

DOI: 10.5846/stxb202103310834

刘凝音, 张妍, 李彦显, 王心静. 从城市到城市群: 京津冀物质代谢特征及影响因素. 生态学报, 2023, 43(4): 1326-1337.

Liu N Y, Zhang Y, Li Y X, Wang X J. From cities to agglomeration: characteristics and driving factors of material metabolism in the Beijing-Tianjin-Hebei Region. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(4): 1326-1337.

从城市到城市群: 京津冀物质代谢特征及影响因素

刘凝音^{1,2}, 张妍^{1,2,*}, 李彦显^{1,2,3}, 王心静^{1,2}

1 北京师范大学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

3 荷兰格罗宁根大学能源与可持续发展研究所, 格罗宁根 9747 AG

摘要: 随着城市化进程和一体化战略的持续推进, 城市管理者急需了解城市规律以消减生态-资源-环境挑战, 并提供坚实物质基础。以京津冀城市群及其组成城市为研究对象, 创新性地从城市群和城市两尺度核算并分析了 2000—2017 年物质消耗状况及变化趋势, 识别并对比了主要贡献物质、贡献部门和影响因素。研究表明: (1) 研究期间, 京津冀城市群物质消耗量总体上升。从物质类型看, 主要由非金属矿物(>34.2%)拉动; 从产业结构看, 受到工业部门(>58%)绝对影响。首要驱动因素为经济规模(>50%)。 (2) 各城市物质消耗量与城市群较为类似, 总体也呈增长态势, 几乎均受到非金属矿物和工业部门驱动, 且经济规模起到正向促进作用, 不同的是物质消耗强度作用类型多样, 且产业结构效应在城市中贡献更为突出。研究结果在一定程度上明确了城市及城市群代谢的规律, 能够为优化资源利用效率和资源配置结构奠定基础, 为城市及城市群生态管理与调控提供切实可行的落力点。

关键词: 城市代谢; 物质流分析; 对数平均迪氏分解模型; 京津冀城市群

From cities to agglomeration: characteristics and driving factors of material metabolism in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

LIU Ningyin^{1,2}, ZHANG Yan^{1,2,*}, LI Yanxian^{1,2,3}, WANG Xinjing^{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

3 Energy and Sustainability Research Institute Groningen, University of Groningen, Groningen, 9747 AG, Netherlands

Abstract: With continuous urbanization and the integration strategy, the managers urgently need to meet the ecological-resource-environmental challenges, so as to provide strong material support for eco-social development. This study took the Beijing-Tianjin-Hebei region and its cities as example, calculated and analyzed the material consumption status and change trends of the two scales from 2000 to 2017, furthermore identified and compared the main material types, sectors and important drivers. The results showed that during the study period, the material consumption of the Beijing-Tianjin-Hebei region increased overall, mainly came from non-metallic minerals (over 34.2%) from perspective of material types and manufacturing sector (more than 58%) from the perspective of sectors, and economy size effect was the primary driver (over 50%). The cities, overall, showed similar trends as the region. The material consumptions increased in general, nearly all cities' material consumptions were pulled up by non-metallic materials and manufacturing sector, while economy size presented positive effects. Differently, the consumption intensity effect had more significant inhibitory effect on the consumption growth of the region than each city, and the industrial structure effects on the urban scale were more prominent

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: 2021-03-31; **网络出版日期:** 2022-10-13

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

than the others. The results clarify the metabolism status of the Beijing-Tianjin-Hebei region and its cities to a certain extent, which can lay a foundation for optimizing resource efficiency utilization and reallocation, and can provide a practical and feasible impact for the ecological management and regulation in the region.

Key Words: urban metabolism; material flow analysis; logarithmic mean division index; the Beijing-Tianjin-Hebei region

城市在现代社会扮演着日趋重要的角色。近几十年来,城市化进程被显著推动,农村地区进一步向城市地区结构转型^[1],该过程将不可避免地带来城市基础设施的增加、资源的掠夺和污染物的排放,给本就脆弱的城市生态系统带来额外压力。城市群是城市化发展的一种重要形态,相较单个城市,其空间范围更大,内部各城市联系紧密且具有不同的功能定位,因此关注城市群和城市两个尺度的物质资源利用特征有助于帮助城市更好地错位发展,实现更全面和一体化的管理。以中国京津冀城市群为例,它包括了北京、天津、石家庄等在内 13 个城市,2021 年它以全国 2.3% 的土地容纳了 8% 的人口,创造出 8.4% 的国内生产总值^[2];这样高度集中的人口和经济活动,导致京津冀地区资源约束日益趋紧,环境承载能力逼近上限^[3],为城市可持续发展带来巨大挑战。因此,城市管理者急需通过合理的手段消减因物质利用的规模和结构产生的生态-资源-环境问题,并为经济社会的发展提供坚强物质支持,这离不开对城市规律的理解与把控。

“城市代谢”这一概念由 Wolman^[4]正式提出,他将城市喻为生命体,城市代谢是系统中物质、能量供给以及产品、废物输出的过程。早期研究中,学者们多使用线性方法进行分析量化^[4-5];随着认识的不断深入,物质流方法(MFA)被逐渐应用以解释资源的存储和流动^[6-7],其输入输出的环形结构可以更好反映代谢间的联系^[8-9]。为推进物质流分析的标准化工作,欧盟统计局(Eurostat)于 2001 年出版了指导手册^[10]并不断更新^[11]。现有物质流研究大多基于这一框架展开,因其便于进行成果对比和解读。如 Rosado 等^[12]对比了瑞典三个不同类型大都市的八种不同代谢指标,探究了其对城市弹性的潜在影响;Bahers 等^[13]分析了两个法国城市的新陈代谢状况,以了解中等城市的功能;Plank 等^[14]在传统欧盟框架中引入材料加工阶段,分析了 116 年间 177 个国家与建筑相关的物质流动情况。总体来说,尽管现有物质流研究呈现出由单一对象转向多个对象的转变,但仍然缺乏尺度间尤其是城市群整体与内部多城市间的比较分析。

识别主要社会经济影响因素是解决城市代谢相关问题的关键,现有研究大多采用指数分解方法实现这一目标,平均迪氏指数法(LMDI)是其中相对有说服力的一种,其数据需求量小、适用性强,可将余项完全分解^[15]。学者多关注于城市中或具有高消耗、高污染特征^[16-17],或与居民生活密切相关^[18-19]的某一特定行业。LMDI 被广泛应用于能源消费和碳排放领域,如刘源等^[20]分析了厦门市产业部门和家庭消费的能源活动和非能源活动影响;He 等^[21]对中国电力部门碳排放的 6 个供给侧和 3 个需求侧因素开展了详细分析。除此之外,LMDI 研究也逐渐发展到粮食生产^[22-23]、污染物^[24-25]等特定领域。近年来,LMDI 研究也开始关注多个部门组成的城市整体社会经济因素影响^[26],如 Li 等^[27]基于北京城市代谢核算结果确定了其结构、强度、规模等方面的潜在驱动力。但现有研究仍然以能源消费和碳排放为主,其他主题的分析相对较少,城市间的比较研究也不多见。

为此,本研究以京津冀城市群及其组成的 13 个城市作为研究对象,尝试将标准化物质流分析模型补充和细化到部门,将多类别物质纳入到核算项目。针对最具代表性的代谢核算指标——物质消耗量,分析其物质消耗结构和部门消耗贡献等特征,在此基础上构建因素分解模型计算驱动因素贡献率。分析多个城市中多行业、多物质的代谢过程,有助于理解不同发展阶段城市的资源利用特征,全景展现城市的物质总量特征和环境压力;将影响物质消耗的变量进行因素分解,能够为优化资源利用效率、结构奠定基础,为不同层次的生态管理与调控提供切入点。

1 研究方法

1.1 物质代谢核算

准确量化一个城市/区域的物质输入、输出或消耗规模,分析其物质消耗结构特征,是诊断城市/区域代谢

过程是否顺畅、是否健康的重要基础。参考欧盟制定的国家尺度物质流核算框架^[10-11]及团队先前建立的标准化框架^[28],将城市/区域划分为 8 个不同的代谢主体/部门(表 1),建立基于部门尺度物质流核算的分析框架(表 2),明确多种物质在城市/区域的输入、转化和输出过程,并根据各具体物质的平衡关系计算物质消耗量。

表 1 物质代谢部门划分及内容

Table 1 Division and content of material metabolism sectors

部门 Sectors	内容 Contents
农业 Agriculture	农林牧渔业
采掘业 Mining	矿物开采和冶炼,化石燃料开采
能源转换 Energy conversion	本地开采和外部输入的化石燃料加工并分配到其他各部门
工业 Manufacturing	系统内所有初级和高级加工及制造行业
循环加工业 Recycling	对废弃物和污染物进行处理、循环和处置
居民消费 Household consumption	城市居民人口对原产品和成品的消耗
建筑业 Construction	建筑物和其他市政工程的建造和拆除
交通运输业 Transportation	人口及货物的交通运输服务

表 2 城市/区域物质输入输出核算项目

Table 2 City/Region Material Input and Output Accounting Items

类别 Classification	项目 Items	涉及内容 Contents
物质输入 Material inputs	生物质	农林牧渔等生物质产量
	化石燃料	原煤、原油、天然气
	金属矿物	铁矿石和有色金属矿物
	非金属矿物	工业矿物和建筑材料
	平衡项	氧气、二氧化碳、水蒸气
物质输出 Material outputs	进口或调入	原材料、成品、半成品及其他产品
	大气污染物	SO ₂ 、CO ₂ 、NO _x 、烟尘、粉尘
	水体污染物	化学需氧量、氨氮排放量、石油类、挥发酚等
	固体废弃物	工业固体废弃物、城市生活垃圾、建筑垃圾等
	耗散性物质	化肥、农药、农用塑料薄膜
	平衡项	氧气、二氧化碳、水蒸气
	出口或调出	原材料、成品、半成品及其他产品

本文核算所需的基础数据来自 13 个城市的统计年鉴/经济统计年鉴、《中国统计年鉴》、《中国矿业年鉴》、《河北经济年鉴》、《河北农村统计年鉴》,以及 EPS 数据平台的中国区域经济数据库、中国城乡建设数据库等。收集得到的原始数据可能存在部分数据无法直接与输入输出项目相匹配的情况,可利用文献调研得到的转换系数将原始数据转换为重量单位,如工业生产的原材料消耗可依据产品的产量借助中国实物型投入产出表进行计算;人均食物消耗和耐用品消耗等资源或产品数据以经济价值量表征,需要借助商品的市场价格来折算重量。对于个别缺失数据,可根据前后相邻年份的数据用插值法估算;较多缺失数据则选取经济人口规模类似的其他城市,根据人口或行业产值折算。本研究选取的详细指标和方法可参见团队先前研究成果^[28]。区域数据由各城市数据加和得到。

通过物质流核算可获得多个评估指标,来反映城市/区域的物质输入、输出或消耗状况。进入(本地开采及外部调入)城市/区域的物质中,仅有部分被消耗利用(直接使用,或加工转化形成的产品),剩余部分(未使用和加工转化形成的产品)则被调出到其他城市,因此单纯的物质输入和输出指标并不能准确反映城市/区域的物质利用情况。这一过程中,直接物质消耗(DMC)作为衡量城市/区域物质消耗状况的重要指标,体现了城市生存需求和生产需求的双重属性,近年来越来越在物质流分析中受到重视,这一指标是由统计资料直

接给出的物质消耗量(如:居民消耗粮油菜肉蛋奶)及由生产产品量计算得到的原材料量(如:工业产品所需砂石木材)各条目加和得到。若存在物质不足或过剩情况,则视为调入或调出,其公式满足:本地生产/开采量+调入量=消费量+调出量^[29]。

核算框架采用“自下而上”的方式,首先分别核算各类物质的部门消耗量,然后加和获得 DMC 指标。因此,在分析物质消耗量变化的基础上,可以量化部门的贡献率,以识别对城市/区域物质消耗变化影响较大的部门;也可以解析 DMC 的物质结构特征,从而识别城市/区域运转过程中依赖性较大的资源。

1.2 驱动因素分解

在物质核算的基础上,识别城市/区域物质消耗的关键驱动因素,有助于定位物质消耗调控的关键切入点。本文采用对数平均迪氏指数分解(LMDI)方法,将影响城市/区域物质消耗的因素分解为物质消耗结构、物质消耗强度、产业结构、经济规模和人口规模 5 项,分析各影响因素对城市/区域物质消耗的促进或抑制作用,并量化其贡献率^[21]。城市/区域在第 t 年的物质消耗量 M^t 可以表示为:

$$M^t = \sum_{ij} M_{ij}^t = \sum_{ij} \frac{M_{ij}^t}{M_i^t} \times \frac{M_i^t}{GDP_i^t} \times \frac{GDP_i^t}{GDP^t} \times \frac{GDP^t}{P^t} \times P^t$$

其中, t 表示年份, i 表示产业部门序号, j 代表物质类别, M^t 代表部门 i 在第 t 年的物质消耗总量, M_{ij}^t 表示部门 i 在第 t 年所消耗的 j 类物质质量, GDP_i^t 代表 i 部门在第 t 年的国内生产总值, GDP^t 代表第 t 年的国内生产总值, P^t 代表第 t 年的人口数。上述公式可被改写为:

$$M^t = \sum_{ij} M_{ij}^t = \sum_{ij} MS_{ij}^t \times MI_i^t \times S_i^t \times R^t \times P^t$$

其中, MS_{ij}^t 是物质消耗结构,为第 t 年 i 部门 j 类物质消耗量占物质消耗总量的比例, MI_i^t 为第 t 年 i 部门的物质消耗强度, S_i^t 是产业结构,为 i 部门在 t 年的经济产值占比, R^t 为第 t 年的人均总产值, P^t 为第 t 年的人口数。因此,从基准年(0)到目标年(t)的物质消耗量变化可以表示为公式:

$$\Delta M_{tot} = M^t - M^0 = \Delta M_{MS} + \Delta M_{MI} + \Delta M_S + \Delta M_R + \Delta M_P$$

其中, ΔM_{tot} 表示 0— t 年物质消耗量的变化量; ΔM_{MS} 、 ΔM_{MI} 、 ΔM_S 、 ΔM_R 和 ΔM_P 分别表示物质消耗结构、物质消耗强度、产业结构、人均 GDP 和人口规模对城市物质消耗量变化的影响程度。对各因素分解如下:

$$\begin{aligned} \Delta M_{MS} &= \sum_{ij} \frac{M_{ij}^t - M_{ij}^0}{\ln M_{ij}^t - \ln M_{ij}^0} \ln \left(\frac{MS_{ij}^t}{MS_{ij}^0} \right) \\ \Delta M_{MI} &= \sum_{ij} \frac{M_{ij}^t - M_{ij}^0}{\ln M_{ij}^t - \ln M_{ij}^0} \ln \left(\frac{MI_i^t}{MI_i^0} \right) \\ \Delta M_S &= \sum_{ij} \frac{M_{ij}^t - M_{ij}^0}{\ln M_{ij}^t - \ln M_{ij}^0} \ln \left(\frac{S_i^t}{S_i^0} \right) \\ \Delta M_R &= \sum_{ij} \frac{M_{ij}^t - M_{ij}^0}{\ln M_{ij}^t - \ln M_{ij}^0} \ln \left(\frac{R^t}{R^0} \right) \\ \Delta M_P &= \sum_{ij} \frac{M_{ij}^t - M_{ij}^0}{\ln M_{ij}^t - \ln M_{ij}^0} \ln \left(\frac{P^t}{P^0} \right) \end{aligned}$$

ΔM_{MS} 、 ΔM_{MI} 、 ΔM_S 、 ΔM_R 和 ΔM_P 可反映各影响因素对城市/区域物质消耗的贡献程度:其正值表示此因素促进城市/区域物质消耗增长,负值则表示此因素抑制城市/区域物质消耗的增长,数值越大表示贡献程度越大,作用效果越强。

2 结果与讨论

2.1 各城市及城市群物质消耗特征

以京津冀城市群为例,采用上述方法解析其物质消耗特征。结果表明:2000—2017 年间京津冀城市群的

DMC 总体呈现上升趋势(图 1)。2000—2011 年间以 37.0% 的年均变化率持续增长;2011 年后平稳波动,年均变化率为-0.17%。就组成城市群看,唐山市、邯郸市和天津市的 DMC 对城市群整体物质消耗量贡献较大,所占比重始终大于 10%;北京市也有一定贡献,但占比不断下滑(由 12.6% 降至 7.7%),而其余城市占比始终不足 10%。同时,承德市、秦皇岛市和唐山市 DMC 增长明显(首末增幅分别为 7.4 倍、7.3 倍和 9.0 倍),三者占比在研究期间均实现了较明显的增长(分别由 4.0% 增至 6.8%、由 1.8% 增至 3.0%、由 15.5% 增至 31.0%),在城市群中的作用日趋重要。

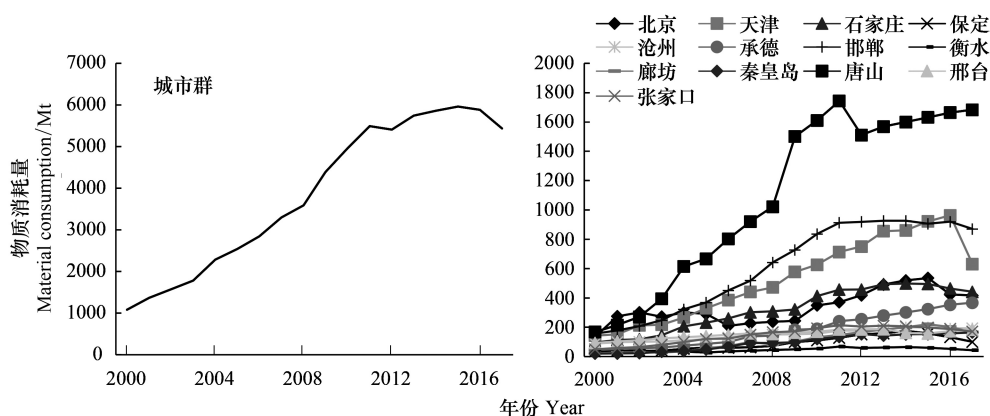


图 1 京津冀城市群及各城市物质消耗量

Fig.1 The material consumption of the Beijing-Tianjin-Hebei region and that of each city

从城市群层面看,非金属矿物消耗量始终占据着京津冀城市群物质消耗量的最大比重(不低于 34.2%),一直保持着 24.3% 的年均增速,仅最后两年稍有回落,是影响城市群 DMC 变化的决定性因素(图 2)。同时,金属矿物消耗量所占比重也有明显增长,除 2008—2012 年间的波动外,其余年份的年均增速大致为 59.6%,所占比重也总体呈现增长趋势(从 12.8% 增长至 28.4%),对城市群 DMC 增长起到一定促进作用。化石燃料、工业产品、生物质和再生资源的消耗量虽然有所增长,但因增幅较小或初始占比不大,导致其在整体 DMC 中的占比不断减少(末年低于 16%),影响作用较为有限。

从城市层面看,京津冀所有城市 DMC 的变化也受到非金属矿物消耗的有力驱动。研究期间,天津市、石家庄市、保定市、沧州市、邯郸市、廊坊市、邢台市和张家口市 DMC 呈现出先增后减的趋势,这与城市群 DMC 变化态势大致对应。除张家口市(非金属消耗量低于 28%)和沧州市外(非金属消耗量低于 33%),其余 5 个城市非金属矿物占比始终不低于 30%,与城市群相当。不同的是,这些城市中的天津市、邯郸市、廊坊市和邢台市 DMC 增长不仅依赖于非金属矿物,还依赖于金属矿物的消耗,因为这些城市大力发展先进制造业,有效承接了从北京转移出的产业,形成了各具特点的支柱产业,包括天津市的汽车制造业、邯郸市的装备制造业、廊坊市的金属加工和装备制造业,以及邢台市的装备制造业。金属矿物在 4 城市的消耗占比最高可达 35.7%、33.6%、44.4% 和 34.1%,略高于城市群平均水平,且研究期间前 3 城市金属矿物消耗比重不断提高,而邢台市不断降低,这是因为邢台市着力进行传统产业的改造提升,要求钢铁工业做专做精做洁,在一定程度上放缓了金属矿物消耗量的增长;石家庄市、保定市、沧州市和张家口市已形成较为成熟的高能耗密集产业,如石家庄市的纺织和制药产业,保定市的汽车和机电制造业,沧州市的石油化工业和张家口的能源和机械制造业,因此 DMC 还依赖于化石燃料的消耗,占比最高可达 30.4%、44.5%、46.1% 和 44.1%。承德市、秦皇岛市和唐山市的 DMC 除个别年份略有波动外(尤其是唐山市 2009—2011 年),大致呈现逐年增长态势。这 3 个城市的物质消耗结构各不相同,承德市煤炭开采和洗选业和非金属矿物制品业等高耗能行业贡献明显,因此其 DMC 以化石燃料和非金属矿物为主导,二者占比均不断增长,分别不低于 25.7% 和 16.6%;装备制造、食品加工、玻璃制品、金属冶炼是秦皇岛市四大支柱产业,其 DMC 则更多依赖于非金属矿物的变化,尽管其占比不断

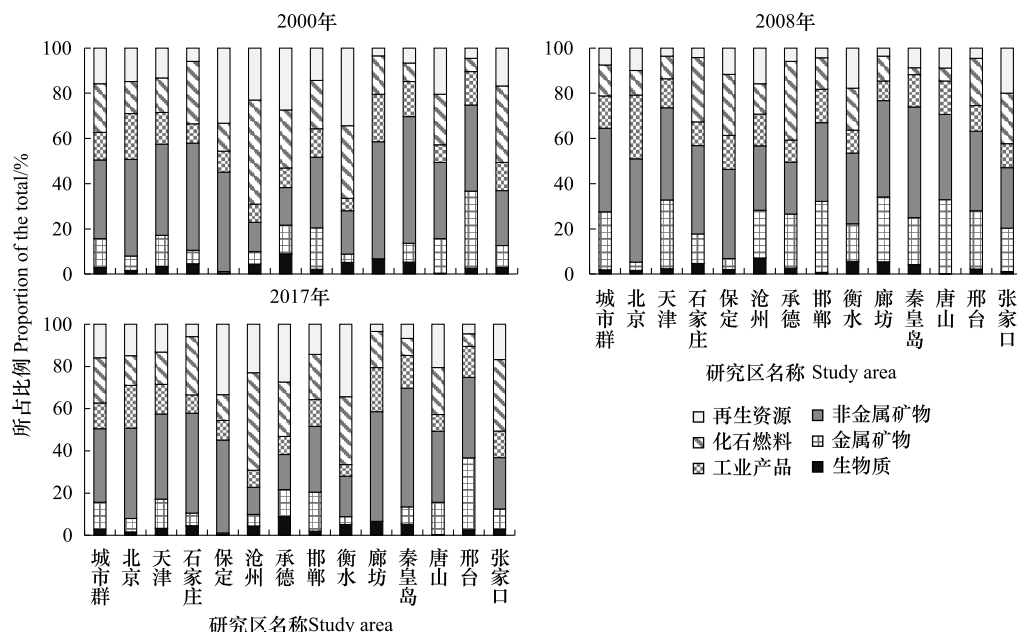


图2 京津冀城市群及各城市物质消耗结构

Fig.2 Material consumption structure of the Beijing-Tianjin-Hebei region and that of each city

下降,但始终不低于38.3%;唐山市拥有钢铁、石化、高端装备制造等重化工业,其DMC变化则很大程度上取决于非金属矿物和金属矿物,前者占比始终不低于30%,后者增长迅速,2017年最终达37.7%,与城市群DMC物质组成较为类似。此外,北京市与衡水市DMC始终处于剧烈的波动状态,前者人口众多,制造业发展较为成熟,以非金属矿物(占比始终不低于35%)和工业产品(占比最高可达49.5%)的消耗为主导,后者产业基础良好,主导产业包括装备制造业、功能材料业、食品医疗业和纺织家居业,故受到非金属矿物(占比最高可达44.2%)和化石燃料消耗量(占比最高可达37.4%)的影响。

从城市群层面看,就物质消耗的部门而言,京津冀城市群DMC受工业物质消耗量的影响最大(图3),始终不低于58%,其所占比重不断扩大,最高接近80%。具体而言,工业物质消耗量的变化趋势以2011年为界,经历了先加速后平稳的变化趋势,前期(2000—2011年)年均变化率高达53.4%,而后期(2012—2017年)年均变化率仅为0.7%。建筑业和循环加工业的物质消耗量占比次之(最高为18.8%和15.8%),也对城市群DMC增长起到一定促进作用。

从城市层面看,北京市建筑业部门在DMC中占比不低于40%,最高可达85%,是北京市DMC变化的绝对主导力量,这是因为北京对非首都功能进行疏解,将高消耗的制造业转移至津、冀两地,同时对原有设施进行改建、扩建等以满足日益增长的人口。除北京市外的其余城市,DMC主要由工业部门贡献,这与城市群的规律一致。其中,承德市、邯郸市、秦皇岛市、石家庄市和唐山市这5个传统制造业城市的工业物质消耗量占比不断扩大,且占比始终不低于50%。与此同时,承德市着力于重点发展文化旅游、健康养老等产业,秦皇岛市不断开发具有滨海、生态、旅游特色的第三产业,邯郸市和唐山市的支柱产业钢铁业本身具有相较其他产业更高的高污染特性,因此这4个城市较为注重循环加工业的培育与发展,其物质消耗也对城市DMC增长有一定影响(最高分别为27.4%、15.7%、14.3%和24.3%),相当于城市群循环加工业占比最高水平的1.7倍、1倍、0.9倍和1.3倍。此外,廊坊市区位优势明显,紧邻京、津两地,着力提升非首都功能疏解和京津产业转移承接能力,工业增长迅猛,虽然首年占比仅为14.5%,但末年达到了91.1%。廊坊市和秦皇岛市致力于突出交通地位、加快转型升级,近年来开展了一系列基础设施建设,导致建筑业物质消耗量同样拥有一定占比(最高分别为66.4%和32.9%),有力促进着城市DMC增长,相当于京津冀城市群建筑业占比最高水平的3.5倍和

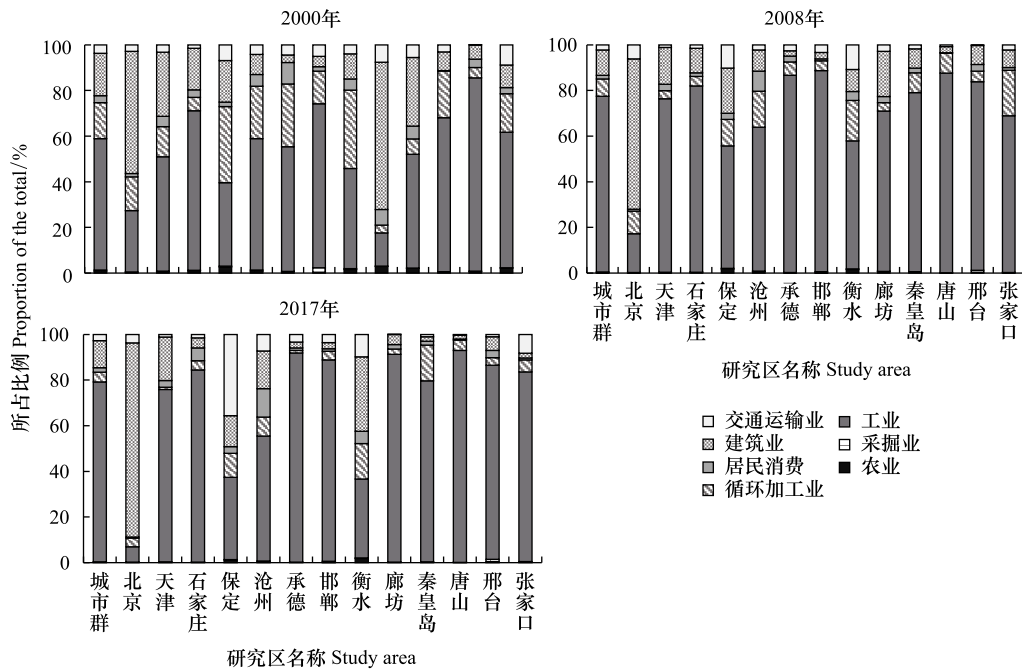


图3 京津冀城市群及各城市物质消耗部门贡献

Fig.3 Sectoral consumption structure of the Beijing-Tianjin-Hebei region and that of each city

1.5 倍。由此可知秦皇岛市与城市群部门消耗特征较为相似。

保定市与天津市的工业物质消耗占比先增后减,二者贡献量分别不低于 30% 和 50%,不同的是,保定市因具有相对优越的区位优势,与京津成三足鼎立之势,致力于全国性综合交通枢纽和城市群“1 小时通勤圈”,故其 DMC 受交通运输业消耗(最高 35%)影响较大;而天津市由于建立了渤海新区,承载了来自北京的大量人口,因此建筑业部门(最高 28%)也对城市整体物质消耗产生一定影响。工业部门物质消耗在沧州市和邢台市变化不大,这 2 个城市虽然正经历产业的转型升级与集成,但工业总体的消耗量较为稳定,前者在后期略有下降,后者则在后期呈现先减后增的波动,在 2 城市中所占比例始终高于 54% 和 74%,而其余部门占比始终不超过 25% 和 15%。衡水市资源丰富、增长潜力较大,尽管第二产业已取得长足发展,但农业基础雄厚,故工业物质消耗在 DMC 中的占比相较于其他城市略低,但始终不低于 34%,呈现减-增-减的趋势,同时衡水市 DMC 还受到循环加工业(占比不断下降,最高 34.4%)和建筑业(占比不断上升,最高 32.6%)影响。张家口市经济规模在河北省内相对较弱,近年来持续发展能源和机械制造业,工业物质消耗占比始终不低于 60%,呈现出增-减-增的趋势,情况与衡水市正好相反,其余部门占比始终不高于 22%。

2.2 物质消耗的影响因素识别

依据规划执行期,将每 5 年视为一个阶段,分析各阶段城市群物质消耗的影响因素(图 4),城市尺度结果见附录。第一阶段是中国加入 WTO 后的首个五年(2000—2005),城市群 DMC 整体增幅高达 1.3 倍;第二阶段(2005—2010)是 2008 年北京奥运会召开前后的五年,DMC 整体增幅虽然相较第一阶段有所减缓,但依然接近 1 倍(98.7%);第三阶段(2010—2015)加速推进京津冀协同发展,但城市群 DMC 增速较前两阶段相比较慢,整体增幅仅为 20.2%。

经济规模是城市群 DMC 增长的首要驱动力,在三个研究时段均起到正向促进作用,贡献量先增后减,始终大于 50%。约 3/4 的城市驱动规律与城市群类似,包括天津市、保定市、承德市、邯郸市、衡水市、秦皇岛市、石家庄市、唐山市和张家口市,贡献量先增后减,且贡献率始终大于 54%;9 个城市中的 5 个城市与城市群规律一致,贡献率在三阶段均不断上升,而天津市与保定市的贡献率变化呈先增后减趋势,秦皇岛市先减后增,承德市不断下降。其余 4 个城市经济规模效应呈现出不同的变化趋势,北京市、邢台市贡献量不断下降,前者

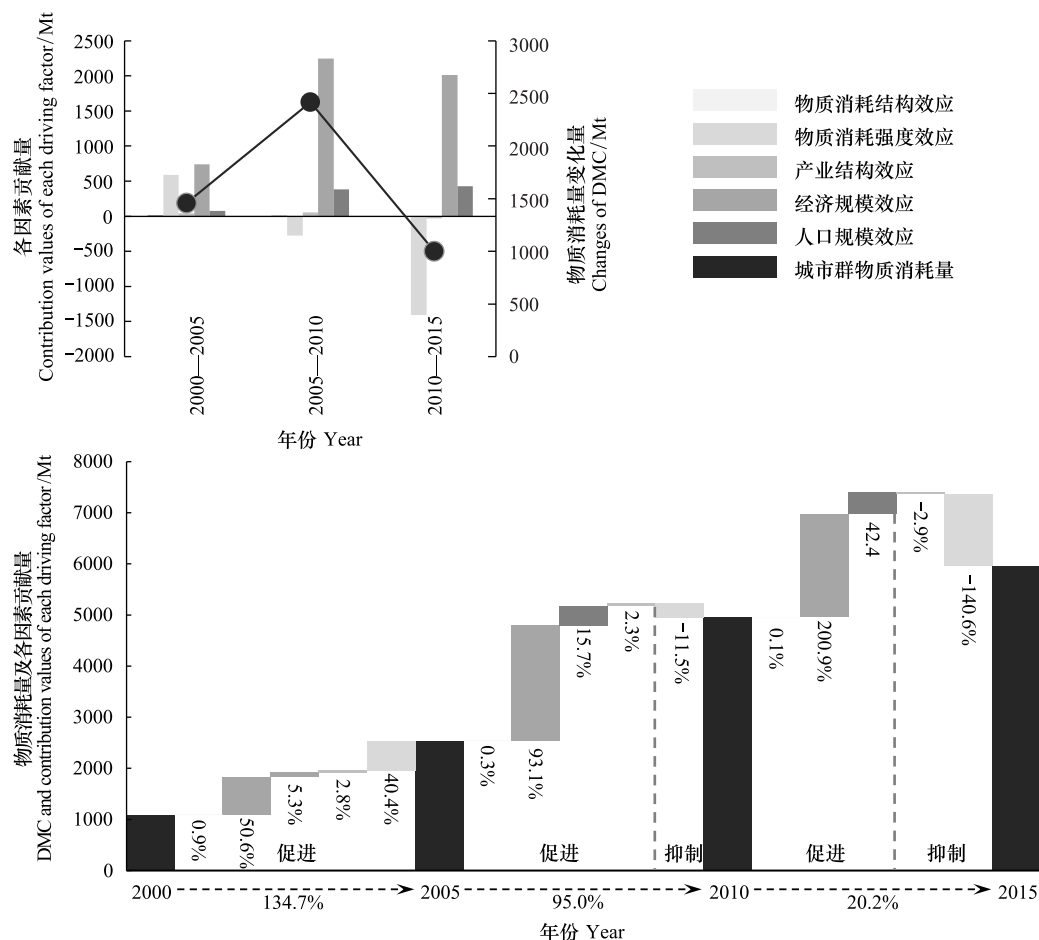


图4 京津冀城市群物质消耗及各因素贡献量

Fig.4 DMC and contribution values of each driving factor of the Beijing-Tianjin-Hebei region

贡献率先增后减,后者不断增长;廊坊市贡献量不断上升,贡献率先增后减,但后两阶段差别不大(分别为67.7%和63.6%);沧州市第一阶段贡献率也呈上升趋势。

人口规模对城市群 DMC 增长也具有一定的正向促进作用,贡献量不断增加。除衡水市前两阶段呈抑制作用外,人口规模在其他城市各阶段均起到正向促进作用,其中一半城市人口规模效应与城市群类似,包括天津市、保定市、沧州市、承德市、邯郸市、廊坊市和唐山市,三阶段贡献量不断增长。人口规模的贡献率除保定市呈先增后减趋势外,上述7个城市在三个阶段皆持续上升。其余城市人口规模的贡献量均呈先增后降趋势,不同的是,北京市与衡水市贡献率与贡献量趋势基本一致;其余4个城市的贡献率不断上升。

物质消耗强度在城市群 DMC 增长中起到先促进后抑制的作用,且在后两阶段成为抑制的最主要因素。但在各城市中表现较为多样。天津市、沧州市、邯郸市、石家庄市和唐山市与城市群趋势相似,均由促进转为抑制作用。其中,沧州市后两阶段(贡献率-174.2%和-202.7%)、石家庄市和唐山市第三阶段(贡献率分别为-144.2%和-277.2%)的物质消耗强度贡献量相对较强,能够部分或全部抵消人均 GDP 等因素的促进作用,为影响 DMC 变化的第二因素,在唐山市第三阶段更成为首要驱动因素。其他8个城市中,承德市的物质消耗强度的贡献与城市群规律相反,由抑制转为促进作用;而北京市和保定市呈现先促进再抑制后促进,衡水市和张家口市呈现先抑制再拉促进后抑制的变化规律;邢台市始终呈抑制作用,秦皇岛市和廊坊市则始终呈促进作用。其中,衡水市第三阶段(贡献率-271.1%)、张家口市第三阶段(-706.8%)、保定市第二阶段(-33.3%)和邢台市全部三阶段(-232.5%、-190.9%和347.2%)的物质消耗强度抑制作用较为明显,而承德市第三阶段

(44.0%)物质消耗强度呈现明显的促进作用。

各城市产业结构的贡献相较于城市群更为突出,保定市、承德市、邯郸市、衡水市、邢台市和张家口市与城市群趋势相似,由促进转为抑制作用,贡献率均高于3%。其余城市中,北京市产业结构效应与城市群相反,呈现由抑制转为促进的趋势,贡献率最高可达38.3%;沧州市先抑制再促进后抑制,后两阶段贡献率数值接近,但方向相反(分别为49.4%和-49.7%);廊坊市(始终不超过8%)、石家庄市(最高可达55%)和唐山市(最高可达865.6%)则先促进再抑制后促进;天津市(始终不超过-9%)、秦皇岛市(最高可达-148.6%)三阶段始终为抑制作用。北京市、唐山市和石家庄市这三个城市的第三阶段的产业结构贡献尤为突出(贡献率为23.0%、865.6%和55.0%);邯郸市第三阶段产业结构对DMC贡献率(-154.7%)超过了物质消耗强度(-96.9%),为影响DMC变化的第二因素;保定市、承德市和秦皇岛市三个城市的第三阶段,产业结构对于DMC抑制作用较为突出(贡献率为-22.1%、-30.0%和-148.6%),尤其是秦皇岛市抵消了经济规模效应促进作用的3/4。

与城市群类似,物质消耗结构效应对DMC变化的贡献作用较为有限,除廊坊市第一阶段达到18.2%外,其余城市始终未超过±6%。

3 结论

本文核算并分析了京津冀城市群与其组成城市的物质消耗状况及其变化趋势,在此基础上识别城市群物质消耗的主要贡献者和重要影响因素,并将两尺度结果进行对比以分析其相似性与不同之处。研究表明:①研究期间,京津冀城市群物质消耗量总体上升,以2011年为界分为先持续增长后平稳波动的两段,其变化主要来自于唐山、邯郸、天津等工业城市贡献;②京津冀城市群非金属矿物消耗量始终占据最大比重(不低于34.2%),金属矿物增长明显,同时受到工业部门物质消耗量的绝对影响(不低于58%),天津、沧州、邯郸、唐山、廊坊、邢台6城市呈现出相似规律;③物质消耗增长的首要驱动因素是经济规模(贡献率>50%),约3/4城市驱动规律与之类似,物质消耗强度对城市群物质消耗量增长起到明显抑制作用,各城市规律多样,仅天津、唐山、邯郸3城市与其一致;产业结构效应在城市贡献作用比城市群突出。总的来说,单个城市的分析能有效识别不同城市所表现出的不同物质消耗特征,从而揭示各城市所面临的不同问题,并提出有针对性的解决措施,但无法将城市之间进行有效的关联,从而无法提出协同发展背景下的针对性建议;而城市群尺度的研究将各城市看作一个整体,能有效识别其中的重点城市、重点物质和部门,有利于京津冀一体化发展中的资源环境政策制定,但它掩盖了各城市本身存在的固有差异。因此,两个尺度相结合可以兼顾城市群协同发展的整体性以及不同类型城市的差异性,从而更全面地诊断城市 and 城市群发展中的物质利用问题。

政策建议如下所述:

鉴于工业是影响京津冀城市群及除北京外的12个城市物质消耗量的主导产业,同时物质消耗结构的单一性将会给城市生态系统的结构和功能带来潜在的稳定性问题,因为生态系统抵抗力稳定性往往依赖于众多可以相互替代的物质。因此对工业代谢结构的调整将成为整个京津冀地区,尤其是工业物质消耗占比处于不断增长阶段的廊坊、承德、邯郸、秦皇岛、石家庄和唐山6市代谢调控的重要任务。各城市:(1)应通过科技手段革新现有产业技术,如加强城市间学术沟通、为产学研结合开设专项补贴等方式,以求降低现有产业对某种特定物质(如非金属矿物),尤其是不可再生资源的过度依赖;(2)在继续发展传统优势产业的基础上,应探索发展新兴产业,可通过宣传典型案例等方式鼓励全市范围内实现精细化、清洁化转型,提高城市产业稳定性,并降低对环境的影响;(3)加强工业生产与其他产业部门之间的互利合作,改善城市间同质化、无序竞争现象^[30],完善供应链设计,从而实现物质的重复高效利用,并促进区域内环境成本的共摊,而非集中于具有加工制造优势的某几个城市。

经济规模是促进城市群物质消耗的首要驱动力,其次为人口规模因素;物质消耗强度则对城市群物质消耗增长起到明显抑制作用。因此,对于经济活动高度集中、外来人口不断增长、社会经济压力指数长期处于高

水平的北京市,应综合考虑经济、社会和环境关系,通过释放非首都功能等方式减轻城市大量消耗物质而带来的健康损耗,河北省也可利用区位优势,通过出台优惠政策做好产业转移与承接,通过户籍制度改革吸引并留住人才^[31]。即便如此,为了降低城市物质消耗而过多地牺牲经济发展或公民福利,对于城市决策者来说显然是不合理的,因此这一策略并不适宜在京津冀的大部分城市深入推广,所以需要从另一角度入手,力图提升物质消耗创造经济价值的转化效率。因此,提高经济活动的物质利用效率从而降低物质消耗强度、推动经济高质量发展和合理控制人口规模是有效减缓未来京津冀城市群物质消耗增长势头,甚至实现物质消耗降低的有效手段。

参考文献 (References):

- [1] 王少剑,方创琳,王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254.
- [2] 国家统计局. 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报. 北京: 国家统计局, 2022.
- [3] 索贵彬,李曼,赵素彦. 资源环境约束下京津冀协同高质量发展研究. 河北地质大学学报, 2021, 44(6): 117-121.
- [4] Wolman A. The metabolism of cities. Scientific American, 1965, 213: 179-190.
- [5] Zucchetto J. Energy-economic theory and mathematical models for combining the systems of man and nature, case study: the urban region of Miami, Florida. Ecological Modelling, 1975, 1(4): 241-268.
- [6] 陈效速,乔立佳. 中国经济—环境系统的物质流分析. 自然资源学报, 2000, 15(1): 17-23.
- [7] Ščasný M, Kovanda J, Hák T. Material flow accounts, balances and derived indicators for the Czech Republic during the 1990s: results and recommendations for methodological improvements. Ecological Economics, 2003, 45(1): 41-57.
- [8] Brunner P H. Reshaping urban metabolism. Journal of Industrial Ecology, 2007, 11(2): 11-13.
- [9] 卢伊,陈彬. 城市代谢研究评述: 内涵与方法. 生态学报, 2015, 35(8): 2438-2451.
- [10] Eurostat. Economy-Wide Material Flow Accounts and Derived Indicators: A Methodological Guide. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2001.
- [11] Eurostat. Economy-wide Material Flow Accounts Handbook (2018 edition). Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2018.
- [12] Rosado L, Kalmykova Y, Patrício J. Urban metabolism profiles. An empirical analysis of the material flow characteristics of three metropolitan areas in Sweden. Journal of Cleaner Production, 2016, 126: 206-217.
- [13] Bahers J B, Barles S, Durand M. Urban metabolism of intermediate cities: the material flow analysis, hinterlands and the logistics-hub function of Rennes and Le Mans (France). Journal of Industrial Ecology, 2019, 23(3): 686-698.
- [14] Plank B, Streeck J, Virág D, et al. From resource extraction to manufacturing and construction: flows of stock-building materials in 177 countries from 1900 to 2016. Resources, Conservation and Recycling, 2022, 179: 106122.
- [15] Ang B W. LMDI decomposition approach: a guide for implementation. Energy Policy, 2015, 86: 233-238.
- [16] 冯博,王雪青. 中国各省建筑业碳排放脱钩及影响因素研究. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(4): 28-34.
- [17] Tan R P, Lin B Q. What factors lead to the decline of energy intensity in China's energy intensive industries? Energy Economics, 2018, 71: 213-221.
- [18] 米红,张田田,任正委,周伟. 城镇化进程中家庭 CO₂ 排放的驱动因素分析. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3183-3192.
- [19] Ma M D, Ma X, Cai W G, Cai W. Carbon-dioxide mitigation in the residential building sector: a household scale-based assessment. Energy Conversion and Management, 2019, 198: 111915.
- [20] 刘源,李向阳,林剑艺,崔胜辉,赵胜男. 基于 LMDI 分解的厦门市碳排放强度影响因素分析. 生态学报, 2014, 34(9): 2378-2387.
- [21] He Y, Xing Y T, Zeng X C, Ji Y J, Hou H M, Zhang Y, Zhu Z. Factors influencing carbon emissions from China's electricity industry: Analysis using the combination of LMDI and K-means clustering. Environmental Impact Assessment Review, 2022, 93: 106724.
- [22] Xu Y J, Huang K, Yu Y J, Wang X M. Changes in water footprint of crop production in Beijing from 1978 to 2012: a logarithmic mean Divisia index decomposition analysis. Journal of Cleaner Production, 2015, 87: 180-187.
- [23] 顾云志,曹月娥,张珍珍,赵猛. 基于 LMDI 模型的新疆粮食生产时空变化特征及其成因分析. 江西农业学报, 2021, 33(8): 102-109.
- [24] Zhang Y, Shuai C Y, Bian J, Chen X, Wu Y, Shen L Y. Socioeconomic factors of PM_{2.5} concentrations in 152 Chinese cities: decomposition analysis using LMDI. Journal of Cleaner Production, 2019, 218: 96-107.
- [25] 王秋红,李维杰,王勇,傅俐,高敏. 基于 LMDI 的城市化不同阶段 PM_{2.5} 浓度影响因素——以我国 5 个特大城市群为例. 中国环境科学, 2021, 41(11): 5069-5078.
- [26] Chen X, Shuai C Y, Wu Y, Zhang Y. Analysis on the carbon emission peaks of China's industrial, building, transport, and agricultural sectors. Science of the Total Environment, 2020, 709: 135768.
- [27] Li Y X, Zhang Y, Yu X Y. Urban weight and its driving forces: a case study of Beijing. Science of the Total Environment, 2019, 658: 590-601.
- [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] Barles S. Society, energy and materials: the contribution of urban metabolism studies to sustainable urban development issues. Journal of Environmental Planning and Management, 2010, 53(4): 439-455.
- [30] 刘肖,金浩. 京津冀城市群制造业与生产性服务业协调发展研究——基于生产性服务业细分产业视角. 河北工业大学学报: 社会科学版, 2021, 13(4): 1-8.
- [31] 戴铁军,安伯超,王婉君. 京津冀地区资源-环境-经济协调发展模式探究. 生态与农村环境学报, 2020, 36(6): 731-740.

附录:

S1 13 城市各影响因素贡献量及贡献率

S1 The contribution value and contribution rate of each city

城市	影响因素	贡献量			贡献率		
		2000—2005	2005—2010	2010—2015	2000—2005	2005—2010	2010—2015
北京	经济规模效应	93.7	89.7	27.1	60.6%	155.8%	14.5%
	人口规模效应	24.0	76.8	43.8	15.5%	133.3%	23.5%
	物质消耗强度效应	35.0	-131.5	74.1	22.6%	-228.4%	39.8%
	物质消耗结构效应	3.1	0.6	-1.5	2.0%	1.0%	-0.8%
	产业结构效应	-1.3	22.1	42.9	-0.8%	38.3%	23.0%
天津	经济规模效应	186.5	308.8	238.3	100.3%	103.7%	80.5%
	人口规模效应	9.0	100.2	132.9	4.8%	33.6%	44.9%
	物质消耗强度效应	1.2	-85.9	-75.1	0.7%	-28.9%	-25.4%
	物质消耗结构效应	1.2	0.4	0.5	0.6%	0.1%	0.2%
	产业结构效应	-12.0	-25.7	-0.6	-6.5%	-8.6%	-0.2%
石家庄	经济规模效应	90.7	216.0	133.3	67.0%	119.1%	161.5%
	人口规模效应	6.3	28.9	22.4	4.6%	15.9%	27.2%
	物质消耗强度效应	35.2	-36.9	-119.0	26.0%	-20.3%	-144.2%
	物质消耗结构效应	0.5	0.5	0.4	0.4%	0.3%	0.5%
	产业结构效应	2.8	-27.1	45.4	2.0%	-15.0%	55.0%
保定	经济规模效应	17.1	57.7	30.7	67.8%	120.2%	64.5%
	人口规模效应	1.6	2.3	9.2	6.5%	4.7%	19.4%
	物质消耗强度效应	0.9	-16.0	18.1	3.4%	-33.3%	38.1%
	物质消耗结构效应	0.5	0.1	0.1	2.1%	0.3%	0.2%
	产业结构效应	5.1	3.9	-10.5	20.2%	8.0%	-22.1%
沧州	经济规模效应	-23.6	81.8	145.5	-82.5%	208.5%	335.1%
	人口规模效应	4.5	6.3	7.2	15.8%	16.2%	16.7%
	物质消耗强度效应	50.5	-68.4	-88.0	176.3%	-174.2%	-202.7%
	物质消耗结构效应	1.5	0.0	0.3	5.3%	0.1%	0.7%
	产业结构效应	-4.3	19.4	-21.6	-14.9%	49.4%	-49.7%
承德	经济规模效应	51.5	115.7	108.8	120.3%	112.2%	81.3%
	人口规模效应	1.3	4.1	6.2	3.0%	4.0%	4.6%
	物质消耗强度效应	-18.9	-20.1	58.8	-44.3%	-19.5%	44.0%
	物质消耗结构效应	0.0	0.0	0.1	0.1%	0.0%	0.0%
	产业结构效应	8.9	3.3	-40.1	20.9%	3.2%	-30.0%
邯郸	经济规模效应	168.1	388.9	171.8	79.0%	83.3%	245.2%
	人口规模效应	9.4	57.1	74.5	4.4%	12.2%	106.4%
	物质消耗强度效应	12.6	-3.6	-67.9	5.9%	-0.8%	-96.9%
	物质消耗结构效应	0.7	0.9	0.0	0.3%	0.2%	0.0%
	产业结构效应	22.0	23.6	-108.4	10.3%	5.1%	-154.7%
衡水	经济规模效应	2.7	22.3	20.5	-64.5%	81.9%	383.3%
	人口规模效应	-0.1	-0.3	5.4	1.3%	-1.2%	101.1%
	物质消耗强度效应	-9.7	2.6	-14.5	234.7%	9.6%	-271.1%
	物质消耗结构效应	0.0	1.2	0.0	1.1%	4.3%	0.2%
	产业结构效应	3.0	1.5	-6.1	-72.6%	5.4%	-113.5%
廊坊	经济规模效应	14.8	49.9	56.9	41.5%	67.7%	63.6%
	人口规模效应	1.1	5.9	14.6	3.0%	8.0%	16.3%
	物质消耗强度效应	11.1	18.4	11.1	31.2%	25.0%	12.4%
	物质消耗结构效应	6.5	0.2	0.0	18.2%	0.3%	0.0%

续表

城市	影响因素	贡献量			贡献率		
		2000—2005	2005—2010	2010—2015	2000—2005	2005—2010	2010—2015
秦皇岛	产业结构效应	2.2	-0.7	6.9	6.1%	-1.0%	7.8%
	经济规模效应	38.8	71.4	67.1	137.6%	99.0%	202.2%
	人口规模效应	1.4	5.5	3.7	5.0%	7.7%	11.0%
	物质消耗强度效应	4.5	0.6	11.7	15.8%	0.9%	35.3%
	物质消耗结构效应	0.5	0.4	0.0	1.8%	0.6%	0.0%
唐山	产业结构效应	-17.0	-5.8	-49.3	-60.2%	-8.1%	-148.6%
	经济规模效应	269.4	823.1	349.5	54.0%	87.2%	1673.9%
	人口规模效应	7.2	46.8	70.4	1.4%	5.0%	337.0%
	物质消耗强度效应	204.2	295.9	-579.9	41.0%	31.3%	-2777.2%
	物质消耗结构效应	15.4	8.6	0.2	3.1%	0.9%	0.8%
邢台	产业结构效应	2.4	-230.0	180.8	0.5%	-24.4%	865.6%
	经济规模效应	88.1	65.1	42.2	192.8%	213.1%	-371.6%
	人口规模效应	2.6	6.9	4.1	5.7%	22.7%	-35.8%
	物质消耗强度效应	-106.3	-58.3	-39.5	-232.5%	-190.9%	347.2%
	物质消耗结构效应	0.7	0.0	0.0	1.6%	0.1%	0.2%
张家口	产业结构效应	60.5	16.8	-18.2	132.4%	55.1%	160.1%
	经济规模效应	60.3	64.7	43.6	85.5%	88.3%	964.3%
	人口规模效应	1.8	6.9	4.8	2.5%	9.5%	107.0%
	物质消耗强度效应	-14.1	6.4	-32.0	-20.0%	8.7%	-706.8%
	物质消耗结构效应	1.0	0.2	0.0	1.4%	0.2%	0.2%
	产业结构效应	21.5	-4.8	-12.0	30.5%	-6.6%	-264.7%