研究的重点多局限于元素代谢或部分子系统过程的物质代谢研究，尚未建立城市代谢的完备机制，以及缺乏对代谢的过程、机理、通量、效率、结构和影响的全方位度量。这一缺乏主要源于未能揭示城市生态环境问题的深层次原因，并缺乏定量城市内部子系统间的互动关系及其对整体城市系统的多方面影响，这需要对城市生态过程进行系统合理的拆解与整合。因此，只有建立城市生态过程核算体系，综合考虑系统生态流与生态组分之间复杂的作用关系，即生态流 + 生态组分 = 过程，才能深刻揭示城市生态系统结构—过程—功能演化机理，从而实现一体化核算、诊断、模拟与调控。

(三)

本书的研究初衷体现在如下两个方面。

第一，在分析资源消费及其环境影响时，重新界定城市代谢的内涵与外延，涵盖城市范围内的物质性资源与非物质性资源，将“资源”与“废弃物”统一在一个概念之下，即“废弃物是可用性降低的资源”，一个代谢过程的废弃物可能是下一个代谢过程的资源输入。本书引入“能值”这种生态环境核算方法进行资源量化分析。

第二，解决城市生态系统的资源环境问题，似乎就是要城市在资源消耗—污染排放的过程链条上进行削减（国家在“十一五”规划纲要中提出单位 GDP 能耗降低 20% 左右，主要污染物排放总量减少 10% 的节能和减排两个约束性目标），但除了能源，还有“节什么、谁来节、减多少”等系统性的问题其实并不明确。因此，探索城市系统资源消耗、废弃物排放以及资源回用之间的关联关系，系统解析城市资源消耗的结构（组成结构与部门分配结构）特征，研究区域城市发展过程中资源消耗的变化规律及其代谢机理，有助于寻找、评估和实施低排放的资源利用模式，提高效率和循环利用水平，为政策制定提供科学的决策工具，实现城市资源消耗的生态管理与调控，从而更好更快地推行两型社会（资源节约型和环境友好型）的建设。

本书研究并发展了能值分析方法，提出了能值视角的可持续观，修正了能值基准及方法学，建立了国家、省、城市多级核算框架及数据库，摸清生态家底；对城市代谢过程、城市健康水平、城市水系统、城市生态系统服务功能进行能值核算和评估，将废物流产生的环境影响纳入核算体系；创新性地提出了覆盖废物流的城市生态过程能值模拟技术，突破了原能值方法无法覆盖废物流的瓶颈，弥补了原有技术对关键生态要素考虑不全的缺陷，开发了城市循环经济政策动态分

析工具,实现了城市多种政策的耦合测评和调控。本书可作为能值分析这一生态环境核算方法和生态经济学等课程的教学用书和能值转换率参数参考工具书,其在城市方面的应用有利于解决城市代谢不良的影响因子识别问题,优化城市系统,使政策制定者能够避免在现有的经济基础上以及在向生态经济转型的关键发展时期支付高额生态成本和重复发达国家城市建设中的末端控制模式,推动社会系统的生态化转型实践,突破当前城市管理的瓶颈,促进城市的健康发展。

本书基于作者近15年在生态环境核算和城市绿色管理领域的研究工作及成果而成。全书由刘耕源和杨志峰共同撰写及统稿,并得到美国佛罗里达大学 Mark T. Brown 教授、意大利帕耳忒诺珀 (Parthenope) 大学 Sergio Ulgiati 教授、巴西保利斯塔 (Paulista) 大学的 Biagio F. Giannetti 教授和国际能值协会 (International Society for the Advancement Emergy Research) 众多成员的建议和帮助;部分章节得到北京师范大学陈彬教授、张力小教授、张妍教授、苏美蓉教授等及学生刘艳尼、刘心宇、薛婧妍、杨青、王琛、潘佳敏、张皓、王雪琪等的建议和帮助;出版阶段得到了我国著名生态经济学家刘思华老先生的帮助和指导,在此一并表示由衷的感谢!

本书的内容也包含下面所列项目的部分研究成果:国家自然科学基金创新研究群体项目“流域水环境、水生态与综合管理”(No. 51721093)、国家重点研发计划项目课题“京津冀城市群生态安全保障技术研究”(No. 2016YFC0503005)和“珠江三角洲城市群生态安全保障技术”(No. 2016YFC0502802)、国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目“面向可持续发展的城市食物—能源—水关联关系模拟研究”(No. 5151101470)、国家重点基础研究发展计划(973计划)项目“现代城市‘病’的系统识别理论与生态调控机理”(No. 2005CB724200)、国家自然科学基金“基于城市群产业代谢网络关联机制的协同减排政策工具开发与实证”(No. 71673029)、“城市产业代谢过程对流域生态健康影响的时空机制研究”(No. 41471466)、“基于生态热力学的城市网络结构模拟研究”(No. 41101564)、“基于生态热力学的城市代谢过程研究”(No. 40871056)和北京市自然科学基金(No. 8154051)。同时致谢高等学校学科创新引智计划(B17005)对合作国际专家的资助。

本书由国家自然科学基金创新研究群体项目“流域水环境、水生态与综合管理”(No. 51721093)和国家科学技术学术著作出版基金共同资助出版,十分感谢!

由于作者经验和水平有限,书中恐有错漏之处,敬请广大读者批评指正,以便促进生态环境核算理论方法和绿色管理实践不断完善。

刘耕源 杨志峰

2017年7月7日于北京铁狮子坟

目 录

序一

序二

前言

第 1 章 生态环境核算的缘起	1
1.1 环境经济核算与生态环境核算	1
1.2 基于生态热力学的生态环境核算理论基础	3
1.3 生态环境核算方法的国内外研究概览	5
1.3.1 能值核算理论的发展历程综述	5
1.3.2 自然生态系统能值核算相关研究概述	7
1.3.3 农业系统能值核算相关研究概述	8
1.3.4 生态工程和环境治理工程能值相关研究概述	8
1.3.5 区域生态经济系统能值核算相关研究概述	9
1.4 环境核算由浅绿走向深绿的原因	11
第 2 章 生态环境核算体系及方法学	14
2.1 生态环境核算基准近二十年的变迁	14
2.2 生态环境核算 EmCF 数据库构建	16
2.3 地球的可再生初级能值流	17
2.4 地球上可再生次级能值流	19
2.4.1 风能	19
2.4.2 降雨能	20
2.4.3 洋流能	21
2.5 地球可再生第三级能值流	21
2.5.1 波浪能	21
2.5.2 大陆径流地理势能	21
2.5.3 地表径流的化学能	22
2.6 水的能值转换率	22
2.7 放射性矿物	24
2.8 地壳矿物质能值转换率	25

2.8.1 单一元素矿石	25
2.8.2 多元素矿石	27
2.8.3 岩石聚合物的能值转换率	27
2.8.4 珊瑚礁能值转换率	27
2.8.5 海水中的矿物	28
2.9 大气气体	29
2.10 土地、生物质和土壤的能值转换率	30
2.10.1 土地使用	30
2.10.2 土地利用类型转变或占用	32
2.10.3 生物质	32
2.10.4 土壤有机碳	33
2.10.5 土壤	33
2.11 木材	34
2.12 化石燃料	35
2.12.1 泥煤	35
2.12.2 煤	36
2.12.3 油和天然气	38
2.12.4 氦	39
2.13 劳力	39
2.14 需要进一步讨论的几个问题	40
2.14.1 全球能值基准	40
2.14.2 可更新和不可更新	41
2.14.3 生物的能值转换率	41
2.14.4 土地占用的能值转换率	41
2.14.5 核物质	42
2.14.6 矿物质	42
2.14.7 大气气体	42
2.14.8 土地占用、现存生物量和木材收获的计算过程	42
2.14.9 水的计算过程	43
2.15 本章小结	45
第3章 基于生态环境核算的区域可持续性指标体系	46
3.1 面向可持续发展的城市代谢的热力学观	46
3.1.1 城市系统与可持续性	46
3.1.2 城市可持续发展问题的辩论	48
3.1.3 城市代谢和熵增原理	48

3.2	从人类中心论到生态中心论的环境伦理观的转移	51
3.3	区域可持续的时空分异研究	51
3.4	可持续指数与四种表征可持续性指标的相关性研究	61
3.5	本章小结与讨论	67
第4章	国家及省级区域系统代谢过程的生态环境核算	69
4.1	生态环境核算框架构建与改进	69
4.1.1	数据库框架概要	69
4.1.2	方法学与核算内容	70
4.2	数据来源、估算方式及能值转换率修正	71
4.2.1	可更新资源流	72
4.2.2	本地可更新资源流	74
4.2.3	本地不可再生的资源流	76
4.2.4	进口及出口资源流	79
4.2.5	省级基础数据的获取	80
4.3	能值指标体系及空间分析方法	81
4.4	中国省级区域系统生态环境核算结果	82
4.4.1	经济子系统生态环境核算指标比较分析	82
4.4.2	社会子系统生态环境核算指标比较分析	85
4.4.3	自然子系统生态环境核算指标比较分析	87
4.4.4	发展可持续性指标比较分析	88
4.5	中国省级区域生态环境核算空间区位分析	90
4.5.1	生态环境核算来源结构性指标	90
4.5.2	生态环境核算社会发展类指标	92
4.5.3	生态环境核算经济发展类指标	92
4.5.4	区域可持续发展水平综合评估	93
4.6	省级区域系统生态环境核算可持续性相关性分析	95
4.6.1	传统生态环境核算指标相关性分析	95
4.6.2	社会发展与生态环境核算指标相关性创新分析	95
4.7	本章小结	100
4.7.1	研究结论	100
4.7.2	研究展望	101
第5章	城市系统代谢过程的生态环境核算	102
5.1	城市代谢系统分析	102
5.2	城市系统的生态环境核算研究方法	103
5.2.1	基于能值的城市代谢模型图的绘制	103

5.2.2	城市代谢系统的绿色核算体系	104
5.3	北京市代谢系统生态环境核算结果分析	108
5.3.1	北京市基础能源资源流分析	108
5.3.2	北京市代谢系统能值核算与分析	108
5.4	本章小结与讨论	120
5.4.1	城市结构和效率的动态变化	121
5.4.2	城市代谢系统分析的多尺度嵌套	122
第 6 章	基于生态环境核算的城市生态环境影响评估	124
6.1	城市代谢与城市生态环境影响	124
6.1.1	耦合了科技、福祉和环境的评估体系	124
6.1.2	生态环境核算：一种不只是技术层面的方法	125
6.2	基于生态环境核算的城市生态环境影响评价方法	125
6.2.1	基于生态环境核算的环境影响评估模型	126
6.2.2	生态环境影响评价	128
6.2.3	环境影响修正后的生态环境核算指标	132
6.2.4	污染物的测定	133
6.3	基于生态环境核算的城市生态环境影响评价结果与讨论	134
6.3.1	城市不同代谢过程中的直接和间接流分析	136
6.3.2	修正后能值指标综合评价	141
6.4	本章小结	143
第 7 章	基于生态环境核算的城市健康评价和发展模式分析	145
7.1	城市健康与生态环境核算	145
7.2	基于生态环境核算的城市健康评价方法	147
7.2.1	城市健康指标选择	147
7.2.2	基于生态环境核算的城市生态系统健康指数	148
7.2.3	中国 31 个典型城市的健康程度测算	148
7.3	基于生态环境核算的城市健康及发展模式分析	152
7.3.1	城市聚类分析	152
7.3.2	中国城市健康程度空间结构分析	154
7.4	城市健康与环境经济要素关联性讨论	156
7.4.1	经济增长与环境绩效的协同分析	156
7.4.2	经济增长和城市生态系统健康	157
7.5	本章小结	158
第 8 章	城市生活用水系统的生态环境核算	160
8.1	城市生活用水供给过程	160