

DOI: 10.5846/stxb201805311204

穆献中, 朱雪婷. 城市能源代谢的生态网络分析研究进展. 生态学报, 2019, 39(12): - .

Mu X Z, Zhu X T. Research progress on ecological network analysis of urban energy metabolism. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(12): - .

城市能源代谢的生态网络分析研究进展

穆献中, 朱雪婷*

北京工业大学循环经济研究院, 北京 100124

摘要: 运用生态网络分析方法研究城市能源代谢可以打破以往研究中的“黑箱模式”, 有助于考察城市内部能源的代谢过程和代谢路径。对研究城市能源代谢的一般方法进行了分析和对比, 发现在探究城市能源代谢方面, 生态网络分析相较于其他方法更具优越性; 因此, 全面整理和阐述了生态网络分析方法的主要内容, 并系统综述了该方法在城市能源代谢中的应用。在此基础上, 指出在未来城市能源代谢的生态网络分析中应从研究尺度、上升性分析和环境元分析的结合应用以及增加不同模型精细度的对比研究 3 个方面做出改进。

关键词: 城市; 能源代谢; 生态网络分析; 研究进展

Research progress on ecological network analysis of urban energy metabolism

MU Xianzhong, ZHU Xueting

Institute of Recycling Economy, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Abstract: Ecological network analysis can eliminate the “black box” problem in research on urban energy systems by examining the metabolic processes and pathways within these systems. This study analyzed and compared the general methods for analyzing urban energy metabolism and found that ecological network analysis was superior to other methods. We comprehensively summarized the main components of the ecological network analysis and systematically reviewed the application of this method to urban energy metabolism. Based on this analysis, we concluded that, in the future, ecological network analyses of urban energy metabolism could be improved in the following aspects: (1) expand the research scale; (2) strengthen the combination of ascendancy analysis and network environ analysis; (3) compare the precision of different models.

Key Words: urban; energy metabolism; ecological network analysis; research progress

能源对于城市的发展至关重要, 在快速的城市化进程中, 城市的众多环境问题源于这一过程对能源的不合理消费。因此, 为顺应可持续发展趋势, 应围绕“如何科学引导城市能源系统转型”这一核心问题, 理清城市能源系统的内在代谢机理, 为我国城市能源系统转型升级提供参考。能源代谢是指能源从资源形态到最终消费形态的所有过程, 期间伴随废弃物的产生。简言之, 城市能源代谢就是城市区域内能源消费和废弃物产生的过程, 主要包括能源的输入、加工转化、终端消费和能源代谢污染物的排放四个环节^[1]。能源代谢的主要特征是存在直接能源代谢和间接能源代谢, 其中, 直接能源代谢具备单向性, 间接能源代谢具备双向性和交叉重叠性。在深入了解城市能源代谢的内涵和特征的基础上, 探究城市能源代谢的内在机理有助于追踪城市能源代谢的核心环节, 揭示城市在能源利用过程中存在的问题及代谢污染物对城市生态和环境的影响, 从而

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71273021), 国家自然科学基金资助项目(71673017)

收稿日期: 2018-00-00; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhux7511@163.com

识别城市能源系统转型的关键节点,为城市能源的政策制定提供科学依据。

近年来,国内外学者基于不同方法对城市能源代谢过程进行了研究。对已有研究整理发现,城市能源代谢的复杂性不仅体现在能源消费规模上,更体现在城市内部能源代谢路径的交叉和重叠上,形成城市系统中多部门、多种能源流的复杂交互网络结构。因此,可以将城市能源系统中各部门和能源流抽象为网络,利用生态网络分析研究城市能源代谢过程。生态网络分析最初应用于自然生态系统,因其在分析系统网络结构方面的优越性,逐步应用于城市经济系统、水系统和能源系统等研究。本文通过梳理生态网络分析方法的发展脉络及在城市能源代谢中的应用,指出已有研究存在的不足,并对未来城市能源代谢的生态网络分析提出研究展望。

1 城市能源代谢研究

城市能源系统研究是城市生态系统相关研究的重要分支,因为随着城市生态系统研究的不断深入和理论方法的不断创新,一些研究者^[2-3]认为能源系统的研究不应孤立地分析其系统本身,而应将其作为城市生态系统的一部分^[4],从生态系统角度研究能源系统的运行规律,分析其组织形态和行为特征^[5],即从能源代谢角度进行分析。

1.1 城市新陈代谢研究

将城市视为完整生态系统的思想最早来自于 Wolman 基于物质代谢视角分析城市生态系统的研究思路。根据 Wolman 的观点,城市是一个完整的生态系统,城市新陈代谢包含了物质/能量输入、产品/废物输出的整个过程。可见废物产生是资源利用的必然结果,只有合理利用资源,才能减少资源浪费和环境破坏^[6]。后来的学者大多接受 Wolman 的观点,并在此基础上进一步解释和发展了城市代谢的概念^[7-10]。近年来,关于城市物质代谢的实证研究大量涌现,根据研究视角的不同,可以将这些研究分为三类:一是研究以城市为代谢主体的多种物质新陈代谢过程,如北京市^[11-14],张掖市^[15],石嘴山市^[16],大连市^[17-18],榆林市^[19],石家庄市^[20]等;二是针对某一特定元素,分析其在经济系统中的流动代谢过程,如碳元素^[21-22],铁元素^[23],硫元素^[24],氮元素^[25],铅元素^[26],钾元素^[27],铝元素^[28]等;三是针对某一种具体物质,研究其在城市经济系统的流动代谢过程,目前研究主要集中在水资源^[29-33]和能源^[34-39]两方面。

1.2 城市能源代谢研究的不同方法比较

城市能源代谢作为城市新陈代谢的重要组成部分^[33],一些学者指出城市能源代谢的系统性分析是城市代谢研究的核心问题^[40],这是因为在能源流动过程中,大量能源被用于维护城市系统的结构和功能^[41]。早期的能源系统研究主要集中于能源供需平衡^[42-44],能源使用强度^[45-50],能源利用结构^[51-54]和系统功能^[55-56]等。这些研究主要分析能源系统结构和功能,侧重于描述能源系统的静态特征。例如,Zhang 等提出了能源结构多样性指数^[57];Templett 等^[53]和 Xu 等^[54]评估了城市能源结构的多样性;在功能分析方面,普遍的研究框架是基于图论的城市能源系统能流状态的分析^[58-61]。可见,早期研究就城市能源系统结构和功能的分析,在如何具体描述能源系统的结构性质、如何分析系统的功能特性、如何通过优化系统的结构和功能来实现城市能源系统新陈代谢的可持续健康发展等关键问题上没有做出充分解释。

基于上述问题,不同学者尝试从能源代谢的角度出发,运用不同方法对城市能源系统及其系统组分进行了研究。Liang 等运用改进后的投入产出方法,对苏州市的能源代谢状况进行了分析^[62]。Browne 等分别利用物质流、代谢比和生态足迹分析法探讨了利默里克市的能源代谢情况^[63]。Baynes 等从城市新陈代谢的角度分析了澳大利亚墨尔本地区的能源代谢过程^[64]。Yang 等利用能值分析法对厦门市的能源代谢进行了研究^[65]。Garcia-Montiel 等分析了波多黎各圣胡安大都市区的社会生态过程对区域内的能源流动和代谢的影响机制^[66]。刘华军等基于 1995—2012 年的中国省际能源消费数据,利用社会网络分析方法对能源消费空间关联的网络结构特征及其效应进行了经验考察^[67]。姜巍等以 2007 年的中国投入产出表为基础,运用威弗综合指数法构建了中国产业部门之间的联系网络,并对以煤炭开采和洗选业为主的 5 个主要能源产业的网络特

征进行了分析^[68]。赵颜创等在部门调研数据、统计年鉴数据和文献资料分析的基础上,提出了一种基于能量流的城市能源代谢综合分析方法,系统分析了能源在城市内部的流动过程,并全面核算了能源的 5 种主要代谢污染物的排放量,同时使用 7 个指标对能源代谢进行评价,系统研究了厦门市 2009 年的能源代谢情况^[1]。Chen 等学者以北京市为例,比较了能量流分析,投入产出分析和生态网络分析三种方法在分析城市能源代谢过程中的不同之处,并指出生态网络分析可以揭示各部门之间相互作用的机制以及各部门对能源的依赖程度^[69]。

可以看出,城市能源代谢分析主要集中于能量流分析、投入产出分析和生态网络分析等方法。其中能量流分析是研究城市代谢的传统方法^[70],计算系统内(社会经济系统)能量的输入和输出,但该方法的缺陷在于没有考察系统内部物质和能量的流动过程,因此忽略了能量流动过程中的隐含能量。因此,Haberl 率先提出了“能量代谢”的概念^[71],改进了能量流分析方法^[72],打破了传统研究的“黑箱模式”,详细分析了箱内(即城市生态系统的部门)流量。(此处“黑箱模式”是指:只侧重于研究系统的外部特征,例如总投入和总产出,却不能检查系统内部,即不能对城市能源系统内部能量交换的细节进行足够的分析。)但该方法仍未解决中间非能源产品和物质交换中的隐含能量计算问题。投入产出分析主要通过累计消费系数评估产品中蕴含的能量,但同样无法计算中间产品中的间接能耗。而基于多路径和多节点分析的生态网络分析可以有效计算总能源消耗(直接能耗+间接能耗),并可以结合投入产出分析识别能源流量,从而揭示城市能源系统的代谢机制。因此,生态网络分析方法在研究城市能源系统代谢时具备较强优越性。

2 生态网络分析方法

生态网络分析方法将研究对象中所传输交换的物质、能量和信息等介质抽象化为网络中的节点,而节点与节点之间的交流关系共同组成了系统网络。结合投入产出方法,研究系统间和系统内各个节点之间介质的流动关系,分析所研究系统的网络结构、功能特征以及不同时期发展和演化的规律。目前,生态网络分析方法已经成为研究生态系统、经济系统、产业系统以及城市代谢系统等复杂网络系统外部特征和内部机理等结构功能的重要工具。基于该方法在研究系统内和系统间各组分关系的优越性,其得到了迅速的发展与推广应用,在城市能源系统中的应用也越来越广泛。

2.1 生态网络分析方法起源

生态网络分析起源于 1973 年 Hannon^[73]将 Leontief^[74-75]所开发的投入—产出模型,用于研究生态系统中物质和能量的流动^[76],是当前分析生态系统结构与功能之间相互作用的主要方法之一。该方法可以定量分析生态网络中生态流的方向和数量以及参与者之间的相互作用,从而揭示生态系统行为的完整性和复杂性^[77]。1976 年,Patten 和 Finn 首先发表了关于生态网络流量分析的论文^[73,78]。最初该分析方法被广泛应用于自然生态系统的研究^[79-83],自从 2002 年 Bodini 和 Bondavalli 首次将生态网络分析方法应用到城市系统中以来,该方法在城市系统中的应用范围不断扩展^[84],例如城市社会经济系统^[12,85-86]、城市水系统^[87]、城市能源系统^[34,37]、城市碳代谢系统^[22,88-89]等。目前,城市生态网络分析主要集中于生态网络分析方法与指标的拓展及多尺度的应用研究,针对不同的研究目的与需要,生态网络分析方法又形成了上升性分析和环境元分析两大分支^[90]。

2.2 上升性分析方法

上升性分析主要研究系统的整体外在表征特点,例如系统稳定性^[91],即系统抵抗外界干扰变化的能力;系统总通量^[92],即系统中流经所有成员的流量的总和;系统发展程度^[93],即系统发展的最大潜力和系统冗余度^[31]等,在该方面上升性具有很大的优越性。运用生态网络分析方法研究各地区水资源代谢时,多采用上升性分析,例如研究黑河流域^[31]、白洋淀流域^[94]、黄河流域^[95]、美国 Sarmato 城市^[93]以及北京市^[30]等地区。同时也有学者运用该方法评价城市系统的可持续性^[96-97]和健康发展水平^[17]等。但该方法不能表征网络内部各节点间的相互作用机制,而环境元分析能够有效解决这一问题^[90]。

2.3 环境元分析方法

环境元分析方法主要研究系统网络内部的结构分布和功能关系,该方法源于传统的 Leontief 投入产出分析,因此会涉及到 Leontief 矩阵的应用。该方法运用的前提是系统是稳态的^[98],在此基础上对网络内部结构分布和功能关系进行分析。主要用于剖析系统的内在机理特征,如系统内的通量^[70,99],即每一个成员流通量的总和;综合流量^[70,99],即资源在成员之间流动的数量;综合效用^[100],即量化评价两两成员之间的生态关系;控制程度^[101],即识别某一节点对其他节点的控制作用;共生程度^[13],即系统整体或每一成员的效用水平等。环境元分析相比上升性分析在城市系统中的应用范围较广,主要集中在能源^[102-103]、水^[29,31]、二氧化碳^[88]以及多种物质^[12,104]等的研究,另外在碳元素^[92,105]、氮元素^[25,100]和硫元素^[24]等代谢分析中也有广泛应用。表 1 说明了两类方法的内涵和具体指标应用:

表 1 上升性和环境元分析指标
Table 1 The indicators from ascendancy analysis and network environ analysis

上升性分析 Ascendancy analysis	代表性指标 Representative indicator	公式 Equation	内涵 Definition
主要负责评价系统的整体外在表征特点 It is mainly responsible for evaluating the overall external characteristics of the system.	平均交互信息	$AMI = k \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n \left(\frac{f_{ij}}{T} \right) \log_2 \left(\frac{f_{ij} T}{T_i T_j} \right)$	二者可相互转化,衡量系统抵抗外界干扰变化的能力
	系统稳定性	$D_R = H_R - AMI$ $H_R = - \sum_{j=0}^n \left(\frac{f_{ij}}{T} \right) \log_2 \left(\frac{T_j}{T} \right)$	
	系统上升性	$A = \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n f_{ij} \log_2 \left(\frac{f_{ij} T}{T_i T_j} \right)$	三者可相互转化,用来描述系统的发展程度
	系统发展能力	$C = - \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n f_{ij} \log_2 \left(\frac{f_{ij}}{T} \right)$	
	系统总开销	$\varphi = C - A = - \sum_{i=1}^{n+2} \sum_{j=0}^n f_{ij} \log \left(\frac{f_{ij}^2}{T_i T_j} \right)$	
环境元分析 Network environ analysis	总通量	$TST = \sum_{i=1}^n T_i$	网络系统的总通量
	综合流量	$N = (I - G)^{-1}$	资源在分室之间流动的数量
	综合效用	$U = (I - D)^{-1}$	分析各分室间的生态互动关系
	共生综合指数	$M = J(U) = \frac{S_+(U)}{S_-(U)}$	判断系统是否为共生系统

3 生态网络分析方法在城市能源代谢中的应用

研究城市能源生态系统的一般思路是,利用城市能源网络流图、能源平衡表及投入产出表存在的结构相似性,构建城市能源生态网络,分析网络中各部门间以及与外部环境间的能源生产、转化、流动和消费的代谢过程,并以此为基础对城市能源系统进行分析^[73-76,106]。目前,国内关于“城市能源代谢的生态网络分析”的研究主要集中于北京师范大学杨志峰院士和张妍教授的研究团队。

该团队基于城市能源代谢特征开发城市能源代谢生态网络模型,并以北京市 1995,2000,2005 和 2007 的历史数据对城市系统内能源流量进行考察,利用环境元分析中的效用分析法阐明了城市能源系统内各部门的复杂关系^[107];在此基础上,该团队研究了中国四个典型城市(北京,天津,上海和重庆)17 个部门的能源流,

分析城市能源系统的结构和功能,阐明优化城市能源系统结构的方法,从而说明如何在未来的城市系统研究中使用生态网络分析方法^[106];之后分别建立了4个城市的5部门生态网络模型和17部门模型,对比了生态网络分析中的简单模型(5部门模型)和复杂模型(17部门模型)在分析城市能源系统时的不同服务功能^[108]。考虑城市系统中的能源代谢网络不仅包含实物能源流,还应该考虑中间产品利用和交换过程中所隐含的能源流,即间接能源消耗。基于此观点,该团队将生态网络分析方法与经济学中的投入产出分析法相结合,以北京市为例,测算了城市能源系统内28个部门的直接能源消耗和间接能源消耗,特别是对城市新陈代谢部门的间接能源流动进行了深入分析^[99]。以此为基础,研究了北京市2000年至2010年间28个社会经济部门的能源消耗情况,确定了能源流动过程及其在北京市各行业的利用分布情况,并根据研究结果为北京减少能源消耗提出相关政策建议^[12]。运用同样的方法,他们做了两个方面的拓展:一是同样以北京市为研究对象,将生态网络分析与投入产出分析相结合,从碳足迹的角度分析了城市系统内28个部门的能源消费结构,量化了城市产品和服务中隐含的能源和碳足迹^[109]。二是将该方法从单一城市尺度(北京)扩展到了多城市尺度的应用:根据2002年和2007年中国各省的多区域投入产出表和能源统计年鉴,结合生态网络分析方法,分别计算了各省的直接和间接能源消费以及整体能源的投入和产出,描述了中国七个城市的能源流动结构^[102];以及抽象出行业部门和能源流作为网络模型中的节点和路径,构建了北京、天津和河北三地多个部门间的生态网络模型,在核算京津冀城市群直接能耗和间接能耗的基础上,考察了能源在城市中各部门之间的代谢路径和在北京、天津和河北三个地区间的流动以及三个地区在能源流动中各自的生态地位^[103]。随后对京津冀城市群进行进一步的深入研究,以京津冀为研究对象,根据2010年中国的多区域投入产出表,结合生态网络分析方法,构建了一个以部门和能源流为节点和路径的18部门网络模型,计算了部门和区域的能源消耗,详细描述了能源在城市中各部门和京津冀城市间的流动过程^[76]。随后,该团队使用该方法,将多区域投入产出表和生态网络分析相结合,从两个角度分别分析了京津冀地区与中国其他地区的能源流动。一个角度是将京津冀地区作为一个整体,研究其与中国其他27个省区的能源流动;另一个角度是分析北京、天津和河北三个地区之间的能源流动和代谢机制^[37]。

其他学者应用生态网络分析方法研究城市能源代谢的研究主要有:郑诗赏等采用生态网络分析方法,首先构造了2000、2005、2010和2014年山东省整体能源代谢网络,然后对其进行了流量分析和效用分析,探讨了山东省能源代谢网络的系统结构及功能关系^[35]。Chen等以北京市为例,在多区域投入产出表和生态网络分析相结合的基础上,分析了城市系统中能源利用和水资源之间的联系^[32];之后,Wang等运用同样的方法研究了京津冀地区城市系统中能源利用和水资源之间的联系^[36];彭焜等将生态网络分析方法和系统投入产出法相结合,对湖北省能源和水资源的耦合关系及协同管理机制进行了研究^[110]。

综上所述,生态网络分析方法在城市能源代谢中已有广泛应用,主要基于城市能源系统中能源流的生产、转化、传输、消费和排放路径进行分析,以反映系统中各部门间的互动关系;在单一城市尺度和多个城市尺度均有应用,但研究力度和深入度仍有待提升。同时可以发现,生态网络分析中的环境元分析法是目前研究城市能源代谢过程的一个主要方法,即通过列昂惕夫矩阵计算出城市能源系统中的隐含能流,进而得出能源系统组分间的关联。但用来研究系统整体外在表征特点的上升性分析在其中的应用较为欠缺。之前有学者将生态网络分析中的上升性分析和环境元分析相结合,用于城市物质代谢^[17]、水资源代谢^[31]和社区碳代谢^[111]的由外在整体表征特点到内在代谢过程的分析。但将二者结合起来分析城市能源代谢状况的研究较少,即大部分学者只是研究了城市能源代谢系统的内部运行机理,但对于系统整体外在表征特点所做研究工作存在不足,为后来者提供了研究空间。

4 结论与展望

自城市能源系统这一概念提出以来,国内外学者基于不同角度对该系统进行了分析。目前研究成果众多,而城市能源系统的代谢研究是其中非常重要的研究分支。经过众多学者不停地探索与研究,城市能源代

谢的研究方法不断得到改进与完善。通过对比各个方法在具体应用中的优劣势,本文认为生态网络分析方法是目前研究城市能源代谢过程较为先进的方法,但通过整理目前城市能源代谢生态网络分析的已有成果,发现仍存在问题,如研究尺度问题,对系统的分析不完善问题,数据可获取性问题等。因此,本文在综合梳理城市能源代谢、生态网络分析方法及其应用等已有研究和脉络的基础上,对未来生态网络分析方法在城市能源代谢问题中的继续深入研究进行了展望:

(1)拓展城市能源代谢的研究尺度。城市能源系统作为相互关联的开放系统,单城市的研究尺度已难以满足现实需求,多城市群或区域协同一体化是未来重要的研究方向。但就目前研究进展来看,单城市背景和城市群尺度的研究都相对较少,且主要集中在京津冀城市群。在当前大力推进城市群一体化建设背景下,拓展分析尺度,构建多城市能源系统协同的生态网络模型,分析城市能源系统的代谢过程,将是未来的重要研究方向。

(2)加强城市能源代谢上升性分析和环境元分析的结合。对城市能源代谢的系统认识,应从系统的外在表征和内部机理两方面进行全面解析。上升性分析和环境元分析方法分别应用于评价系统外部特征和分析系统内部机理,服务于不同的研究目标。但目前二者在城市能源代谢方面的结合应用比较欠缺,因此未来应该加强城市能源代谢上升性分析和环境元分析的结合。

(3)增加生态网络模型不同精细度的对比研究。目前研究中已出现的生态网络模型精细度有 5 部门模型、17 部门模型和 28 部门模型等等,但均是独立研究。关于不同模型精细度的对比研究并不多见,模型精细度的不同对分析结果造成的影响并不明晰。因此,未来的一个研究方向是理清何种生态网络模型精细度可以满足何种研究需要,突出生态网络模型不同精细度的对比研究。

参考文献 (References):

- [1] 赵颜创, 赵小锋, 林剑艺, 崔胜辉. 厦门市城市能源代谢综合分析方法及应用. 生态科学, 2016, 35(5): 110-116.
- [2] Su M R, Fath B D, Yang Z F. Urban ecosystem health assessment: a review. Science of the Total Environment, 2010, 408(12): 2425-2434.
- [3] Jones N F, Pejchar L, Kiesecker J M. The energy footprint: how oil, natural gas, and wind energy affect land for biodiversity and the flow of ecosystem services. Bioscience, 2015, 65(3): 290-301.
- [4] Su M R, Zhang Y, Liu G Y, Xu L Y, Zhang L X, Yang Z F. Urban ecosystem health assessment: perspectives and Chinese practice. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2013, 10(11): 5874-5885.
- [5] Zeng H, Ellis C S, Lebeck A R, Vahdat A. ECOSystem: managing energy as a first class operating system resource. ACM Sigops Operating Systems Review, 2002, 36(5): 123-132.
- [6] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213: 179-190.
- [7] Newman P W G. Sustainability and cities: extending the metabolism model. Landscape and Urban Planning, 1999, 44(4): 219-226.
- [8] Warren-Rhodes K, Koenig A. Escalating trends in the urban metabolism of Hong Kong: 1971-1997. Ambio, 2001, 30(7): 429-438.
- [9] Kennedy C, Cuddihy J, Engel-Yan J. The changing metabolism of cities. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11(2): 43-59.
- [10] Huang H P, Bi J, Li X M, Zhang B, Yang J. Material flow analysis (MFA) of an eco-economic system: a case study of Wujin District, Changzhou, China. Frontiers of Biology in China, 2008, 3(3): 367-374.
- [11] 宋涛, 蔡建明, 杜姗姗, 倪攀, 丁悦. 基于能值分析的北京城市新陈代谢研究. 干旱区资源与环境, 2015, 29(1): 37-42.
- [12] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D, Liu H, Yang Z F, Liu G Y, Su M R. Ecological network analysis of an urban metabolic system based on input-output tables: model development and case study for Beijing. Science of the Total Environment, 2014, 468-469: 642-653.
- [13] Zhang Y, Liu H, Fath B D. Synergism analysis of an urban metabolic system: Model development and a case study for Beijing, China. Ecological Modelling, 2014, 272: 188-197.
- [14] Yang Z F, Zhang Y, Li S S, Liu H, Zheng H M, Zhang J Y, Su M R, Liu G Y. Characterizing urban metabolic systems with an ecological hierarchy method, Beijing, China. Landscape and Urban Planning, 2014, 121: 19-33.
- [15] 王红娟. 张掖市城市代谢机理及优化调控研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012: 57.
- [16] 黄永斌, 董锁成, 李泽红. 基于能值分析的资源型城市新陈代谢水平评价——以石嘴山市为例. 资源科学, 2015, 37(8): 1621-1628.
- [17] 刘耕源, 杨志峰, 陈彬, 徐琳瑜, 张妍. 基于生态网络的城市代谢结构模拟研究——以大连市为例. 生态学报, 2013, 33(18): 5926-5934.

- [18] 李晓英. 基于城市代谢分析的大连可持续发展对策. 环境保护, 2016, 44(19): 56-58.
- [19] 徐福军, 马俊杰. 基于物质流分析的区域循环经济评价指标体系构建——以陕西省榆林市为例. 地下水, 2011, 33(1): 158-159, 167-167.
- [20] 李爽, 张国臣, 王丽艳. 基于生态足迹和物质流的可持续性分析与评价——以石家庄市为例. 水土保持研究, 2013, 20(5): 226-231.
- [21] Zhang Y, Xia L L, Xiang W N. Analyzing spatial patterns of urban carbon metabolism: a case study in Beijing, China. Landscape and Urban Planning, 2014, 130: 184-200.
- [22] 夏楚瑜, 李艳, 叶艳妹, 史舟, 刘婧鸣, 李效顺. 基于生态网络效用的城市碳代谢空间分析——以杭州为例. 生态学报, 2018, 38(1): 73-85.
- [23] Yellishetty M, Mudd G M. Substance flow analysis of steel and long term sustainability of iron ore resources in Australia, Brazil, China and India. Journal of Cleaner Production, 2014, 84: 400-410.
- [24] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Liu G Y, Su M R. Analysis of the industrial metabolic processes for sulfur in the Lubei (Shandong Province, China) eco-industrial park. Journal of Cleaner Production, 2015, 96: 126-138.
- [25] Min Y, Jin X G, Chang J, Peng C H, Gu B J, Ge Y, Zhong Y. Weak indirect effects inherent to nitrogen biogeochemical cycling within anthropogenic ecosystems: a network environ analysis. Ecological Modelling, 2011, 222(17): 3277-3284.
- [26] Bai L, Qiao Q, Li Y P, Xie M H, Wan S, Zhong Q D. Substance flow analysis of production process: a case study of a lead smelting process. Journal of Cleaner Production, 2015, 104: 502-512.
- [27] Sakamornsnguan K, Kretschmann J. Substance flow analysis and mineral policy: the case of potash in Thailand. The Extractive Industries and Society, 2016, 3(2): 383-394.
- [28] Ding N, Yang J X, Liu J R. Substance flow analysis of aluminum industry in mainland China. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 1167-1180.
- [29] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D. Ecological network analysis of an urban water metabolic system: model development, and a case study for Beijing. Science of the Total Environment, 2010, 408(20): 4702-4711.
- [30] Li Y, Yang Z F. Network structure analysis for environmental flow toward sustainable water use. Procedia Environmental Sciences, 2010, 2: 1737-1744.
- [31] Fang D L, Chen B. Ecological network analysis for a virtual water network. Environmental Science & Technology, 2015, 49(11): 6722-6730.
- [32] Chen S Q, Chen B. Urban energy-water nexus: a network perspective. Applied Energy, 2016, 184: 905-914.
- [33] 黄初龙, 于昌平, 高兵, 黄云凤. 厦门市资源水与虚拟水耦合代谢效率评价. 生态学报, 2016, 36(22): 7267-7278.
- [34] Zhang Y, Li Y X, Zheng H M. Ecological network analysis of energy metabolism in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration. Ecological Modelling, 2017, 351: 51-62.
- [35] Zheng S S, Shi L. Energy metabolism network based on ecological network analysis: a case study of Shandong province. Advances in Environmental Protection, 2016, 6(6): 159-170.
- [36] Wang S G, Chen B. Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis: a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region. Applied Energy, 2016, 178: 773-783.
- [37] Zheng H M, Wang X J, Li M J, Zhang Y, Fan Y C. Interregional trade among regions of urban energy metabolism: a case study between Beijing-Tianjin-Hebei and others in China. Resources, Conservation and Recycling, 2018, 132: 339-351.
- [38] Facchini A, Kennedy C, Stewart I, Mele R. The energy metabolism of megacities. Applied Energy, 2017, 186(2): 86-95.
- [39] 黄和平, 王丽影. 基于能源代谢分析的南昌市能源消费碳排放综合生态效率研究. 生态学报, 2017, 37(12): 4191-4197.
- [40] 宋涛, 蔡建明, 倪攀, 杜姗姗, 丁悦. 城市新陈代谢研究综述及展望. 地理科学进展, 2013, 32(11): 1650-1661.
- [41] Liu G Y, Yang Z F, Chen B, Zhang Y. Ecological network determination of sectoral linkages, utility relations and structural characteristics on urban ecological economic system. Ecological Modelling, 2011, 222(15): 2825-2834.
- [42] Amatya V B, Chandrashekar M, Robinson J B. Residential sector energy-supply-demand analysis: a modelling approach for developing countries and fuelwood-supply sustainability in Nepal. Energy, 1993, 18(4): 341-354.
- [43] Howorth C, O'Keefe P, Convery I. Energy utilisation in peri-urban areas: issues of demand. Energy for Sustainable Development, 1997, 3(5): 16-25.
- [44] Brownsword R A, Fleming P D, Powell J C, Pearsall N. Sustainable cities-modelling urban energy supply and demand. Applied Energy, 2005, 82(2): 167-180.
- [45] Pachauri S. An analysis of cross-sectional variations in total household energy requirements in India using micro survey data. Energy Policy, 2004, 32(15): 1723-1735.
- [46] Crompton P, Wu Y R. Energy consumption in China: past trends and future directions. Energy Economics, 2005, 27(1): 195-208.

- [47] Kadian R, Dahiya R P, Garg H P. Energy-related emissions and mitigation opportunities from the household sector in Delhi. *Energy Policy*, 2007, 35(12): 6195-6211.
- [48] Farreny R, Gabarrell X, Rieradevall J. Energy intensity and greenhouse gas emission of a purchase in the retail park service sector: an integrative approach. *Energy Policy*, 2008, 36(6): 1957-1968.
- [49] Dhakal S. Urban energy use and carbon emissions from cities in China and policy implications. *Energy Policy*, 2009, 37(11): 4208-4219.
- [50] Ma C B. Account for sector heterogeneity in China's energy consumption: sector price indices vs. GDP deflator. *Energy Economics*, 2010, 32(1): 24-29.
- [51] Bense T G, Remedio E M. Residential energy use patterns in Cebu City, Philippines. *Energy*, 1995, 20(3): 173-187.
- [52] Alabe M. Household energy consumption patterns in northern Nigeria. *Energy for Sustainable Development*, 1996, 2(5): 42-45.
- [53] Templet P H. Energy, diversity and development in economic systems; An empirical analysis. *Ecological Economics*, 2004, 30(2): 223-233.
- [54] Xu Z M, Cheng G D, Chen D J, Templet P H. Economic diversity, development capacity and sustainable development of China. *Ecological Economics*, 2002, 40(3): 369-378.
- [55] Shivakumar K, Narasimhan S. A robust and efficient NLP formulation using graph theoretic principles for synthesis of heat exchanger networks. *Computers & Chemical Engineering*, 2002, 26(11): 1517-1532.
- [56] Grekas D N, Frangopoulos C A. Automatic synthesis of mathematical models using graph theory for optimisation of thermal energy systems. *Energy Conversion and Management*, 2007, 48(11): 2818-2826.
- [57] 张雷. 经济发展对碳排放的影响. *地理学报*, 2003, 58(4): 629-637.
- [58] Newcombe K, Kalma J D, Aston A R. The metabolism of a city: the case of Hong Kong. *Ambio*, 1978, 7(1): 3-15.
- [59] Korhonen J. Four ecosystem principles for an industrial ecosystem. *Journal of Cleaner Production*, 2001, 9(3): 253-259.
- [60] Korhonen J. A material and energy flow model for co-production of heat and power. *Journal of Cleaner Production*, 2002, 10(6): 537-544.
- [61] Korhonen J, Snäkin J P. Analysing the evolution of industrial ecosystems: concepts and application. *Ecological Economics*, 2005, 52(2): 169-186.
- [62] Liang S, Wang C, Zhang T Z. An improved input-output model for energy analysis: a case study of Suzhou. *Ecological Economics*, 2010, 69(9): 1805-1813.
- [63] 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.
- [64] Baynes T M, Bai X M. Reconstructing the energy history of a city. *Journal of Industrial Ecology*, 2012, 16(6): 862-874.
- [65] Yang D W, Kao W T M, Zhang G Q, Zhang N Y. Evaluating spatiotemporal differences and sustainability of Xiamen urban metabolism using emergy synthesis. *Ecological Modelling*, 2014, 272: 40-48.
- [66] Garcia-Montiel D C, Verdejo-Ortiz J C, Santiago-Bartolomei R, Vila-Ruiz C P, Santiago L, Melendez-Ackerman E. Food sources and accessibility and waste disposal patterns across an urban tropical watershed: implications for the flow of materials and energy. *Ecology and Society*, 2014, 19(1): 37.
- [67] 刘华军, 刘传明, 孙亚男. 中国能源消费的空间关联网络结构特征及其效应研究. *中国工业经济*, 2015, (5): 83-95.
- [68] 姜巍, 高卫东, 熊天琦. 中国能源产业网络结构特征分析. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(8): 196-202.
- [69] Chen S Q, Chen B. Urban energy consumption: different insights from energy flow analysis, input-output analysis and ecological network analysis. *Applied Energy*, 2015, 138: 99-107.
- [70] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D. Analysis of the energy metabolism of urban socioeconomic sectors and the associated carbon footprints: model development and a case study for Beijing. *Energy Policy*, 2014, 73: 540-551.
- [71] Haberl H. Human appropriation of net primary production as an environmental indicator: implications for sustainable development. *Ambio*, 1997, 26(3): 143-146.
- [72] Haberl H. The energetic metabolism of societies part I: accounting concepts. *Journal of Industrial Ecology*, 2001, 5(1): 11-33.
- [73] Patten B C, Bosserman R W, Finn J T, Cale W G. Propagation of cause in ecosystems//Patten B C, ed. *Systems Analysis and Simulation in Ecology*. New York: Academic Press, 1976: 457-579.
- [74] Leontief W W. The structure of the U.S. economy. *Scientific American*, 1965, 212(4): 25-35.
- [75] Leontief W W. *Input-output Economics*. Oxford: Oxford University Press, 1966: 15-21.
- [76] Schramski J R, Kazanci C, Tollner E W. Network environ theory, simulation, and EcoNet[®] 2.0. *Environmental Modelling & Software*, 2011, 26(4): 419-428.
- [77] Fath B D. Network mutualism: positive community-level relations in ecosystems. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 56-67.
- [78] Finn J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows. *Journal of Theoretical Biology*, 1976, 56(2): 363-380.

- [79] Baird D, Fath B D, Ulanowicz R E, Asmus H, Asmus R. On the consequences of aggregation and balancing of networks on system properties derived from ecological network analysis. *Ecological Modelling*, 2009, 220(23): 3465-3471.
- [80] Dame J K, Christian R R. Evaluation of ecological network analysis: validation of output. *Ecological Modelling*, 2008, 210(3): 327-338.
- [81] Borrett S R, Fath B D, Patten B C. Functional integration of ecological networks through pathway proliferation. *Journal of Theoretical Biology*, 2007, 245(1): 98-111.
- [82] Jordán F, Okey T A, Bauer B, Libralato S. Identifying important species: linking structure and function in ecological networks. *Ecological Modelling*, 2008, 216(1): 75-80.
- [83] Gattie D K, Schramski J R, Bata S A. Analysis of microdynamic environ flows in an ecological network. *Ecological Engineering*, 2006, 28(3): 187-204.
- [84] Bodini A, Bondavalli C. Towards a sustainable use of water resources: a whole-ecosystem approach using network analysis. *International Journal of Environment and Pollution*, 2002, 18(5): 463-485.
- [85] Li S S, Zhang Y, Yang Z F, Liu H, Zhang J Y. Ecological relationship analysis of the urban metabolic system of Beijing, China. *Environmental Pollution*, 2012, 170: 169-176.
- [86] 胡科, 刘晓磊, 魏希文, Reshmita N, 崔雪锋. 应用生态网络分析方法评价中国经济系统的可持续性. *生态学报*, 2016, 36(24): 7942-7950.
- [87] Bodini A, Bondavalli C, Allesina S. Cities as ecosystems: growth, development and implications for sustainability. *Ecological Modelling*, 2012, 245: 185-198.
- [88] Zhang Y, Li Y G, Liu G Y, Hao Y. CO₂ metabolic flow analysis in global trade based on ecological network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 34-41.
- [89] Xia L L, Liu Y, Wang X J, Tian X, Wu Q, Zhang Y, Liu G Y, Hao Y. Spatial analysis of the ecological relationships of urban carbon metabolism based on an 18 nodes network model. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 170: 61-69.
- [90] 张妍, 郑宏媚, 陆韩静. 城市生态网络分析研究进展. *生态学报*, 2017, 37(12): 4258-4267.
- [91] Lu W W, Su M R, Zhang Y, Yang Z F, Chen B, Liu G Y. Assessment of energy security in China based on ecological network analysis: a perspective from the security of crude oil supply. *Energy Policy*, 2014, 74: 406-413.
- [92] Xia L L, Fath B D, Scharler U M, Zhang Y. Spatial variation in the ecological relationships among the components of Beijing's carbon metabolic system. *Science of the Total Environment*, 2016, 544: 103-113.
- [93] Bodini A. Building a systemic environmental monitoring and indicators for sustainability: what has the ecological network approach to offer? *Ecological Indicators*, 2012, 15(1): 140-148.
- [94] Mao X F, Yang Z F, Chen B, Chen H. Examination of wetlands system using ecological network analysis: a case study of Baiyangdian Basin, China. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 427-439.
- [95] 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.
- [96] Niquil N, Chaumillon E, Johnson G A, Bertin X, Grami B, David V, Bacher C, Asmus H, Baird D, Asmus R. The effect of physical drivers on ecosystem indices derived from ecological network analysis: comparison across estuarine ecosystems. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2012, 108: 132-143.
- [97] Ravalde T, Keirstead J. Comparing performance metrics for multi-resource systems: the case of urban metabolism. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163(S1): S241-S253.
- [98] Fath B D, Patten B C. Review of the foundations of network environ analysis. *Ecosystems*, 1999, 2(2): 167-179.
- [99] Small G E, Sterner R W, Finlay J C. An ecological network analysis of nitrogen cycling in the Laurentian great lakes. *Ecological Modelling*, 2014, 293: 150-160.
- [100] Zhang Y, Zheng H M, Fath B D. Ecological network analysis of an industrial symbiosis system: a case study of the Shandong Lubei eco-industrial park. *Ecological Modelling*, 2015, 306: 174-184.
- [101] Chen S Q, Chen B. Network environ perspective for urban metabolism and carbon emissions: a case study of Vienna, Austria. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(8): 4498-4506.
- [102] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Su M R, Liu G Y, Li Y X. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China. *Energy Policy*, 2015, 86: 651-663.
- [103] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Li Y X, Liu G Y, Su M R, Yin X N. Urban energy flow processes in the Beijing-Tianjin-Hebei (Jing-Jin-Ji) urban agglomeration: combining multi-regional input-output tables with ecological network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 114: 243-256.

- [104] Ravalde T, Keirstead J. Comparing performance metrics for multi-resource systems: the case of urban metabolism. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163(S1): S241-S253.
- [105] Zhang Y, Xia L L, Fath B D, Yang Z F, Yin X N, Su M R, Liu G Y, Li Y X. Development of a spatially explicit network model of urban metabolism and analysis of the distribution of ecological relationships: case study of Beijing, China. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112(5): 4304-4317.
- [106] Zhang Y, Yang Z F, Fath B D, 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.
- [107] Zhang Y, Zhang J Y, Yang Z F. Network relationship analysis of urban energy metabolic system. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1407-1412.
- [108] Zhang Y, Li S S, Fath B D, Yang Z F, Yang N J. Analysis of an urban energy metabolic system: comparison of simple and complex model results. *Ecological Modelling*, 2011, 223(1): 14-19.
- [109] Zhang Y, Zheng H M, Yang Z F, Li J J, Yin X N, Liu G Y, Su M R. Analysis of urban energy consumption in carbon metabolic processes and its structural attributes: a case study for Beijing. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 103: 884-897.
- [110] 彭焜, 朱鹤, 王赛鸽, 陈斌, 魏文栋, 李佳硕. 基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究——以湖北省为例. *自然资源学报*, 2018, 33(9): 1514-1528.
- [111] Lu Y, Chen B, Hayat T, Alsaedi A. Communal carbon metabolism: methodology and case study. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163(S1): S315-S321.