

# 城市跨区域资源环境协同治理： 理论框架、应用场景及可拓展性

王东方 刘耕源 孟凡鑫\*

---

**【摘要】**本文基于城市代谢及远程耦合理论，从复杂系统科学及要素耦合视角出发，构建了城市复合生态系统资源环境要素耦合理论框架，系统阐释了多种资源环境要素在城市“自然生态-经济生产-社会消费”三元子系统中跨部门及跨区域的流转路径、空间格局与耦合关系。本文以中国四大直辖市的“能-水-土地”资源要素耦合为例，验证该理论框架的可行性和科学性，基于已构建的以城市为中心的多级经济尺度投入产出嵌套模型，突破城市行政区划藩篱，实现城市“能-水-土地”足迹在“部门-城市-国家-全球”上的可量化及可追溯。结果表明，超过70%的虚拟资源流的供给来源于城市行政边界外，四大直辖市均是资源消费型城市，建筑业是能源消费密集的部门而农业是“水-土地”消费密集的部门。

**【关键词】**城市复合生态系统；远程耦合；协同治理；可持续管理

---

## 一、引言

“减污降碳协同治理”是中国生态环境保护的内在要求，是“十四五”时期生态环境保护的新使命，是兑现“碳达峰和碳中和”庄严承诺的重要举措，是牵引促进经济社会绿色转型和生态环境持续改善的重要抓手，也是具有前瞻意义的重大战略方针<sup>①</sup>。“双碳”及“减污降碳协同治理”目标的实现需要从作为基本行政单元的城市入手，逐步形成区域资源环境协同管理，助推生态文明发展和美丽中国建设。资源环境治理范式也需要由传统的单一要素、单一部门、单一区域向多要素、跨

---

\* 王东方，北京师范大学环境学院博士研究生；孟凡鑫（通讯作者），北京师范大学环境学院副教授，博士生导师；刘耕源，北京师范大学环境学院教授，博士生导师。本文系国家重点研发计划课题“城市群生态系统污染物与碳耦联循环机理”（编号：2022YFF1301201）阶段性成果。

① 黄润秋：《深入贯彻落实党的十九届五中全会精神协同推进生态环境高水平保护和经济社会高质量发展》，《环境保护》2021年第Z1期。

部门、跨区域协同治理转变<sup>①</sup>。在此背景下，实现城市资源环境跨区域协同是亟须关注的研究重点，是减污降碳协同治理的必然要求，也是当前多方利益主体关注的热点领域。

城市作为人口、经济和资源高度聚集的地区<sup>②</sup>，以不足3%的陆地面积<sup>③</sup>，承载了世界56%的人口<sup>④</sup>，贡献了全球超过80%的国内生产总值<sup>⑤</sup>。据联合国预测，2050年全球城市人口将增长到68%<sup>⑥</sup>。随着世界上众多国家迈向城市化，城市已成为实现可持续发展目标（SDGs）的关键参与者，其可持续发展是全球可持续发展进程的重要组成部分<sup>⑦⑧</sup>，是协助各国政府进行可持续政策实施的主要参与者<sup>⑨⑩</sup>，大约65%的可持续发展目标需要通过城市管理来实现<sup>⑪</sup>。此外，城市化进程的加速使其资源环境问题呈现出高度集中且复杂的特点<sup>⑫</sup>。城市作为资源消耗中心及环境变化的主要驱动力，其消耗了全球约60%-80%的能源<sup>⑬</sup>、80%的食物<sup>⑭</sup>、排放了75%的二氧化碳<sup>⑮</sup>，凸显了城市消费者的属性特点。

然而，城市自身发展所需的各种资源要素，其生产过程大多发生在城市行政边界以外的其他区域；同时由于城市经济生产和消费活动所产生的环境影响也超出了其行政边界，这就产生了城市资源空间错配、跨区域环境污染等问题，形成了城市多种资源环境要素在跨部门、跨区域的复杂耦合问题。资源环境要素在城市复合系统中呈现出复杂性、外溢性、无界性、扩散性、多样性等特征，需要多方利益主体进行跨区域协同治理。然而，当前城市已有的管理体系，多数集中于城市行政边界内，使得各个区域相互分割，形成“诸侯经济”局面，陷入失灵困境<sup>⑯</sup>。近年来，随着区域协同发展战略及城市群战略的提出，城市开始逐渐探索跨区域治理模式<sup>⑰</sup>，旨在打破城市行政壁垒，实现资源互补，降低环境污染。然而，目前研究对于城市资源环境跨区域治理的底层逻辑尚不清晰，研究框架需要更新。因此，亟须采用系统性、耦合性的研究视角，揭示城市“自然生态—经济

- ① 刘倩、张苑等：《城市水—能源—粮食关联关系(WEF-Nexus)研究进展——基于文献计量的述评》，《城市发展研究》2018年第10期。
- ② 王效科、欧阳志云等：《城市生态系统长期研究展望》，《地球科学进展》2009年第8期。
- ③ UN-Habitat. The Strategic Plan 2020-2030, 2017.
- ④ REN21. Renewables in Cities 2019 Global Status Report, 2019.
- ⑤ Rusadi E Y, Habitat U N. World Cities Report 2020, 2020.
- ⑥ United Nations Department of Economic and Social Affairs Population Division. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision, 2019.
- ⑦ Seto K C, Golden J S, et al. Sustainability in an Urbanizing Planet, *Proceedings of the National Academy of Sciences-PNAS*, 2017, 114 (34).
- ⑧ Keith M, Birch E, et al. A New Urban Narrative for Sustainable Development, *Nature Sustainability*, 2023, 6(2).
- ⑨ Creutzig F, Baiocchi G, et al. Global Typology of Urban Energy Use and Potentials for an Urbanization Mitigation Wedge, *Proceedings of the National Academy of Sciences-PNAS*, 2015, 112(20).
- ⑩ Jones P, Comfort D. A Commentary on the Localisation of the Sustainable Development Goals, *Journal of Public Affairs*, 2020, 20(1).
- ⑪ REN21. Renewables in Cities 2019 Global Status Report, 2019.
- ⑫ Tan L M, Arbabi H, et al. Mapping Resource Effectiveness Across Urban Systems, *npj Urban Sustainability*, 2021, 1(1).
- ⑬ UN-Habitat. The Strategic Plan 2020-2030, 2017.  
Chen G W, Shan Y L, et al. Review on City-Level Carbon Accounting, *Environmental science & technology*, 2019, 53(10).
- ⑭ FAO. Tackling Food Insecurity at the Urban Level—Turning Global Commitments into Local Realities, 2019, Available from: <https://www.fao.org/news/story/en/item/1181196/icode/>.
- ⑮ UN-Habitat. The Strategic Plan 2020-2030, 2017.
- ⑯ 姚华松、许学强：《诸侯经济、一体化经济还是不完全一体化经济？——论珠三角区域发展之路》，《热带地理》2009年第3期。
- ⑰ 李国平、吕爽：《京津冀跨域治理和协同发展的重大政策实践》，《经济地理》2023年第1期。

生产-社会消费”复合系统中人为活动与资源环境要素在跨部门、跨区域之间的耦合规律与级联效应,为城市资源环境协同治理及可持续发展战略提供调控指引和政策管理。

本文首先面向“减污降碳协同治理”“区域协同发展”“城市可持续发展”等重大战略需求,满足城市资源环境跨区域协同治理及可持续管理实践需要,基于城市代谢以及远程耦合理论,构建了城市复合生态系统资源环境要素耦合理论框架,即:城市三元多维耦合理论框架(Urban Ternary Multi-dimensional Nexus, UTMDN)。该理论框架有利于突破城市行政区划藩篱,精准追溯资源环境要素在多级经济尺度上的足迹、识别其在全球供应链上的关键代谢路径及调控节点,为厘清城市人为活动引起的资源环境要素耦合规律提供了理论框架,同时可为城市减污降碳与资源环境协同管理及可持续发展提供理论基础及科学支撑。其次,从城市“自然生态-经济生产-社会消费”三元子系统为切入点,深入阐述该理论框架的内涵与外延。再次,以中国四大直辖市的“能-水-土地”耦合为例,基于环境拓展的多级经济尺度投入产出嵌套模型,阐述在该理论框架基础上的应用场景及现实意义,验证了该理论框架的可行性及科学性。最后,提出未来亟待开展的研究方向。

## 二、城市三元多维耦合理论框架的理论基础

采用耦合视角探讨城市人为活动与资源环境要素间的耦合规律,已成为城市资源环境可持续管理领域的前沿和热点<sup>①</sup>。目前学者们对资源环境耦合关系的概念界定和理解各有侧重,尚未形成定论。其中英文科技论文中常用“nexus”<sup>②</sup>、“coupling”<sup>③</sup>,或“linkage”<sup>④</sup>表示耦合;中文则将其常翻译为关联关系<sup>⑤</sup>,系统关联<sup>⑥</sup>,耦合<sup>⑦</sup>,或纽带关联<sup>⑧</sup>。为统一表述,本文英文采用nexus,中文采用耦合。本文借鉴了城市代谢(Urban Metabolism)及远程耦合(Tele-coupling)理论,构建了一个具有普适性的城市复合生态系统资源环境要素耦合理论框架——“城市三元多维耦合理论框架”,可系统揭示城市“自然生态-经济生产-社会消费”三元子系统中人为活动引起的资源环境要素在跨部门、跨区域的流动路径及耦合规律。

### (一)城市代谢理论是城市三元多维耦合理论框架的内在基础

Wolman于1965年提出了城市代谢理论,该理论将城市类比成一个自然生态系统,能量、物质、资源等以输入形式供应给该系统,并以产品和废物的形式从该系统输出<sup>⑨</sup>。之后,马世俊和王

① Wiedmann T, Allen C. City Footprints and SDGs Provide Untapped Potential for Assessing City Sustainability, *Nature Communications*, 2021, 12(1).

② Zhang P P, Zhang L X, et al. Food-Energy-Water (FEW) Nexus for Urban Sustainability: A Comprehensive Review, *Resources Conservation and Recycling*, 2019, 142.

③ Fang C L, Liu, H M, et al. The Coupling Curve Between Urbanization and the Eco-Environment: China's Urban Agglomeration as a Case Study, *Ecological Indicators*, 2021, 130.

④ Graedel T E, E van der Voet. *Linkages of Sustainability*, Cambridge, MA: MIT Press, 2010, P. 3.

⑤ 高成康、朱素龙等:《城市食物-能源-水系统的关联关系研究:以广州市为例》,《北京师范大学学报(自然科学版)》2021年第5期。

⑥ 李心晴、张小等:《城市食物-能源-水资源系统关联性研究:以北京市为例》,《中国人口·资源与环境》2021年第5期。

⑦ 李成宇、张士强:《中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究》,《中国人口·资源与环境》2020年第1期。

⑧ 林志慧、刘宪锋等:《水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望》,《地理学报》2021年第7期。

⑨ Wolman A. The Metabolism of Cities, *Scientific American*, 1965, 213(3).

如松提出城市是受自然生命支持系统所供养的自然-社会-经济复合生态系统<sup>①</sup>。城市作为人类经济和社会活动高度聚集的场所，其复合生态系统间蕴含着复杂的交互耦合机制与规律<sup>②</sup>，而要解决城市复合生态系统中的多种资源环境要素之间的耦合问题，城市代谢理论为其提供了坚实的理论基础<sup>③④</sup>。在复杂的城市复合生态系统中，若只关注某一种资源环境要素，如能源或碳排放等，难以实现高效的资源利用及管理，不足以解决城市化进程中复杂的资源环境问题。在此情况下，有必要开展城市多种资源环境要素耦合代谢研究。

目前，城市多种资源环境要素的代谢研究主要集中在“食物-能源-水”耦合关系（Food-Energy-Water Nexus, FEWN）主题，与FEWN相关的研究可以从资源依存、资源供给和系统集成三个方面进行概括。其中，资源依存强调三种资源的相互依赖性，即任何一种资源要素在其生命周期生产阶段（即提取、生产、加工、运输、消费）是由城市系统的其他两种资源要素的消费决定的<sup>⑤</sup>。在这种耦合关系中，对一种资源的需求变化会对另外两种资源的供应产生积极或消极的影响<sup>⑥⑦⑧</sup>。以往关于FEWN研究大多集中在资源依存视角，并较多采用生命周期评估（Life-Cycle Assessment, LCA）、物质流分析（Material Flow Analysis, MFA）、投入产出分析（Input-Output Analysis, IOA）和系统动力学（System Dynamics, SD）的研究方法。研究主要关注某些与资源环境要素相关的产业部门的资源效率分析<sup>⑨</sup>，例如能源和水部门的“能源-水”耦合关系<sup>⑩</sup>，能源、水和食物部门的FEWN，以及城市食物系统由于食物生产引致的温室气体（GHG）、氮（Nitrogen, N）和磷（Phosphorus, P）排放<sup>⑪</sup>。上述研究量化一个或两个产业部门的能源、水、食物或土地、N、P（N、P是食物系统的代表性元素，可以用于表征食物系统）的代谢过程。

资源供给视角强调城市FEW系统与其外部环境的关系<sup>⑫</sup>，即三种资源作为城市经济生产系统的投入，以此来刻画资源环境要素在城市系统的流动规律和特征。该视角下的相关研究揭示了城市系

① 马世骏、王如松：《社会-经济-自然复合生态系统》，《生态学报》1984年第1期。

② 卢伊、陈彬：《城市代谢研究评述：内涵与方法》，《生态学报》2015年第8期。

③ Chen B, Lu Y. Urban Nexus: A New Paradigm for Urban Studies, *Ecological Modelling*, 2015, 318.

④ Zhang Y, Yang Z F, et al. Urban Metabolism: A Review of Current Knowledge and Directions for Future Study, *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(19).

⑤ Zhang P P, Zhang L X, et al. Understanding the Tele-Coupling Mechanism of Urban Food-Energy-Water Nexus: Critical Sources, Nodes, and Supply Chains, *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235.

⑥ White D J, Hubacek K, et al. The Water-Energy-Food Nexus in East Asia: A Tele-Connected Value Chain Analysis Using Inter-Regional Input-Output Analysis, *Applied Energy*, 2018, 210.

⑦ Feng C Y, Qu S, et al. Uncovering Urban Food-Energy-Water Nexus Based on Physical Input-Output Analysis: The Case of the Detroit Metropolitan Area, *Applied Energy*, 2019, 252.

⑧ Liang S, Qu S, et al. Quantifying the Urban Food - Energy - Water Nexus: The Case of the Detroit Metropolitan Area, *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(2).

⑨ Wang K, Liu J, et al. Understanding the Impacts of Climate Change and Socio-Economic Development Through Food-Energy-Water Nexus: A Case Study of Mekong River Delta, *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 167.

⑩ Li X, Yang L, et al. City-level Water-Energy Nexus in Beijing-Tianjin-Hebei Region, *Applied Energy*, 2019, 235.

⑪ Hu Y C, Cui S H, et al. Transboundary Environmental Footprints of the Urban Food Supply Chain and Mitigation Strategies, *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(17).

⑫ Zhang P P, Zhang L X, et al. Food-Energy-Water (FEW) Nexus for Urban Sustainability: A Comprehensive Review, *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142.

统中商品和服务在生产与交换过程的跨区域近远程耦合的流动特征<sup>①</sup>。资源环境要素的跨区域耦合产生的诸多影响通过全球供应链将城市问题从城市本地扩展到全球层面<sup>②</sup>。为揭示资源环境要素在城市系统内部以及跨区域的流动路径,多数研究采用IOA以及基于过程的LCA和IOA的混合分析方法。这部分研究主要关注城市化进程发展较快、资源环境问题突出的大城市,如从整个经济系统出发分析上海市与国内国际的跨区域“能源-水”耦合关系<sup>③</sup>,北京市FEW与中国其他省份之间的耦合关系<sup>④</sup>,以及中国四大直辖市的“能源-水-土地”与国内国际的跨区域耦合关系<sup>⑤⑥</sup>。跨区域研究表明,超过50%的资源要素来自城市行政边界以外的其他区域,故而城市资源环境要素跨区域协同治理对城市自身乃至全球的可持续发展十分重要。

系统集成视角从资源相互依存和资源供给两个视角对城市FEW系统进行优化,考虑了资源禀赋、经济发展、人口、社会等因素以提高城市系统的韧性<sup>⑦</sup>。如Hu等考虑了减少粮食损失和浪费以及优化化学施肥两种策略以减少食品供应链中的环境足迹<sup>⑧</sup>;并进一步考虑优化施肥、提高生产效率、减少食物损失浪费以及调整膳食结构四种基础策略在安全环境边界内食物系统的多种环境要素排放<sup>⑨</sup>。然而,由于资源环境要素在城市系统的复杂性、关联性、异质性、协同性等特点,目前对城市FEW的优化研究较少。

## (二) 远程耦合理论是城市三元多维耦合理论框架的外在条件

随着全球化及城市化进程的加快,城市与国家及地区之间的远距离联系日益紧密,城市可持续发展将愈加直接或间接地依赖城市行政边界以外的其他区域,因此,城市本地的自然生态与社会经济消费系统之间的一系列相互作用会通过全球供应链从邻近影响延伸至更远距离,呈现出从城市本地影响跨越到全球范围的发展趋势<sup>⑩⑪</sup>。如城市的生物燃料的生产<sup>⑫</sup>通过贸易方式可能会对其他地方产生诸如碳排放<sup>⑬</sup>、生物多样性损失<sup>⑭</sup>等环境问题。

- ① Meng F X, Liu G Y, et al. Quantification of Urban Water-Carbon Nexus Using Disaggregated Input-Output Model: A Case Study in Beijing (China), *Energy (Oxford)*, 2019, 171.
- ② Elmqvist T, Andersson E, et al. Urbanization in and for the Anthropocene, *npj Urban Sustainability*, 2021, 1(1).
- ③ Nawab A, Liu G Y, et al. Exploring Urban Energy-Water Nexus Embodied in Domestic and International Trade: A Case of Shanghai, *Journal of Cleaner Production*, 2019, 223.
- ④ Zhang P P, Zhang L X, et al. Understanding the Tele-Coupling Mechanism of Urban Food-Energy-Water Nexus: Critical Sources, Nodes, and Supply Chains, *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235.
- ⑤ Meng F X, Wang D F, et al. Mapping Urban Energy - Water - Land Nexus within a Multiscale Economy: A Case Study of Four Megacities in China, *Energy (Oxford)*, 2022, 239.
- ⑥ Wang D F, Meng F X, et al. Cross-Sectoral Urban Energy - Water - Land Nexus Framework within a Multiscale Economy: The Case of Chinese Megacities, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376.
- ⑦ Zhang P P, Zhang L X, et al. Food-Energy-Water (FEW) Nexus for Urban Sustainability: A Comprehensive Review, *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142.
- ⑧ Hu Y C, Cui S H, et al. Transboundary Environmental Footprints of the Urban Food Supply Chain and Mitigation Strategies, *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(17).
- ⑨ Hu Y C, Su M R, et al. Food Production in China Requires Intensified Measures to be Consistent with National and Provincial Environmental Boundaries, *Nature Food*, 2020, 1(9).
- ⑩ 孙晶、刘建国等:《人类世可持续发展背景下的远程耦合框架及其应用》,《地理学报》2020年第11期。
- ⑪ Seto K C, Reenberg A. Rethinking Global Land Use in an Urban Era, *Strüngmann Forum Reports*, 2014.
- ⑫ Tilman D, Socolow R, et al. Beneficial Biofuels: The Food, Energy, and Environment Trilemma, *Science*, 2009, 325.
- ⑬ Meng J, Mi Z F, et al. The Rise of South - South Trade and Its Effect on Global CO<sub>2</sub> Emissions, *Nature Communications*, 2018, 9(1).
- ⑭ Lenzen M, Moran D, et al. International Trade Drives Biodiversity Threats in Developing Nations, *Nature*, 2012, 486(7401).

远程耦合概念 (Tele-coupling Concept) 于 2008 年首次被 Liu 提出, 作为远程连接理论 (Tele-connection) 的演变, 它融合了环境科学、自然科学、社会科学、系统科学等多个学科, 更加关注全球化进程中由于人为活动产生的远距离的社会经济和环境相互作用<sup>①</sup>。2013 年 Liu 等人提出了远程耦合框架 (Tele-coupling Framework), 是对远程耦合概念的形象结构表示, 该理论框架包含五个基本组成部分, 即系统、流、代理、原因和影响<sup>②③</sup>, 注重远距离的人为活动和自然环境之间的相互作用, 是人与自然耦合系统、社会与生态耦合系统、人类与环境耦合系统的延伸<sup>④</sup>。随后, Liu 进一步对远程耦合进行扩展和完善, 提出了在城市本地和全球范围内都适用的近程耦合 (Peri-coupling) 和内部耦合 (Intra-coupling), 并将其和远程耦合统称为元耦合 (Meta-coupling)<sup>⑤</sup>。元耦合不仅关注系统内的自然生态与社会经济消费系统的相互作用, 而且关注上述相互作用对邻近和/或远距离其他系统产生的溢出效应。

远程耦合理论是一个包含了系统内部、邻近以及远距离相互作用的综合概念, 它使研究者能够跨越多个尺度探索资源环境跨区域流动的相互作用, 明晰系统内部的相互作用对远距离区域的自然环境和社会经济造成的影响。近年来的大量相关研究正逐渐促使远程耦合理论框架成为有一定影响力的综合性框架之一。该理论框架已被应用于全球、区域、国家的重点问题研究中, 如全球土地利用和土地变化<sup>⑥</sup>、全球粮食和林产品贸易、全球食物系统的磷资源<sup>⑦</sup>, 美国木材贸易<sup>⑧</sup>和中国林产品贸易<sup>⑨</sup>。此外, 该理论框架在城市尺度的应用逐渐备受关注, 如埃塞俄比亚农村地区由清洁水举措驱动的城市土地扩张以及由此带来的一系列影响<sup>⑩</sup>, 京津冀地区城市化与经济耦合关系及影响<sup>⑪</sup>, 北京食物系统自 1978 年以来的演变过程并揭示食物系统演变蕴含的近远程耦合关系<sup>⑫</sup>。根据实际需要远程耦合理论在研究中不断创新和发展, 如方创琳等学者在借鉴人地关系地域系统、远程耦合理论及星球城市化理论核心思想的基础上, 从空间、时间、表象和组织四个维度构建多尺度层级嵌套的“耦合魔方”概念, 以系统、科学、全面地解释城镇化与生态环境要素

- ① Liu J G, William M C, et al. Symposium on "Telecoupling of Human and Natural Systems" at the Meeting of the American Association for the Advancement of Science, 2011. Available from: <http://aaas.confex.com/aaas/2011/webprogram/Session2889.html>.
- ② Liu J G, Hull V, et al. Framing Sustainability in a Telecoupled World, *Ecology Society*, 2013, 18(2).
- ③ 刘建国、Hull V 等:《远程耦合世界的可持续性框架》,《生态学报》2016 年第 23 期。
- ④ Liu J G, Mooney H, et al. Systems Integration for Global Sustainability, *Science*, 2015, 347(6225).
- ⑤ Liu J G. Integration Across a Metacoupled World, *Ecology Society*, 2017, 22(4).
- ⑥ Seto K C, Reenberg A. Rethinking Global Land Use in an Urban Era, *Strüngmann Forum Reports*, 2014.
- ⑦ Barbieri P, Macdonald G K, et al. Food System Resilience to Phosphorus Shortages on a Telecoupled Planet, *Nature Sustainability*, 2022, 5(2).
- ⑧ Dwivedi P, Khanna M, et al. Potential Greenhouse Gas Benefits of Transatlantic Wood Pellet Trade, *Environmental Research Letters*, 2014, 9(2).
- ⑨ Liu J G. Forest Sustainability in China and Implications for a Telecoupled World, *Asia & the Pacific Policy Studies*, 2014, 1(1).
- ⑩ Chignell S M, Laituri M J. Telecoupling, Urbanization, and the Unintended Consequences of Water Development Aid in Ethiopia, *Geological Society of America*, 2016, p. 125-136.
- ⑪ Fang C L, Ren Y F. Analysis of Emergy-Based Metabolic Efficiency and Environmental Pressure on the Local Coupling and Telecoupling Between Urbanization and the Eco-Environment in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration, *Science China Earth sciences*, 2017, 60(6).
- ⑫ 马恩朴、叶玮怡等:《城市食物系统演化的人地耦合启示及驱动力——以北京食物系统为例》,《自然资源学报》2022 年第 10 期。

耦合机理<sup>①</sup>，能够从多维度，多尺度认知人地系统复杂的演化机理，增强跨区域协作政策制定的可持续性。学者们还将远程耦合理论与耦合方法（Nexus Approaches）结合<sup>②</sup>，从资源环境要素的空间流动出发，深入探讨其跨部门、跨区域的相互作用，尤其关注由于区域间贸易产生的资源分配不均以及隐含的环境压力转移问题，以期为全球可持续发展提供更加公正、科学的决策支持，如在城市尺度定量研究北京FEW要素与省份之间的耦合特征<sup>③</sup>以及中国四大直辖市的“能源-水-土地”的近远程耦合规律<sup>④</sup>。

综上所述，城市代谢理论的提出及发展打开了城市系统内部的黑箱，有助于厘清城市系统内部关键产业部门资源环境要素的流动规律并深入剖析其代谢机制；远程耦合理论有助于理解城市系统与区域乃至全球大尺度之间的交互影响。内嵌在商品和服务中的隐含资源环境通过全球供应链在全球范围内进行流动，厘清城市系统内部的本地耦合关系及与不同城市、区域之间的近远程耦合关系，有助于更全面地揭示城市乃至世界系统的复杂性。目前，多种资源环境要素的耦合研究，多数集中在资源依存和资源供给视角下的远程耦合分析，缺少对多种资源环境要素在城市整个经济生产子系统内的近、远程耦合的全面深入研究，并且针对城市复杂系统的资源环境耦合研究，尚缺乏统一的、可操作的理论框架。因此，亟须提出城市系统多尺度资源环境要素代谢及耦合理论框架，清晰地描绘多种资源环境在部门-城市-国家-全球的代谢特征及规律，全面深入地研究城市内部子系统与跨部门、跨区域系统之间复杂的耦合关系。

### 三、城市三元多维耦合理论框架

基于上述理论基础，本文构建了城市复合生态系统资源环境要素耦合理论框架，即“城市三元多维耦合理论框架”（图1），该理论框架是一个由多层次子系统、子系统内相互耦合及子系统与外部系统相互耦合的涉及多维度解析的概括化、抽象化概念框架。该理论框架的构成如下：其中“三元”是指城市系统内部的自然生态、经济生产及社会消费三元子系统。“多维”是指资源环境要素、产业部门、空间尺度、经济尺度、评估视角、要素流动形式、要素耦合性状以及耦合效应多个维度。其中，资源环境要素包括能源、水、食物等满足城市生产消费所必须的资源要素，以及由于城市发展所排放的诸如废气、废水、固体废物等环境要素，有关其他维度详细的解释参见图1注释。

本文从生产和消费两个视角剖析城市资源环境要素的流动规律及界定资源消耗与环境污染责任。生产视角，是指从生产者责任的视角，核算城市行政边界内由于生产活动直接导致的资源消耗或环境排放。资源环境要素通过本地的经济生产活动，部分以产品形式内嵌在商品和服务中用于本地直接消费、国内调出及国际出口，从而实现了从实体物理流向虚拟价值流形式的转换。对于消费视角，是指从消费者责任的视角，核算由城市最终需求活动驱动的隐含在全球产业链上的资源消耗

① 刘海猛、方创琳等：《城镇化与生态环境“耦合魔方”的基本概念及框架》，《地理学报》2019年第8期。

② Liu J G, Hull V, et al. Nexus Approaches to Global Sustainable Development, *Nature Sustainability*, 2018, 1(9).

③ Zhang P P, Zhang L X, et al. Understanding the Tele-Coupling Mechanism of Urban Food-Energy-Water Nexus: Critical Sources, Nodes, and Supply Chains, *Journal of Cleaner Production*, 2019, 235.

④ Wang D F, Meng F X, et al. Cross-Sectoral Urban Energy – Water – Land Nexus Framework within a Multiscale Economy: The Case of Chinese Megacities, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376.

或环境排放，在此核算方法下资源环境要素是内嵌在商品和服务中的虚拟价值流形式存在，主要包含本地直接供给、国内调入及国际进口。另外，消费视角可以体现资源环境的负外部性并明晰污染责任主体，即城市本地通过进口城市行政边界以外其他区域的商品和服务，不仅消耗了其他区域（出口地）的资源还将生产过程中产生的污染物留在了城市行政边界以外的其他区域，使该区域成了资源供给者及“污染天堂”，而消费这些商品和服务的城市本地（进口地）可以不必承担资源消耗及环境污染的后果。

城市行政边界内的经济生产和社会消费活动，直接或/和间接地引起多种资源要素消耗及环境要素排放，导致资源环境要素以实体或/和虚拟形式隐含在产业链中，流经部门-城市-国家-全球多级经济尺度。资源环境要素在上述多级经济尺度中的流动，形成了城市本地及近远程耦合，且近远程耦合都属于跨区域耦合。其中，城市本地耦合是指城市系统由于自身产业活动及消费需求引起的城市行政边界内的各要素间耦合关系；近程耦合是指城市系统从其行政边界以外的国内区域调入或者调出过程中引起的各要素之间的交互耦合关系；远程耦合是指城市系统从其行政边界以外的国际区域进口或者出口过程中引起的各要素之间的交互耦合关系。资源环境要素在城市系统的自然生态—经济生产—社会消费三元子系统中的详细流动路径如下：

第一，城市系统为了维持自身的运行和发展，需要从两个方面获取实体资源投入。一方面，主要通过开采、加工、运输等方式从城市自然生态子系统获取实体资源要素。从自然生态子系统中获取的实体资源要素投入用作两部分，一部分用于城市经济生产子系统中各产业部门的经济生产活动（如图1中①所示）；另一部分用于城市社会消费子系统最终消费活动，如政府消费、企业消费或居民消费（如图1中②所示）。另一方面，从城市系统边界外的其他区域获取城市实体资源要素，即通过贸易方式，城市经济生产子系统和社会消费子系统从城市行政边界外的其他区域进口作为中间产品的跨区域实体资源要素（如图1中③和⑦所示）。

第二，实体资源流入城市系统边界内的经济生产子系统，由于各产业部门的经济生产活动导致了这些实体资源内嵌在商品和服务中，以虚拟的形式存在（如图1中⑤所示），同时经济生产活动又排放了废气、废水、固体废物等环境要素。这些环境要素，通过物理方式（如，大气扩散等）或者内嵌在商品或者服务中以贸易形式转移到国内和国际区域，对这些区域产生了环境压力，形成了转移和泄漏，如，碳排放转移及碳泄漏（如图1中⑨所示）。在经济生产子系统中，由于不同产业部门之间的频繁交换活动，城市资源环境要素间形成了两种耦合性状：一种是显性耦合，是由于与资源相关的产业部门自身的生产活动，引起的另一种资源的直接消耗，例如，能源部门生产引起的水资源消耗、水部门生产引起的能源消耗，形成了能-水耦合等；另一种是隐性耦合，是指伴随着产业部门之间的中间产品贸易活动，大量资源环境要素内嵌在中间产品（商品和服务）的虚拟形式，在多级经济尺度的产业部门间的生产链和消费链中流动（如图1中的④所示），例如，一件T恤的生产需要中间产品棉布作为原材料，在棉布的上游生产过程中会同时消耗大量的水和能源等资源及排放污染物，这种相互依赖的间接资源消耗就形成了隐性耦合。

第三，实体资源要素内嵌在由经济生产活动产生的最终产品（商品和服务）中，以虚拟的形式存在，流入社会消费子系统中政府、企业、居民消费等活动环节，该最终产品的来源主要有本地经济生产活动供给（如图1中⑥所示）以及跨区域的国内调入及国际进口（如图1中⑧所示）。伴随着最终产品在社会消费系统的消费活动，大量的环境压力以物理转移及贸易隐含等形式，发生在城市及跨区域之间流动，导致转移和泄露风险（如图1中⑨所示）。



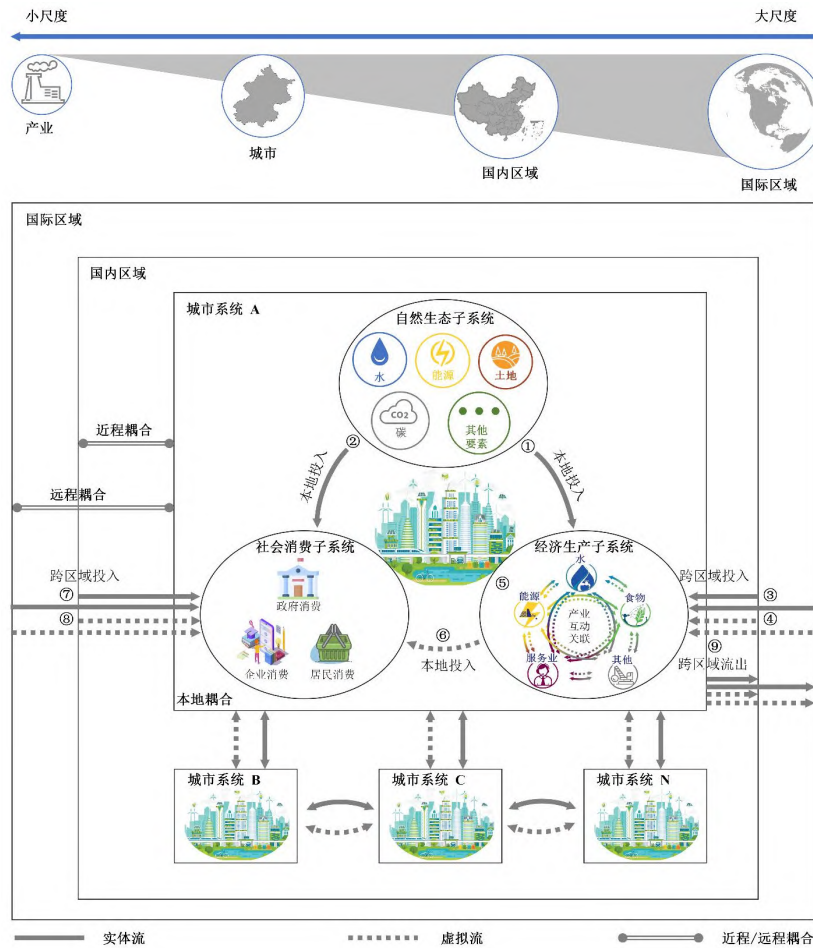


图1 城市三元多维耦合理论框架<sup>①</sup>

注释：其中，实线表示资源环境要素的实体流动，虚线表示资源环境要素的虚拟流动，箭头的指向表示资源环境要素的流动方向，双向箭头代表不同系统间的双向耦合关系。“多维”包含两方面。一方面是物理范围。包括（1）要素（如：能源、水、食物等资源要素以及废气、废水、固体废物等环境要素）；（2）产业部门（如：能源、水、食物、服务业及其他产业等部门）；（3）空间尺度（多个城市或者城市群）；（4）经济尺度（即部门-城市-国内-国际）。另一方面是评估形式。包括（5）评估视角（即生产和消费视角）；（6）要素流动形式（即实体和虚拟）；（7）要素耦合性状（即显性和隐性耦合）；（8）耦合效应（即本地、近程、远程耦合）。

#### 四、城市三元多维耦合理论框架的应用场景及可拓展性

##### （一）理论框架的应用场景及意义

本文提出的城市三元多维耦合理论框架，突破了城市行政藩篱，可应用于指导城市资源环境要素在“部门-城市-国内-国际”多级经济尺度上的量化及追溯，基于前期构建的以城市为中心的

<sup>①</sup> 改编自 Wang DF, Meng FX, et al. Cross-Sectoral Urban Energy – Water – Land Nexus Framework within a Multiscale Economy: The Case of Chinese Megacities, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376.

多级经济尺度投入产出模型，可通过量化及追踪资源环境要素在城市内产业部门间以及跨区域的代谢过程及足迹，识别其在全球供应链上的关键节点和调控路径，有利于揭示城市资源环境要素在多级经济尺度上的耦合规律。

已开展的中国四大直辖市“能源-水-土地”资源耦合研究<sup>①②</sup>，作为典型应用场景，验证了本文所构建的城市三元多维耦合理论框架及上述研究思路。研究表明，四大直辖市消费视角下的虚拟资源流大于生产视角下的直接资源流，是典型的能、水及土地资源消费型城市。对于北京、上海、天津而言，超过70%的虚拟能、水及土地资源流的供给来源于城市行政边界外，并且国内区域是虚拟资源流的主要供应者，因此需要重点关注近程耦合。重庆是虚拟能、水及土地资源流自给自足型城市，因此需要重点关注本地耦合。从产业部门的追溯上看，建筑业、其他制造业及服务业是虚拟能源资源流消费的主要部门，农业是虚拟水和土地资源流消费的主要部门，国内区域是上述部门虚拟资源流的主要供应。因此，重庆应该关注本地的产业部门，如建筑业和农业部门，大多数的虚拟能、水及土地资源流来自本地供应。

本文构建的“城市三元多维耦合理论框架”，简明、清晰地阐述城市资源环境跨区域的代谢过程，厘清城市资源环境要素在跨区域的耦合规律，有利于打破行政壁垒，可为城市跨区域资源环境协同治理、减污降碳协同治理、城市资源环境可持续发展、经济结构和区域布局优化提供理论指导和政策建议，从而推动城市向可持续性、宜居性和韧性的方向发展。具体意义如下：

(1) 该理论框架能够从多个维度对城市资源环境进行系统性、概括性定性描述分析，并将多种资源环境要素纳入一个统一分析框架中，这是对局限于单一城市、单一资源环境要素和社会经济部门割裂管理模式的拓展与融合<sup>③</sup>。该理论框架描绘了资源环境要素在城市系统的“自然生态-经济生产-社会消费”三元子系统之间的交互耦合，便于厘清资源环境要素在城市行政边界内的具体流动情况并摸清其流动特征和规律，有助于城市本地相关部门及城市与跨区域政府部门进行资源环境的协同管理。

(2) 该理论框架能够对城市系统由于生产和消费驱动的多种资源环境要素进行详细的产业链资源追踪，精准追溯多种资源环境要素流的来源和去向，有利于准确定位城市系统多种资源环境要素可调控点，加强城市资源环境精细化管理；明晰城市资源环境要素耦合中的关键代谢路径及调控节点，识别部门间资源控制依赖关系；厘清由城市本地消费引起的行政边界外上游产业链中隐含的间接资源消耗及环境排放，可以有针对性地开展产业结构调整、技术升级及改造。此外，跨区域追踪资源环境影响，可以进行生态治理责任的认定和分配，采用诸如技术转移和生态补偿的方式减少对资源环境出口地的经济及生态损失。

(3) 该理论框架将“城市-国内-国际”区域进行经济尺度的耦合分析，城市系统通过全球供应链与城市行政边界以外的其他地区频繁进行物质交换<sup>④</sup>，该理论框架把一系列城市资源环境相关

① Meng F X, Wang D F, et al. Mapping Urban Energy – Water – Land Nexus within a Multiscale Economy: A Case Study of Four Megacities in China, *Energy (Oxford)*, 2022, 239.

② Wang D F, Meng F X, et al. Cross-Sectoral Urban Energy – Water – Land Nexus Framework within a Multiscale Economy: The Case of Chinese Megacities, *Journal of Cleaner Production*, 2022, 376.

③ 张超、刘蓓蓓等：《面向可持续发展的资源关联研究：现状与展望》，《科学通报》2021年第26期。

④ Wiedmann T, Chen G W, et al. Three-scope Carbon Emission Inventories of Global Cities, *Journal of Industrial Ecology*, 2021, 25(3).

的复杂问题,纳入一个多层次和全方位的分析体系框架中,能够使政策制定者明晰资源环境跨区域协同调控的责任主体,打破区域、部门行政壁垒,协助各利益相关方完善跨区域协作政策,促进区域充分发挥各自的比较优势,推进资源环境要素跨区域协同可持续发展。此外,可以从各个层级得出实现社会经济和环境可持续发展的解决方案,为多方利益主体进行资源环境要素跨区域协同治理提供理论依据。

(4) 该理论框架是对已有理论在逻辑上的创新和发展。有助于“耦合思维(Nexus Thinking)”和“耦合导向决策(Nexus-Oriented Policymaking)”的形成<sup>①②</sup>。有利于促进社会和自然的融合,促进以知识整合、跨学科对话和跨部门治理为基础的发展观,有利于促进城市的可持续发展进程。并且,对于相关政府、国际组织等制定发展政策,以及建立跨学科跨部门的合作具有重要意义。

## (二) 理论框架的可拓展性

可以纳入时间维度。一方面可以对比分析特定时期城市多种资源环境要素的代谢特征,研究特定年份的资源环境变化特点;另一方面由于城市化进程是个长时间动态过程,可以从长期动态角度探索城市多种资源环境要素代谢的规律及演化路径依赖,预测未来城市资源需求及环境排放。

可以丰富城市案例的选取以及扩充多种资源环境要素的种类。在数据可获得的前提下,可以在中国或世界其他国家中选取不同规模且具有代表性的典型性城市作为案例进行比较研究,使得城市多种资源环境要素耦合研究具有普遍适用性。

可以融入社会复杂网络分析方法。城市社会经济部门之间生产和消费过程中存在着复杂交织的转化路径(如,提取、供应、分配、终端利用、废弃物处置等),并且以复杂网络的形式将城市产业部门与全球供应链相连。今后可以借助复杂网络分析方法,如中介中心性(Betweenness)<sup>③</sup>评估城市一个部门传导的环境压力,实现可持续供应链管理。

可以将行星边界理论纳入。从消费视角进一步衡量城市尺度的多种资源环境要素与行星边界阈值之间的联系。根据甜甜圈经济学构建的“安全和公正的空间”框架<sup>④⑤</sup>,在城市尺度上从消费视角将足迹与社会阈值耦合,实现城市的可持续发展<sup>⑥</sup>。另外,该理论框架可以考虑社会、经济、政治、健康等因素<sup>⑦</sup>,如政府政策、区域间贸易关税政策等变化对城市多种资源环境要素的影响。

可以纳入由多方利益主体协同参与的管理机制。将城市三元子系统之间以及城市系统与行政边界以外其他区域的复杂交互的系统科学认识纳入城市可持续发展的管理实践中,积极推动多方利益主体的共同参与,探索制定行之有效的资源环境跨区域协同管理政策。

① Liu J G, Hull V, et al. Nexus Approaches to Global Sustainable Development, *Nature Sustainability*, 2018, 1(9).

② Simpson G B, Jewitt G P W. The Water-Energy-Food Nexus in the Anthropocene: Moving From 'Nexus Thinking' to 'Nexus Action', *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 40.

③ Liang S, Qu S, et al. Betweenness-Based Method to Identify Critical Transmission Sectors for Supply Chain Environmental Pressure Mitigation, *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(3).

④ O' Neill D W, Fanning A L, et al. A Good Life for All within Planetary Boundaries, *Nature Sustainability*, 2018, 1(2).

⑤ Fanning A L, O' Neill D W, et al. The Social Shortfall and Ecological Overshoot of Nations, *Nature Sustainability*, 2022, 5(1).

⑥ Wiedmann T, Allen C. City Footprints and SDGs Provide Untapped Potential for Assessing City Sustainability, *Nature Communications*, 2021, 12(1).

⑦ Newell J P, Ramaswami A. Urban Food-Energy-Water Systems: Past, Current, and Future Research Trajectories, *Environmental Research Letters*, 2020, 15(5).

## 五、结论

城市是“减污降碳协同治理”“区域协同发展”“城市可持续发展”等重大战略实施的基本调控单元。由于城市系统的复杂性和开放性，资源环境管理范式需要由传统的单一要素、单一部门、单一区域向多要素、跨部门、跨区域协同治理转变。本文基于城市代谢和远程耦合理论，并对其在逻辑上的自然延伸和理论内容的拓展丰富，构建了城市复合生态系统资源环境要素耦合理论框架，即“城市三元多维耦合理论框架”。该理论框架是一个由多层次子系统、子系统内相互耦合及子系统与外部系统相互耦合的涉及多维度解析的概括化、抽象化概念框架。它简明、清晰地阐述了城市开展跨区域资源环境治理的底层逻辑，从多要素、多视角、多尺度、跨部门、跨区域全方位视角揭示了资源环境要素在城市跨区域多级经济尺度上的耦合规律；把一系列城市资源环境要素相关的复杂问题纳入一个有机的、多层次、全方位分析体系框架，有利于突破城市行政区划藩篱，厘清城市系统人为活动与资源环境要素之间的耦合规律，为多方利益主体实现城市跨区域资源环境协同治理及可持续管理提供理论指导和政策建议。其次，以中国四大直辖市的“能-水-土地”资源耦合研究为例，介绍了该理论框架的主要应用场景及结果分析。最后，以该理论框架为指导，提出未来该理论框架可以融合的城市亟待开展的科学研究问题和管理实践的重点。

# Synergistic Governance of Urban Trans-Boundary Resources and Environment: Theoretical Framework, Application Scenarios, and Future Directions

WANG Dongfang LIU Gengyuan MENG Fanxin

**[Abstract]** From the perspective of complex system science and nexus, this study constructs a theoretical framework for resource and environmental element nexus in complex urban ecosystems (i.e., the urban ternary multi-dimensional nexus (UTMDN) framework) based on the theory of urban metabolism and tele-coupling. It systematically describes the flow pathways, spatial patterns, and nexus connections of multiple resource and environmental elements in the "natural-economic-social" complex system of cities. This study demonstrates the theoretical framework's viability and scientific validity by taking the energy-water-land nexus in four Chinese municipalities as an example. Using a multi-scale input-output model, it breaks down city administrative divisions and achieves measurable and traceable urban energy-water-land footprints at the sectoral-city-national-global level. Results show that above 70% of virtual flows are supplied from outside the urban administrative boundaries, and the four cities are resource-intensive, with construction being an energy-intensive sector and agriculture being a water-land-intensive sector.

**[Keywords]** Integrated Urban Eco-system; Tele-coupling; Synergistic Governance; Sustainable Management

(责任编辑：朱瑞 责任校对：周瑞春)