

DOI: 10.5846/stxb201904220814

李枝坚, 张晓刚, 曾辉, 常文静. 基于景观生态学的城市人居环境代谢研究范式与研究框架建构. 生态学报, 2020, 40(19): 6738-6748.

Li Z J, Zhang X G, Zeng H, Chang W J. Paradigm and framework construction of metabolism of urban human settlement based on landscape ecology. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(19): 6738-6748.

基于景观生态学的城市人居环境代谢研究范式与研究框架建构

李枝坚, 张晓刚, 曾辉, 常文静*

北京大学深圳研究生院城市规划与设计学院, 深圳 518055

摘要: 人居环境建设已经成为中国城市发展和当代生态学研究的新兴命题, 基于物质代谢研究成果, 系统剖析城市人居环境问题, 提升城市化过程的生态文明水准成为推动新型城市化发展的重要途径选择。通过对人居环境视角和社会代谢视角的城市研究进行简要回顾, 认为两种视角的有机整合可以弥补各自的理论和方法论缺陷, 进而凝练出新的城市生态学研究思路。利用景观生态学理论和概念体系, 建构了多层次、多维度的城市人居环境代谢研究范式和基本研究框架。这一范式可以从多尺度和多维度反映城市人居环境代谢的过程特征, 厘清城市人为活动和各种资源环境问题的关联关系, 整合多学科的知识和技术手段, 解析城市人居环境的时空动态演化过程及其驱动机制, 为城市人居环境研究学科的发展创造有利条件。通过建构基于景观生态学的城市人居环境物质能量代谢研究框架, 还可以有效推进城市人居环境物质能量代谢中的格局-过程-尺度耦合问题, 数据采集、储存与分析问题和效应调控与过程管理问题的研究, 对于完善城市代谢研究方法, 促进城市人居环境建设具有重要的参考和借鉴意义。

关键词: 城市代谢; 人居环境; 等级斑块动态范式; 物质流; 能量流

Paradigm and framework construction of metabolism of urban human settlement based on landscape ecology

LI Zhijian, ZHANG Xiaogang, ZENG Hui, CHANG Wenjing*

Shenzhen Graduate School of Peking University, Shenzhen 518055, China

Abstract: The construction of human settlement has become an emerging issue in urban development and ecology in China. Using material metabolism to analyze urban human settlement and improve ecological civilization during the urbanization has become an important way to promote modern urbanization development. By reviewing the urban studies from the perspectives of human settlement and social metabolism, we propose that these two perspectives are complementary regarding their respective theories and methodologies, and the combination of them will provide a holistic understanding of urban ecology. Using theories of landscape ecology, we construct a multi-level and multi-dimensional paradigm and framework to study the metabolisms of urban human settlements. This paradigm can reflect the process characteristics of urban human settlement metabolism from multiple scales and dimensions; clarify the correlations between anthropogenic activities and the resource and environmental issues; integrate multi-disciplinary knowledge and technologies; analyze the spatiotemporal variations in urban human settlements and the driving factors; and thus favor the knowledge advances for urban human settlements. The landscape ecology-based framework can effectively identify the pattern-process-scale coupling problems in the metabolisms of urban human settlements, provide tools for data collection, storage and analysis, impact control, and process management.

基金项目: 科技部国家重点研发计划(2017YFC0505801)

收稿日期: 2019-04-22; 网络出版日期: 2020-07-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: changwj@pkusz.edu.cn

The paradigm and framework provide a valuable reference in methodology improvement of urban metabolism and future construction of urban human settlements.

Key Words: urban metabolism; human settlement; hierarchical patch dynamic paradigm; material flow; energy flow

从物质代谢角度解析城市结构功能关系及相关的资源环境问题,是近年来城市生态环境效应研究的新思路,也是城市景观生态安全格局建构和功能完善的重要基础^[1]。大规模城镇建设和快速增加的城市人口,需要消耗大量资源并排出各种废物,引发资源耗竭、环境污染等环境问题,以及交通拥挤、住房紧张、治安恶化等社会问题,严重威胁城市人居环境^[2-3]。运用物质流分析方法可以深入探讨社会经济发展与资源消耗和环境污染之间的关系,从而为社会经济发展过程中资源环境问题的解决提供科学依据^[4-5]。目前城市化地区的物质代谢分析除不断进行方法论完善外^[6],对行业^[7]、城市^[8]乃至国家^[9]等各个尺度的研究对象均开展了大量的实证研究,成为人为活动生态环境效应研究领域的热点研究方向之一。

人居环境建设已经成为中国城市发展和当代生态学研究的新兴命题^[10],基于物质代谢研究成果,系统剖析城市人居环境问题,提升城市化过程的生态文明水准成为推动新型城市化发展的重要路径选择。现阶段国际城市代谢研究的重点是整合自然系统(环境)与人类系统(社会经济),全面分析城市和主要生产过程的资源利用与废物排放,提高对城市过程与功能的整体理解,为城市规划、设计人员和管理者提供机会,来改善城市化过程中各类负面生态环境效应^[11]。相关研究工作的重点领域包括:特定产业类型或区域单元的代谢核算及流程分析^[12-13];适用于不同行业和区域特点的代谢模型研究与应用;以及将相关研究成果用于指导城市建设和管理的技术路径与方法等^[14-16]。

近年来,国内外学者开始尝试将景观生态学的基本概念和方法引入城市物质流分析,以期拓展相关研究的深度和广度。例如,引入点、线、面概念,将城市景观格局与生态代谢过程联系起来,进而建立城市物质流分析模型框架^[17];建构网络化的生态城市模型,量化分析物质流特征,厘清流的外部特征(输入和输出的大小和结构)以及内部特征(关键节点和生态关系)及其随时间的变化^[18];从特定生态流的行为差异出发,分析生态流发生的背景系统的景观特征,总结生态流的关键模式及其与背景景观系统的契合程度,以达成更好地理解景观格局和功能的目的^[19]等。这些研究工作通常以城市或一个大尺度地域单元为研究对象,核心研究内容大致可以分成两类,一类从物质流的角度重新认识景观的结构、格局与功能,进而将二者整合为一类系统研究工作^[20-21];第二类大多基于城市代谢视角,利用网络分析手段,尝试弄清各类生态流的整体系统过程特征及其生态环境效应,寻求可持续的生态流管理手段和路径^[22-26]。

总结上述分析不难发现,由于人居环境建设问题极为复杂,物质代谢理论和方法在城市人居环境建构中的研究案例大多集中于某些具体的领域,整体研究工作还缺乏系统性。大多数研究工作通常针对单一功能过程或一个特定的尺度空间,缺乏合理的多尺度、多维度整体性研究,致使人居环境代谢研究的理论总结、方法论建构和决策应用方面难以形成有效的集成效应;另外具体研究工作中的格局—过程—尺度耦合问题,数据采集、储存和分析问题以及效应调控和过程管控等关键学科发展问题的解决进展缓慢。针对上述问题,本文拟采用景观生态学的理论和方法,尝试整合传统研究思路和成果,搭建一套综合的研究范式和研究框架,以期有效解决上述各关键问题,推动城市人居环境代谢研究的发展。

1 研究背景:城市研究的两种视角

1.1 人居环境视角的城市研究

“人居活动”特指生产活动以外的休息居住和休闲娱乐活动,或泛指人类生产和生活所需的一切有关活动^[27]。人居环境强调“人居活动”的地域空间,在突出“人居活动”核心地位的同时,也强调支撑环境的重要性。人居环境学又被称为人类聚居学,最早是由希腊著名的城市规划学者道萨迪亚斯(Constantinos Apostolos

Doxiadis, 1913—1975) 在 20 世纪 50 年代创立的。国外城市人居环境思想可以追溯到 16 世纪欧洲的“乌托邦”理想, 历经萌芽期、雏形期和发展期^[28], 先后形成了物质空间规划、人和可持续发展三个研究核心, 以及城市规划学派、人居环境学派、地理学派和生态学派等不同的学科派别^[29]。

我国的人居环境思想发端于古代风水学思想^[30]。20 世纪 90 年代初, 吴良镛先生从当前我国城市化发展面临的实际问题和理论需求出发, 在参考和借鉴国外“人类聚居学”思想的基础上, 倡议并主持创建了以人与自然协调为中心, 以居住环境为研究对象的人居环境科学, 并首次提出了人居环境科学的基本框架^[31]。该框架以五大系统(包含自然、人、社会、居住和支撑网络)和五大层次(包含全球、区域、城市、社区和建筑)的概念体系归纳了城市人居环境的结构性特征; 同时建议从建筑学、景观学、地理学、生态学、社会学和环境科学等不同学科角度剖析“城市人居环境”问题。人居环境科学基本框架的提出为从学科交叉角度解决城市人居环境问题打开了思路; 此后, 人居环境科学整合地理学^[32-33]、生态学^[34-35]理论和方法获得快速发展, 并细分出“大城市边缘区人居环境”^[36-37]、“乡村人居环境”^[38]和“岛屿人居环境”^[39]等不同人居环境科学研究的分支领域。

然而近 30 年来, 尽管相关学科在人居环境研究, 特别是城市人居环境的理论和实践研究方面形成较好的积累, 但并没有使得这一研究领域凝练成长为一门综合、独立的新学科, 还存在各学科基础理论缺乏整合, 定性与定量研究结合不足, 理论与应用脱节等问题(表 1)。这些问题一方面体现了城市人居环境问题的复杂性, 需要进一步强化基础研究范式和理论支撑基础; 另外一方面也体现了这项研究工作强烈的实践性色彩, 需要有效解决理论与应用脱节问题, 以指导各类人居环境的建设与实践。

表 1 当前城市人居环境研究存在的主要问题
Table 1 Main problems of studies on urban human settlement

问题类型 Problems	具体表现 Specific features
各学科基础理论缺乏整合 Lacking integration of basic theories of various disciplines	人居环境问题是一个多学科问题, 但学科整合多限于指标体系层面 ^[40-41] ; 城市规划和建筑学仍然是人居环境研究的核心学科, 其他相关学科的参与程度不足; 环境科学多聚焦于人居场所的微观环境质量的研究, 缺乏对人居环境宏观演化趋势把握; 地理学研究仅仅利用 GIS 技术融入人居环境研究 ^[42-44] , 一些最新的学科进展与现行城市人居环境建设和管理工作缺乏接入接口; 生态学在人居环境研究中取得的成果和学术影响力有限, 综合性研究特色未能充分发挥。
定性与定量研究结合不足 The insufficient combination of qualitative and quantitative research	定性与定量研究结合是城市人居环境学科发展的重要趋势, 但定量研究的总体水平不高; 基于指标体系的城市人居环境评价思路, 过于宏观和空泛, 决策支持能力不足; 定量研究的指标设计不能反映城市人居环境系统的内部结构特征与演变机制; 定量研究的数据获取存在诸多障碍, 不完备的数据来源导致研究结果的不确定性较大。
理论与应用脱节 Theory divorcing from application	人居环境科学研究和人居环境工程工程建设缺乏必要的匹配; 高水平人居环境科学研究成果不足, 高水平专业刊物报道较少 ^[35, 45] ; 人居环境理论研究生态学、地理学等基础学科, 但实操工作主要依赖建筑、规划等学科; 城市设计、生态规划、地理设计等新兴城市管控技术在城市人居环境建设工作中的应用还没有受到足够重视

1.2 社会代谢视角的城市研究

代谢思想最早出现于医学和生物学领域, 而后经过学科迁移, 现广泛应用于生态学、社会学、人类学、地理学以及环境科学等自然科学和社会科学的诸多领域^[36]。进入 20 世纪以来, 工业化、城市化进程导致资源环境问题日益突出, 代谢思想逐步发展成为环境科学和产业生态学的重要研究范式。社会代谢思想重视自然生态系统与社会生态系统的差别, 并强调代谢是连接自然生态与社会经济的重要过程。其核心内涵是将社会经济系统看作不断进行着物质和能量代谢的复合生态系统, 将社会投入和社会产出与人类生产和人类消费相结合, 从生物代谢角度考察社会现有的代谢状况^[46]。以代谢的视角进行各类物质空间的过程和现象研究, 有助于合理串联研究客体的结构和功能, 及时发现二者之间存在的现实和潜在问题, 采取适宜的措施加以应对, 确保系统的有序正常运营。

城市代谢是社会代谢研究的重要应用领域。城市代谢分析将城市类比为生命系统, 通过考察物质能量输

入、储存和输出等代谢过程来理解城市运转的机制及其问题产生的根源。1965 年, Wolman 首次将代谢方法用于城市物质、能量流动研究,建立了第一个城市代谢模型^[47]。随着可持续发展理念的传播,城市代谢研究在国内外引起了广泛关注,我国也于 21 世纪初开始城市代谢的实证和理论研究^[48]。如今的城市代谢研究在概念框架、指标体系、数据集成和管理应用等方面都有了一定的发展,通过集成物质流分析、物流分析、生命周期评价、能值分析、生态足迹评价等研究工具,凭借客观、量化、简洁的分析特点,城市代谢分析已经成为循环经济、生态效率、低碳社会可持续发展等研究领域的重要评估手段,但在理论建构以及政策应用方面的研究还相对缺乏。

上述分析表明,人居环境和社会代谢视角的城市研究在各自领域获得了多年的积累,已经有了长足发展。但对于城市这一复杂研究对象而言,两种视角还缺乏必要整合,城市人居环境代谢研究还显得零散^[49-51],相关的理论发展和实践应用也尚未引起充分重视。我国现阶段的城市化过程已经进入以生态文明建设为核心的全新发展阶段,针对城市人居环境建设领域各类迫切的目标和任务要求,人居环境科学研究亟待创新研究范式,高效解决研究中的各类理论和方法论问题,及时凝练和总结具有实践指导意义的科研成果,为我国今后的城市化发展进程提供强有力的科学支撑。

2 城市人居环境代谢研究的概念框架

基于生态学原理和方法的城市人居环境研究一直存在两种视角,从中观生态学(生态系统生态学)的角度来看,人居环境研究是以人为核心物种的生态学研究;从宏观生态学(景观生态学)的角度来看,人居环境研究是物质空间的格局和过程研究,而代谢分析是其结构和功能解构的重要手段。两种视角下城市人居环境研究的分歧反映了城市生态学理论基础的分化,体现了基于景观生态学和生态系统生态学两个不同生态学分支学科的城市认知方式和城市解构模式的差异^[52]。整体而言,基于生态系统生态学原理的城市人居环境代谢研究多关注物质能力的流特征和分析,属于典型的过程研究思路;而基于景观生态学原理和方法的城市人居环境代谢研究,可以有效地整合格局、过程、尺度、功能等地域分异特征,研究成果能够更好地反应代谢过程的时空分异特征、生态环境效应及其驱动机制,进而为区域可持续发展决策提供扎实的基础研究支撑^[15-17,20-21]。

2.1 从“城市(产业生态)代谢”到“城市人居环境代谢”

根据上述分析结果,引入景观生态学原理可以从格局-过程-尺度-功能层面全面解析城市人居环境代谢的时空动态演化特征,建立科学的尺度推演规则,进而从根本上完善城市代谢的理论基础^[52]。本文利用景观生态学的基本原理,在整合传统城市代谢研究思路的基础上,尝试提出一个带有景观生态学特色的城市人居环境代谢综合研究范式。鉴于传统的城市代谢是以产业生态过程为核心的代谢研究,本文在建构基于景观生态学的“城市人居环境代谢研究范式”时,更加关注人居环境过程在城市代谢中的支配作用,并力争在理念、学科、概念和逻辑等方面都体现出与传统范式不同的特征:

(1) 在发展理念方面:不单纯强调解决城市产业发展中环境问题,而更加强调保障城市中人的健康生存和全面发展;

(2) 在学科依据方面:从以工业化和工业代谢为焦点的产业生态学,转移到以城市化和景观动态为焦点的景观生态学;

(3) 在概念体系方面:遵循常用的景观结构和功能解构方法^[17-20],强调用“社会”呼应“经济”,用“人”呼应“企业”,用“景观”呼应“系统”,用“消费”呼应“生产”,用“居住”呼应“工作”,用“空间循环”呼应“时间循环”,用“等级(系统)理论”呼应“黑箱系统理论”;

(4) 在逻辑思想层面:强调用“经验整合”匹配“抽象逻辑”;用“整合还原论思想的整体论”取代“秘密的还原论”。

在完成上述各项准备工作之后,就可以发展一种基于景观生态学基本概念框架和基本理论的城市人居环境

境研究新范式(图1)。与传统重视过程的产业代谢研究范式相比,这一关于城市人居环境这种特定物质空间的研究方式在发展理念、学科依据、概念体系和逻辑思想等各个层面都满足了科学研究范式的基本条件要求。景观生态学作为侧重异质性空间“格局—过程”研究的宏观生态学分支学科,用于作为城市人居环境代谢研究的学科基础,不仅能够有效解析复杂人居环境系统的结构与功能关系,还可以通过有效的格局优化手段,为缓解乃至根除人居环境建设过程的各种矛盾创造有利条件。

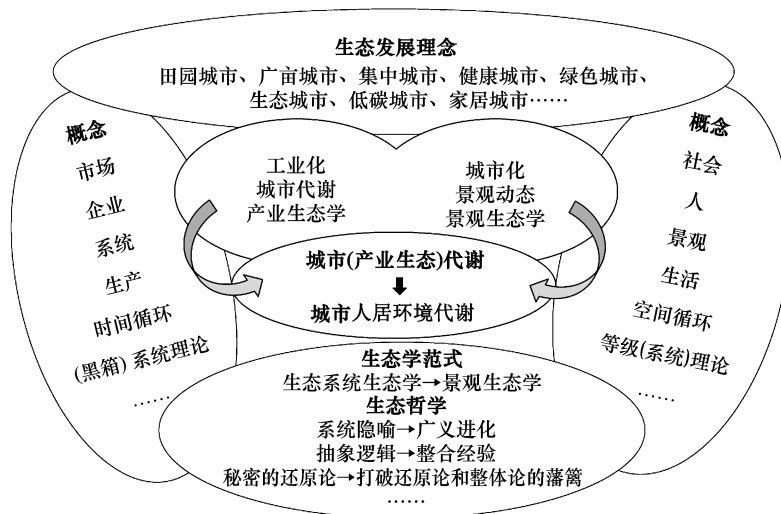


图1 范式变迁:从“城市(产业生态)代谢”到“城市人居环境代谢”

Fig.1 Paradigm Shift: from “urban industrial ecology metabolism” to “metabolism of urban human settlement”

2.2 城市人居环境物质能量代谢的研究框架

在上述范式变迁分析的基础上,综合分析城市人居环境代谢的研究需求,结合景观生态学原理,可以将研究过程划分为理论认知,方法建构和决策应用3个步骤,进而搭建起关于城市人居环境物质能量代谢研究的整体框架(图2)。

1)城市人居环境物质能量代谢的理论认知:人居环境科学的学科体系涉及知识层次众多,城市人居环境代谢研究也同样涉及诸多学科。有效解析城市人居环境代谢过程,要对不同学科的人居环境认知加以整合,既要完善传统城市代谢思想中自然生态系统与社会经济系统的对比研究成就,还要有效融合现有人居环境科学学科体系的不同概念。鉴于景观生态学具有整合传统生态学、地理学和景观设计学的学科综合特征,以及强调空间格局、生态过程和尺度相互作用关系的研究特色,成为建构新的城市人居环境物质能量代谢研究框架的理想理论支撑体系。引入景观生态学原理,有助于解析城市(区域)物质能量代谢过程的空间结构,完善城市(区域)物质能量代谢的认知图式,对于加深城市人居环境物质能量代谢的理论认知、识别核心研究命题具有重要意义^[34]。目前的工作重心是,如何根据人居环境问题研究的需要,以景观生态学理论为核心,在合理整合其他学科理论成果的基础上,建构一套能够切实用于支撑人居环境研究的理论基础,推动人居环境学科加速发展和成熟。

2)城市人居环境物质能量代谢的方法建构:不同于传统广泛基于黑箱假设基础上建构的城市代谢分析框架,城市人居环境物质能量代谢需要在理论认知的基础上充分剖析城市人居环境物质能量代谢的内部过程,整合城市人居环境科学的时空层次性解构思路,在家庭到城市的不同层次广泛开展研究案例研究。事实上,针对家庭^[53-54]、住宅^[55-57]、住区^[58-61]等不同空间尺度的物质能量代谢研究都已经有一定的积累,但相关研究还未整合在一个城市人居环境代谢的宏观分析框架之下,通过进一步对输入输出表(Input-Output Table)、区域动态模型(Regional dynamic model)、材料流分析(substance flow analysis, SFA)、存量与流量模型(Stock and Flow, STAF)、生命周期评价(Life Cycle Analysis, LCA)以及能值分析(Energy Analysis)、焓分析(Exergy

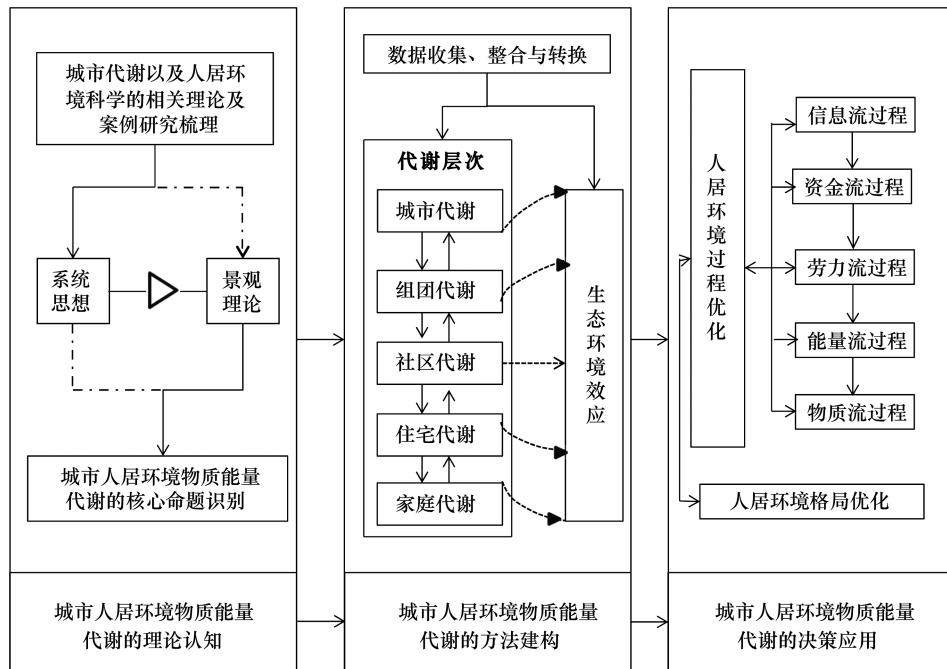


图2 城市人居环境物质能量代谢的研究框架

Fig.2 Conceptual framework for energetic and material metabolic analysis on urban human settlement

Analysis)等不同代谢分析手段的整合,可以建构一套完整、科学、有效体现城市人居环境结构和功能特征的物质能量代谢分析方法,这也是今后城市人居环境代谢问题方法论研究重点和难点。

3)城市人居环境物质能量代谢的决策应用:基于系统思想建构的城市代谢分析范式在决策应用领域的参考价值十分有限,而基于景观生态学原理的城市人居环境物质能量代谢研究则充分体现了格局-过程的观点,一方面通过对城市人居环境空间层次的划分,可以实现城市人居环境空间结构的剖析和空间责任主体的匹配,结合代谢过程研究为建筑-景观-城市规划与设计提供参考;另一方面,通过引入3S技术、物联网、网络通信等高新技术可以实时监控城市人居环境中的物质流、能量流、劳力流、资金流和信息流过程,建构城市人居环境物质能量代谢研究的虚拟分析平台。由此看来,基于景观生态学的城市人居环境研究框架可以实现优越的开放性和包容性,可以很方便地与各种新的技术手段和应用目标实现无缝衔接,进而打通基础研究和实际应用之间的隔阂,为城市人居环境建设的各种决策过程,提供强有力的支持。

3 城市人居环境代谢研究的关键问题

3.1 “格局-过程-尺度耦合”问题

景观生态学十分重视“格局-过程-尺度-等级”的共轭耦合关系。如图3所示,景观生态学的等级斑块动态思想(Hierarchical Patch Dynamic Paradigm, HPDP)^[62],可以有效解析城市人居环境物质能量代谢过程的空间结构。格局、过程、等级的研究需要同时考虑空间尺度、时间尺度和组织尺度问题,城市人居环境物质能量代谢研究则要对不同时空尺度的格局、过程和组织的剖析,具体以人体层次的代谢过程向外逐渐延伸,包括:(1)家庭尺度的“家庭物理结构-家庭物质能量代谢过程-家庭成员”相互匹配,输入各类消费品、电力、燃气,输出垃圾和费水,存贮为家居;(2)住宅尺度的“住宅空间格局-住宅物质能量代谢过程-住宅住户”相互匹配,输入建筑材料、燃气、电力,输出建筑垃圾,存贮为建筑体;(3)社区尺度的“社区景观格局-社区物质能量代谢-社区业主”相互匹配,输入社区用品、降水,输出公共废物、废水,存贮为社区外观;(4)组团尺度的“组团

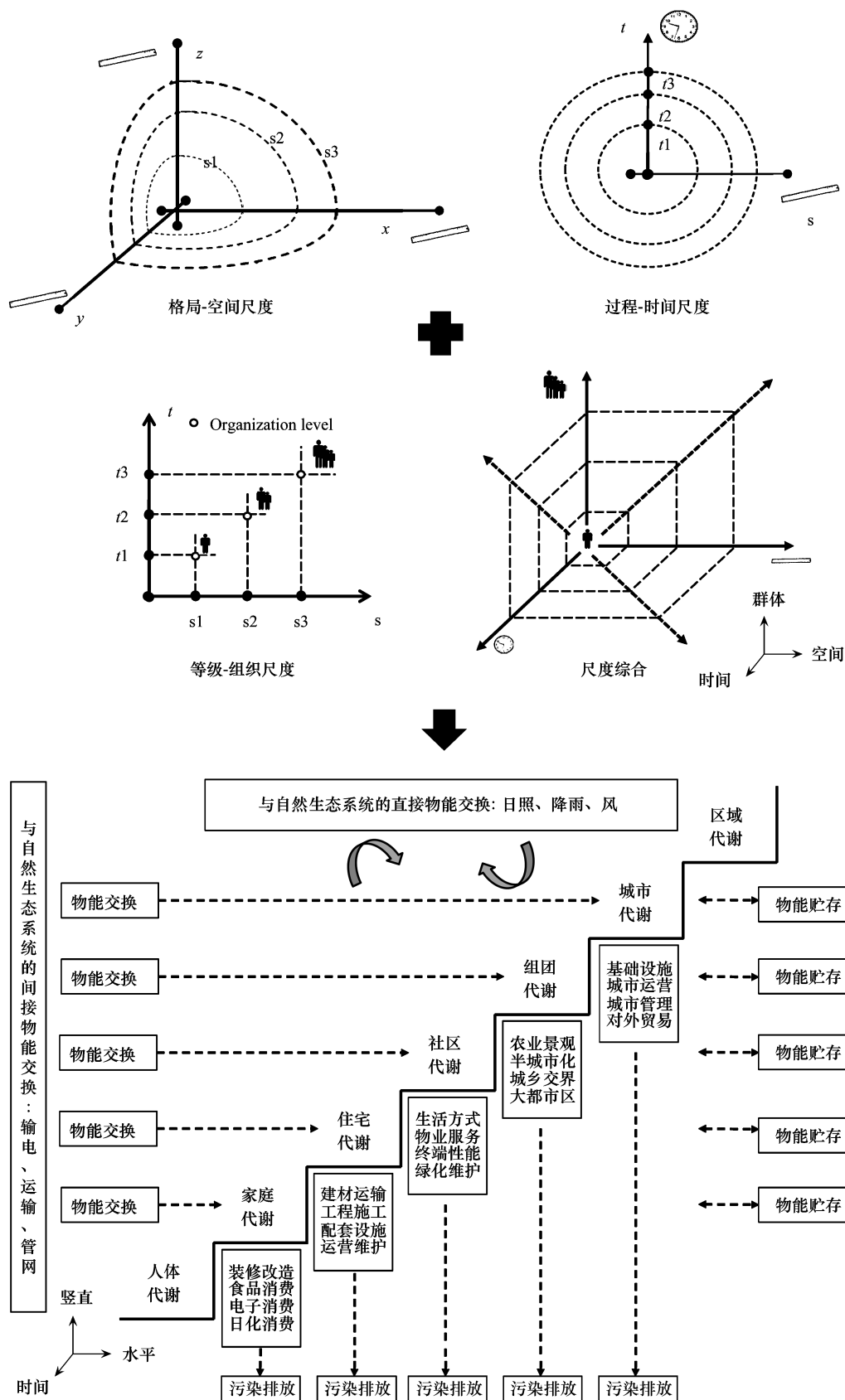


图3 城市人居环境物质能量代谢的“格局-过程-尺度-等级”问题

Fig.3 Problems of urban human settlement on “pattern-process-scale-hierarchy”

t: 时间, time, t1, t2, t3 表示时间序列, 越来越久; s: 空间, space, s1, s2, s3 表示空间等级, 范围越来越大

景观格局-组团物质能量代谢过程-组团群体”相互匹配,输入公共用品,输出垃圾、废气,存贮为组团形态;(5)城市尺度的“城市景观格局-城市物质能量代谢过程-城市市民”相互匹配,输入产业原料,输出产品、废物、废水废气,存贮为城市资产。

城市人居环境的物质能量代谢过程发生在不同的时空层次当中,受到不同行为主体的综合行为的驱动^[63],同时也为不同的行为主体提供服务。当然,不同时空层次的物质能量代谢过程还会产生差异化的生态环境效应,并在宏观的时空层次积累。由于不同的代谢层次在地表空间中呈依次包含关系,较高代谢层次会对较低层次的代谢过程产生约束,而较低层次的代谢过程也能够对较高层次的代谢产生影响。城市人居环境物质能量代谢过程的刻画需要从不同层次物质能量格局动态过程的描述性分析着手,深入剖析特定代谢层次的行为主体与主体行为物质能量代谢的影响过程,进而总结和探讨城市人居环境物质能量代谢过程的内在驱动机制。还有一个需要关注的问题是,现阶段各种人居环境代谢研究重点进行可度量的输入、存储和输出变量分析,不同尺度的背景自然环境差异影响在模型建设和具体分析过程中考量较少,这是目前研究工作的一个明显漏洞,建议在今后的研究工作中予以必要的重视。

3.2 数据采集、储存与分析问题

对城市人居环境物质能量代谢内在过程的整体剖析,需要以规模化的数据获取、储存和分析技术为依托。随着 3S 技术在代谢分析乃至产业生态学领域的初步应用^[64-65],信息化已经成为城市代谢研究的重要发展趋势。基于景观生态学原理建构的城市人居环境代谢研究框架,有更加完善的“信息化”理论支撑基础和最新的数据分析技术接入接口,20 世纪 80 年代初计算机、3S 技术、模型等重大技术手段进步曾经极大地促进了现代景观生态学的发展。随着三维景观遥感技术^[66]、物联网技术(Internet of Things, IOT)、网络分析、大数据分析等新兴信息技术和数据分析手段的引入,以及智慧城市(社区、建筑)、大规模现代信息基础设施和智能社会建设工作的推进,城市人居环境物质能量代谢分析、预测和管理的硬件基础支撑条件必将得到快速发展,进而为城市人居环境科学的发展创造更加有利的条件。

3.3 效应调控与过程管理问题

城市人居环境物质能量代谢分析关注的是城市系统的物质和能量维度,但从代谢机制来看,人员、资金和信息等其他过程在城市人居环境代谢过程中发挥着更加重要的作用。城市人居环境代谢过程不仅存在类似于生态系统或生物体代谢的自组织过程,还依赖于其他组织过程的政策、文化、资本等社会经济因素的影响。如图 4 所示,城市人居环境不仅存在结构上的层次性,还存在功能上的层次性;在城市人居环境的不同景观层次中,能量流、物质流、物种流、劳力流、资金流、信息流等不同类型的生态过程贯穿其中,在满足人类物质、生物、社会、经济、精神等不同层次需求的同时,还时时刻刻发生着复杂的相互作用。

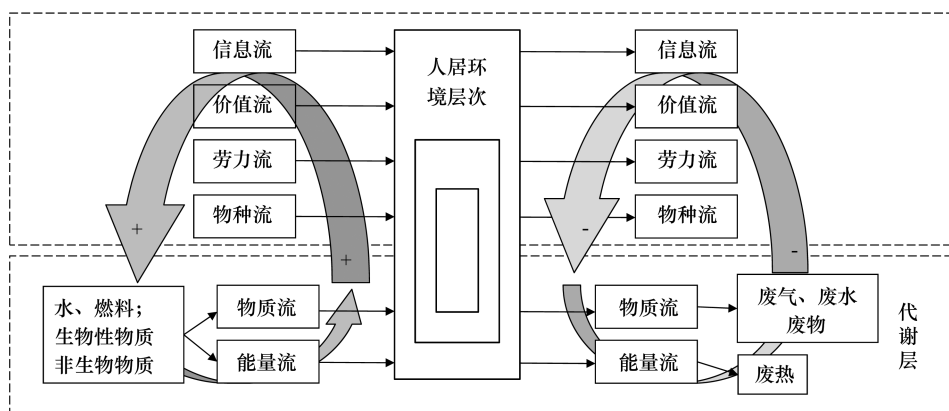


图 4 城市人居环境代谢的功能层次及其互动机制

Fig.4 Functional levels of metabolism on urban human settlement and its coordination mechanism

进一步解析分析表明,城市人居环境当中的各种过程按照自身的运动(流动)规律发挥作用。物质流和能量流过程是城市人居环境代谢分析考察的重点,自然生态系统中的物质流和能量流过程以垂直方向流动为主、水平方向为辅;社会经济系统中的物质流、能量流过程以水平为主、垂直方向为辅。通过对物质流和能量流的管理,充分利用垂直方向的物质能量,减少水平方向的物质能量需求,特别是跨区域长距离高密度的物质能量传输需求,是现阶段城市发展走向生态化的主要路径选择。人员流、资金流和信息流在城市人居环境当中有独特的时空过程,以人居环境建设为目标的人员流、资金流和信息流调控不仅可以间接调控城市人居环境的物质能量代谢过程,还能通过非物质性福利的调整,来促进城市人居环境建设水平的提升。因此,对城市人居环境建设进行合理的效应与过程管控,是人居环境管理工作目标达成的重要保障因素。

4 结语

人居环境视角和社会代谢视角的城市研究在各自的领域都已形成了多年的研究积累,但从城市的复杂性和综合性来看,两种研究视角的整合具有理论和实践的双重必要性。我国城市化发展的主体思路正经历着深刻的变化,单纯凸显生产功能的城市化发展思想已经为全面推进生态文明建设的新兴城市化发展思路所取代。在日益注重城市“生产、生活和生态”格局与功能建设的背景下,人居环境建设工作在今后我国城市化进程中的角色和地位将越来越重要。鉴于目前城市人居环境建设工作还缺乏成熟的模式、标准和技术规程,进一步强化相关的基础和应用研究就成为亟待解决的关键问题。搭建新的城市人居环境代谢研究范式,积极推进针对城市人居环境问题的跨学科研究,无疑应成为今后城市生态学研究的重点领域。

本文提出的基于景观生态学基本原理和概念框架的城市人居环境代谢研究范式,是一个不同于城市“产业生态”代谢研究的新研究范式。这一范式可以从多尺度和多维度反应城市人居环境代谢过程的结构、功能、特征和问题,厘清城市人为活动和各种资源环境问题的关联关系,整合多学科的知识和技术手段,解析城市人居环境的时空动态演化过程及其驱动机制,为城市人居环境研究学科的发展和完善创造有利条件。通过建构基于景观生态学的城市人居环境物质能量代谢研究框架,还可以有效解决城市人居环境物质能量代谢中的格局-过程-尺度问题,数据采集、储存与分析问题和效应调控与过程管理问题,对于完善城市代谢研究方法,促进城市人居环境建设具有重要的参考和借鉴意义。

参考文献(References):

- [1] 陈利顶,景永才,孙然好. 城市生态安全格局构建: 目标、原则和基本框架. 生态学报, 2018, 38(12): 4101-4108.
- [2] 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.
- [3] 刘长安,赵玉坤,张继龙. 基于物质循环代谢的城市“有农社区”研究. 城市规划, 2018, 42(1): 52-59.
- [4] Li Y, Beeton R J S, Halog A, Sigler T. Evaluating urban sustainability potential based on material flow analysis of inputs and outputs: a case study in Jinchang City, China. Resources, Conservation and Recycling, 2016, 110: 87-98.
- [5] 戴铁军,刘瑞,王婉君. 物质流分析视角下北京市物质代谢研究. 环境科学学报, 2017, 37(8): 3220-3228.
- [6] Zhang Y, Lu H J, Fath B D, Zheng H M. Modelling urban nitrogen metabolic processes based on ecological network analysis: a case of study in Beijing, China. Ecological Modelling, 2016, 337: 29-38.
- [7] Dai T J. A study on material metabolism in Hebei iron and steel industry analysis. Resources, Conservation and Recycling, 2015, 95: 183-192.
- [8] Lu Y, Geng Y, Qian Y Y, Han W Y, McDowall W, Bleischwitz R. Changes of human time and land use pattern in one mega city's urban metabolism: a multi-scale integrated analysis of Shanghai. Journal of Cleaner Production, 2016, 133: 391-401.
- [9] Raupova O, Kamahara H, Goto N. Assessment of physical economy through economy-wide material flow analysis in developing Uzbekistan. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 89: 76-85.
- [10] 林晗,雪娅. 人居,人居环境和人的城市. 科学通报, 2018, 63(11): 986-987.
- [11] Zhang Y, Fath B D. Urban metabolism: measuring sustainable cities through ecological modelling. Ecological Modelling, 2019, 392: 6-7.
- [12] Zhang Y Z, Lu W S, Tam V W Y, Feng Y B. From urban metabolism to industrial ecosystem metabolism: a study of construction in Shanghai from 2004 to 2014. Journal of Cleaner Production, 2018, 202: 428-438.

- [13] Na H M, Gao C K, Tian M Y, Qi Z Q, Ye Z. MFA-based analysis of CO₂ emissions from typical industry in urban—as a case of steel industry. *Ecological Modelling*, 2017, 365: 45-54.
- [14] Zhang Y, Wu Q, Fath B D. Review of spatial analysis of urban carbon metabolism. *Ecological Modelling*, 2018, 371: 18-24.
- [15] John B, Luederitz C, Lang D J, Von Wehrden H. Toward sustainable urban metabolisms. From system understanding to system transformation. *Ecological Economics*, 2019, 157: 402-414.
- [16] Cui X Z, Wang X T, Feng Y Y. Examining urban metabolism: a material flow perspective on cities and their sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 214: 767-781.
- [17] Liu W, Chang A C, Chen W P, Zhou W Q, Feng Q. A framework for the urban eco-metabolism model-Linking metabolic processes to spatial patterns. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 165: 168-176.
- [18] Wang X J, Zhang Y, Yu X Y. Characteristics of Tianjin's material metabolism from the perspective of ecological network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 239: 118115.
- [19] Mushet D M, Alexander L C, Bennett M, Schofield K, Christensen J R, Ali G, Pollard A, Fritz K, Lang M W. Differing modes of biotic connectivity within freshwater ecosystem mosaics. *Journal of the American Water Resources Association*, 2019, 55(2): 307-317.
- [20] Van Broekhoven S, Vernay A L. Integrating functions for a sustainable urban system: a review of multifunctional land use and circular urban metabolism. *Sustainability*, 2018, 10(6): 1875-1875.
- [21] Calvert K, Greer K, Maddison-MacFadyen M. Theorizing energy landscapes for energy transition management: insights from a socioecological history of energy transitions in Bermuda. *Geoforum*, 2019, 102: 191-201.
- [22] 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.
- [23] Li Y X, Zhang Y, Hao Y, Wang X J. Exploring the processes in an urban material metabolism and interactions among sectors: an experimental study of Beijing, China. *Ecological Indicators*, 2019, 99: 214-224.
- [24] Fan Y P, Fang C L. Research on the synergy of urban system operation—based on the perspective of urban metabolism. *Science of the Total Environment*, 2019, 662: 446-454.
- [25] Tan L M, Arbabi H, Li Q Q, Sheng Y L, Tingley D D, Mayfield M, Coca D. Ecological network analysis on intra-city metabolism of functional urban areas in England and Wales. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 138: 172-182.
- [26] Huang Q, Zheng X Q, Liu F, He Y C, Zou Y Q. Dynamic analysis method to open the “black box” of urban metabolism. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 139: 377-386.
- [27] 李雪铭, 杨俊, 李静. 地理学视角的人居环境. 北京: 科学出版社, 2010.
- [28] 董晓峰, 杨保军, 刘理臣, 高峰. 宜居城市评价与规划理论方法研究. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [29] 李王鸣, 叶信岳, 祁巍锋. 中外人居环境理论与实践发展述评. *浙江大学学报: 理学版*, 2000, 27(2): 205-211.
- [30] 祁新华, 程煜, 陈烈, 陈君. 国外人居环境研究回顾与展望. *世界地理研究*, 2007, 16(2): 17-24.
- [31] 吴良镛. 人居环境科学导论. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001.
- [32] Mao Y, Liu Y F, Wei X J, Kong X S. Network and geography: dependence and disparity between human settlement pattern and socioeconomic network in Chengui, China. *Journal of Urban Planning and Development*, 2018, 144(1): 05017015.
- [33] Ma R F, Wang T F, Zhang W Z, Yu J H, Wang D, Chen L, Jiang Y P, Feng G Q. Overview and progress of Chinese geographical human settlement research. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(8): 1159-1175.
- [34] Yang W P, Zhao J K, Zhao K. Analysis of regional difference and spatial influencing factors of human settlement ecological environment in China. *Sustainability*, 2018, 10(5): 1520-1520.
- [35] 刘平, 王如松, 唐鸿寿. 城市人居环境的生态设计方法探讨. *生态学报*, 2001, 21(6): 997-1002.
- [36] 祁新华, 程煜, 陈烈. 大城市边缘区人居环境系统演变的动力机制——以广州市为例. *经济地理*, 2008, 28(5): 794-798.
- [37] 祁新华, 程煜, 陈烈, 朱宇. 大城市边缘区人居环境系统演变规律——以广州市为例. *地理研究*, 2008, 27(2): 421-430.
- [38] 李伯华, 刘沛林, 窦银娣, 曾灿, 陈驰. 中国传统村落人居环境转型发展及其研究进展. *地理研究*, 2017, 36(10): 1886-1900.
- [39] Zhang Z H, Xiao R, Shortridge A, Wu J P. Spatial point pattern analysis of human settlements and geographical associations in eastern coastal China—a case study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(3): 2818-2833.
- [40] 刘颂, 刘滨谊. 城市人居环境可持续发展评价指标体系研究. *城市规划汇刊*, 1999, (5): 35-37, 14.
- [41] 李雪铭, 姜斌, 杨波. 城市人居环境可持续发展评价研究——以大连市为例. *中国人口·资源与环境*, 2002, 12(6): 129-131.
- [42] Zhu J H, Tian S F, Tan K, Du P J. Human settlement analysis based on multi-temporal remote sensing data: a case study of Xuzhou City, China. *Chinese Geographical Science*, 2016, 26(3): 389-400.
- [43] Li X C, Gong P. An “exclusion-inclusion” framework for extracting human settlements in rapidly developing regions of China from Landsat images.

- Remote Sensing of Environment, 2016, 186: 286-296.
- [44] Sabo F, Corbane C, Florezyk A J, Ferri S, Pesaresi M, Kemper T. Comparison of built - up area maps produced within the global human settlement framework. Transactions in GIS, 2018, 22(6): 1406-1436.
- [45] 祁新华, 程煜, 胡喜生, 陈烈, 林小阳, 周燕萍. 大城市边缘区人居环境系统演变的生态-地理过程——以广州市为例. 生态学报, 2010, 30(16): 4512-4520.
- [46] 陶在朴. 生态包袱与生态足迹: 可持续发展的重量及面积概念. 北京: 经济科学出版社, 2003.
- [47] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213(3): 179-190.
- [48] 夏传勇. 经济系统物质流分析研究述评. 自然资源学报, 2005, 20(3): 415-421.
- [49] Gao L J, Cui S H, Yang D W, Tang L N, Vause J, Xiao L S, Li X Q, Shi L Y. Sustainability and Chinese urban settlements: extending the metabolism model of energy evaluation. Sustainability, 2016, 8(5): 459-459.
- [50] Hertwich E G. Life cycle approaches to sustainable consumption: a critical review. Environmental Science & Technology, 2005, 39(13): 4673-4684.
- [51] 林魁, 林清, 李赓. 人居环境物质代谢的生态学探讨. 能源与环境, 2008, (4): 55-56.
- [52] 张晓刚, 曾辉. 从系统到景观: 区域物质流分析的景观取向. 生态学报, 2014, 34(6): 1340-1351.
- [53] Yang D W, Gao L J, Xiao L S, Wang R. Cross-boundary environmental effects of urban household metabolism based on an urban spatial conceptual framework: a comparative case of Xiamen. Journal of Cleaner Production, 2012, 27: 1-10.
- [54] 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.
- [55] Di Donato M, Lomas P, Carpintero Ó. Metabolism and environmental impacts of household consumption: a review on the assessment, methodology, and drivers. Journal of Industrial Ecology, 2015, 19(5): 904-916.
- [56] 崔胜辉, 张雅京, 周健, 林剑艺, 刘勇. 城市建筑代谢研究方法及其展望. 生态科学, 2011, 30(3): 359-367.
- [57] 蒋伟葳. 新陈代谢派在台湾钢木建筑设计应用研究. 福建建筑, 2018, (8): 48-53.
- [58] 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.
- [59] Codoban N, Kennedy C A. Metabolism of neighborhoods. Journal of Urban Planning and Development, 2008, 134(1): 21-31.
- [60] Hall M H P. A preliminary assessment of socio-ecological metabolism for three neighborhoods within a rust belt urban ecosystem. Ecological Modelling, 2011, 223(1): 20-31.
- [61] Deng W, Prasad D K, Osmond P W. Application of “streamlined” material input per service unit concept to small residential districts in China. Journal of Industrial Ecology, 2011, 15(6): 967-979.
- [62] Wu J G. Landscape ecology, cross-disciplinarity, and sustainability science. Landscape Ecology, 2006, 21(1): 1-4.
- [63] 黄和平, 毕军, 张炳, 李祥妹, 杨洁, 石磊. 物质流分析研究述评. 生态学报, 2007, 27(1): 368-379.
- [64] 刘惠明, 尹爱国, 苏志尧. 3S 技术及其在生态学研究中的应用. 生态科学, 2002, 21(1): 82-85.
- [65] 李书娟, 曾辉. 遥感技术在景观生态学研究中的应用. 遥感学报, 2002, 6(3): 233-240.
- [66] 张培峰, 胡远满, 熊在平, 刘森. 城市居住区三维景观变化规律与影响因素. 应用生态学报, 2011, 22(2): 453-459.