

城市物质能量代谢相关研究述评 ——兼论资源代谢的内涵与研究方法

张力小, 胡秋红

(北京师范大学 环境学院 水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875)

摘要: 物质能量代谢分析已成为城市生态系统研究的一个重要视角与工具。论文在对当前各种代谢概念与方法进行系统梳理和分析的基础上, 借鉴资源科学相关研究的最新成果, 重新整合城市代谢相关的研究内容和分析边界, 将物质能量代谢概念拓展为资源代谢的概念, 试图涵盖物质性资源和非物质性资源、能量性和非能量性资源, 并引入资源烟来解决城市资源代谢的生态统一核算问题, 实现资源稀缺性和有用性的有效度量。此外, 引入资源流过程分析特别是网络分析的方法, 可打破传统代谢研究“灰箱”分析的局限, 实现资源流在系统内部流动的代谢路径跟踪, 实现城市生态系统结构化与网络化的深度分析, 从而完善城市代谢研究的理论与方法体系。

关键词: 城市生态系统; 代谢分析; 资源烟; 资源流

中图分类号: X171.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)10-1801-10

随着我国城市化进程的进一步加快与经济的迅速发展, 发达国家近百年的城市环境问题在我国二三十年内集中爆发, 我国正面临着世界上最为严重的城市生态问题。如同生命有机系统一样, 一个城市也需要持续不断输入输出物质、能量和信息等代谢过程以实现其正常的运转。从代谢的角度研究城市系统能量输入(资源支撑)与输出(污染排放), 被认为是系统解析城市病症结的重要切入点^[1]。到目前为止, 与城市相关的代谢研究在理论和实践方面都取得了很大进展。本文试图系统梳理和分析城市物质能量代谢的相关概念和方法, 结合当前国内外在该领域研究中的研究进展与热点, 重新整合城市代谢过程的分析边界、研究内容和核算方法, 提出资源代谢的概念和方法, 从而为城市生态系统过程分析提供一种新的研究视角和方法体系。

1 城市物质能量代谢的概念与方法

1.1 涉及城市代谢相关概念层次不一, 研究对象各有侧重

在宏观层面, 目前可用于城市系统分析的相关代谢概念层次不一, 具体有社会代谢(Social Metabolism)、城市代谢(Urban Metabolism)、产业代谢(Industrial Metabolism)、能量代谢(Energy Metabolism)以及生态能量代谢(Ecological Energetic Metabolism)等。这些代谢分析的内涵和外延既存在很大的重叠, 也存在较大的差异。

收稿日期: 2011-01-24; 修订日期: 2011-05-03。

基金项目: 国家自然科学基金项目(40901293); 国家重点实验室专项基金课题(11Y04ESPCN); 中央高校基本科研业务费专项资金(2010)。

第一作者简介: 张力小(1977-), 男, 山东沂水人, 副教授, 博士, 主要从事资源过程代谢与生态核算研究。E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

关于代谢的论述最早见于1857年Jarob Moleschott的著作,他认为生命是一种代谢现象,是能量、物质与周围环境的交换过程^[2]。随后,这种思想被逐渐引申到生态学、生物学等自然科学领域以及哲学、社会学等领域。在社会学和文化人类学方面,马克思是代谢概念的最早使用者,用于描述人类劳动与自然环境之间的关系,他认为劳动过程就是社会与自然之间的物质交换过程^[3],其代谢的含义已经体现了社会经济活动中的资源环境过程。此后,奥地利学者继承和发扬了这一概念,在社会代谢方面开展了卓有成效的研究,用来分析社会发展过程中的资源环境负荷,代表人物有Fischer-Kowalski、Heinz Schandl、Niels Schulz、Fridolin Krausmann等^[3-5]。近些年来,西班牙、葡萄牙以及中国等国家也陆续出现以社会代谢为核心内容的相关研究^[6-8]。

需要说明的是,1955年在美国新泽西州普林斯顿召开“人类在改变地球命运过程中的作用”学术会议,使得人们开始关注社会发展的物质基础,传统的社会代谢内涵得到了极大的扩展,现代经济社会中资源开发、加工制造、产品消费、废物处置、循环再生五个关键环节所构成的社会物质代谢问题逐渐引起国外学者的关注^[4]。

针对城市物质消耗所引起的资源环境问题,曾经参加过1955年会议的美国水处理专家Abel Wolman于1965年提出城市代谢的概念,他认为城市代谢是从环境中输入物质和能量,然后输出产品和废物的过程^[9],并首先测定了城市居民生活、工作或娱乐所需要的各项物质,如粮食衣物、燃料、电力及各种建材等,开辟了城市代谢研究领域。此后,香港^[10-11]、悉尼^[12]、维也纳^[13]、多伦多^[14]和伦敦^[15]等城市都悉数开展了城市代谢研究。这些研究也成为该领域的标志性成果,在国内被广泛介绍和引用^[16-18]。

1970年,Allen V Kneese与Robert U Ayres以及Wassily W Leontief等基于经济学理论和投入产出方法分别提出物料平衡分析的初步方法,用以解释系统的生产与消费以及外部性问题,从而推动物质代谢研究逐渐应用于识别产业结构及其导致的环境影响^[19-20]。1988年Robert U Ayres提出工业代谢的概念,也被译为产业代谢,他认为产业代谢是原料、能源和劳动在一起转化为产品和废弃物的物理过程的集合^[21]。此后,德国、加拿大、美国、日本、荷兰、瑞典等发达国家在这方面开展了大量研究^[22-23]。产业代谢的提出,标志着物质代谢研究范畴正式确立并得到广泛认可。

然而物质和能量是同一个过程的两个不同方面,要想全面认识代谢过程,两个方面必须同时考虑。针对能量的重要性,Haberl在1997年提出了“能量代谢”的概念,并根据物质流研究分析框架对能量流分析方法进行了详细的阐述^[24-26],随后也有很多学者在不同尺度上进行了有关能量代谢方面的尝试,如Krausmann和Haberl从能量代谢的角度研究了奥地利社会经济系统的现代化进程^[27],Ramos-Martin等运用多尺度综合分析方法探讨了中国经济系统的演化^[28]。其中,Huang等采用能值分析方法,系统分析了台湾的生态能量代谢过程,并将结果与传统的物质流分析结果进行了对比,认为物质流分析方法不能很好地识别台湾日益增长的能量依赖这一社会现实^[29]。

表1系统梳理了上述概念方法的内涵与适应范围。其中,社会代谢、城市代谢和产业代谢都是基于载体角度提出的,往往以物质流分析为手段,而能量代谢和生态能量代谢是基于对象的角度提出,以能量流分析为手段。社会代谢和城市代谢研究从系统层面出发,涵盖了系统边界内主要的要素代谢过程,如水、能源、土地等,分辨率较粗。产业代谢缩小了系统边界,集中于某一产业过程,侧重于资源转化效率及生态效率的研究。需要说明的是,对于基于载体的代谢研究一般须借助于物质代谢和能量代谢等基于研究对象的方法进行分析。

表 1 各种相关代谢概念的对比

Table 1 Comparison of metabolism concepts associated with urban ecosystem research

名称	概念	研究角度	主要代表人物	系统边界	研究对象	特点
社会代谢	人类社会与自然环境系统交换物质和能量的过程 ^[4]	载体	Fischer-Kowalski M	人类社会经济活动	水、空气、固体物质、“三废”、土地等	从系统层面出发,分辨率较粗,代谢过程不够清晰,数据需求量大
城市代谢	城市系统输入物质、能量、食物等,然后输出产品和废物的过程 ^[9] 。	载体	Wolman A	城市系统	能源、食物、建筑材料、水、空气、土地等	系统边界确定,涵盖系统内各种代谢过程,代谢过程模糊,数据需求量大
产业代谢	由资源开采、加工制造、产品消费、原料、能源和劳动在一起转化为产品和废弃物的物理过程的集合 ^[21]	载体	Ayres R U	产业系统	水、空气、固体物质、“三废”等	系统边界集中于某一产业过程,侧重物质能量转化率、生态效率的研究,代谢过程清晰
能量代谢	社会能量输入、转换与输出过程 ^[24]	对象	Habel H	不确定	能源、“三废”	仅仅考虑了化石能源的作用,忽略了物质和可再生能源的作用
生态能量代谢	产品或劳务生产过程中直接或间接的能量输入输出过程 ^[29]	对象	Huang S L	不确定	可再生资源、水、固体物质、服务、“三废”等	拓展了核算范围,但存在重复计算等问题,而且对服务的核算方法仍存在争议

显然,物质代谢仅仅考虑了物质性研究对象的作用,而忽视了非物质性能量的作用,如太阳能、电力等;与之相反,传统的能量代谢仅仅考虑了化石能源的作用,而忽略了物质和可再生能源的作用。以能值分析为统一度量方法的生态能量代谢,尽管其研究范围涵盖了各种可再生能源、物质、能量、服务等资源,为代谢研究提供了一个新的思路和工具,然而该方法仍存在一定的缺陷,例如重复计算、无法分离副产品以及反馈等问题^[30],且对于信息、服务等方面的处理,学术界仍然存在争议等等,目前应用较少。因此,如何将各种物质性和非物质性研究对象统一在同一代谢概念之下进行统一核算仍有待进一步探索。

1.2 存在统一核算问题,无法统一量化“量”与“质”

目前国内外对于城市代谢的定量计算主要体现在“重量”、“能量”及“面积”等三个方面,一般采用分项计算,或混合加和,计算相关代谢过程中的流通量与流通强度。具体核算方法分别有:

(1) 物质流分析(Materials Flow Analysis,简称 MFA),主要是以质量守恒定律为基本依据,从实物的质量出发,将通过社会经济系统的物质分为输入、贮存和输出三大部分,通过研究三者的关系,揭示物质在特定区域内的流动特征和转化效率^[31],一般采用物理单位(通常用 t)。当前不少研究机构和学者正在为物质流分析建立统一的计算框架^[32-33],欧盟于 2001 年为国家层面的物质流分析制定了一个导则^[34]。

(2) 能量流分析(Energy Flow Analysis,简称 EFA),能量流与物质流是同一个系统代谢过程的两个不同方面,因此 EFA 与 MFA 的系统边界相同,具体是以能量守恒定律为基本依

据,跟踪能量在社会经济系统中的流动途径及过程,揭示能量在特定区域内的流动特征、转化效率和总的吞吐量^[27]。

其实,美国生态学家 Odum 提出的能值方法也是能量系统分析方法中的一种。所谓能值,即产品或劳务生产过程中直接或间接投入某种可用能的总量^[35],Odum 认为太阳能是地球上能源的根本来源,因此将太阳能值作为核算基准,对各种不同性质和类别的物质和能量进行统一度量,为实现各种资源的统一核算提供了一种新的思路和工具。

(3) 生态足迹(Ecological Footprint,简称 EF),主要是计算出满足城市或者区域社会经济系统物质代谢所需要的虚拟土地数量,即计算出化石能源地、耕地、牧草地、林地、建筑用地和水域的生产力,主要用于判断一个区域社会经济系统的物质代谢是否处于生态承载能力的范围内^[36]。

这三种分析方法目前在城市相关代谢的研究中都有应用,但存在的问题却是显而易见的(表2)。物质流分析方法基本上是基于重量进行加和,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;而生态足迹分析方法以土地面积作为第三方当量进行折算,无法反映资源消耗的结构变化,也无法真正反映城市代谢过程。相比较而言,能量流分析法是目前讨论较多的方法,然而不管是传统的能量分析方法还是能值分析方法都是以能量守恒定律作为基本依据的,只能反映资源的使用规模和流动路径,无法反映资源品质的衰减过程,也无法真正体现资源的“可用性”与“稀缺性”。

表2 典型案例城市代谢研究所采用的核算方法

Table 2 Accounting methods adopted in the available urban metabolism research cases

城市	涉及年份	参考文献	研究内容	核算方法
多伦多	1987 和 1999 年	[14]	食物、水、能源、物质、废弃物	基于重量逐项核算,没有系统加和
维也纳	20 世纪 90 年代	[13]	水、化石燃料、建筑材料、消费品、“三废”排放物	基于重量逐项核算,没有系统加和
香港	1971 和 1997 年	[10-11]	食物、水、物质、能源、城市建设耗材料、“三废”排放物	基于重量逐项核算,没有系统加和
台北	1960,1970,1980 和 1990 年	[37]	城市生态系统输入的可更新、不可更新资源	采用能值方法进行统一核算
悉尼	1970 和 1990 年	[12]	食物、能源、水、“三废”排放物	基于重量逐项核算,没有系统加和
伦敦	2000 年	[15]	能源、食物、土地、“三废”排放物	生态足迹
北京	2006 年	[38]	能源	基于能量逐项核算并运用生态网络分析方法进行结构分析

因此,除了研究目的不同外,缺乏能够统一量化系统代谢过程中的资源“量”与“质”的方法,也是当前代谢研究过程中系统边界不同、归类方法差异大、彼此结果之间缺乏可比性的重要原因。

通过对当前国内外相关代谢研究的分析与梳理,不难看出:①目前涉及城市代谢相关的概念较多,各有侧重,但这些概念的提出并非针对于城市这个特有的尺度,如果用于城市系统研究,分辨率粗细不合适,而且有些概念出现时间较早,无法适应当前城市系统代谢过程研究的需要;②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,而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,但事实上城市中的生产、生活行为还需要大量生物圈可再生资源的支撑,包括阳光、土壤、风力和环境容量等,以及外部经济

社会的劳动力和信息等资源的支持,传统代谢研究对此考虑较少;③从核算方法上看,仍然缺乏各种物质能量之间的统一度量方法,研究系统边界的拓展面临诸多困难,同时传统的代谢方法主要以物质和能量守恒定律为基本依据,只能反映资源数量的流动过程,无法反映资源品质的衰减过程,也无法真正体现资源的“可用性”与“稀缺性”;④目前城市代谢研究主要是基于要素的视角,忽视资源科学研究的新成果,与资源科学的研究存在一定程度的割裂。

2 资源科学的相关研究进展

2.1 资源流研究进展

“流”的学术思想最初来源于生态学,用于揭示生态系统各组分之间相互作用的方向、强度和速率。随着生态学思想在资源科学领域的渗透,资源流研究日渐成为资源科学发展新的视角。近几年,国内有学者开始对资源流理论进行探讨,认为资源流是指资源在人类活动作用下,在产业、消费链条或不同区域之间所产生的运动、转移和转化。它既包括资源在不同地理空间资源势的作用下发生的空间位移(所谓横向流动),也包括资源在原态、加工、消费、废弃这一链环运动过程中形态、功能、价值的转化过程(所谓纵向流动)^[39-40]。除此之外,沈镭和刘晓洁对资源流的概念又进行了重新界定,即资源流是指在人类活动中,资源在不同空间位置、不同产业集群、不同消费链条单元、不同使用功能之间的运动、转移和转换,既包括资源在空间方向上的流动,也包括资源在价值和功能方向上的转移和改变。这个概念中包含了一些特殊资源如土地资源和劳动力资源^[41]。

相比较而言,国外并没有专门针对资源流这个领域开展具体的研究,其研究分散在其他的范畴内,但既有对经济发展过程中资源的横向流动和纵向流动的研究^[42-43],也有对企业生产过程的资源流动机制进行探讨^[44-45]。在理论方面,英国科学家 Chamber 系统分析了与国家经济活动密切相关的资源流动过程,构建了资源流研究的框架,目前已得到广泛认可。同时,在各层次生态系统中资源流动的研究中,生态网络分析(Ecological Network Analysis)得到广泛的应用^[38,46]。

由此可见,系统过程的资源流研究及其代谢研究,都强调资源是输入输出过程,强调系统发展的资源支撑与过程分配,只是在分析的出发点上有较大差异,资源流强调其流动的承接,而代谢则强调过程的转换。尽管如此,资源流的研究可为系统代谢研究打破“灰箱”分析模式,实现资源系统代谢过程的深度分析,即实现结构化与网络化的分析,提供方法学参考。但是,资源流的研究同样面临统一核算问题,同样面临如何实现资源可用性和稀缺性的有效度量问题,如何体现资源的品质差异问题。生态热力学的理论与方法之一——资源炯(Exergy)的发展为此带来了新的曙光。

2.2 资源炯研究进展

又称为有用能或可用能,是能量中能转变为有用功的那部分,因此是物质或能量的有用性或品质的表征。任何系统赖以维持的基础是炯而不是能,炯才是所有系统功能的最终资源,与能量相比,由于实际过程不可逆,炯总是被消耗,故炯不守恒(除理想或可逆过程)。因此,炯能够真正度量资源稀缺性和有用性,而且炯是能量“质”和“量”的统一,可以对各种形式的物质、能量和信息进行统一度量,并赋予其科学客观的意义^[47]

炯方法用于系统核算最初仅仅局限于分析能源使用中的能量流^[48-49]。Wall 首次将炯核算的范围扩大至包括原材料在内的各种资源,将炯的概念扩展到资源炯^[50],Wall 及其后

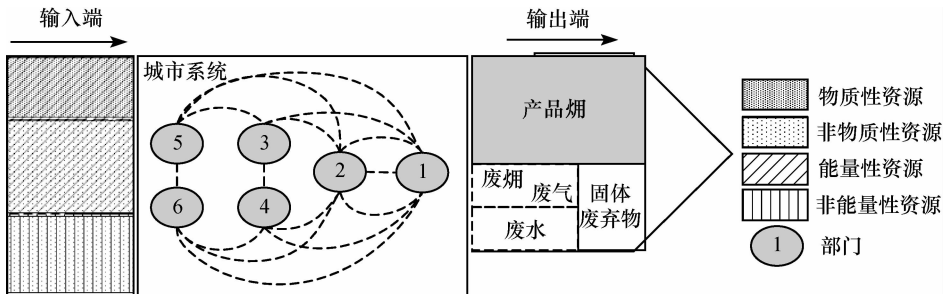
继者对包括瑞典、巴西、挪威、意大利、中国在内的国家进行了资源焓系统核算^[51-55]。从环境影响方面看,由于表征焓的是物质或能量的有用性或品质,描述系统产生变化的潜能,因此,焓可以作为测度物质或能量对环境影响潜力的指标。Rosen 提出焓环境影响的三个方面:秩序破坏、资源退化与废排放^[56]。Sciubba 提出扩展焓会计理论(Extended Exergy Accounting),采用焓直接评价环境污染控制措施对转换过程和系统能量平衡的影响,综合以往资源焓理论和工程成本分析^[57]。除此之外,Chen 等核算了中国各项资源的焓值和河流污染物的废焓量^[58-60],特别是借助扩展焓和投入产出表等两个方面拓展了系统核算的边界及其产业代谢过程网络分析^[61-62]。但是,这些研究大多停留在国家尺度的资源核算上,较少有人将资源焓核算方法引入城市系统的代谢分析中^[63]。

总之,焓分析不但能表达“有效”资源流和代谢过程,还可反映系统的结构、梯度、等级和组织等特征^[64]。

3 资源代谢的概念与方法

通过上述几个方面的分析,我们不难发现它们之间存在着很好的相互弥补与相互支撑的结合点,城市相关代谢概念的扩展及其研究方法上也出现了新的曙光,即可将城市物质能量代谢可拓展到资源代谢的这个层面,将城市系统的演化和发展所需要的输入与输出落实到资源这个层面,而用资源焓来解决资源统一核算问题。

因此,本研究将传统的“物质代谢”或“能量代谢”扩展为“资源代谢”,重新界定其内涵和外延,同时引入资源焓核算计量方法,实现资源代谢视角下的统一核算。可对城市资源代谢的概念下一个初步的定义,即城市生态系统在维持系统结构与功能在一定的稳态条件下的各种物质性和非物质性、能量性和非能量性资源的输入输出的过程,也是在维持城市生态系统结构与功能下的资源流品质与可用能的衰减过程。如图 1 所示,资源代谢的输入涵盖了各种物质性资源与非物质性资源的输入,这些资源流在城市系统中进行代谢与流动,是城市发展动力。要想全面系统地认识城市生态系统的代谢过程,必须系统地考察城市生态经济系统的各种资源流动,即需要涵盖各种研究对象。



注:1 为居民消费部门;2 为第三产业;3 为能源转化部门;4 为交通部门;5 为农业部门;6 为工业部门;物质性资源包括原材料、能源、建筑材料、食物等;非物质性资源包括太阳能、风能等可再生资源、电力、劳务等;能量性资源包括化学能源、可再生能源、电力等;非能量性资源包括建筑材料、食物、原材料等物质性资源。

图 1 城市系统资源代谢示意图

Fig. 1 Conceptual model for resource metabolism of urban ecosystem

资源代谢的概念、方法一方面实现了各种物质性资源和非物质性资源、能量性和非能量性资源的系统、统一的核算,同时还理清了资源废弃物利用的层次结构,将“资源”与“废弃

物”统一在了同一资源视角之下,即“废弃物是可用性降低的资源”,或者说处在代谢层级下端的资源,为代谢研究提供了一个新的视角和工具。

4 结论与讨论

目前关于城市代谢研究的相关概念层次不一,研究对象也各有侧重,但大多仅仅关注了物质性资源的作用,忽略了太阳能、风能、信息等非物质性资源的作用,而要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。因此本文在系统梳理当前各种代谢概念、分析边界及其核算方法的基础上,提出资源代谢的概念框架构想,试图涵盖物质性和非物质性资源、能量性和非能量性资源。

借鉴资源科学领域最新的研究成果,引入资源熵来解决城市资源代谢的生态统一核算问题,解决资源稀缺性和有用性的有效度量,同时实现各种物质、能量、信息在同一视角下的统一核算,为城市代谢研究提供了一个新的视角和工具,而且对于揭示城市系统资源流动转化过程、利用效率及可能产生的生态环境效应具有重要作用。同时,借鉴资源流研究的进展,特别是网络分析方法,可打破传统代谢研究的“灰箱”分析模式,实现资源流在系统内部流动的代谢路径跟踪,实现结构化与网络化的深度分析。

但是,本文仅仅提出了一个概念和分析框架的构想,目前基于相关案例城市的研究正在开展,后续成果将对资源代谢思想与方法的完善提供实践验证。

参考文献(References):

- [1] 黄书礼. 都市生态经济与能量[M]. 台北:詹氏书局,2004. [HUANG Shu-li. Energy Basis for Urban Ecological Economic System. Taipei: Chanshi Press, 2004.]
- [2] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹——可持续发展的重量及面积观念[M]. 北京:经济科学出版社,2003. [TAO Zai-pu. Eco-rucksack and Eco-Footprint: The Conception of Weight and Area of Sustainability Development. Beijing: Economic Science Press,2003.]
- [3] Schandl H, Schulz N. Changes in the United Kingdom's natural relations in terms of society's metabolism and land-use from 1850 to the present day [J]. *Ecological Economics*,2002,41(2):203-221.
- [4] Fischer-Kowalski M. Society's metabolism: The intellectual history of materials flow analysis, Part I: 1860 - 1970 [J]. *Journal of Industrial Ecology*,1998,2(1):61-78.
- [5] Krausmann F, Haberl H, Schulz N B, et al. Land-use change and socio-economic metabolism in Austria—Part I: Driving forces of land-use change: 1950-1995 [J]. *Land Use Policy*,2003,20(1):1-20.
- [6] Xu M, Jia X P, Shi L, et al. Societal metabolism in Northeast China: Case study of Liaoning Province [J]. *Resources, Conservation and Recycling*,2008,52(8/9):1082-1086.
- [7] Cusso X, Garrabou R, Tello E. Social metabolism in an agrarian region of Catalonia (Spain) in 1860-1870: Flows, energy balance and land use [J]. *Ecological Economics*,2006,58(1):49-65.
- [8] Niza S, Ferrao P. A transitional economy's metabolism: The case of Portugal [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 46(3): 265-280.
- [9] Wolman A. The metabolism of cities [J]. *Scientific American*,1965,213(3):179.
- [10] Newcombe K, Kalina J D, Aston A R. The metabolism of a city: The case of Hong Kong [J]. *AMBIO*,1978,7(1):3-15
- [11] Warren-Rhodes K, Koenig A. Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong: 1971 - 1997 [J]. *AMBIO*,2001, 30(7): 429-438.
- [12] Newman P W. Sustainability and cities: Extending the metabolism model [J]. *Landscape and Urban Planning*, 1999, 44(4): 219-226.
- [13] Hendriks C, Obernosterer R, Muller D, et al. Material flow analysis: A tool to support environmental policy decision making: Case studies on the city of Vienna and the Swiss lowlands [J]. *Local Environment*, 2000, 5(3): 311-328.

- [14] Sahely H R, Dudding S, Kennedy C A. Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto area case study [J]. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(2): 468-453.
- [15] Chambers N, Heap R, Jenkin N E A. A resource flow and ecological footprint analysis of greater London [R], 2002.
- [16] 徐一剑, 张天柱, 石磊, 等. 贵阳市物质流分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(12): 1688-1691. [XU Yi-jian, ZHANG Tian-zhu, SHI Lei, et al. Material flow analysis in Guiyang. *Journal of Tsinghua University: Science & Technology*, 2004, 44(12): 1688-1691.]
- [17] 颜文洪, 刘益民, 黄向, 等. 深圳城市系统代谢的变化与废物生成效应[J]. 城市问题, 2003(1): 40-44. [YAN Wen-hong, LIU Yi-min, HUANG Xiang, et al. The change of urban metabolism and the linkages between economics, ethics and the environment. *City Problem*, 2003(1): 40-44.]
- [18] 于术桐, 黄贤金. 区域系统物质代谢研究——以江苏省南通市为例[J]. 自然资源学报, 2005, 20(2): 212-221. [YU Shu-tong, HUANG Xian-jin. Studies on material metabolism in the regional system—A case study of Nantong City, Jiangsu Province. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(2): 212-221.]
- [19] Ayers R U, Kneese A V. Production consumption and externalities [J]. *American Economic Review*, 1969, 59(3): 282-297.
- [20] Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: An input-output approach [J]. *Review of Economics and Statistics*, 1970, 52(1): 262-271.
- [21] Ayres R U. Industrial metabolism: Theory and policy [C]//Ayres R U, Simonis U K. *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development*. United Nations University Press, 1994: 3-20.
- [22] Michaelis P, Jackson T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector, Part 2: 1994–2019 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 29(3): 209-230.
- [23] Daigo I, Matsuno Y, Adachi Y. Substance flow analysis of chromium and nickel in the material flow of stainless steel in Japan [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2010, 54(11): 851-863.
- [24] Haberl H. Human appropriation of net primary production as an environmental indicator: Implications for sustainable development [J]. *AMBIO*, 1997, 26(3): 143-146.
- [25] Haberl H. The energetic metabolism of societies [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 5(1): 11-31.
- [26] Haberl H. The energetic metabolism of societies, Part II: Empirical examples [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 5(2): 71-88.
- [27] Krausmann F, Haberl H. The process of industrialization from the perspective of energetic metabolism; Socioeconomic energy flows in Austria 1830–1995 [J]. *Ecological Economics*, 2002, 41(2): 177-201.
- [28] Ramos-Martin J, Giampietro M, Mayumi K. On China's exosomatic energy metabolism: An application of multi-scale integrated analysis of societal metabolism (MSIASM) [J]. *Ecological Economics*, 2007, 63(1): 174-191.
- [29] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan; Emery synthesis versus material flow analysis [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(2): 166-196.
- [30] Zhang L X, Chen B, Yang Z F. Comparison of urban ecosystems of typical mega cities in China using emery synthesis [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(6): 2827-2836.
- [31] 夏传勇. 经济系统物质流分析研究述评[J]. 自然资源学报, 2005, 20(3): 415-421. [XIA Chuan-yong. Review on studies of economy-wide material flow analysis. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 415-421.]
- [32] Schandl H, Grunbuhel C, Haberl H, et al. Handbook of physical accounting measuring bio-physical dimensions of socio-economic activities MFA-EFA-HANPP [R]. Vienna: 2002.
- [33] Brunner P H, Rechberger H. Practical Handbook of Material Flow Analysis [M]. Boca Raton: CRC Press, 2003.
- [34] Eurostat. Economy-wide Material Flow Accounts and Derived Indicators—A Methodological Guide [M]. Luxembourg: Eurostat, 2001.
- [35] Odum H T. Environmental Accounting—Emery and Environmental Decision Making [M]. New York: John Wiley & Sons, 1996.
- [36] Rees W, Wackernagel M. Urban ecological footprints; Why cities cannot be sustainable—And why they are a key to sustainability [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 1996, 16(4/6): 223-248.
- [37] Huang S L. Urban ecosystems, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis [J]. *Journal of Envi-*

ronmental Management, 1998, 52(1):39-51.

- [38] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D, *et al.* Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: Model development, and a case study of four Chinese cities [J]. *Ecological Modelling*, 2010, 221(16):1865-1879.
- [39] 成升魁, 闵庆文, 闫丽珍. 从静态的断面分析到动态的过程评价——兼论资源流动的研究内容与方法[J]. *自然资源学报*, 2005, 20(3): 407-414. [CHENG Sheng-kui, MIN Qing-wen, YAN Lin-zhen. From static assessment to dynamic processing resources flow and its contents and methods. *Journal of Natural Resources*, 2005, 20(3): 407-414.]
- [40] Cheng S K, Xu Z R, Sun Y, *et al.* Spatial and temporal flows of China's forest resources: Development of a framework for evaluating resource efficiency [J]. *Ecological Economics*, 2010, 69(7):1405-1415.
- [41] 沈镞, 刘晓洁. 资源流研究的理论与方法探析[J]. *资源科学*, 2006, 28(3):9-16. [SHEN Lei, LIU Xiao-jie. Discussion on theories and methods of resource flow. *Resource Science*, 2006, 28(3):9-16.]
- [42] Krausmann F, Haberl H, Erb K H, *et al.* Resource flows and land use in Austria 1950-2000: Using the MEFA framework to monitor society-nature interaction for sustainability [J]. *Land Use Policy*, 2004, 21(3): 215-230.
- [43] Peter B. Green accounting and material flow: Alternatives or complements? [R] WI papers No. 106. 2000.
- [44] Chambers N, Child R, Jenkin N, *et al.* Stepping forward: A resource flow and ecological footprint analysis of the southwest of England resource flow report [R]. Best Foot Forward Ltd, United Kingdom, 2005.
- [45] Narayanaswamy V, Scott J B, Ness J N, *et al.* Resource flow and product chain analysis as practical tools to promote cleaner production initiatives [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2003, 11(4):375-387.
- [46] Fath B D, Patten B C. Quantifying resource homogenization using network flow analysis [J]. *Ecological Modelling*, 1999, 123(2/3): 193-205.
- [47] Ukidwe N U, Bakshi B R. Thermodynamic accounting of ecosystem contribution to economic sectors with application to 1992 U. S. economy [J]. *Environmental Science and Technology*, 2004, 38(18):4810-4827.
- [48] Reistad G M. Available energy conversion and utilization in the United States [J]. *ASME Journal of Engineering for Power*, 1975, 97: 429-434.
- [49] Ayres R U, Ayres L W, Warr B. Exergy, power and work in the US economy, 1900-1998 [J]. *Energy*, 2003, 28(3): 219-273.
- [50] Wall G. Exergy—A useful concept within resource accounting [R]. Institute of Theoretical Physics, 1977, Report No. 77-42.
- [51] Wall G. Exergy conversion in the Swedish society [J]. *Resources and Energy*, 1987, 9(1):55-73.
- [52] Wall G. Exergy conversion in the Japanese society [J]. *Energy*, 1990, 15(5):435-444.
- [53] Wall G, Sciubba E, Naso V. Exergy use in the Italian society [J]. *Energy*, 1994, 19(12):1267-1274.
- [54] Ertesvag I S, Mielnik M. Exergy analysis of the Norwegian society [J]. *Energy*, 2000, 25(10): 957-973.
- [55] Chen G Q, Qi Z H. Systems account of societal exergy utilization: China 2003 [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 208(2/4):102-118.
- [56] Rosen M A. Assessing energy technologies and environmental impacts with the principles of thermodynamics [J]. *Applied Energy*, 2002, 72(1):427-441.
- [57] Sciubba E. Beyond thermoeconomics? The concept of extended exergy accounting and its application to the analysis and design of thermal systems [J]. *Exergy, An International Journal*, 2001, 1(2):68-84.
- [58] Chen B, Chen G Q. Exergy analysis for resource conversion of the Chinese society 1993 under the material product system [J]. *Energy*, 2006, 31(8/9):1115-1150.
- [59] Chen G Q, Ji X. Chemical exergy based evaluation of water quality [J]. *Ecological Modelling*, 2007, 200(1/2):259-268.
- [60] Huang L Q, Chen G Q, Zhang Y, *et al.* Exergy as a unified measure of water quality [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2007, 12(5):663-672.
- [61] Chen G Q, Chen B. Extended-exergy analysis of the Chinese society [J]. *Energy*, 2009, 34(9):1127-1144
- [62] Chen G Q, Chen Z M. Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: A 135-sector inventory and input-output embodiment [J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(11):3647-3732
- [63] Balocco C, Papeschi S, Grazzini G, *et al.* Using exergy to analyze the sustainability of an urban area [J]. *Ecological Eco-*

nomics, 2004, 48(2): 231-244.

- [64] 李栋,刘晶茹,王如松. 城市生态系统代谢分析方法与评价指标研究进展[J]. 生态经济,2008(6):35-39. [LI Dong, LIU Jing-ru, WANG Ru-song. Progresses on the analyzing methods and evaluating indicators of urban ecosystems metabolism. *Ecological Economy*,2008(6):35-39.]

A Critical Review on Material and Energetic Metabolism for Urban Ecosystem: Resource Metabolism and Its Contents

ZHANG Li-xiao, HU Qiu-hong

(State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Metabolism analysis is one of the important perspectives and tools for urban ecosystem research. Conducted in this paper is a critical review on research of urban metabolism with regard to concepts and methods. Currently, the metabolism concept associated with urban ecosystem are consisted of social metabolism, urban metabolism, industrial metabolism, as well as energy metabolism and ecological energetic metabolism, connotation and denotation of which are both overlapped and varied. In addition to the diverse research purpose, the lacking of unified accounting method is the real reason for the varied metabolism concepts and frameworks to some extent. In fact, the available framework of urban metabolism has only paid attentions to physical resource, while ignoring non-physical resources such as solar energy, wind power and information. However, the new developments in resources sciences, i. e. , resource flow, network analysis and exergy accounting provide new ideas and methodology assistance for solving the problems in urban metabolism analysis. Therefore, a new concept of resource metabolism was put forward, which extends the research content and systematic boundary, including material resources and non-material resources, energetic resources and non-energetic resources. In definition, the concept of urban resource metabolism can be regarded as the process of resource consumption and waste generation of the cities for some time, and the process of the quality degradation of flows of the material and energy, which is necessary input for maintain the basic urban structures and functions. In addition, the exergy method was suggested to be introduced to solve the unified accounting problem and quantify the availability and scarcity of resources. Furthermore, the resource flow analysis tools as ecological network analysis method can also be incorporated to trace the metabolism route, hoping to change the traditional grey mode commonly used in metabolism analysis. This newly concept of resource metabolism and corresponding method would provide new integrate analyzing framework for urban ecosystem research. Nevertheless, it is just a primary concept and framework on resources metabolism, in-depth analysis and case studies are badly needed in near future to perfect and verify the conceived theory system.

Key words: urban ecosystem; metabolism analysis; resource exergy; resource flow