

DOI: 10.5846/stxb202204221104

王心静, 张妍, 刘凝音. 网络视角下城市物质代谢过程解析——以京津冀 13 城市为例. 生态学报, 2023, 43(7): 2676-2687.

Wang X J, Zhang Y, Liu N Y. Analysis of urban material metabolism from the perspective of network: A case study of 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(7): 2676-2687.

网络视角下城市物质代谢过程解析 ——以京津冀 13 城市为例

王心静^{1,2}, 张妍^{1,2,*}, 刘凝音^{1,2}

1 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875

2 北京师范大学环境学院, 北京 100875

摘要: 城市作为物质吞吐量的集中区, 往往存在一定的资源消耗和环境问题。京津冀是中国北方经济规模最大的地区, 负载着巨大的资源环境压力。以京津冀地区为例, 在计算城市物质输入与输出的基础上, 运用生态网络分析方法对代谢系统内部的具体路径和节点关系进行深入探究, 并分析其变化。结果表明, 京津冀地区 97% 的流量都集中于各城市内部, 各城市之间的优势互补有待加强。2017 年京津冀 13 城市代谢总流量增长为 2000 年的 3.3 倍, 其中承德、秦皇岛和唐山增长最为迅速, 而衡水是唯一一个流量下降的城市。各城市的关键路径中有 71.8% 呈现流量上升态势, 加工制造业为涉及关键路径最多的部门, 其中加工制造业-环境为大多数所有城市共有的关键路径。掠夺/控制是京津冀 13 城市的主导关系类型; 2000—2017 年间 13 城市总体的生态关系良性转变少于劣性转变, 致使共生关系数量下降, 需要从交通运输业、采掘业和加工制造业等重点部门上寻求突破。关键路径及生态关系等代谢网络特征及其变化的识别, 有效打破了城市代谢的“黑箱”, 为缓解不同城市物质利用所带来的资源环境问题提供可靠理论依据。

关键词: 城市物质代谢; 生态网络分析; 关键路径; 生态关系; 京津冀

Analysis of urban material metabolism from the perspective of network: A case study of 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei Region

WANG Xinjing^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2,*}, LIU Ningyin^{1,2}

1 State Key Laboratory of Water Environment Simulation, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: As a concentrated area of material throughput, cities are often faced with some problems of resource and environment. The Beijing-Tianjin-Hebei region has the largest economic scale in northern China, so it is bound to be burdened with huge pressure on resources and environment. From the perspective of metabolism and based on the calculation of urban material input and output, this study selected the Beijing-Tianjin-Hebei region as an example, used the ecological network analysis method to deeply explore the specific path and node relationships within the metabolic system, and analyzed the changes from time. The results showed that 97% of the flow amount was within the cities, indicating the need for cities to strengthen their complementarity. The total metabolic flow of 13 cities in the Beijing-Tianjin-Hebei region increased by 3.3 times that of 2000 in 2017, with Chengde, Qinhuangdao and Tangshan growing the most rapidly, while Hengshui was the only city with a decrease. Among the key paths of each city, 71.8% showed an upward trend of flow, and a high degree of sectoral concentration. Manufacturing became one sector most involved in the key paths, and manufacturing-environment was the key path type that existed in most cities. The exploitation and control were the dominant relationship type in the 13 cities. From 2000 to 2017, the positive change of ecological relationship was less than the negative change,

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0503005); 国家自然科学基金项目 (41871213)

收稿日期: 2022-04-22; **网络出版日期:** 2022-11-21

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

which may require breakthroughs in key sectors such as transportation, mining and manufacturing. The identification of metabolic characteristics and their changes, such as key path and ecological relationship, effectively opened the “black box” of urban metabolism, and reliable theoretical basis for alleviating the resource and environment problems caused by urban material utilization.

Key Words: urban material metabolism; ecological network analysis; key path; ecological relationship; Beijing-Tianjin-Hebei

全球经济和科学技术的快速发展推动了世界城市化进程,目前全球城市人口城市化率约为 55%^[1],超过 1900 年的 4 倍^[2]。城市人口和经济的快速增长带来了巨大的资源消耗和环境问题,当前,全球城市以 2%—3%左右的面积,在创造超过全球 80%的 GDP 的同时,也带来了 75%左右的自然资源、将近 67%的能源和 50%的食物需求,贡献了全球温室气体排放的 70%以上^[3]。中国的城市化进程远超世界平均水平,近 40 年来飞速从不足 20%提升到 60%以上^[4]。因此,中国城市所面临的资源环境挑战将更加严峻。作为中国北方经济规模最大、最具活力的地区,京津冀地区虽然仅占国土面积的 2.3%,但集中了全国近 8.1%的人口,创造了全国 10.2%的 GDP,这也意味着本地区正负载着尤为突出的资源环境压力。同时,虽然 2010 年的《京津冀都市圈区域规划》使京津冀地区的各城市开始逐步集聚发展为城市群,但这一地区也包含了首都北京、传统工业城市唐山、滨海港口秦皇岛等在内的诸多城市类型,因此资源利用方面的问题不尽相同。

城市作为物质吞吐量的集中区,如何量化识别并改善物质在其中的迁移转化与利用,从而探求减小资源能源消耗和污染物排放的有效方式,已经成为全球范围内城市可持续发展的关键。越来越多的研究者选择借助 Wolman 所提出的“城市代谢”思想^[5],将城市对物质、能量、污染物等要素的输入、利用与输出过程类比为自然界生命体的代谢过程,探究物质^[6]、能量^[7]或元素^[8-10]在城市中的流动转化过程。虽然当前以深圳^[11]、北京^[6]、开普敦^[12]、波哥大^[13]等国内外城市,甚至以整个国家^[14]为对象的城市代谢研究成果已经较为丰富^[15-17],但它们往往将城市看作整体系统,或将城市内的各部门看作彼此独立的分析单元,而不考虑各代谢部门间的物质或能量流动情况。随着基础数据的完善和数据获取渠道的扩充^[18],目前也有少数学者关注到了各社会经济组分^[19]和不同资源消费空间^[20]之间相互的物质利用,但仍未揭示出这些城市代谢组分之间具体物质传递和利用关系,因此物质在城市内各部门之间的流动转化过程所带来的影响依然难以识别。另一方面,随着城市间的经济与贸易的发展,不同城市之间的差异性日趋显著,城市之间的物质、能量传输也更加频繁,因此当前的研究不再满足于关注单个城市,已有学者开始关注多城市代谢状态的对比,如全球 16 个城市^[21]、中国 4 个特大城市^[22]、山东省 16 个地级市^[23]等。此外也有学者上升到城市群尺度分析城市间互动关系,如对京津冀城市群能源代谢^[24]、珠三角城市群的水系统代谢^[25]的分析等,但此类多城市的对比和关联研究相比于单一城市的研究仍较少,且缺乏城市社会经济系统中综合物质代谢的关注。

本研究将自然生态系统研究中常用的生态网络分析方法^[26-27]运用到京津冀地区 13 城市的物质代谢研究中,能够解决以往大部分城市代谢研究没有深入到内部探讨部门间生态关系的问题,同时有效实现多个城市之间的对比与关联。首先通过核算城市代谢部门间的物质流量,构建京津冀 13 城市 2000—2017 年的物质代谢的生态网络模型,并选取特定年份将各城市代谢网络进一步关联为城市群代谢网络,模拟城市内和城市间的物质传递过程,进而识别对各城市代谢网络有重要影响的关键路径及各节点之间的生态关系,整体性和差异化地识别各城市在资源利用中的主要问题并分析其变化情况,找到京津冀各城市代谢过程的潜在问题和调控工作的有效切入点,为改善城市发展过程由物质代谢导致的资源环境问题供理论依据。

1 研究方法与数据

本研究的整体框架如图 1 所示。

1.1 城市及城市群代谢网络模型构建

类比自然生态系统各组分之间的物质传输,将城市内部各代谢部门看作一个有机系统,以代谢部门为节

点,部门之间的物质流动过程为路径,构建城市物质代谢网络模型(图1)。网络系统的边界即城市行政边界,系统内包含城市内部的自然环境和各经济部门,系统边界外部则包括城市外部的所有自然环境和社会经济。城市的物质代谢部门依据物质利用特征差异及数据可获得性划分,包括环境、农业、采掘业、能源转换、加工制造业、循环加工业、居民消费、建筑业、交通运输业9个部门,其中能源转换和循环加工业是两个虚拟部门,分别代表将直接开采的能源转化为各部门使用能源的环节和废物和污染的处理、回收和处置环节,二者在系统中均起中转的作用。每个城市均采用统一的节点划分方式,以便于城市间的对比分析。

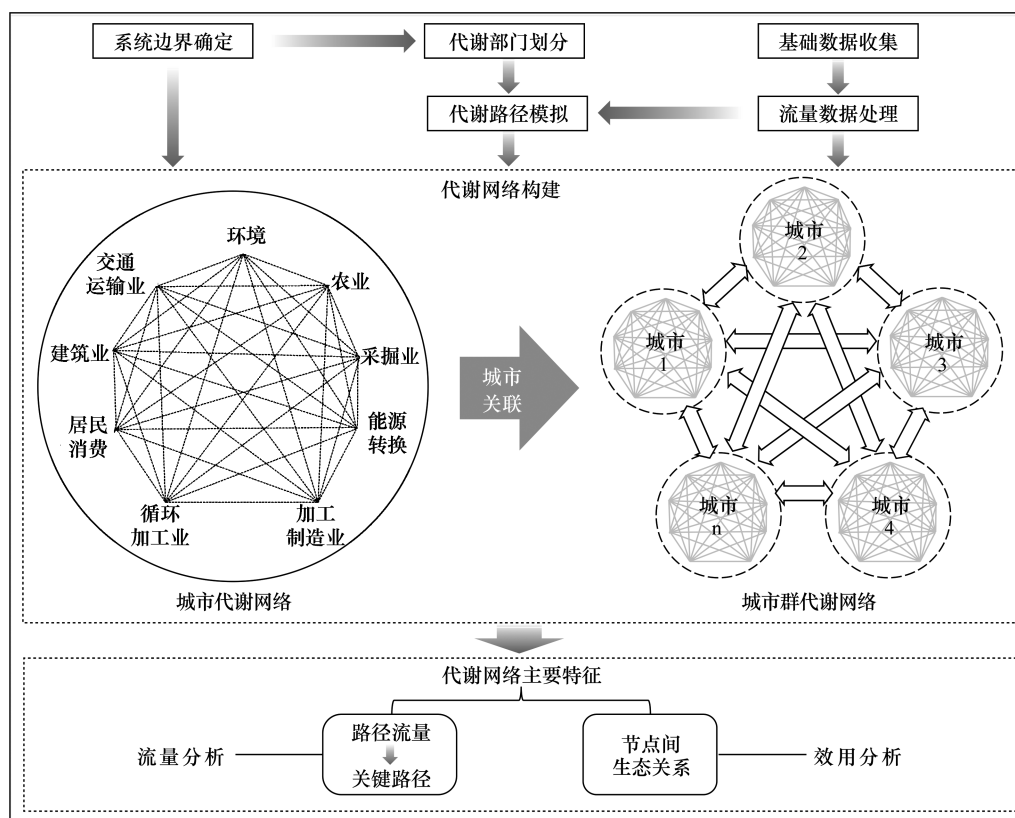


图1 本研究的整体框架

Fig.1 Overall framework of this study

依据各城市间的物质交换过程,将京津冀13城市的代谢网络进一步关联,可以得到城市群整体代谢网络。此时网络边界扩展到城市群的行政边界,网络内部既包含各城市内部部门间的物质流动过程,也包括属于不同城市的部门间的物质相互利用。

1.2 代谢网络主要特征分析方法

城市物质代谢网络的特征主要表现在两方面,一是网络路径上的流量,二是节点间的生态关系。二者分别通过生态网络的流量分析和效用分析实现。

1.2.1 路径流量量化与关键路径识别

城市和城市群代谢网络各路径上的流量以部门间物质传递的形式存在。京津冀13城市内部的物质代谢路径流量量化采用物质流核算方法,该方法以物料平衡原则为基础,其主要平衡关系为:某物质存量的变化等于该物质的本地(本部门)生产量和调入量之和减去本地(本部门)消费和调出量。城市内部流量量化的基础数据主要来源于各城市2000—2018年的统计年鉴,以及省级和国家统计部门公布的其他统计资料。网络各节点之间传递的物质类型主要包括生物质、金属与非金属矿物、化石燃料、工业制成品以及环境污染物与废弃物等。通过将两两节点之间的各类物质转移量加和,即可获得这一路径上的直接流量。

由于所获得的部分基础数据是以元(或万元、亿元)为单位的价值量,或为体积、数量等非质量单位计量的量,还有一些生产原料、能耗、产品调入调出量等数据无法直接获取,所以在原始数据收集整理完成后,需要根据转换系数或平衡关系在已知数据的基础上进一步计算获得^[28-29]。此外,由于氧气、二氧化碳(燃烧排放除外)、水蒸气三类物质以及水量数值巨大,易掩盖物质总量中其他物质的比例和变化特征^[30],且此类物质数值的影响因素单一更适于单独分析而非加和到综合物质中,因此核算时将其排除^[31-32]。

城市群网络中的跨城市路径流量需借助京津冀多区域投入产出表计算。该表获取中国产业生态学实验室,它包含 2012 年京津冀 13 个城市和国内其余 27 省市、全球其他区域的 30 个产业间价值量传递量^[33-34]。受此表数据年份的限制,本研究中仅构建 2012 年的城市群网络,用以分析京津冀城市群建设的起点状态。首先结合每个城市部门向城市外部输出的物质质量,计算多区域部门间物质转移系数 m_i 。在此基础上将此价值型投入产出表转换为物质型投入产出表,即将城市间产业价值关联转换为城市物质流动量。具体计算公式如下:

$$f_{ij} = X_{ij} \times m_j$$

$$m_j = C_j / X_j$$

式中, f_{ij} 为城市间产业 j 向产业 i 的物质流量; X_{ij} 指城市间部门 j 向部门 i 的经济价值转移, X_j 指城市部门 j 输出的价值量总和(包括输出到中国其他区域所有产业、最终使用和出口), C_j 为部门 j 的物质输出总量。

路径上的流量大小往往决定了路径对网络整体代谢总量的影响程度,因此城市内部部门间具有较多物质转移的路径往往对整体代谢过程具有较为关键的影响。通过量化各路径上的物质流量,本研究将其中首末年间平均流量较大的前 3 条路径定义为网络中的关键路径,进而分析关键路径上的流量变化趋势。

1.2.2 节点间生态关系识别

网络节点之间生态关系可以采用网络效用分析方法识别。具体公式如下:

$$d_{ij} = \frac{f_{ij} - f_{ji}}{T_i}$$

$$U = (u_{ij}) = D^0 + D^1 + D^2 + D^3 + \dots + D^m + \dots = (I - D)^{-1}$$

其中, f_{ij} 是节点 j 流向节点 i 的物质流量; D 是直接效用强度矩阵, d_{ij} 是其中的元素; T_i 是其他节点和网络系统外部输入节点 i 的总流量; U 是综合效用强度矩阵, u_{ij} 是其中的元素。

综合效用强度矩阵 U 可以表征每对节点之间的净效用,进而表示系统通过多级路径传递物质的强度和传递模式^[35]。根据综合效用矩阵 U 中各元素的正负,形成符号关系矩阵 $\text{sgn}(U)$,其中每个元素记为 su_{ij} ,用于表示网络中每对节点的关系类型^[36],如 $(su_{21}, su_{12}) = (+, -)$ 表示节点 2 掠夺节点 1,此外 $(-, +)$ 表示控制关系, $(-, -)$ 表示竞争关系, $(+, +)$ 表示共生关系。由于掠夺和控制为一对仅有方向相反的相互关系,所以分析时往往将二者看作同种生态关系。在对 2000—2017 年间各城市节点间生态关系进行识别的基础上,将首末年份和中间年份中出现频率高于 2/3 的生态关系确定为稳定生态关系,从而确定出京津冀 13 城市的生态关系分布特征。

当两节点间表现为掠夺(或控制)关系时,表示一个部门的综合效益为正而另一个部门的综合效益为负,主要包括直接或间接的资源供给以及污染物和废弃物容纳两种情况。当两部门间表现为共生关系时,则两节点在彼此交换中均受益,一般是通过中间部门形成流动链,促进物质的相互利用。竞争关系形成原因则主要是由于两部门对相同部门有物质供给或需求,虽然两个部门均从关系中受损,但短期的竞争可能促进双方资源利用效率的提高。一般来说,网络中的共生关系越多,物质在城市的代谢系统中将能得到更高效的流转和利用,因此共生关系数量可以有效评价城市代谢网络物质代谢网络的共生性。

2 结果与分析

2.1 物质代谢网络模拟结果

京津冀地区整体代谢的代谢流量巨大,但流量在网络中分布的非均质性特征显著。以城市群发展起点阶

段的 2012 年为例, 62.3 亿吨物质流量分布于 2256 条路径中, 其中输入到环境节点的路径和从加工制造业阶段输出的路径上流量分布较多, 占比均超过 35% (图 2)。同时, 跨城市的路径数量虽高达城市群路径总数的近 85%, 但却有超过 97% 的流量集中在各城市内部 (如图 2 对角线附近部分所示)。这意味着京津冀地区各城市之间的物质交换很不活跃, 城市群的整体代谢状态极大程度上受城市内部的代谢过程的影响。聚焦于各城市的内部代谢过程, 流量核算结果显示, 京津冀地区 13 个城市的代谢总流量在 2000—2017 年间呈现增长, 2017 年高达 106 亿吨, 是 2000 年的 3.3 倍。在 13 城市中, 以钢铁、化工等重工业为支柱产业的唐山、邯郸、天津历年的总流量均位于前 3 位, 2000 年分别占全地区代谢总流量的 15.7%、11.7% 和 11.5%, 而随着京津冀各城市的差异化发展和功能分化, 三者的占比在 2017 年分别增加到了 24.7%、13.8% 和 12.9%。

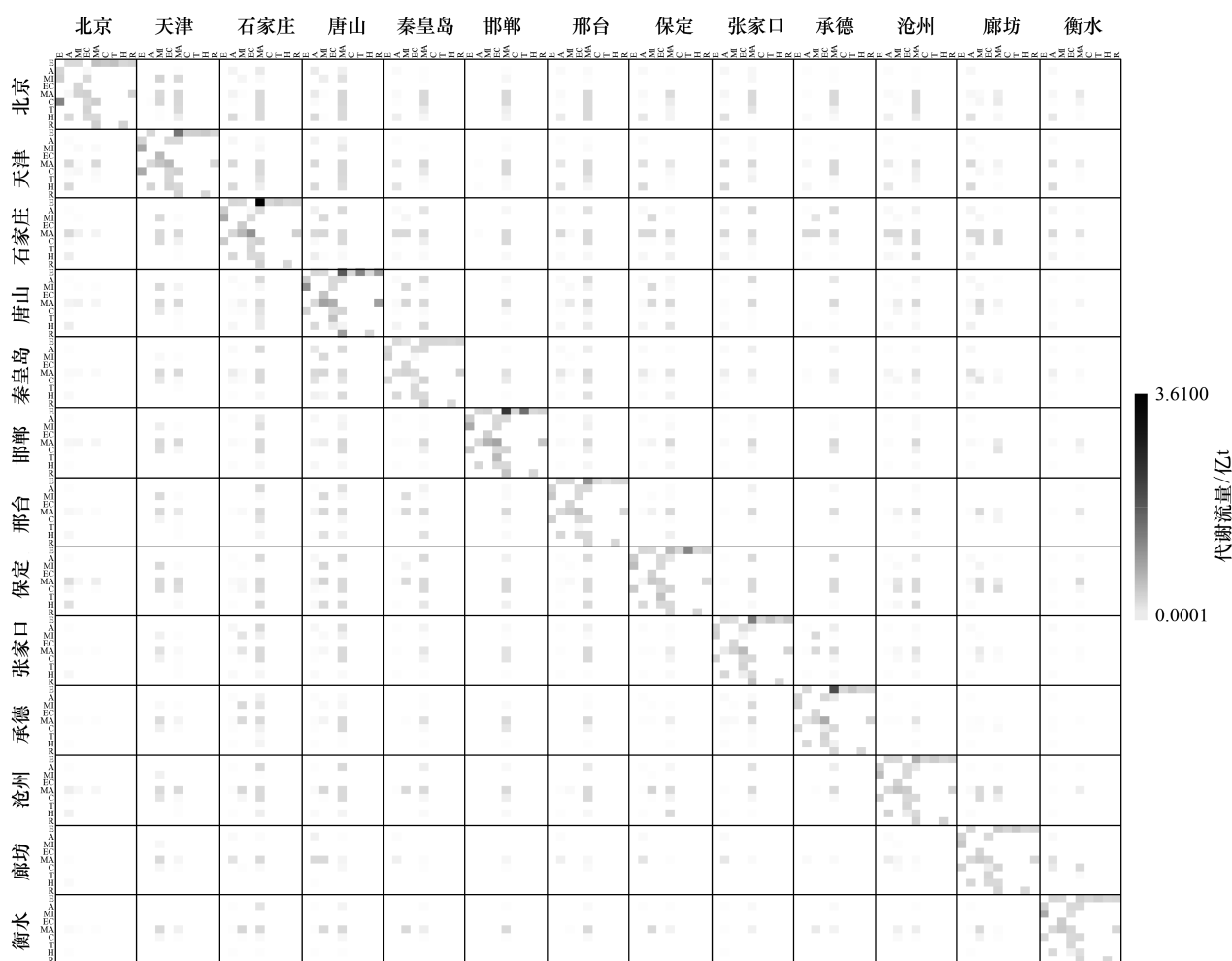


图 2 2012 年京津冀城市群直接物质流量分布

Fig.2 Distribution of direct material transfers in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration in 2012

E: 环境 Environment; A: 农业 Agriculture; MI: 采掘业 Mining, MA: 加工制造业 Manufacturing; EC: 能源转换 Energy conversion; H: 居民消费 Household; T: 交通运输业 Transportation; C: 建筑业 Construction; R: 循环加工业 Recycling; 考虑到数量级的巨大差异, 小于 0.0001 亿吨的流量在图中显示为空白

从各城市的代谢流量变化趋势来看, 除衡水在 2000—2017 年间出现了 4.9% 的流量下降外, 其余 12 个城市均呈现不同幅度的增长 (图 3), 说明随着京津冀地区经济活动的集中和发展, 城市对物质的需求规模普遍增大, 城市代谢变得日益活跃。承德、秦皇岛和唐山是总流量增长最快的 3 个城市, 增幅分别为 7.8 倍、5.9 倍和 4.2 倍。其中承德和秦皇岛产生巨大增幅的主要原因在于其 2000 年的流量位于本地区的最后两位, 因此

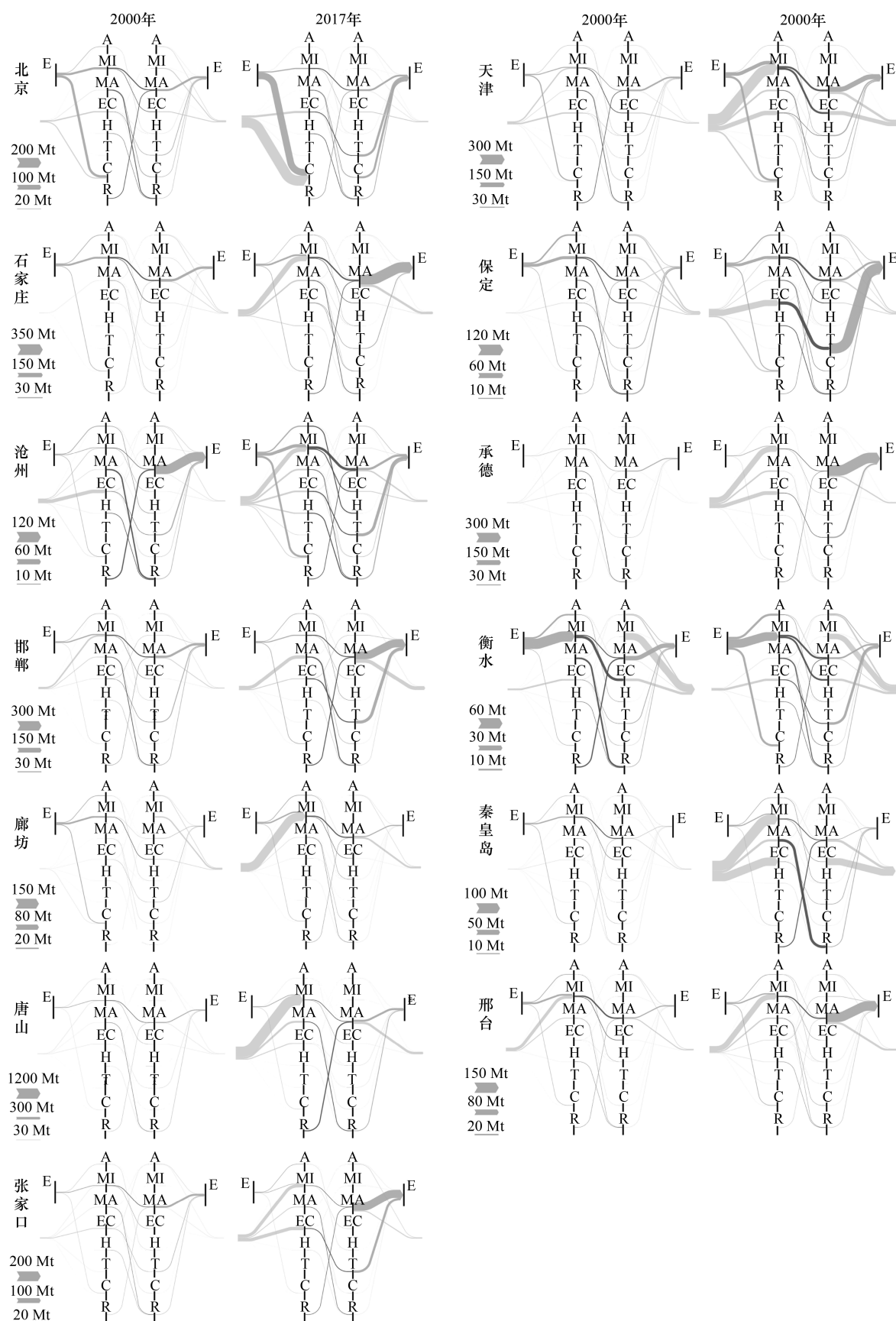


图3 2000与2017年的京津冀13城市直接物质代谢网络

Fig.3 Direct material transfer network of 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region in 2000 and 2017

即使二者的增长量仅占城市群总增长量的 11.2% 和 4.4%, 却成为增幅最大的两个城市。承德和秦皇岛代谢流量的迅猛增加, 主要来源于加工制造业和能源转换部门的外部输入的显著增长(增幅均超 13 倍); 此外, 二者的增长还分别受到加工制造业向环境的污染物排放(增幅 10.9 倍)以及能源转换外部输出(增幅 325.8 倍)的重要影响。唐山虽然在 2000 年已成为京津冀地区流量最大的城市, 但研究期内占城市群整体 28.6% 的增量使其也产生了较大的增幅, 从而在 2017 年仍具有本地区最大的流量。受高度发达的钢铁制造产业影响, 唐山的流量增长最主要来源于增幅高达 51.5 倍的采掘业外部输入, 同时加工制造业产品的向外输出也呈现较明显的增加(增幅 8.5 倍)。

虽然图 2 显示京津冀各城市间的物质交换相对较少, 但由图 3 可以看出, 京津冀各城市的代谢网络与城市外部区域的物质转移量均较大, 这在一定程度上反映出京津冀各城市在物质资源存在较大外部依赖性的同时, 也缺少城市群内部各城市的产业互补互惠。在绝大部分城市中, 来自外部区域的物质均主要转移到采掘业(占比 35.8%—64.5%)或能源转换部门(占比 15.3%—38.5%), 说明京津冀地区的本地矿产资源和能源越来越难以满足本地区的经济发展需要。与其他城市不同, 北京的外部输入物质主要由建筑业承接, 占比高达 38.6%—82.1%, 这是由于北京不断涌入的外来人口通过城市住房带来了巨大资源需求。而物质向城市外部的输出则主要集中在能源转换部门(占比 24.5%—25.3%)和加工制造业部门(占比 27.0%—66.5%)。秦皇岛是京津冀地区中与外部区域物质交换最密切的城市, 代谢总流量的 21.9%—77.3% 来自或去向城市外部, 其中近半数流量来源于能源转换部门, 这与其为世界最大的煤炭运输港有关。

2.2 网络中的关键路径

为识别城市代谢中的重要内部过程, 将各城市内部首末年间平均流量较大的前 3 条路径识别为关键路径(表 1)。各城市关键路径流量在 2000—2017 年间有 71.8% 呈现上升, 增幅最小的路径是唐山的环境-采掘业(23%), 而秦皇岛加工制造业-循环加工业路径上的流量增幅高达 30.4 倍, 成为京津冀地区物质流量增长最迅速的路径。也有少部分的关键路径的流量出现下降, 沧州的加工制造业-环境的降幅高达 76%, 成为研究期内流量下降最明显的路径。

表 1 京津冀 13 城市关键路径类型识别

Table 1 Critical path type identification of 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region

城市 City	关键路径 Key path	变化幅度/% Rangeability	城市 City	关键路径 Key path	变化幅度/% Rangeability
北京	E-C	187	衡水	E-MI	-15
	MA-E	-13		MA-E	-64
	T-E	263		MI-EC	-34
天津	MA-E	226	廊坊	E-MI	-20
	E-MI	313		MA-E	170
	E-C	93		MI-MA	1312
石家庄	MA-E	352	秦皇岛	MA-R	3035
	EC-MA	352		E-MI	-21
	E-MI	-10		MI-MA	-10
保定	T-E	1368	唐山	MA-E	137
	E-MI	-4		E-MI	23
	EC-T	1368		R-MA	903
沧州	MA-E	-76	邢台	MA-E	843
	E-MI	469		EC-MA	843
	T-E	171		E-MI	-30
承德	MA-E	1094	张家口	MA-E	335
	EC-MA	1094		EC-MA	335
	T-E	529		T-E	378
邯郸	MA-E	274			
	T-E	266			
	EC-MA	274			

E; 环境 Environment; A; 农业 Agriculture; MI; 采掘业 Mining; MA; 加工制造业 Manufacturing; EC; 能源转换 Energy conversion; H; 居民消费 Household; T; 交通运输业 Transportation; C; 建筑业 Construction; R; 循环加工业 Recycling; 由于加工制造业和交通运输业向环境排放的大气污染物主要依据能源消耗量估算得到, 因此 MA/T-E 的路径流量往往与 EC-MA/T 呈现一致变化

除保定外,其他城市的关键路径均与加工制造业有关,表明加工制造业部门的材料或能源使用以及污染物处理排放已成为京津冀地区最为关键的一类代谢过程。加工制造业-环境为除保定、秦皇岛外所有城市共有的关键路径,其中加工制造业过程的大气污染物排放,尤其是 CO₂ 等温室气体向环境的排放过程尤为突出,表明加工制造业大气污染物排放已经成为京津冀大部分城市需关注的物质代谢过程。存在加工制造业-环境这一关键路径的 11 个城市中,仅北京、沧州和衡水 3 市此路径上的物质流量有所下降,2017 年分别降为 2000 年的 87%、24% 和 36%,表明三者的加工制造业污染物排放问题已经得到了一定的疏解或控制。而其他 8 个城市加工制造业-环境路径上的物质流量呈现上升趋势,但不同城市的增长幅度差异明显,其中唐山的增幅最小(1.4 倍)而承德的增幅最大(10.9 倍)。除了加工制造业-环境这一关键路径外,能源转换-加工制造业也成为石家庄、承德、邯郸、邢台、张家口 5 市的关键路径,且均呈现出 2.7 倍以上的增幅,初始值较小的承德和邢台增幅甚至高达 8.4 倍以上,因此这些城市在未来的发展中要更加注重加工制造业生产过程对化石燃料的减量、高效利用,并积极推进清洁能源的替代使用。

除了围绕加工制造业的关键路径以外,集中于京津冀城市群中东部的天津、石家庄、保定、沧州、衡水、廊坊、秦皇岛、唐山、邢台 9 市的关键路径中还包含了环境-采掘业,这是由于采掘业从环境中获取金属、非金属矿物,且矿物单价质量相对较大,此代谢过程往往涉及较大的物质流量。天津、沧州和唐山 3 市的此路径流量整体呈现增长,增幅分别 3.1 倍、4.7 倍和 23%,其中前二者表现为持续增长态势,而唐山虽然后期的政策调控和产业技术升级导致本地开采规模出现小幅度回落,但仍未恢复到初期水平。除此以外,其他 6 个城市的环境-采掘业路径上的流量均呈现下降趋势。北京、保定、沧州、承德、邯郸、张家口 6 个城市的关键路径均包含交通运输业-环境,且流量均呈现较大的上升态势(增幅超过 2.6 倍),作为京津冀中部交通枢纽城市的保定甚至呈现超 10 倍的增幅,表明交通污染物排放也应成为这些城市的调控重点。值得一提的是,不同于其他任何城市,北京的关键路径包含了环境-建筑业,其流量高达城市总流量的 36.3%,在一定程度上可以说明北京持续的人口扩张所带来的住房和基础设施需求,可能已成为资源消耗的重要驱动力。

2.3 网络节点间的生态关系

从研究期内各类生态关系的数量可以看出(图 4),掠夺/控制关系是京津冀地区城市物质代谢节点间的主导生态关系,在各城市中的占比分布在 50% 至 61% 之间,其中邯郸和衡水的掠夺/控制关系比例最高,其次为廊坊、秦皇岛、张家口(均约占 60%),北京的占比最低;与掠夺/控制关系关联较为紧密的部门为环境,占掠夺/控制关系总数的 27%,其次为能源转换部门(25%)和加工制造业(22%)。这三个部门均为向内吸纳和向外输送物质较多的部门,因此更易与其他部门形成掠夺或控制关系。共生关系类型出现的频次(23%—35%)高于竞争关系(9%—22%),承德为共生关系数量比例最高的城市,最低则为秦皇岛。而竞争关系比例最高的城市为北京,最低为张家口。从部门类型来看,循环加工业是与共生关系联系最为紧密的产业,占共生关系总数的 33%;而与加工制造业相关的共生关系数量最少(14%),但竞争关系最多(占竞争关系总数的 31%),在一定程度上说明京津冀城市群的工业生产与其他产业部门之间有通过加强互利合作提高物质利用率的空间。此外,石家庄、承德、廊坊、秦皇岛、唐山、张家口 6 城市中有 12 个节点对出现了不稳定生态关系,占区域内生态关系总数的 2.6%,其中石家庄有 5 个,而其他城市均不超过 2 个,而这些不稳定生态关系中有半数与循环加工业相关,有望成为加强网络整体共生关系的重要突破口。

对比研究期前后的生态关系发现,2000—2017 年间京津冀地区共有 25.4% 的节点出现了生态关系的转变,其中与共生关系有关的转变最为关键。京津冀 13 城市中超过 56% 的转变与共生关系有关,其中 55.2% 表现为原有共生关系消失的劣性转变,多转变为掠夺/控制关系,而转变为竞争关系的情况仅不足 20%;44.8% 表现新增共生关系的良性转变,其中约 80% 由掠夺/控制关系转变而来。由于良性转变少于劣性转变,因此共生关系比例在 2000—2017 年间整体下降。京津冀 13 城市中,仅有邯郸和张家口两城市出现了共生关系数量的净增长,其中邯郸以 2 个共生关系的净增量成为网络共生性转变最为领先的城市。有 5 个城市的共生关系数量下降,其中秦皇岛并未出现新增共生关系,以高达 4 的净减值成为最急需改善生态关系的城市。

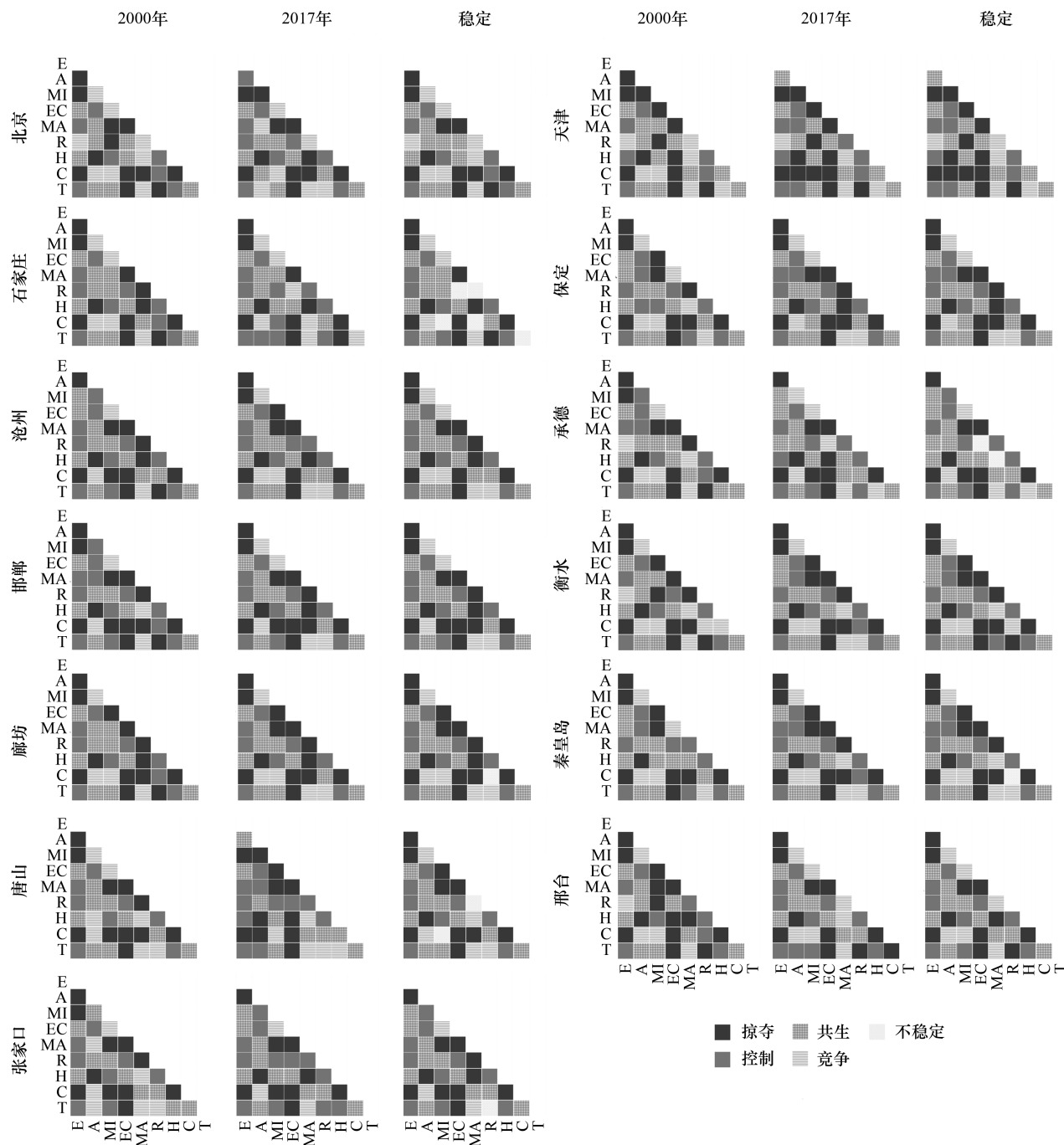


图4 京津冀 13 城市 2000 年、2017 年和研究期内稳定生态关系分布图

Fig.4 Distribution map of the ecological relationship in 2000 and 2017 and stable ecological relationship of 13 cities in Beijing-Tianjin-Hebei region

从 13 城市中的部门类型综合来看,与采掘业、建筑业或循环加工业 3 个节点相关的良性转变数量最多,均不少于 10 个。其中,建筑业以 6 个净增共生关系成为共生性提升最显著的节点,与循环加工业之间的共生关系数量增长最为显著,说明京津冀地区建筑业正逐渐走向资源循环节约和环境友好型发展。但除此以外,采掘业和循环加工业所关联的劣性转变也分别高达 12 个和 8 个,所以综合来看这两个节点的共生性并未明显提升,只是共生关系的关关节点发生了迁移。采掘业从与交通运输、加工制造等节点的共生转向环境和居民消费节点,同时与循环加工业之间存在各城市此起彼伏的共生关系变化;而循环加工业的共生关系则由集

中在采掘业和能源转换两个部门转向以建筑业和采掘业为主。除采掘业外,交通运输业的劣性转变也高达 12 个,二者共同成为涉及劣性转变最多的节点,但与采掘业不同,交通运输业仅涉及了与沧州采掘业和张家口农业相关的 2 个良性转变,因此以 10 个共生关系的净减量成为共生性下降最显著的部门。此外,农业和加工制造业这两个生产型部门也均有 10 个劣性转变,致使其共生关系数量分别净减了 3 个和 4 个,因此改善二者的在代谢网络中的共生性也值得关注。

3 讨论

目前城市代谢研究的计算大多在“黑箱”中完成,主要关注物质或能量的直接输入与输出,对中间过程的关注不足,所以通过调节代谢网络的内部迁移转化过程来优化整体城市代谢需要被当作研究着力点之一^[37-38]。Ravalde 和 Keirstead 通过 15 个全球城市的实证分析,同样指出黑箱指标所能揭示的规律十分有限,因为它们没有考虑到过程和系统内组分的细节变化^[39]。而本研究通过对各城市整体及关键路径流量大小和变化的对比,以及对部门间的生态关系的识别,可以有效揭示京津冀地区物质利用调控工作中的重点城市、代谢过程和部门,从而寻求可能的改进手段。

研究结果表明,在京津冀 13 城市均对外部资源具有较高依赖性的背景下,地区内部各城市之间相互的物质供应却并不活跃,因此建立城市间产业的优势互补,充分发挥各城市的产业专长,提升各城市对周边城市的物质供应能力,扩大废弃物、副产品的跨城市回收利用范围,将成为京津冀物质资源减量化和高效利用的有效途径。唐山、邯郸、天津等历年的流量均较大的城市,以及承德、秦皇岛、唐山等流量增长较快的城市,应成为京津冀地区物质代谢过程调控的重点关注对象。未来的相关调控措施与政策规划在力求促进其与周边城市资源互惠的同时,也应通过产业升级、奖惩政策干预等途径优先控制这些城市自身的生产生活资源消耗。此外,虽然首都北京的流量占比由 2000 年的第 4 位(10.7%)下降至 2017 年的第 6 位(6.2%),但这主要是由于受到产业转移和非首都功能疏解等政策的影响,并不能代表北京现存的产业已经达到了高效物质利用的水平,受人口因素影响较大的建筑业、交通等部门依旧较大的提升空间。

将表 1 中的关键路径结果进一步归纳可以发现,关键路径类型与城市的产业结构密切相关。由于京津冀各城市的支柱产业类别多为物耗能耗和污染物排放较为密集的产业,如天津的汽车制造产业,石家庄的纺织和制药产业,廊坊的金属加工和装备制造业,沧州的石油化加工制造业以及唐山高度集中的钢铁产业,因此本地区绝大部分城市均存在与加工制造业有关的关键路径。而与采掘业相关的关键路径数量同意也比较突出,这虽然主要受到矿物产品矿物单价质量相对较大这一特性的影响,但也与城市的产业特点存在一定关联。以环境-采掘路径流量呈现增长的 3 个城市为例,天津和沧州由于快速发展的汽车、五金、机电等制造业极大拉动了金属和非金属矿物需求,从而导致了开采规模的扩大;而唐山则主要因其具备传统优势的钢铁行业带来了巨大的矿产资源和化石燃料需求。由此可见,在优化产业结构的同时,进一步控制城市主导产业的资源消耗与污染物排放,将成为缩减代谢总量的重要突破口。但与此同时,研究结果显示不同城市的同类关键路径也往往存在流量变化趋势的差异,因此在实际的政策制定和管理调控工作中,对于流量处于迅猛上升阶段的城市(如承德、秦皇岛等),尽快降低加工制造业污染物排放的增长速度,使其早日实现与经济增长的脱钩成为当务之急;对于流量长期维持在较高水平的城市(如唐山、天津等),要尽快突破技术和管理瓶颈,实现资源能源消耗或污染物排放的减量化;而对于流量已经开始下降的城市(如衡水),要进一步发展已取得初步成效的技术和管理措施,努力维持下降水平,争取早日降低到较低水平并保持稳定。

与关键路径与产业结构的密切关系不同,节点间的生态关系更多地受到部门固有特征的影响。掠夺/控制关系占优势的 3 个部门中,环境通过初级产业将自然资源输入到城市系统中,又对城市系统所产生的废弃物和污染物起到容纳的作用,因此是掠夺/控制关系出现频率最高的部门;加工制造业是城市生产活动开展的主要产业,它需要上游部门提供大量的原材料和化石燃料以保障生产,同时它也向城市系统提供生产生活所需的工业产品,因此也对上下游产业分别起到明显的掠夺和控制作用;能源转换部门则担任了中转城市系统

内部能源物质的角色,也对其上下游的产业部门起到明显的控制或掠夺效应。共生比例最高的循环加工业则各部门产生的污染物和废弃物进行处理后排放到环境或转化为再生资源返回到代谢过程中,因此它与城市内其他部门容易形成互利共生的关系。同时,循环加工业相关的不稳定生态关系也最多,一是因其与能源转换业、交通运输业等部门无直接关联,因此生态关系往往更容易受到其他部门的间接影响而发生改变;二是因其与加工制造业和居民消费两个主要关联部门之间的物质转移关系受技术水平、政策法规甚至思想观念的影响较大,因此相比于其它节点对更加不稳定。但上述固有属性并不意味着当前京津冀物质代谢中各节点的生态关系无需改变或不可改变,根据研究结果,京津冀 13 城市的 468 个生态关系中,有超 1/4 在 2000 至 2017 年间发生了转变,且其中半数以上为涉及到共生关系的关键性转变;同时在 13 城市的稳定生态关系中,有 52.8% 的节点对在至少 1 个城市中出现过共生关系。这些数据均表明,当前部分非共生关系仍存在转变为共生关系的潜力,尤其是邯郸、衡水、秦皇岛等共生比例较低(均未超过 25%)的城市,以及承德、唐山等劣性转变较多的城市。因此,这些城市的部门间,尤其是农业、加工制造业、采掘业等生产型部门以及交通运输业等劣性转变较多的部门与其他部门间的共生性有望进一步提高,以改善城市和城市群代谢过程的资源利用效率。同时不稳定生态关系较多的循环加工部门也将成为提升代谢共生性的潜在突破口,可以通过提升技术水平和加强宣传教育等途径改善其与加工制造业和居民消费部门之间的共生性。

4 结论

本研究以京津冀 13 城市为例,在核算城市物质输入与输出的基础上,对代谢系统内部的具体路径和节点关系进行深入探究,并分析其内部代谢特征的变化,有效打开了城市代谢黑箱,发现京津冀地区物质代谢组分和环节中的潜在问题和提升空间;同时通过城市间的关联和对比有效揭示了地区整体性问题以及应优先关注的城市 and 部门,为京津冀地区的城市物质利用调控提供一定的理论依据和有效抓手。

从网络模拟的整体结果来看,京津冀地区的代谢流量绝大多数集中在各城市内部。13 个城市的代谢流量在 2000—2017 年间均呈现增长,其中,承德、秦皇岛和唐山增长最为迅速,在京津冀地区资源利用调控工作中应重点关注,而只有衡水的流量在研究期内呈现下降趋势。各城市的关键路径中有近 3/4 呈现流量上升,且多集中于加工制造业,此外环境-采掘业和交通运输业-环境类的关键路径数量也较多。掠夺/控制关系是京津冀 13 城市的主导关系类型,其次为共生关系;与加工制造业相关的共生关系数量最少,因此加工制造业是京津冀物质资源利用减量化和合理化调控的关键部门。总体来看 2000—2017 年间京津冀整体共生关系比例略有下降,农业、采掘业、加工制造业 3 个生产部门以及共生关系下降最多的交通运输部门之间,以及它们与其他部门间的物质利用关系改善可以作为调控的突破口。

此外,本研究还存在一些不足。由于统计数据的缺陷性,网络模型量化中的一些实物量需要通过折算或估算获得,同时基于部门的物质供需差值对物质分配流向进行了假设,这两个问题导致研究中各网络节点之间的直接流量与实际情况之间可能存在一定偏差。这些问题需要通过未来的实际调研或其他数据获取途径来修正,以减少基础数据的误差,从而使研究结果更具有科学性和针对性。此外,目前对于城市代谢部门的划分还比较粗糙,难以在调控政策上进行更有具体行业针对性的建议。此后的研究可以考虑在进一步挖掘行业数据的基础上,对个别部门尤其是加工制造业继续进行细分,使研究所得出的结论更精准地服务于调控政策的制定。

参考文献(References):

- [1] United Nations, Department of Economic and Social Affairs. World Urbanization Prospects 2018. New York: UN-DESA, 2018.
- [2] Kennedy C A, Stewart I, Facchini A, Cersosimo I, Mele R, Chen B, Uda M, Kansal A, Chiu A, Kim K G, Dubeux C, Lebre la Rovere E, Cunha B, Pincetl S, Keirstead J, Barles S, Pusaka S, Gunawan J, Adegbile M, Nazariha M, Hoque S, Marcotullio P J, González Otharín F, Genena T, Ibrahim N, Farooqui R, Cervantes G, Sahin A D. Energy and material flows of megacities. PNAS, 2015, 112(19): 5985-5990.
- [3] United Nations, Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Integrated resource management for sustainable and inclusive cities: policy opportunities for the new urban agenda. Bangkok: UN-ESCAP, 2016.

- [4] 国家统计局. 2019 年国民经济和社会发展统计公报. 北京: 国家统计局, 2020.
- [5] Wolman A. The metabolism of cities. *Scientific American*, 1965, 213: 179-190.
- [6] 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.
- [7] Zhu X T, Mu X Z, Hu G W. Ecological network analysis of urban energy metabolic system—a case study of Beijing. *Ecological Modelling*, 2019, 404: 36-45.
- [8] Chen S Q, Xu B, Chen B. Unfolding the interplay between carbon flows and socioeconomic development in a city: what can network analysis offer? *Applied Energy*, 2018, 211: 403-412.
- [9] Zhang Y, Zhang X L, Zhao X Y. Analysis of the ecological relationships and hierarchical structure of Beijing's nitrogen metabolic system. *Ecological Indicators*, 2018, 94: 39-51.
- [10] Pan J J, Ding N, Yang J X. Changes of urban nitrogen metabolism in the Beijing megacity of China, 2000-2016. *The Science of the Total Environment*, 2019, 666: 1048-1057.
- [11] 武昊彤, 冼超凡, 刘晶茹. 城市代谢效率研究的热点识别与综合效率实证研究. *生态学报*, 2021, 41(22): 8709-8717.
- [12] Atkins F, Flügel T, Hugman R. The urban water metabolism of Cape Town: towards becoming a water sensitive city. *South African Journal of Science*, 2021, 117(5/6): 8630.
- [13] Pardo Martínez C I, Alfonso Piña W, Facchini A, Cotte Poveda A. Trends and dynamics of material and energy flows in an urban context: a case study of a city with an emerging economy. *Energy, Sustainability and Society*, 2021, 11(1): 1-15.
- [14] 孙静亚, 韩厚峰, 张萍, 刘俊稚, 王攀峰. 基于物质流分析的我国磷资源开发利用研究. *国土与自然资源研究*, 2020(5): 68-71.
- [15] 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.
- [16] Ngo N S, Pataki D E. The energy and mass balance of Los Angeles County. *Urban Ecosystems*, 2008, 11(2): 121-139.
- [17] Rosado L, Niza S, Ferrão P. A material flow accounting case study of the Lisbon metropolitan area using the urban metabolism analyst model. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(1): 84-101.
- [18] D'Amico G, Arbolino R, Shi L, Yigitcanlar T, Ioppolo G. Digitalisation driven urban metabolism circularity: a review and analysis of circular city initiatives. *Land Use Policy*, 2022, 112: 105819.
- [19] 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.
- [20] Chen I C, Cheng K L, Ma H W, Hung C C W. Identifying spatial driving factors of energy and water consumption in the context of urban transformation. *Sustainability*, 2021, 13(19): 10503.
- [21] Chen S Q, Chen B, Feng K S, Liu Z, Fromer N, Tan X C, Alsaedi A, Hayat T, Weisz H, Schellnhuber H J, Hubacek K. Physical and virtual carbon metabolism of global cities. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 182.
- [22] Jin Y T, Wang H M, Wang Y F, Fry J, Lenzen M. Material footprints of Chinese megacities. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 174: 105758.
- [23] Gao H, Tian X, Zhang Y, Shi L, Shi F. Evaluating circular economy performance based on ecological network analysis: a framework and application at city level. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, 168: 105257.
- [24] Liu X L, Guo P B, Yue X H, Qi X Y, Guo S F, Zhou X J. Measuring metabolic efficiency of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration: a slacks-based measures method. *Resources Policy*, 2021, 70: 101928.
- [25] Cao X J, Su M R, Liu Y F, Hu Y C, Xu C, Gu Z H. Is the water system healthy in urban agglomerations? A perspective from the water metabolism network. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(9): 6430-6439.
- [26] Patten B C, Higashi M, Burns T P. Trophic dynamics in ecosystem networks: significance of cycles and storage. *Ecological Modelling*, 1990, 51(1/2): 1-28.
- [27] Zhai M Y, Huang G H, Liu L R, Zhang X. Ecological network analysis of an energy metabolism system based on input-output tables: model development and case study for Guangdong. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 434-446.
- [28] Wang X J, Li Y X, Liu N Y, Zhang Y. An urban material flow analysis framework and measurement method from the perspective of urban metabolism. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 257: 120564.
- [29] 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.
- [30] (奥)陶在朴. 生态包袱与生态足迹: 可持续发展的重量及面积观念. 北京: 经济科学出版社, 2003.
- [31] Eurostat. Economy-Wide Material Flow Accounts (EW-MFA) Compilation Guide. Luxembourg: Statistical Office of the European Communities, 2013.
- [32] Eurostat. Economy-Wide Material Flow Accounts (EW-MFA) Manual. Luxembourg: Statistical Office of the European Communities, 2016.
- [33] Wang Y F. An industrial ecology virtual framework for policy making in China. *Economic Systems Research*, 2017, 29(2): 252-274.
- [34] Wang Y F, Geschke A, Lenzen M. Constructing a time series of nested multiregion input - output tables. *International Regional Science Review*, 2017, 40(5): 476-499.
- [35] Fath B D, Borrett S R. A MATLAB® function for network environ analysis. *Environmental Modelling & Software*, 2006, 21(3): 375-405.
- [36] Fath B D. Network mutualism: positive community-level relations in ecosystems. *Ecological Modelling*, 2007, 208(1): 56-67.
- [37] Zhang Y. Urban metabolism: a review of research methodologies. *Environmental Pollution: Barking, Essex*, 1987, 2013, 178: 463-473.
- [38] Song T, Yang Z S, Chahine T. Efficiency evaluation of material and energy flows, a case study of Chinese Cities. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 112: 3667-3675.
- [39] Ravalde T, Keirstead J. Comparing performance metrics for multi-resource systems: the case of urban metabolism. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 163: S241-S253.