

DOI: 10.5846/stxb201306091538

卢伊, 陈彬. 城市代谢研究评述: 内涵与方法. 生态学报, 2015, 35(8): 2438-2451.

Lu Y, Chen B. A review on urban metabolism: connotation and methodology. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(8): 2438-2451.

城市代谢研究评述: 内涵与方法

卢 伊, 陈 彬*

北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点实验室, 北京 100875

摘要: 随着城市发展面临的生态问题日益显著, 部分研究者试图通过对自然生态系统进行类比来寻求解决途径, 城市代谢理论应运而生。当以系统科学来研究城市生态系统时, 哲学思想的引入为探索和城市及城市代谢的内涵提供了最原始的桥梁。因此, 在介绍城市代谢内涵与研究进展的基础上, 融合产业、家庭、社会等多尺度代谢理论, 对城市代谢的边界进行扩展, 将其分为狭义与广义两类, 结合亚里士多德的“四因说”对其质料因(组分)、形式因(结构)、动力因(驱动力)和目的因(功能)进行识别分析, 据此将城市代谢研究方法归纳为质料、形式和混合研究方法三类, 并提出未来研究的主要动向和解决手段。城市代谢“四因图”可为相关研究者提供参考。

关键词: 城市代谢; 四因说; 产业代谢; 家庭代谢; 社会代谢

A review on urban metabolism: connotation and methodology

LU Yi, CHEN Bin*

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Facing the pressing ecological problems caused by urbanization, researchers have tried to seek for an effective solution with urban metabolism theory originated from the analogy of natural ecosystem. The metabolic concept has been introduced into artificial ecosystem and thus shapes the theoretical frameworks of the urban metabolism, industrial metabolism, household metabolism and social metabolism, blazing new trials for the urban metabolic studies. In order to penetrate into the urban metabolism issues, we divided the concept with the generalized and specific senses according to different metabolic objects and boundaries. The Aristotelian causality explores the constituted causes of a thing, embracing the material cause, formal cause, efficient cause, and final cause. A four-causes-map for urban metabolism on the perspective of Aristotle's wisdom was thereby proposed to set up an integrated framework of multi-scale metabolic theories. The urban metabolism studies that have been widely extended and stimulated with myriad innovative methodologies can be interpreted as three main streams in view of Four Causes: 1) Material-based methodology emphasizing the energy and material fluxes of metabolic processes, e.g., material flow analysis, embodied energy (emergy) analysis; 2) Form-based methodology shaping the external morphology and internal structure of urban metabolism, e.g., spatial analysis, ecological footprint and ecological network analysis; 3) Hybrid methodology providing a panoramic figure of urban metabolism. Finally, the future trends and potential solutions were discussed to explore the metabolic pattern and carrying capacity issues relevant to the concrete urban planning activities.

Key Words: urban metabolism; four causes; industrial metabolism; household metabolism; social metabolism

基金项目: 国家自然科学基金 (91325302, 41271543); 国家科技支撑计划课题 (2012BAK30B03); 国家基金委创新研究群体科学基金 (51121003); 高等学校博士学科点专项科研基金 (20130003110027)

收稿日期: 2013-06-09; 网络出版日期: 2014-05-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenb@bnu.edu.cn

随着城市化进程的加剧,巨大的外部资源压力与生态破坏问题成为限制城市发展的重要因素,因此,研究者们开始尝试通过将城市类比自然生态系统来寻找解决该问题的关键,代谢理论即为其中的一个重要研究方面。

代谢的概念最早源于生物学对生物个体及生态学对生态系统的研究,它是生物体或生态系统内一切物理化学过程的总和,包括物质和能量从外环境向代谢主体的供给、在体内传递和储存、以及代谢废物和废能排至外环境的全过程。由于自然生态系统和人工生态系统在结构与功能上存在一定相似性,通过仿生与类比,代谢的概念逐渐引入到对人工生态系统的研究中,城市代谢^[1]、产业代谢^[2]、家庭代谢^[3]等概念相继提出,其理论和内涵不断拓展。这些代谢理论虽然为城市代谢研究的发展提供了新思路,但由于其内涵存在一定重叠和差异,这使得城市代谢过程的探究视角始终有所局限。由此,本文在系统梳理城市、社会、产业、家庭等不同尺度城市代谢研究脉络的基础上,参考亚里士多德“四因说”对城市代谢的理论内涵和研究方法进行分类归纳,最终提出未来研究的热点方向,以期为相关研究者提供新的研究思路。

1 城市代谢:内涵与发展

1.1 城市代谢理论的内涵与发展脉络

城市代谢(Urban Metabolism)的概念最早由 Wolman 于 1965 年提出,通过同自然代谢过程相类比,它可被定义为物质、能量输入城市和产品、废物输出城市的完整过程,用以指明物质、能量流动的基本方式,揭示城市对外环境的影响^[1]。此后,基于代谢类比的观点,城市代谢的内涵被不断丰富。Decker 等认为城市可将原材料、燃料和水资源转换成内环境、人体生物质和废弃物^[4],Huang 和 Hsu 进一步提出城市是一个为人类存续提供便利的自调节系统,可被看作一个超生命体^[5]。这里即把城市同生物个体相类比,将其看作一个不断同外环境进行物质、能量交换的有机体,而城市代谢则描述了其消费、储存和转换的过程与结果,进而通过类比生物个体对其生存环境的影响来探究城市代谢对支持人类生命的外环境的影响与压力。此后,马世骏和王如松先生则创造性地提出城市是一类以人类技术和社会行为为主导,生态代谢过程为经络,受自然生命支持系统所供养的社会-经济-自然复合生态系统^[6-7]。可见,较生物个体而言,城市自身更具系统性和复杂性,基于将其同自然生态系统相类比的观点,Kennedy 等将城市代谢过程看作是城市中一切技术与社会经济过程的总和,它带来城市发展和能量生产,同时可以消除浪费^[8],进一步丰富了城市代谢的理论内涵。

城市代谢理论的提出与发展为城市生态问题的解决提供了新视角,有助于打开城市黑箱,探视其内部的代谢机制与流动过程,为解释和探寻维持城市正常运转的关键部门提供了研究基础。近 50 年来,城市代谢研究的变化发展同研究者们对不同城市代谢质料的关注密切相关。质料的概念源于亚氏的“四因说”,它表示事物所由产生,并在事物内部始终存在着的東西,强调其对于事物的始基作用^[9]。可见,城市代谢质料即为贯穿代谢过程始终的各种形式的物质和能量,它为城市代谢提供了最基本的物质来源,是代谢的物理基础。早期的城市代谢研究主要关注水、食物、建材、三废等复合代谢质料,研究者多将城市比作一个生物个体,根据质量守恒定律来对复合质料开采-生产-消费-废弃这一线性流动过程和其输入输出规模进行跟踪,以此来探究城市代谢对外环境的影响,进而探寻城市可持续发展路径,如对东京^[10]、香港^[11-12]、悉尼^[13]、维也纳^[14]、多伦多^[15]、深圳^[16]、邯郸^[17]、苏州^[18]、张掖^[19]等研究。此后,随着城市代谢理论与方法的演进,如物质流分析、投入产出模型等研究手段开始广泛应用到相关研究中,为进一步打开黑箱、探究代谢的具体路径和关键组分提供了可能。研究者据此对城市代谢质料予以细化,即以单一元素或物质为关键质料,研究城市代谢同区域或全球尺度代谢的作用关系和可能影响,其中包括对氮、磷等单一元素的研究^[20-23],以及对水系统^[24-27]和废弃物^[28-29]的研究。研究表明,快速城市化是一种以大量消耗资源为代价的发展过程^[11],城市自身虽具有一定独立性,但仍需依赖外界环境来供应资源、吸纳废物^[4],由于城市质料的输入增速要远超过输出部分的增速^[15],城市土地、大气和水系统将逐渐出现超载现象^[12],因而未来城市代谢的良性发展应注重削减资源需求量和废物产生量^[18]。然而,受理论发展与研究手段的限制,这些研究大多将城市代谢理解为线性输入-输出过程,仅

从外围量化了代谢规模与环境压力,但不易揭示代谢质料在城市内部的流动过程与关键靶点,难以突破城市黑箱问题的局限。

能量蕴含在种种代谢物质和不同形式的能源中,城市代谢过程必然关系到能量的流动、储存、转换和耗散过程,因而基于能量这一关键质料的研究往往更能揭示城市代谢的路径与内涵,近年来开始不断受到研究者的重视。传统的城市能量代谢研究将能量狭义地理解为能源,将其归为复合代谢质料中的一部分进行研究,如对香港^[11-12]、多伦多^[15]、利莫里克^[29]及多城市^[4]的研究。这些研究忽视了蕴含在物质和服务中其他形式的能量以及能量质量问题,无法绘出城市能量代谢的全貌。为弥补传统能量代谢研究的缺陷,Odum 提出的能值方法将城市看作一个异养生态系统,定量描述不同形式和质量的能量及它们同社会、经济因素及外环境的关系,研究者据此先后对迈阿密^[30]、巴黎^[31]、台北^[32-33]、北京^[34-35]、包头^[36]及多城市^[37-39]等展开了案例研究,并探讨城市内部生态与经济子系统间的作用关系^[40]。

纵观针对城市案例的传统代谢研究可以发现,由于边界固定,许多研究往往探究城市整体的代谢质料流动情况,即相当于将城市看作一个生命个体来探究其体内的代谢过程与它同外环境的影响作用,不利于对城市内部代谢结构和机理的挖掘。因而,有必要将城市看作一个完整的生态系统,打开黑箱,探究其内部的物质、能量代谢网络,这就需要将其他尺度的代谢理论与研究方法融入于传统的城市代谢研究中。

1.2 城市代谢的扩展:多尺度代谢理论的融合

由于城市系统自身具有社会-经济-自然的复合属性,内部囊括如工业生产、金融贸易、人居生活等不同的功能组分,产业代谢、家庭代谢和社会代谢等不同尺度的代谢理论开始不断同城市代谢研究相融合,用以探讨城市内部某一功能组分的代谢过程及其对城市自身和城市外环境的影响作用。

1.2.1 多尺度代谢理论

(1) 产业代谢

1988 年, Ayres 明确提出了产业代谢(又作工业代谢)的概念^[2],认为产业代谢是稳定条件下原材料、能源和劳动最终转化为产品和废物过程的结合,并将其作为模拟自然代谢功能的分析手段,通过系统结构变化分析、功能模拟和产业流分析来研究产业生态系统的代谢机能及控制方法^[41],该理论随后被广泛用于国家或区域产业部门^[42-48]及特定产业组织(如工厂、企业或园区)^[49-53]的代谢研究。由于产业系统是城市生产功能的主要承担者,是维持城市活力的关键组分,同时也是引发城市生态问题的重要源头,通过物质与能量的联系,产业代谢过程势必同城市代谢过程紧密相连,这也为二者的融合创造了条件。产业代谢理论的引入使城市代谢研究不再停留于早期对特定生态流代谢规模的核算与预测,而是通过引入物质流分析等手段,使得解析城市产业系统的代谢结构与效率、探析其对城市整体及外环境的影响成为可能。如 Bailey 等采用投入产出法对城市产业系统中的物质代谢过程进行生态分析^[54-55]; Sendra 等应用物质流分析手段,对加泰罗尼亚市工业区的水和能源代谢效率进行分析^[56]; Yang 等采用能值分析法,对武汉市的 3 个主要产业部门进行代谢分析^[57]。但总体来说,针对城市系统内部特定产业组织的代谢研究要远多于针对城市产业部门的研究。

(2) 家庭代谢

家庭是社会生活的基本构成单元,同时也是维持人居生活的基本功能结构。家庭代谢概念的提出最早源于荷兰的 HOMES 项目,它将家庭看作最小的社会单元,认为其内部涵盖着一系列复杂而动态变化的产品与服务消费过程,其中资源在家庭中输入输出的内在模式即为家庭代谢^[3, 58]。其研究基础是物质守恒原理,它将家庭看作一个具有代谢功能的有机体,而其对外环境的影响则可通过代谢能力来进行量化评价^[59]。由于家庭的生产能力严重弱化,其代谢过程往往始于对物质、能量的消耗与利用,其中一部分被人体(如食物)或作为消费品(如家具)储存起来,剩余部分则废弃至外界环境,可见,家庭代谢通过消费-废弃的线性过程,将人类的社会经济活动同对环境的影响负荷紧密联系起来。由于家庭是社会的基础单元,其消费结构和代谢模式对于社会子系统和城市整体具有不可忽视的基础指导作用,通过代谢类比的思路将研究尺度由家庭放大至城市将为相关研究提供新思路,因而家庭代谢同样成为城市代谢的扩展理论之一。有关家庭代谢的研究往往起

步于对某种家庭必需生活资料消费/代谢的分析,包括对商品(尤其是食品)和服务^[60-64]以及能源利用^[58, 65-67]消费/代谢情况的研究。然而,受理论建成时间短、家庭研究尺度小、数据要求高等因素限制,研究者多关注家庭个体的代谢模式,并未将其同城市代谢过程相联系进行研究。

(3) 社会代谢

马克思是将代谢概念引入社会学中的重要人物,他在《资本论》中指出,人类劳动就是社会同自然交换物质的过程,从而以代谢的概念来描述人类劳动与自然环境间的关系^[68]。这一理念由 Fischer-Kowalski 扩展,于 1998 年提出了社会代谢的概念,即人类社会同自然环境交换物质和能量的过程^[69],它更强调以物质、能量为载体来探究社会经济系统代谢过程的环境负荷。目前,针对国家或区域尺度的社会代谢研究不断涌现,如对日本^[70-71]、中国台湾^[72]、捷克斯洛伐克^[73]、中国^[74-76]、中国海南^[77]和多国家比较^[78]等研究;而在城市方面,肖强等^[79]基于上升性理论,采用投入产出分析方法对重庆市的社会经济系统进行了代谢研究。目前,针对城市社会经济系统的代谢研究并不多见,这主要由于社会既可以看作城市的一个下位概念,将其代谢过程看作城市代谢的有机组分,也可理解为一个包括城市在内的诸多人工系统的上位概念,是一个宏观的抽象系统,因而以城市生态系统为核心进行的代谢研究也可以理解为社会代谢的一个类型。

类似地,社区作为城市生态系统中不可或缺的一个子系统,也具有类似的组分复杂性,以及社会(以人居生活为核心)、经济(以商业交易为中心)和环境(以废弃物处理和社区绿化为载体)的复合联系性,也可视为一个微缩社会,因而有关社区代谢过程的研究同样可归为社会代谢的一个子类。由于研究尺度较小,对于数据量和精度的要求相对较高,相关研究较少,如对珀斯^[80]和北京^[81-82]的研究。

通过对上述不同尺度下代谢理论的内涵与发展沿革进行梳理,可发现它们同城市代谢理论的内涵与适用范围相互重叠、兼具差异,具体特征与内涵如表 1 所示。其中,社会代谢的应用尺度较大,作为城市代谢的上位概念,囊括了大多数有关人工社会系统的研究;而产业代谢和家庭代谢则缩小了研究边界,将代谢过程集中于某一产业过程或家庭消费系统中,侧重于对转化效率和环境影响的探究,对数据量和数据精度的要求相对较高。在研究手段上,产业代谢和家庭代谢多倚重物质流分析方法,或对系统中某一特定元素或物质流进行过程解析,或以能量流分析为依托探究能量的代谢过程;而城市代谢和社会代谢则需以物质、能量代谢为载体进行研究,研究手段较为多样,同时还借鉴了空间分析手段。

表 1 多尺度代谢理论的内涵特征比对
Table 1 Comparison of multi-scale metabolism concepts

类别 Category	时间 Time	定义 Definition	边界 Boundary	对象/载体 Object/Carrier	特点 Feature
城市代谢 ^[1, 4, 8] Urban Metabolism	1965	物质、能量输入城市和产品、废物输出城市的过程	城市系统	水、能源、食物、建材、废弃物、污染物、营养元素等	边界确定,研究方法多样,所需数据量较大,侧重于对代谢过程的探析与代谢规模的核算
产业代谢 ^[2, 41] Industrial Metabolism	1988	稳定条件下原材料、能源和劳动最终转化为产品和废物过程的集合	产业系统	水、能源、元素、原材料、废弃物等	边界灵活,可以是产业组织或区域产业部门,以物质流分析为主,侧重于对生态效率和负面环境影响的分析
家庭代谢 ^[3, 58] Household Metabolism	1998	资源在家庭中输入输出的内在模式	家庭消费系统	食物、水、消费品、废弃物、能源等	边界确定,数据精度要求高,侧重于对家庭某种生活资料消费或元素代谢过程的分析
社会代谢 ^[68-69] Social Metabolism	1998	人类社会同自然环境交换物质、能量的过程	社会经济系统	水、原材料、食物、废弃物、土地利用等	多为大尺度、长时序的动态研究,以物质流分析和空间技术结合为主,是城市代谢的上位概念

1.2.2 狭义与广义的城市代谢

为便于进一步分析讨论,本文依据类比对象与系统边界的选取方式,将城市代谢分解为广义的城市代谢与狭义的城市代谢两类。其中,狭义的城市代谢将城市同自然界中有机生命体相类比,将其定义为以城市系统整体同外环境间一切代谢质料输入输出过程的总和,其系统边界仅限于城市自身。而广义的城市代谢则将城市类比于生态系统,其代谢过程既包括狭义的代谢过程,也包括城市生态系统中各组分同城市环境及外环境间的代谢过程(如家庭代谢、产业代谢),其系统边界不仅限于城市自身,还可小于城市边界。下文中所涉及的城市代谢概念均取广义意。

对于狭义的城市代谢研究,由于尺度固定,黑箱模型的限制给代谢方法在城市生态研究中的应用造成了一定困难,因而代谢方法在城市研究的主要应用方面应该突破黑箱模型的限制,将黑箱打开,将城市分成不同的功能区,以各个功能区作为城市的肢体,以物质能量流作为城市的血液,将城市看作一个各种功能复合的复杂系统进行研究^[83]。家庭、社区和产业部门均作为城市基本组成单元之一,其形态依据人类社会发展的需求在不断变换革新,形态上的改变与内在过程的变化必然存在某种联系,这种形态与过程之间的关系将最终反映到整个城市的运转和代谢过程之中,微观尺度的代谢吞吐量大小对于城市环境压力具有举足轻重的作用^[84-85]。可见,通过引入如家庭代谢、社会代谢、产业代谢等广义的城市代谢理论,将有助于城市研究者打开黑箱,对其内部代谢结构和过程进行探视。

1.3 城市与城市代谢“四因图”

哲学的基本问题之一在于对万物本体的探讨,亚氏的“四因说”即探讨了构成本体的四种原因:质料因、形式因、动力因、目的因。如果允许对亚氏的“四因”赋予现代含义的话,质料相当于组成,形式相当于结构,动力相当于相互作用,目的相当于功能,而任何一个系统的存在及描述都离不开组成、结构、相互作用和功能这四个要素。从这个含义上来说,亚氏的“四因说”是一种最原始、最朴素的系统科学^[9]。当人们把城市看作一个生态系统,并以系统科学的角度来观察、研究它时,引入哲学思想(如“四因说”)将为探索和更为接近城市及城市代谢的内涵提供最原始、最朴素的桥梁。

城市代谢是城市存续的关键过程,它贯穿城市始终,很难从城市这一概念中剥离出来,进而抽象为一个独立存在的个体。因而,本文以城市为本体进行分析,其“四因”可以理解为城市代谢的物质组成、形态结构、驱动力和功能目的,由此可构建出城市代谢的“四因图”,如图1所示。

(1) 质料因是事物由所产生的,并在事物内部始终存在着的東西^[9]。如上文所述,质料即流动在城市内部各种形式的物质与能量,它们构成了城市得以存在、城市代谢得以延续的物理根基。具体说来,城市内部包含自然、社会、经济子系统,其内部又可细分为产业、社区、家庭等子系统,尽管尺度不同,这些子系统间通过不断交换各种形式的代谢质料构成了城市代谢的内循环。其中,大部分城市消费的原材料都源于人类对自然的开发与采掘,因而自然子系统为城市代谢提供了最基本的质料基础,它为不同尺度代谢活动的有序进行提供了物质保障。同时,城市代谢产生的废弃物也往往最终排向自然子系统进行分解和循环,但当排放量远大于自然子系统的承载力时,环境污染与破坏则将对城市及其代谢过程造成损害。经济是衡量城市发展的量化表征,也是推动人类建设、发展城市的动力之一。城市经济的发展离不开产业系统的支持,经济子系统内的三大产业相互作用,为城市提供了经济活力与发展空间。尤其在以工业活动为主的工业系统中,生产、消费、分解部门彼此联系,为城市存续提供大量消费品,并分解处理种种废弃物,有力缓解了城市代谢对自然子系统的压力。而社会是城市存续的根本形态,在社会子系统中,由于缺乏经济生产活动,其代谢过程主要表现在社会-社区-家庭不同尺度下的消费与废弃过程。同时,城市自身的存续也有赖于同外环境进行代谢质料的传输转换,这又构成了城市代谢的外循环,内、外循环相结合即构成了城市代谢的完整过程。

(2) 形式因是事物的原型亦即表达本质的定义^[9],它解释了事物之所以由质料组成事物的原因,表征事物的外在形态和内部结构。对城市而言,其形式因可以分为内与外两部分:“外”指城市的外部形态,即它的地理位置和空间构型,它们构筑了城市的外在表现;而“内”则指城市的内部结构,包括其关键的子系统或组

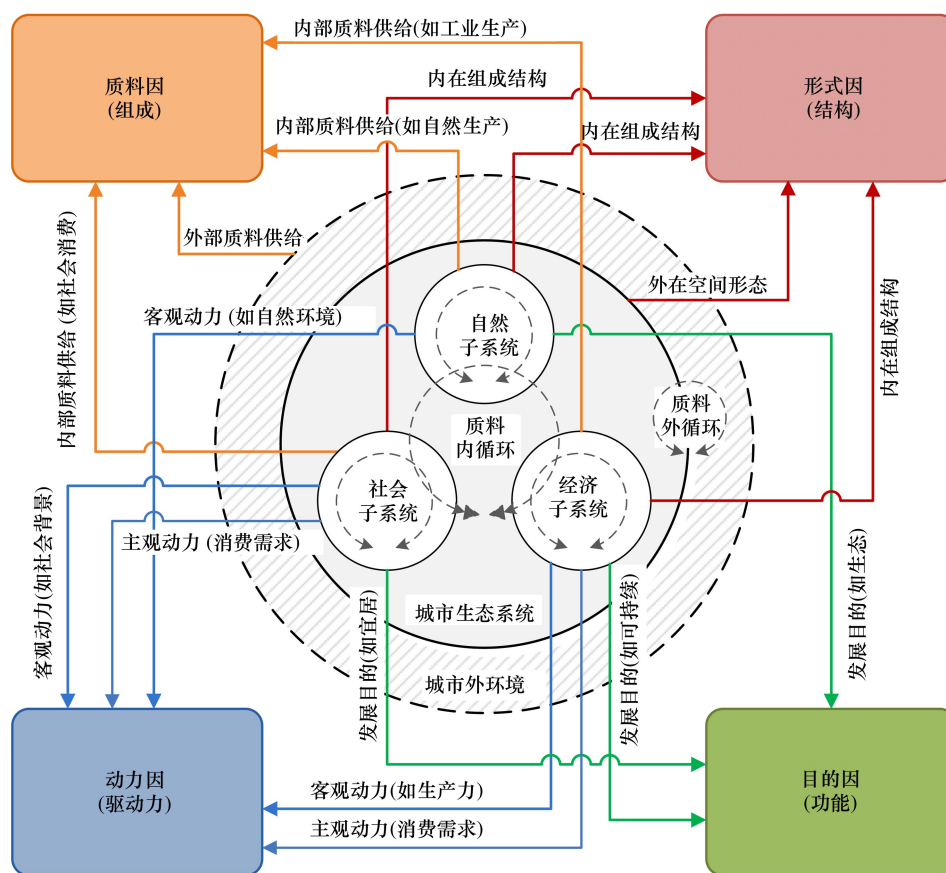


图1 城市代谢“四因图”

Fig.1 The four-causes-map for urban metabolism

分以及由代谢路径构成的复杂网络,是城市的内在联系,同时也是城市代谢的重要内涵。

(3) 动力因即那个使被动者运动的事物、引起变化者变化的事物^[9],它解释了本体运动、变化、发展的根本原因(即驱动力),这种变化既可以是量的变化(如城市代谢规模和效率的增减),也可以是形态(如城市扩张、空间结构变动)或性质(如城市由健康变为不健康、代谢状况由好变坏)的变化。推动城市运动变化的动力因可从主观和客观两方面理解:客观上看,城市的社会环境(如社会生产力、文化背景)和自然环境(如地理位置、气候)构成了推动其变化发展的背景因素;而主观上,城市人、或说城市人的社会需求才能决定城市的变化过程,从而构成了驱动城市及城市代谢变化发展的决定性因素。

(4) 目的因是事物最善的终结^[9],它解释事物之所以存在的根本原因,可以理解为事物的功能和性质。对城市而言,城市的存在是为了满足人类的生存需求或期待,一个“好”的城市或许需要安全、宜居、生态、可持续、结构稳定、功能健全等等,而这种需求和期待(目的)正是城市得以存在的根本原因。

2 城市代谢技术方法的变迁

随着多尺度代谢理论的融合,新的研究方法和探究手段大大拓展了城市代谢的研究思路和视角,为相关研究注入了新的活力。本文将目前城市代谢的研究方法分为三类,包括基于物质、能量载体的质料研究方法、表征物质形态结构的形式研究方法、和结合上述两类方法的混合研究方法。

2.1 质料研究方法

质料可理解为各种形式的物质和能量,是构成研究系统构成的物理根基。对城市生态系统而言,以物质和能量为研究载体,通过跟踪其在城市内外的路径和流量来探究城市代谢的过程、结构与规模的方法均属于质料研究方法,其中较具代表性的有物质流分析、能量流分析和能值分析等。

根据研究载体的不同,质料研究方法又可分为基于物质代谢的质料研究方法和基于能量代谢的质料研究方法。前者主要基于物质代谢理论,以物质流分析方法为主。物质流分析主要以质量守恒定律为依据,通过跟踪某种物质或元素在代谢系统中的输入、储存和输出的路径与规模,研究系统的运行特征和代谢效率。受技术手段的限制,早期基于物质代谢的城市代谢研究主要针对城市生态系统中多种物质材料(如食物、水、建材等)和污染物(如固体废弃物、大气污染物等)进行流动路径、流量和存量的确认与核算,旨在对城市物质代谢的规模进行宏观把握,但这种研究方法仍无法突破黑箱模型的限制,物质流方法的引入则可帮助研究者相对精确地了解物质代谢过程的全貌。研究精度的提高导致研究者不再局限于对多种物质代谢规模进行评估,而以水^[86-87]、食物^[23]、废弃物^[28, 29]或复合质料^[88-89]等为研究对象,通过设置代谢指标,对城市物质代谢进行更为细致的研究。如陈波等^[90]建立了城市物质流分析的研究框架及指标体系,为城市物质代谢研究提供了详细的方法指南。此外,还有一些研究者通过建立物质代谢的投入产出模型,对城市生态系统的水^[16]、食物^[22]和废弃物^[91]代谢水平进行模拟和评价,这些研究同样为探究城市物质代谢路径和规模做出了积极贡献。

能量作为城市生态系统重要的质料之一,同样受到了研究者的重视。基于能量载体的研究方法以 Haberl 提出的能量代谢理论^[92]为依托,探究城市系统中能量的输入、转换和输出过程。早期针对城市能量代谢的研究多以能量流分析为主,主要针对城市能源的利用规模和转换效率。能值分析方法的出现为城市能量代谢研究提供了新视角,Odum 将能值定义为一种产品或劳务生产过程中直接或间接投入的可用能^[93],即以太阳能为基准,对系统中各类物质与能量进行系统核算,从而量化能量流动的规模,并体现出不同能量的质量。由此,部分研究者尝试将其引入城市代谢研究中,这为解决传统能量代谢研究方法只考虑直接能源消耗而忽视间接能源消耗和可再生能源利用的问题提供了有力帮助。近年来,由于城市代谢研究者对于能值分析法的关注程度逐年上升,导致大量应用该方法的城市代谢研究^[30-40]涌现而出,这些研究主要对探明城市能量代谢的结构与效率提供了较大参考价值,同时也有少数研究者在现有分析框架的基础上对方法予以完善^[94-95],有助于更好地构建城市代谢体系。

此外,还有部分研究者将物质与能量代谢过程和方法相结合,对城市代谢的模式与规模进行分析。如 Yuan 等^[96]结合系统动力学方法,对北京城市发展的多个方面进行模拟,其中就包括对水资源和能源利用的代谢模拟;张妍和杨志峰^[97]通过构建城市物质代谢的生态效率模型,对深圳市水、能量和废弃物的代谢通量及生态效率进行系统分析;张力小和胡秋红^[98]结合资源科学的相关研究,提出将城市中物质能量代谢拓展为资源代谢,并引入资源火用来解决核算问题。在家庭尺度的代谢研究方面,刘晶茹等^[99]与 Liu 等^[100]利用家庭代谢的概念模型,对近 20 年来中国城市家庭的水资源与能源代谢水平进行分析,并探讨了影响家庭代谢的社会因素;陈依岚和包存宽^[101]利用代谢分析方法,从影响家庭消费模式的主要因素入手,对同济新村家庭中的水、能源和其他物质的代谢结构进行分析。

2.2 形式研究方法

在研究城市代谢时,不仅需要探究质料的代谢规模和过程,更需分别从空间的“外”和结构的“内”两方面打开城市黑箱,把握城市系统代谢的运行机理和关键靶点。因此,以城市的外在形态和内在结构为主要关注目标的研究方法即属于形式研究方法,主要包括地理空间分析、生态足迹方法和生态网络分析等。

地理空间分析作为形式研究方法的一个重要分支,主要由实体空间分析和虚拟空间分析组成。实体空间分析通过遥感监测技术对城市的空间动态变化进行监测和表征,用以考察城市空间形态的变迁方式与规划路径,如对北京^[102]的研究;而虚拟空间分析则将系统的生产力和承载力以虚拟土地面积表征,用于判断系统代谢水平是否满足生态承载力,即生态足迹方法。但目前,由于地理空间分析往往需要借助质料研究方法来提供数据基础,因而单独采用该方法的城市代谢研究并不多,多数研究者往往采用混合方法的研究方式进行探究。

而生态网络是由早期描述生物化学反应结构的生物网络演变而来的,它以网络结构为基础,对生态系统

中物质、能量流动结构的模拟^[103]。基于生态流代谢的生态网络分析方法可以识别和量化网络系统中的结构、功能以及系统组分间的直、间接作用,从而定量研究系统中生态流的流向及相互作用的过程与强度,揭示出系统行为的整体性、复杂性与连接性的分析工具^[104-106]。相较其他质料研究方法而言,生态网络分析更能体现出研究系统内各组分间的生态关系、系统功能及营养级结构,从而表征出代谢系统内部的运行状况和特点,因而近年来开始逐渐受到研究者的关注,并分别应用于城市^[107-110]、产业^[53, 111]、水系统^[112]等不同尺度的代谢研究上。

2.3 混合研究方法

质料研究方法和形式研究方法各有特点,如表 2 所示。

表 2 城市代谢主要研究方法比较表
Table 2 Comparison Table of Diverse Urban Metabolic Methodologies

类别 Category	方法 Method	概述 Definition	特征 Feature	主要指标 Indicator
质料研究方法 Material-based Methodology	物质流分析 ^[90]	通过跟踪某种物质或元素在代谢系统中的输入、储存和输出的作用路径与规模,研究系统的运行特征和代谢效率	该方法以质量守恒定律为根本依据,采用质量单位进行研究,从根本来看是一种基于物质的投入产出分析,但由于该方法主要是基于物质质量的加和,且忽略了能量对于代谢的作用,导致研究结果不够精确	总物质输入/需求/输出量、直接物质输入/输出/消费量、净存储量等
	能量流分析 ^[92]	通过跟踪城市系统中能量的输入、转换和输出过程,探寻城市能源的利用规模和转换效率	该方法以能量守恒定律和能量代谢理论为基础,是一种以能量为载体的类物质流分析,该方法主要针对系统中化石能源的代谢规模进行分析,但由于忽略了间接能量的作用,研究结果与实际能量代谢水平差异较大	总能量输入量、总能量输出量、净存储量等
	能值分析 ^[93]	以太阳能值为基准,对各种物质与能量进行系统核算,从而体现出该种产品或劳务生产过程中直接或间接投入的可用能总量	该方法的优势在于可以体现出间接利用的能量,并同时量化能量质与量,但容易产生重复计算的问题,且对不同研究的核算系数不同,导致对同一代谢系统的研究结果可能不同	可更新资源能值、不可更新资源能值、购买资源与服务能值、输出能值、废弃物能值、能值总量等
形式研究方法 Formal-based Methodology	生态网络分析 ^[103-106]	以网络结构为基础,对生态系统中物质、能量流动结构的模拟,用以探讨系统的代谢行为、结构和功能	该方法以分室、路径和网络为核心,但由于代谢类比思路在人工系统的应用仍存在较大争议,对消费系统的代谢研究存在一定方法学上的缺陷,同时由于该方法假设系统处于稳定状态,不利于对系统动态发展进行量化预测	系统总流量、循环指数、有效利用矩阵、综合利用强度矩阵、网络互利指数、网络共生指数、冗余度等
	地理空间分析	一类是以遥感技术为核心来研究系统空间形态的变化,一类是以生态足迹为代表,通过折合生产性土地面积的方式来探讨系统生态承载力的问题	对于遥感技术方法,由于其往往需要借助质料研究方法来提供数据基础,因而多采用混合方法的方式进行研究;而生态足迹方法无法清晰反映出完整的代谢路径和结构,而更适用于对系统生态生产力和承载力的关系进行分析	人均生态足迹、人均生态承载力等

质料研究方法主要以物质守恒和能量守恒定理为理论依据,对城市生态系统中物质代谢和能量代谢过程进行研究,从本质上说是一种以质料为载体、基于物质能量守恒的投入产出方法,主要探讨系统稳定状态下的代谢过程和规模,难以准确模拟流量和存量的动态变化和作用关系。而形式研究方法则从形态和结构上对研究系统的代谢过程进行探析,一方面需要依赖质料研究方法为其提供数据支持,同时尤以空间分析手段为主的形式研究方法可用来研究较长时序条件下的代谢变化,可见,结合上述两种研究方法将为探究系统代谢动态变化的全貌提供了可能,而这正符合亚氏对于本体的理解(亚氏认为事物是由质料与形式构成的)。近年来,有部分研究者开始尝试通过质料与形式相结合的混合研究方法,对城市的代谢过程进行动态分析,为城市生态系统规划提供了新的参考依据。如 Liu 等^[113-116]结合扩展火用分析与网络分析方法,对北京社会经济系统的代谢过程、结构与效率进行分析,探讨城市可持续发展的可能路径;Liu 和 Zhang^[117]结合物质流分析方法,以投入产出表为依据,对北京的城市代谢水平进行生态网络分析;Browne 等^[118]结合能流核算、能流代谢率分析和生态足迹方法,研究爱尔兰城区能源消费的可持续性;Chrysoulakis 等^[119]通过采用多指标分析法,联系城市中能量、水资源、碳及其他污染物的代谢过程,结合空间技术探究其潜在动态变化,并对欧洲五个案例城市的可持续规划提供参考方向;Moore 等^[120]则对温哥华的物质能量代谢水平进行分析,并结合生态足迹方法探究城市发展的可持续性。

3 城市代谢的研究展望

通过系统梳理目前城市代谢研究的主要关注目标和热点问题,本文对城市代谢的研究方向进行了展望。

3.1 代谢模式发掘

目前,尽管有关城市代谢的定义及量化代谢规模的手段已较为明确,但通过构建城市与城市代谢的“四因图”发现,除城市代谢的质料较为确定外,其形式因(形态结构,即如何以系统科学的观点研究城市及城市代谢的关键组分和作用结构)、动力因(驱动力,即我们对何者通过何种方式推动城市和城市代谢进行怎样的变化发展)、目的因(需求与功能,即我们需要一个怎样的城市、怎样的城市代谢才是“好”的、如何衡量城市代谢的状况)都有值得我们进一步研究的地方,这说明在现有的研究模式下,城市代谢这一概念本身仍有许多值得我们进一步探索 and 挖掘的空间,黑箱模型的局限只是城市代谢内涵不清的一个后果。

对城市代谢的形式,多数研究者仍局限于对将城市看作一个生物个体,对不同质料的线性代谢过程(即狭义的城市代谢)进行探讨,由于这些研究未对城市代谢的内部结构进行探索,因而始终无法描绘出代谢系统的关键过程与机理,也就难以突破黑箱模型的限制。系统科学的引入为解决这一问题提供了强有力的理论手段,通过将城市看作一个由多个子系统构成的复杂巨系统,探索代谢质料在其内部关键靶点的流动情况,这使进一步探明城市代谢的内在形式成为可能。探索城市代谢的动力则需紧密围绕关键靶点和作用效应进行研究,同时应当联系城市社会经济活动对代谢过程的影响作用。而城市代谢研究的关键还在于我们对目的的定义。近年来,城市代谢研究已逐渐从针对整体代谢规模的核算研究过渡至探究系统代谢效率和建立可持续性指标的研究中来,部分研究者通过对城市生态系统的物质、能量代谢过程设置效率指标来把握代谢系统的功能运行状况和环境负荷能力,据此判断城市健康和可持续能力,这表明,城市健康研究同城市代谢研究或有交叉融合的可能。

一旦上述问题得以突破,城市代谢的内在机理和外在效应都将更为明确,而调控代谢状况的手段和依据也将更为可靠。由此可见,未来对城市代谢概念的发掘及对现有研究模式的突破必将成为研究者予以特别关注的一个研究方向。

3.2 代谢排放控制

早期的城市代谢研究侧重于探析资源开采(代谢质料输入端)和污染物排放(输出端)对城市外部的环境影响,其中对代谢输出端的研究多关注复合污染物的排放,近年来,随着研究手段的丰富,一些研究者尝试对单一排放源进行代谢分析。工业革命以来,高速的经济发展、无节制的资源开采和过度的能源利用,使得人类

在生产生活过程中排放了大量温室气体,进而加剧了全球气候变化进程,严重威胁人类社会的正常存续。城市是人类社会生产生活活动的集中地,也是温室气体的最主要排放源,全球超过 80% 的 CO₂ 排放源自城市^[121]。目前,已有一些研究者结合城市代谢理论对这一问题予以关注,如 Churkina^[121] 构建了城市碳代谢模型和关键影响因素; Browne 等^[28] 采用碳足迹方法分析爱尔兰城区的废弃物代谢情况,并对管理政策进行评估; Kellett 等^[122] 对城市碳代谢的主要来源和控制方案进行量化分析; Chen 和 Chen^[123] 则以利用生态网络分析方法对维也纳的碳代谢结构与功能特征进行系统评价,为突破城市黑箱模型的局限提供了参考。随着城市化进程的持续加剧,城市的温室气体排放量还将持续增长,因而针对城市代谢水平对温室气体排放的贡献研究以及揭示城市碳代谢机理的代谢研究必将日益受到研究者的密切关注。

3.3 城市规划设计

最早将城市代谢理论应用于城市规划设计的研究可追溯至 Oswald 和 Baccini 的规划研究。他们定义了成形性、可持续性、重建性与责任力的城市规划原则,通过分析城市中水、食物、建材和能源的代谢过程来对城市生态系统的主要活动进行规划设计^[124]。此后,如 Kennedy 等^[125]、Chrysoulakis 等^[119]、Moore 等^[120] 均探讨了采用城市代谢理论进行城市规划设计的可能。随着城市代谢研究方法的不断扩展,空间技术的应用标志着依凭城市代谢视角的规划研究成为可能。通过对城市生态系统中各种物质和能量的代谢路径、规模、结构和效率进行研究分析,可以把握目前城市代谢的功能状况,找寻影响代谢水平的关键路径和因素,通过优化改进现有代谢系统中的不足,采用空间技术将设计方案进行模拟,从而使规划设计后的城市生态系统满足代谢结构的优化配置和代谢功能的高效发挥。

4 结论

(1) 本文在简要总结城市代谢的内涵与发展过程的基础上,通过融合多尺度代谢理论,将城市代谢扩展为广义与狭义两类,并结合亚里士多德“四因说”对其质料因、形式因、动力因、目的因进行分析,初步提出城市代谢“四因图”。

(2) 本文将城市代谢的分析方法与研究技术分为基于物质、能源代谢的质料研究方法、探究系统代谢内外结构的形式研究方法和二者相结合的混合研究方法。物质流分析、能值分析等质料方法为城市代谢研究的主流,生态网络分析和地理空间技术等形式方法逐渐升温,混合方法吸收了上述两者的优势,为探究系统代谢动态变化的全貌提供了可能。

(3) 由于城市代谢本身仍有许多值得探索和挖掘的空间,未来有关发展与突破城市代谢模式、结合温室气体等代谢排放控制目标以及用于城市规划设计的研究将成为未来城市代谢研究的关注热点。

参考文献 (References):

- [1] Wolman A. The metabolism of cities. *Scientific American*, 1965, 213(3): 179-190.
- [2] Ayres R U. Industrial metabolism: Theory and policy // Ayres R U, Simonis U K, eds. *Industrial Metabolism: Restructuring for Sustainable Development*. Tokyo: United Nations University Press, 1994.
- [3] Noorman K J. *Green Households? Domestic, Consumers, Environment and Sustainability*. London: Earthscan Publications Ltd., 1998.
- [4] Decker E H, Elliott S, Smith F A, Blake D R, Rowland F S. Energy and material flow through the urban ecosystem. *Annual Review of Energy and the Environment*, 2000, 25(1): 685-740.
- [5] Huang S L, Hsu W L. Material flow analysis and emergy evaluation of Taipei's urban construction. *Landscape and Urban Planning*, 2003, 63(2): 61-74.
- [6] 马世骏, 王如松. 社会-经济-自然复合生态系统. *生态学报*, 1984, 4(1): 1-9.
- [7] 王效科, 欧阳志云, 仁玉芬, 王华锋. 城市生态系统长期研究展望. *地球科学进展*, 2009, 24(8): 928-935.
- [8] Kennedy C, Cuddihy J, Engel-Yan J. The changing metabolism of cities. *Journal of Industrial Ecology*, 2007, 11(2): 43-59.
- [9] 叶侨健. 系统哲学探源——亚里士多德“四因说”新透视. *中山大学学报: 社会科学版*, 1995, (4): 26-31.
- [10] Science Council of Japan. *Science for Better Environment: Proceedings of the International Congress on the Human Environment (HESC)*, Kyoto,

1975. UK: Pergamon Press, 1977.
- [11] Newcombe K, Kalma J D, Aston A R. The metabolism of a city: the case of Hong Kong. *Ambio*, 1978, 7(1): 3-15.
- [12] Warren-Rhodes K, Koenig A. Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong: 1971-1997. *A Journal of the Human Environment*, 2001, 30(7): 429-438.
- [13] Newman P W G. Sustainability and cities: Extending the metabolism model. *Landscape and Urban Planning*, 1999, 44(4): 219-226.
- [14] Hendriks C, Obernosterer R, Muller D, Kytzia S, Baccini P, Brunner P H. Material flow analysis: A tool to support environmental policy decision making: Case studies on the city of Vienna and Swiss lowlands. *Local Environment*, 2000, 5(3): 311-328.
- [15] Sahely H R, Dudding S, Kennedy C A. Estimating the urban metabolism of Canadian cities: Greater Toronto area case study. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 2003, 30(2): 468-453.
- [16] 颜文洪, 刘益民, 黄向, 胡玉佳. 深圳城市系统代谢的变化与废物生成效应. *城市问题*, 2003, (1): 40-44.
- [17] 楼俞. 城市物质代谢分析方法建立与实证研究——以邯郸市为例 [D]. 北京: 清华大学, 2007.
- [18] Liang S, Zhang T Z. Urban metabolism in China: Achieving dematerialization and decarbonization in Suzhou. *Journal of Industrial Ecology*, 2011, 15(3): 420-434.
- [19] 王红娟. 张掖市城市代谢机理及优化调控研究 [D]. 兰州大学, 2012.
- [20] Nilsson J. A Phosphorus budget for a Swedish municipality. *Journal of Environmental Management*, 1995, 45(3): 243-253.
- [21] Baker L A, Hope D, Xu Y, Edmonds J, Lauver L. Nitrogen balance for the Central Arizona-Phoenix (CAP) ecosystem. *Ecosystem*, 2001, 4(6): 582-602.
- [22] Forkes J. Nitrogen balance for the urban food metabolism of Toronto, Canada. *Resources, Conservation and Recycling*, 2007, 52(1): 74-94.
- [23] 黎思斯, 袁增伟, 毕军, 武慧君, 刘恒. 城市食物生产与消费系统磷代谢研究. *环境科学*, 2011, 32(2): 603-608.
- [24] Hermanowicz S W, Asano T. Abel Wolman's "the metabolism of cities" revisited: A case for water recycling and reuse. *Water Science and Technology*, 1999, 40(4): 29-36.
- [25] Barles S. Urban metabolism and river systems: An historical perspective. Paris and the Seine, 1790—1970. *Hydrology and Earth System Science Discuss*, 2007, 4: 1845-1878.
- [26] Sahely H R, Kenndy C A. Water use model for quantifying environmental and economic sustainability indicators. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2007, 133(6): 550-559.
- [27] 邵田. 中国东部城市水环境代谢研究 [D]. 上海: 复旦大学, 2008.
- [28] Brwone D, O'Regan B, Moles R. Assessment of total urban metabolism and metabolic inefficiency in an Irish city-region. *Waste Management*, 2009, 29(10): 2765-2771.
- [29] Browne D, O'Regan B, Moles R. Material flow accounting in an Irish city-region 1992-2002. *Journal of Cleaner Production*, 2011, (19): 9-10.
- [30] Zucchetto J. Energy-economic theory and mathematical models for combining the systems of man and nature, case study: The urban region of Miami, Florida. *Ecological Modelling*, 1975, 1(4): 241-268.
- [31] Stanhill G. An urban agro-ecosystem: The example of nineteenth-century Paris. *Agro-Ecosystems*, 1976, 3: 269-284.
- [32] Huang S L. Urban ecosystem, energetic hierarchies, and ecological economics of Taipei metropolis. *Journal of Environmental Management*, 1998, 52(1): 39-51.
- [33] Huang S L, Wu S C, Chen W B. Ecosystem, environmental quality and ecotechnology in the Taipei metropolitan region, 1995, 4: 233-248.
- [34] 胡聃, 文秋霞, 李锋, 王震, 冯强, 张艳萍. 北京城市生态系统的能值动态分析. *城市环境与城市生态*, 2006, 19(6): 1-4.
- [35] Chen B, Chen Z M, Zhou Y, Zhou J B, Chen G Q. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(2): 622-635.
- [36] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Zhang Y, Zhang L X, Zhao Y W, Jiang M M. Emergy-based urban ecosystem health assessment: A case study of Baotou, China. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(3): 972-981.
- [37] 李芳, 张妍, 刘耕源. 基于能值分析的城市物质代谢研究. *环境可持续与技术*, 2009, 32(10): 108-112.
- [38] Zhang L X, Chen B, Yang Z F, Chen G Q, Jiang M M, Liu G Y. Comparison of typical mega cities in China using emergy synthesis. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(6): 2827-2836.
- [39] Su M R, Yang Z F, Chen B. Limiting factor analysis of urban ecosystems based on emergy - A case study of three cities in the Pearl River Delta in China. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 5: 131-138.
- [40] Chen S Q, Chen B. Assessing inter-city ecological and economic relations: An emergy-based conceptual model. *Frontiers of Earth Science*, 2011, 5(1): 97-102.
- [41] 曲向荣, 张国徽, 徐丽, 林华, 胡俊生. 产业生态学. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [42] Ginley D M. Material flows in the transport industry: An example of industrial metabolism. *Resources Policy*, 1994, 20(3): 169-181.

- [43] Michaelis P, Jackson T. Material and energy flow through the UK iron and steel sector. Part 1: 1954- 1994. *Resources, Conservation and Recycling*, 2000, 29(1/2): 131-156.
- [44] Saidur R, Sattar M A, Majkyi H H, Abdessalam H, Shahruam B S. Energy and exergy analysis at the utility and commercial sectors of Malaysia. *Energy Policy*, 2007, 35(3): 1956-1966.
- [45] Chen Z M, Chen G Q, Zhou J B, Jiang M M, Chen B. Ecological input-output modeling for embodied resources and emissions in Chinese economy 2005. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(7): 1942-1965.
- [46] Zhou Y C, Yang N, Hu S Y. Industrial metabolism of PVC in China: A dynamic material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2013, 73: 33-40.
- [47] Chen S Q, Chen B. Sustainability and future alternatives of biogas-linked agrosystem (BLAS) in China: An emergy synthesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(6): 3948-3959.
- [48] 杨谨, 陈彬, 刘耕源. 基于能值的沼气农业生态系统可持续发展水平综合评价——以恭城县为例. *生态学报*, 2012, 32(13): 4007-4016.
- [49] Yang P P J, Lay O B. Applying ecosystem concepts to the planning of industrial areas: A case study of Singapore's Jurong Island. *Journal of Cleaner Production*, 2004, 12(8/10): 1011-1023.
- [50] Liwarska-Bizukojc E, Bizukojc M, Marcinkowski A, Doniec A. The conceptual model of an eco-industrial park based upon ecological relationships. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(8): 732-741.
- [51] Chae S H, Kim S H, Yoon S G, Park S. Optimization of a waste heat utilization network in an eco-industrial park. *Applied Energy*, 2010, 87(6): 1978-1988.
- [52] Behera S K, Kim J H, Lee S Y, Suh S, Park H S. Ecolution of 'designed' industrial symbiosis networks in the Ulsan Eco-industrial Park: 'research and development into business' as the enabling framework. *Journal of Cleaner Production*, 2012, 29-30: 103-112.
- [53] Lu Y, Su M R, Liu G Y, Chen B, Zhou S Y, Jiang M M. Ecological network analysis for a low-carbon and high-tech industrial park. *The Scientific World Journal*, 2012, doi: 10.1100/2012/30547.
- [54] Bailey R, Bras B, Allen J K. Applying ecological input-output flow analysis to material flows in industrial systems: Part I: Tracing flow. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 8(1/2): 45-68.
- [55] Bailey R, Bras B, Allen J K. Applying ecological input-output flow analysis to material flows in industrial systems: Part II: Flow metrics. *Journal of Industrial Ecology*, 2004, 8(1/2): 69-91.
- [56] Sendra C, Gabarrell X, Vicent T. Material flow analysis adapted to an industrial area. *Journal of Cleaner Production*, 2007, 15(17): 1706-1715.
- [57] Yang Z F, Li S S, Zhang Y, Huang G H. Emergy synthesis for three main industries in Wuyishan City, China. *Journal of Environmental Informatics*, 2011, 17(1): 23-35.
- [58] Biesiot W, Noorman K J. Energy requirements of household consumption: A case study of the Netherlands. *Ecological Economics*, 1999, 28(3): 367-383.
- [59] Gao Z Y, Liu C Y. Empirical analysis on ecological footprint of household consumption in China. *Energy Procedia*, 2011, 5: 2387-2391.
- [60] Druckman A, Sinclair P, Jackson T. A geographically and socio-economically disaggregated local household consumption model for the UK. *Journal of Cleaner Production*, 2008, 16(7): 870-880.
- [61] 罗婷文, 欧阳志云, 王效科, 苗鸿, 郑华. 北京城市化进程中家庭食物碳消费方法与数据来源. *生态学报*, 2005, 25(12): 3252-3258.
- [62] 李忠民, 尹英琦. 我国城乡家庭居民食物消费低碳化比较研究. *经济问题探索*, 2010, (9): 36-42.
- [63] 尹英琦. 我国城镇居民家庭食物碳消费研究 [D]. 陕西: 陕西师范大学, 2011.
- [64] Kerkhof A C, Nonhebel S, Moll H C. Relating the environmental impact of consumption to household expenditures: An input-output analysis. *Ecological Economics*, 2009, 68(4): 1160-1170.
- [65] 陆莹莹, 赵旭. 家庭能源消费研究述评. *水电能源科学*, 2008, 26(1): 187-191.
- [66] Kok R, Benders R M J, Moll H C. Measuring the environmental load of household consumption using some methods based on input-output energy analysis: A comparison of methods and a discussion of results. *Energy Policy*, 2006, 34(17): 2744-2761.
- [67] Papathanasopoulou E. Household consumption, associated fossil fuel demand and carbon dioxide emissions: The case of Greece between 1990 and 2006. *Energy Policy*, 2010, 38(8): 4152-4162.
- [68] 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. *Ecological Economics*, 2002, 41(2): 203-221.
- [69] Fischer-Kowalski M. Society's metabolism: The intellectual history of materials flow analysis, Part I: 1860-1970. *Journal of Industrial Ecology*, 1998, 2(1): 61-78.
- [70] Hashimoto S, Moriguchi Y. Proposal of six indicators of material cycles for describing society's metabolism: From the viewpoint of material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004, 40(3): 185-200.

- [71] Hashimoto S, Moriguchi Y, Saito A, Ono T. Six indicators of material cycles for describing society's metabolism: Application to wood resources in Japan. *Resources, Conservation and Recycling*, 2004, 40: 201-223.
- [72] Huang S L, Lee C L, Chen C W. Socioeconomic metabolism in Taiwan: Emergy synthesis versus material flow analysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 2006, 48(2): 166-196.
- [73] Kuskova P, Gingrich S, Krausmann F. Long term changes in social metabolism and land use in Czechoslovakia, 1830-2000: An energy transition under changing political regimes. *Ecological Economics*, 2008, 68(1/2): 394-407.
- [74] Chen B, Chen G Q. Ecological footprint accounting based on emergy-A case study of the Chinese society. *Ecological Modelling*, 2006, 198(1/2): 101-114.
- [75] Jiang M M, Zhou J B, Chen B, Chen G Q. Emergy-based ecological account for the Chinese economic in 2004. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008, 13(10): 2337-2356.
- [76] Li Y T, Zhang Y, Yang N J. Ecological network model analysis of China's endosomatic and exosomatic societal metabolism. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1400-1406.
- [77] 丁平刚, 田良, 陈彬. 海南省环境经济系统的物质流特征与演变. *中国人口 资源与环境*, 2011, 21(8): 66-71.
- [78] Sorman A H, Giampietro M. The energetic metabolism of societies and the degrowth paradigm: Analyzing biophysical constraints and realities. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 38: 80-93.
- [79] 肖强, 文礼章, 易定宏, 胡聃, 于盈盈, 张海涛. 基于上升性理论的重庆市生态经济系统投入产出分析. *生态学报*, 2010, 30(5): 1148-1156.
- [80] Gray S R, Becker N S C. Contaminant flows in urban residential water systems. *Urban Water*, 2002, 4(4): 331-346.
- [81] Wang J, Han L, Li S S. The collection system for residential recyclables in communities in Haidian District, Beijing: A possible approach for China recycling. *Waste Management*, 2008, 28(9): 1672-1680.
- [82] Li D, Wang R S. Hybrid Emergy-LCA (HEML) based metabolic evaluation of urban residential areas: The case of Beijing, China. *Ecological Complexity*, 2009, 6(4): 484-493.
- [83] 刘天星. 代谢方法及其在城市生态学中的应用//生态学与环境 协调发展——中国生态学会第七届全国会员代表大会论文摘要荟萃. 中国: 中国生态学会, 2004: 306-307.
- [84] Codoban N, Kennedy C A. Metabolism of neighborhood. *Journal of Urban Planning and Development*, 2008, 134(1): 21-32.
- [85] 李旋旗, 花利忠. 基于系统动力学的城市住区形态变迁对城市代谢效率的影响. *生态学报*, 2012, 32(10): 2965-2974.
- [86] Huang C L, Vause J, Ma H W, Yu C P. Urban water metabolism efficiency assessment: Integrated analysis of available and virtual water. *Science of the Total Environment*, 2013, 452-453: 19-27.
- [87] Wang Z Y, Huang K, Yang S S, Yu Y J. An input-output approach to evaluate the water footprint and virtual water trade of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 42: 172-179.
- [88] 徐涛涛. 基于可持续发展的家庭核算: 理论与方法 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2007.
- [89] Zhang Y, Liu H, Chen B. Comprehensive evaluation of the structural characteristics of an urban metabolic system: Model development and a case study of Beijing. *Ecological Modelling*, 2013, 252: 106-113.
- [90] 陈波, 杨建新, 石垚, 欧阳志云. 城市物质流分析框架及其指标体系构建. *生态学报*, 2010, 30(22): 6289-6296.
- [91] Liang S, Zhang T Z. Comparing urban solid waste recycling from the viewpoint of urban metabolism based on physical input-output model: A case of Suzhou in China. *Waste Management*, 2012, 32(1): 220-225.
- [92] Haberl H. Human appropriation of net primary productions as an environmental indicator: Implications for sustainable development. *Ambio*, 1997, 26(3): 143-146.
- [93] Odum H T. Emergy in ecosystems. // *Ecosystem Theory and Application*. New York: John Wiley and Sons, 1986: 337-369.
- [94] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析方法的城市代谢过程研究——理论与方法. *生态学报*, 2013, 33(15): 4539-4551.
- [95] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬. 基于能值分析方法的城市代谢过程研究(2): 案例研究. *生态学报*, 2013, 33(16): 5078-5089.
- [96] Yuan X H, Ji X, Chen H, Chen B, Chen G Q. Urban dynamics and multiple-objective programming: A case study of Beijing. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2008, 13(9): 1998-2007.
- [97] 张妍, 杨志峰. 城市物质代谢的生态效率——以深圳市为例. *生态学报*, 2007, 27(8): 3125-3131.
- [98] 张力小, 胡秋红. 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. *自然资源学报*, 2011, 26(10): 1801-1810.
- [99] 刘晶茹, 王如松, 王震, 杨建新. 中国城市家庭代谢及其影响因素分析. *生态学报*, 2003, 23(12): 2672-2676.
- [100] Liu J R, Wang R S, Yang J X. Metabolism and driving forces of Chinese urban household consumption. *Population and Environment*, 2005, 26(4): 325-341.
- [101] 陈依岚, 包存宽. 基于代谢分析的可持续家庭消费模式研究. 2005 中国可持续发展论坛——中国可持续发展研究会 2005 年学术年会论

文集(下册). 上海: 同济大学出版社, 2005: 595-600.

- [102] Liu S L, Dong Y H, Wen M X, Chen B. Quantify the landscape effect and environmental sustainability of rural region planning at town scale near metropolis. *Frontiers of Earth Science in China*, 2009, 3(1): 112-117.
- [103] 韩博平. 生态网络分析的研究进展. *生态学杂志*, 1993, 12(6): 41-45.
- [104] Fath B D, Patten B C. Quantifying resource homogenization using network flow analysis. *Ecological Modelling*, 1999, 123(2/3): 193-205.
- [105] Jorgensen S E, Fath B D. Examination of ecological network. *Ecological Modelling*, 2006, 196(3/4): 283-288.
- [106] Fath B D, Scharler U M, Ulanowicz R E, Hannon B. Ecological network analysis: Network construction. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 49-55.
- [107] 张妍, 杨志峰. 一种分析城市代谢系统互动关系的方法. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 217-224.
- [108] Chen S Q, Fath B D, Chen B. Information indices from ecological network analysis for urban metabolic system. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 720-724.
- [109] Zhang Y, Yang Z F, Fath B R, Li S S. Ecological network analysis of an urban energy metabolic system: Model development, and a case study of four Chinese cities. *Ecological Modelling*, 2010, 221(16): 1865-1879.
- [110] Zhang J Y, Zhang Y, Yang Z F. Ecological network analysis of an urban energy metabolic system. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(5): 685-695.
- [111] Zheng H M, Zhang Y, Yang N J. Evaluation of an Eco-industrial park based on a social network analysis. *Procedia Environmental Science*, 2012, 13: 1624-1629.
- [112] Li Y, Chen B, Yang Z F. Ecological network analysis for water use systems — A case study of the Yellow River Basin. *Ecological Modelling*, 2009, 220(22): 3163-3173.
- [113] Liu G Y, Yang Z F, Chen B. Comparison of different urban development strategy options to the urban metabolism optimal path. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 5: 178-183.
- [114] Liu G Y, Yang Z F, Chen B. Extended exergy-based urban ecosystem network analysis: a case study of Beijing, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 243-251.
- [115] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Zhang Y. Ecological network determination of sectoral linkages, utility relations and structure characteristics on urban ecological economic system. *Ecological Modelling*, 2011, 222(15): 2825-2834.
- [116] Liu G Y, Yang Z F, Su M R, Chen B. The structure, evolution and sustainability of urban socio-economic system. *Ecological Informatics*, 2012, 10: 2-9.
- [117] Liu H, Zhang Y. Ecological network analysis of urban metabolism based on input-output table. *Procedia Environmental Sciences*, 2012, 13: 1616-1623.
- [118] Browne D, O'Regan B, Moles R. Comparison of energy flow accounting, energy flow metabolism ratio analysis and ecological footprinting as tools for measuring urban sustainability: A case-study of an Irish city-region. *Ecological Economics*, 2012, 83: 97-107.
- [119] Chrysoulakis, Lopes M, Jose R S, Grimmond C S B, Jones M B, Magliulo C, Klostermann J E M, Synnefa A, Mitraka Z, Castro E A, Gonzalez A, Vogt R, Vesala T, Spano D, Pigeon G, Freer-Smith P, Staszewski Tomasz, Hodges N, Mills G, Cartalis C. Sustainable urban metabolism as a link between bio-physical sciences and urban planning: The BRIDGE project. *Landscape and Urban Planning*, 2013, 112: 100-117.
- [120] Moore J, Kissinger M, Rees W E. An urban metabolism and ecological footprint assessment of Metro Vancouver. *Journal of Environmental Management*, 2013, 124: 51-61.
- [121] Churkina G. Modeling the carbon cycle of urban systems. *Ecological Modelling*, 2008, 216(2): 107-113.
- [122] Kellett R, Christen A, Coops N C, van der Laan M, Crawford B, Tooke T R, Olchovski I. A system approach to carbon cycling and emissions modeling at an urban neighborhood scale. *Landscape and Urban Planning*, 2012, 110: 48-58.
- [123] Chen S Q, Chen B. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: A case study of Vienna, Austria. *Environmental Science and Technology*, 2012, 46(8): 4498-4506.
- [124] Oswald F, Baccini P. *Netzstadt: Designing the Urban*. Basel: Birkh User, 2003.
- [125] Kennedy C, Pincetl S, Bunje P. The study of urban metabolism and its applications to urban planning and design. *Environmental Pollution*, 2011, 159(8/9): 1965-1973.